

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

**Національний транспортний університет
Навчально-науковий Київський інститут водного
транспорту імені гетьмана
Петра Конашевича-Сагайдачного**

Збірник наукових праць

ВОДНИЙ ТРАНСПОРТ

випуск 1 (45)

**Київ
2026**

Збірник наукових праць Водний транспорт. Національного транспортного університету. – К.: НТУ, 2026. – Випуск 1 (45). – 198 с. <https://doi.org/10.33298/2226-8553.2026.1.45>

У збірнику публікуються матеріали, що відображають наукову й методичну роботу викладачів і здобувачів Національного транспортного університету, закладів вищої освіти, фахівців підприємств і організацій водного транспорту.

Більшість публікацій присвячена проблемам галузі, експлуатації засобів водного транспорту, зокрема, розглядаються питання інфраструктури, технологій та організації транспортних процесів, впровадження сучасних технологій, математичного моделювання, екологічної безпеки, економічних аспектів діяльності річкового та морського транспорту й якісної підготовки фахівців з даного напрямку.

Збірник має тематичні розділи: «Судноводіння та енергетика суден», «Методика навчання», «Транспортні технології».

Засновник: Національний транспортний університет

E-mail редакції: vtduit@gmail.com; інформаційний сайт: <http://vt.duit.edu.ua>

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

Редакційна колегія:

Головний редактор

Тимошук Олена Миколаївна, д.т.н., проф. (НТУ): [Orcid.org](https://orcid.org/) [Scopus](https://scopus.com/) [ResearcherID](https://researcherid.com/) [Scholar.google](https://scholar.google.com/)

Редакційна колегія:

Ганношина Ірина Миколаївна, к.т.н., доцент (НТУ): orcid.org scopus.com

Мельник Ольга Володимирівна, к.т.н., доцент (НТУ): orcid.org [scopus](https://scopus.com/)

Кириченко Олександр Сергійович, к.т.н., доцент (НТУ):

[orcid](https://orcid.org/) [scopus](https://scopus.com/) ieeexplore.ieee.org [scholar.google](https://scholar.google.com/) [webofscience](https://webofscience.com/)

Гаценко Лариса Володимирівна, PhD (НТУ): [orcid](https://orcid.org/) [scopus](https://scopus.com/) [scholar.google](https://scholar.google.com/)

Головань Андрій Ігорович, д.т.н., доцент (Одеський національний морський університет):

orcid.org [scopus](https://scopus.com/) [webofscience](https://webofscience.com/)

Гончарук Ірина Павлівна, к.т.н., доцент (Одеський національний морський університет):

[orcid](https://orcid.org/) [webofscience](https://webofscience.com/) [scopus](https://scopus.com/)

Заблоцький Юрій Вікторович, к.т.н., доцент (Національний університет «Одеська морська академія»): orcid.org [scopus](https://scopus.com/)

Чимшир Валентин Іванович, д.т.н., професор (Дунайський інститут Національного університету «Одеська морська академія»): [scopus](https://scopus.com/) [scholar.google](https://scholar.google.com/)

Olegas Prentkovskis, prof. Dr. Vilnius Gediminas Technical University (Vilnius, Lithuania):

[orcid](https://orcid.org/) [scopus](https://scopus.com/) [researchgate](https://researchgate.net/) [publons](https://publons.com/) [scholar.google](https://scholar.google.com/)

Ierin Volodymyr, Research Associate NingboTech University People's Republic of China: [orcid](https://orcid.org/) [scopus](https://scopus.com/)

Відповідальний секретар редколегії – Левченко О.В. к.е.н., доцент (НТУ)

Рекомендовано до друку Вченою радою Національного транспортного університету (протокол № 3 від 26 березня 2026р.).

Рішення Національної ради України з питань телебачення і радіомовлення № 1553, від 09.05.2024 р., протокол № 15 Ідентифікатор медіа - R30-05072

Збірник включено до Переліку наукових фахових видань України (категорія «Б», спеціальності – 271, 275), у яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата з технічних наук/доктора філософії (Наказ Міністерства освіти і науки України від 28.12.2019 № 1643).

ЗМІСТ

СУДНОВОДІННЯ ТА ЕНЕРГЕТИКА СУДЕН

Маранов О.В, Носовський А.А. Мультиагентна модель взаємодії автономних морських платформ з портовою інфраструктурою	5
Кириченко О.С. Аналіз експлуатаційних характеристик мініатюрного термоелектричного модуля для суднових енергетичних навігаційних систем	15
Сагін С.С., Сагін С.В. Підвищення ефективності експлуатації суден-контейнеровозів під час трансокеанських переходів на основі адаптивної корекції курсу	25
Сагін А.С., Заблоцький Ю.В. Експедирування та постачання суден в умовах блокування морських проток: виклики, адаптація та економічні наслідки	36
Томчаковський Г. Г., Кучеренко Н. В., Капочкіна М. Б. Міжрічна мінливість літнього мусону у аравійському морі (факторний аналіз).....	48
Тимошук О. М., Коломієць О.М., Левченко О.В. Гідрометеорологічні чинники управління навігаційними водними ресурсами	61
Кучеренко Н. В., Капочкіна М. Б. Шляхи трансформації міжнародної системи пошуку і порятунку на морі в умовах третьої світової війни нового гібридного типу (SAR)	69
Калініченко Є. В., Колєснік О.В Метод автоматизованого отримання параметрів судна з візуального інтерфейсу навігаційного тренажера	84
Головань А.І., Монюшко М.М. Алгоритмічне забезпечення інтегрованих навігаційно-інформаційних систем контейнеровозів для підвищення ефективності експлуатації	97
Васалатій Н.В., Монюшко М.М. Особливості гідрологічного режиму течії Куросіо в період формування та розвитку Великого Меандру LM2017.....	108
Гончарук І.П. Удосконалення підходів до оцінювання енергоефективності суден на основі потенціалу енергозбереження	116
Ширкова О.А., Бажак О.В. Модернізація річкового флоту: підвищення коефіцієнту енергоефективності	124
Гільдєєв Д.О., Онищенко С.П. Формування систем доставки вантажів з урахуванням викидів	132

Щенявський Г.С., Мельник О.М. Адаптивне оцінювання ризику судна в режимі реального часу на основі інтелектуального моніторингу та цифрового двійника	140
Tyron O.M., Kaminska S.V., Didenko M.O. METHODS OF RESEARCHING THE HUMAN FACTOR IN THE MARITIME INDUSTRY	149
Kochubei P., Appazov E. FUELSIGHT: MODEL FOR PREDICTING SHIP FUEL CONSUMPTION AND PROVIDING EXPLANATIONS	157
Кучерук Г.Ю., Ганношина І.М. Методи виявлення спуфінгу в суднових навігаційних системах	166
Россомаха О.А. Інтегрований підхід до оцінки ризиків використання роторів флетнера на морських суднах	176

ТРАНСПОРТНІ ТЕХНОЛОГІЇ

Мироненко В.К., Іродовська Н. Ю. Трансформація ролі мультимодального транспортного оператора в умовах цифровізації правового поля	186
Автори випуску	197

СУДНОВОДІННЯ ТА ЕНЕРГЕТИКА СУДЕН

УДК 656.61:004.89:004.942

doi.org/10.33298/2226-8553.2026.1.45.01

© Маранов О.В., Носовський А.А.

МУЛЬТИАГЕНТНА МОДЕЛЬ ВЗАЄМОДІЇ АВТОНОМНИХ МОРСЬКИХ ПЛАТФОРМ
З ПОРТОВОЮ ІНФРАСТРУКТУРОЮ

Вибухоподібний розвиток автономних морських систем на основі агентів штучного інтелекту загострив проблему забезпечення та координації, прийняття рішень й дотримання нормативних вимог у режимі реального часу. Метою статті є розробка мультиагентної моделі взаємодії автономних морських платформ з портовою інфраструктурою, що забезпечує безпеку та екологічність операцій. Мета статті досягається широким застосуванням штучного інтелекту, який виконує низку функцій для забезпечення безпечної роботи автономних суден у складних морських середовищах. Кожна з цих функцій – навігація, виявлення перешкод, запобігання зіткненням та прийняття рішень у режимі реального часу – має вирішальне значення. Для підтримання цих функцій застосовуються різноманітні методи штучного інтелекту, у тому числі машинне навчання, глибоке навчання, навчання з підкріпленням, комп'ютерний зір та обробку природної мови. Наведено огляд елементів штучного інтелекту, використовуваних в системах морської безпеки, а також їхні переваги та недоліки з точки зору продуктивності автономної морської системи. Запропоновано високорівневу модель архітектури агентів штучного інтелекту, що функціонують у режимі реального часу в автономних судових системах. Такий підхід інтегрує сучасні технології (сенсорні функції, сприйняття, прийняття рішень, контроль та нагляд) для забезпечення безпечних, ефективних та стійких морських операцій. Основу моделі складає агент штучного інтелекту, який діє як автономна сутність, здатна обробляти вхідні дані, генерувати контекстно-залежні рішення та виконувати критично важливі для безпеки дії в умовах обмеженого часу й портової акваторії. Агенти штучного інтелекту не лише забезпечують ситуаційну обізнаність у режимі реального часу завдяки вдосконаленому об'єднанню даних датчиків, але й оптимізують маршрутизацію, споживання палива та технічне обслуговування, узгоджуючи це з галузевими цілями щодо зниження витрат та екологічної відповідальності. Детально описані функції агентів штучного інтелекту на кожному рівні архітектури. Інтеграція автономних суден з інтелектуальними портовими системами із застосуванням агентів штучного інтелекту дозволяє покращити динамічне планування, зменшити завантаженість порту та прискорити час виконання робіт у морській логістиці. Інтелектуальні порти, вдосконалені технологіями IoT, аналітикою великих даних та автоматизацією, стають основою для створення безперервного операційного континууму між судном і берегом.

Ключові слова: безпека судноводіння, безпека судноплавства, судноплавство, надзвичайні ситуації, судно, рух судна, судноводіння, управління рухом, технічні засоби судноводіння, безпека на морі, автономні морські платформи, агентний підхід, морський транспорт, портова інфраструктура, транспортні технології, штучний інтелект

Вступ. Морські перевезення є основою світової торгівлі. На морський транспорт припадає до 80% міжнародного вантажообігу в абсолютному вимірі, що є ключовим фактором сталого функціонування глобального ринку та світової економічної системи. Морська транспортна галузь знаходиться в процесі глибоких трансформаційних перетворень, пов'язаних з автоматизацією операцій та цифровізацією процесів. Окремо слід виділити широке впровадження елементів штучного інтелекту (ШІ), стрімкий

розвиток якого прийшовся на 20-ті роки ХХІ століття [1-3].

У поєднанні з науковими досягненнями у сфері сенсорних систем та систем технічного зору було створено технологічну основу розвитку автономних морських транспортних систем. Дійсно, на теперішній час важко здивувати повідомленням про успішне застосування у спеціальних місцях морських дронів. Однак автономні морські системи охоплюють широкий спектр технологій, включаючи безпілотні надводні судна (БПС), автономні підводні апарати (АНПА) та інтегровані системи моніторингу, контролю та управління рухом. Ці системи обіцяють революціонізувати морські операції, підвищуючи операційну ефективність, зменшуючи людські помилки та мінімізуючи вплив на навколишнє середовище. Так, автономні судна можуть оптимізувати споживання палива завдяки точному плануванню маршруту та адаптивній навігації, тим самим сприяючи значному скороченню викидів відпрацьованих газів [4, 5].

Інтеграція елементів ШІ в морські системи дозволяє обробляти дані та приймати рішення в режимі реального часу, що є критично важливим для безпечної та ефективної роботи морського транспорту. Системи на базі штучного інтелекту використовують значні обсяги даних, зібраних з різних датчиків, таких як радар, LIDAR, автоматичні системи ідентифікації (АІС) та камери, для отримання ситуаційної обізнаності, виявлення перешкод та прийняття обґрунтованих навігаційних рішень [3]. Ці можливості є важливими для навігації в складних та динамічних морських середовищах, взаємодії з портовою інфраструктурою. В той же час широке застосування автономних систем несе нові виклики та ризики, які потребують детального дослідження.

В першу чергу, це – забезпечення безпеки, оскільки порушення в системах ШІ можуть призвести до аварій з потенційно серйозними наслідками, включаючи шкоду навколишньому середовищу, втрату вантажу та загрози людському життю [2, 6]. Окрім питань безпеки, впровадження автономних систем має відповідати нормативно-правовим базам, що розвиваються, спрямованим на сприяння сталим та екологічно безпечним морським практикам. Такі правила, як Індикатор вуглецевої інтенсивності (СІІ) Міжнародної морської організації (ІМО) та Інтелектуальні транспортні системи Європейського Союзу (EU ITS), вимагають суворого скорочення викидів вуглецю та впровадження передових технологій для моніторингу та управління впливом на навколишнє середовище [7, 8]. Автономні морські системи, що працюють та взаємодіють на базі агентів ШІ, відіграють вирішальну роль у виконанні нормативних вимог, дозволяючи оптимізувати операції суден у режимі реального часу при взаємодії з портовою інфраструктурою, що й визначає актуальність написання статті.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

В сучасних літературних джерелах вітчизняних та закордонних авторів визначено, що агенти штучного інтелекту сприяють безпеці, дозволяючи автономним суднам обробляти та інтерпретувати дані в режимі реального часу, сприяючи проактивному виявленню небезпек та запобіганню зіткненням, а також ефективній взаємодії з портовою інфраструктурою при виконанні навантажувально-розвантажувальних робіт. Алгоритми машинного навчання можуть аналізувати закономірності в даних датчиків для прогнозування потенційних ризиків, дозволяючи суднам безпечно плавати навіть у складних умовах. Наприклад, системи запобігання зіткненням на основі штучного інтелекту можуть розраховувати оптимальні маневри ухилення в режимі реального часу, значно знижуючи ймовірність аварій, спричинених людською помилкою або затримкою реакції [9-12].

Існуючі наукові джерела свідчать про значний інтерес та розгалуженість досліджень щодо розвитку автономних морських систем, заснованих на елементах ШІ, для безпеки на морі та технічних засобах обробки даних у режимі реального часу. Однак більшість рецензованих досліджень розглядають ці аспекти окремо, зосереджуючись на конкретних технологіях або функціональних можливостях, а не на тому, як вони взаємодіють у повністю автономних системах, включаючи портову інфраструктуру, за реальних операційних та правових обмежень.

Серйозною прогалиною є відсутність інтегративних моделей, які б враховували, як компоненти на основі ШІ працюють спільно для забезпечення безпеки, ефективності та відповідності нормативним вимогам. Хоча машинне навчання, комп'ютерний зір та об'єднання датчиків широко вивчаються в існуючій літературі, досліджень мультиагентних архітектур, які б інтегрували ці технології в інтелектуальні системи прийняття рішень у режимі реального часу та з урахуванням взаємодії з

портовою інфраструктурою, досліджені недостатньо.

Ще одним ключовим обмеженням у сучасній літературі є брак оцінок на основі сценаріїв або тематичних досліджень, які ілюструють, як ШІ-агенти реагують на зміни у реальних морських ситуаціях. Відсутність конкретних прикладів ускладнює оцінку зрілості та обмежень запропонованих систем [13-17]. У статті пропонується структурований, агентно-орієнтований підхід до побудови відповідної мультиагентної системи.

Мета статті: розробити мультиагентну модель взаємодії автономних морських платформ з портовою інфраструктурою, що забезпечує безпеку та екологічність операцій.

Виклад основної частини.

Останнім часом сфера застосування автономних морських систем значно розширилася, охоплюючи ширший спектр типів суден та операційних систем, включаючи портові операції (рис. 1).

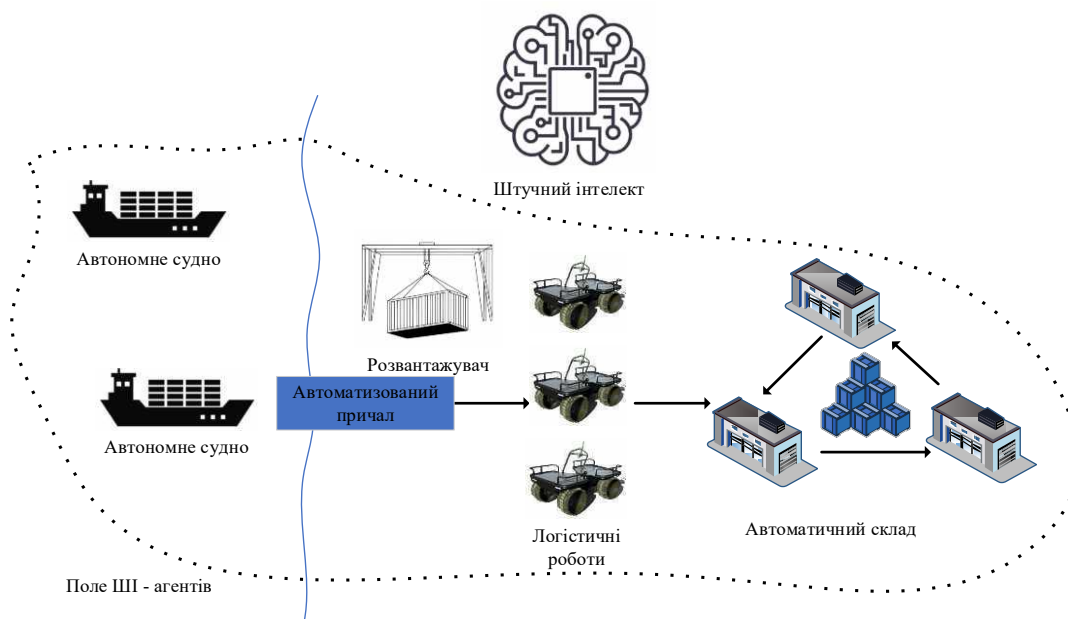


Рисунок 1. Загальна система мультиагентної системи під управлінням елементів штучного інтелекту (розроблено автором)

Сучасні автономні судна призначені для роботи з різним ступенем автономності. Існує часткова автономія, коли оператори-люди контролюють та втручаються за необхідності, а також повна автономність, коли судна здійснюють навігацію та виконують завдання без участі людини.

Цей прогрес був сприятливий завдяки розвитку сенсорних технологій, алгоритмів машинного навчання та систем зв'язку, які разом покращують здатність автономних суден сприймати навколишнє середовище, приймати обґрунтовані рішення та виконувати маневри із заданою точністю [18].

Операційні межі застосування автономних морських систем також розвивалися для підтримки їх інтеграції в існуючу морську інфраструктуру. Ці межі охоплюють розробку навігаційних протоколів, систем управління рухом та стандартів зв'язку, які дозволяють автономним суднам співіснувати з традиційними суднами. Необхідно відмітити, що інтеграція автономних суден у морський рух вимагає надійних систем запобігання зіткненням, планування маршрутів та моніторингу в режимі реального часу для забезпечення безперервної та безпечної експлуатації особливо в умовах вузькостей портів [19]. Крім того, розробка сумісних стандартів та інтерфейсів має вирішальне значення для полегшення зв'язку між автономними суднами та портовою інфраструктурою.

Таким чином, незважаючи на стрімкий розвиток автономних морських систем, забезпечення та координація сприйняття, прийняття рішень й дотримання нормативних вимог у режимі реального часу залишається складною проблемою, особливо в контексті проектування ШІ-агентів,

ШІ стає ключовою технологією у підвищенні безпеки та автономності морських операцій. Застосування ШІ в цьому контексті охоплює низку функцій, включаючи навігацію, виявлення перешкод,

запобігання зіткненням та прийняття рішень у режимі реального часу, кожна з яких має вирішальне значення для забезпечення безпечної роботи автономних суден у складних морських середовищах. Ці функції підтримуються різноманітними методами ШІ, включаючи машинне навчання, глибоке навчання, навчання з підкріпленням, комп'ютерний зір та обробку природної мови.

У табл. 1 наведено огляд елементів ШІ, використовуваних в системах морської безпеки, їхні переваги та недоліки з позиції продуктивності автономної морської системи.

Таблиця 1. Огляд елементів ШІ, що використовуються при взаємодії морських систем з портовою інфраструктурою (складено автором)

№ з/п	Елемент ШІ	Переваги	Недоліки	Варіант застосування
1.	Машинне навчання	Адаптивність, підвищена точність	Потрібні великі набори даних, перенавчання	Прогноз, оптимізація маршрутів
2.	Глибоке навчання	Висока точність розпізнавання образів	Висока обчислювальна потужність, проблеми інтерпретації	Комп'ютерний зір для виявлення перешкод
3.	Навчання з підкріпленням	Здатність вивчати складні стратегії	Час навчання, стабільність вивчених політик	Динамічне планування шляху, запобігання зіткненням
4.	Комп'ютерний зір	Обробка в режимі реального часу, детальний аналіз	Вразливий до освітлення/погодних умов	Виявлення об'єктів, моніторинг навколишнього середовища
5.	Інтеграція датчиків	Підвищена надійність даних, комплексна аналітика	Складність інтеграції даних та синхронізації	Ситуаційна обізнаність, прийняття обґрунтованих рішень в портах
6.	Обробка природної мови	Покращена взаємодія з операторами-людьми	Обмежено мовними моделями, розумінням контексту	Екстрений зв'язок, інтерфейси людина-машина

Створення та широке застосування автономних морських систем й їх взаємодія з портовою інфраструктурою регулюється міжнародними нормами, що забезпечують безпеку експлуатації, захист навколишнього середовища та юридичну відповідальність. Ці нормативні рамки (табл. 2) не просто визначають зовнішні обмеження; вони безпосередньо впливають на проектування, архітектуру та поведінку агентів штучного інтелекту у режимі реального часу.

В автономних морських системах обробка даних у режимі реального часу є не просто технологічною функцією, а критично важливим фактором інтелектуальної поведінки. Для ШІ-агентів, що працюють у динамічних морських середовищах, критично важливою є здатність сприймати, інтерпретувати потоки даних та реагувати на них за мілісекунди.

Автономні судна безперервно збирають величезні обсяги даних з мультимодальних датчиків, включаючи радар, LIDAR, AIS, сонар та візуальні камери. ШІ-агенти повинні обробляти цю інформацію в режимі реального часу, щоб підтримувати ситуаційну обізнаність, виявляти аномалії, виконувати навігаційні рішення та взаємодіяти із зовнішніми системами та операторами портової інфраструктури. Своєчасність та точність цієї обробки безпосередньо впливають на безпеку та швидкість реагування судна (рис. 2).

Таблиця 2. Вимоги керівних документів щодо застосування ІІІ-агентів при взаємодії морських автономних систем й портової інфраструктури (складено автором)

Назва нормативного акту	Керівний орган	Ключові вимоги	Вплив на взаємодію
SOLAS [20]	Міжнародна морська організація (ІМО)	Стандарти будівництва, обладнання та експлуатації суден	Забезпечує функції безпеки та надійні навігаційні системи
MARPOL [21]	ІМО	Запобігання забрудненню морського середовища	Потрібні системи контролю викидів та управління відходами
Індикатор вуглецевої інтенсивності (ІВІ) [22]	ІМО	Зменшення викидів CO ₂ з суден	Необхідна оптимізація палива та моніторинг викидів за допомогою штучного інтелекту
Інтелектуальні транспортні системи ЄС (ЕС ІТС) [23]	Європейський Союз	Інтеграція інтелектуальних технологій у транспорт	Сприяє зв'язку між автономними суднами та портами
STCW [24]	ІМО	Стандарти навчання, сертифікації та несення вахти	Забезпечує відповідність систем штучного інтелекту стандартам навчання екіпажу

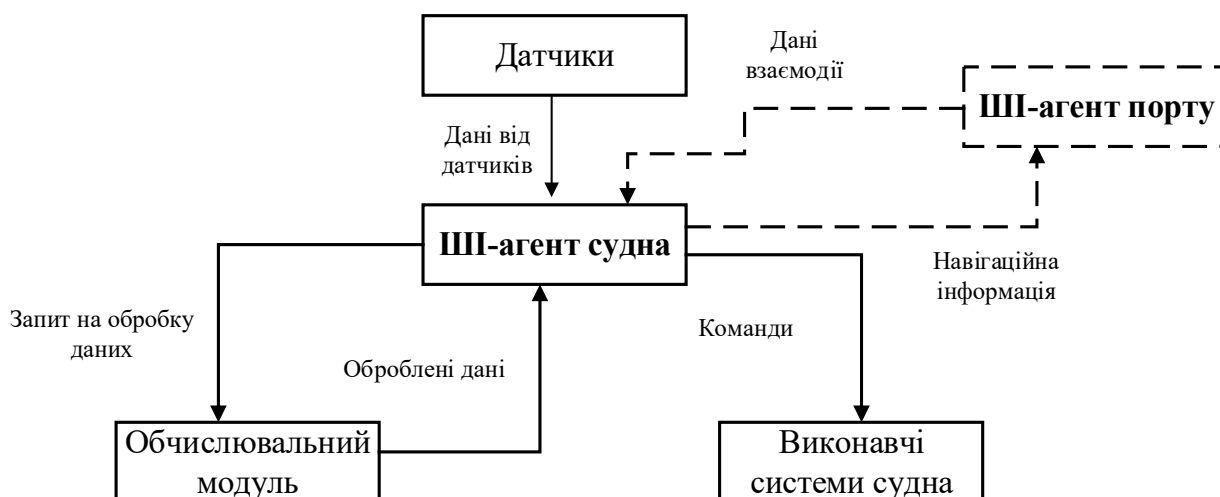


Рисунок 2. Потоки даних при взаємодії ІІІ у портовій акваторії (розроблено автором)

Архітектура ІІІ-агентів в режимі реального часу в автономних суднових системах – це складна та багатогранна структура, яка інтегрує сучасні технології для забезпечення безпечних, ефективних та стійких морських операцій. Сформуємо високорівневу модель архітектури ІІІ-агента (рис. 3).

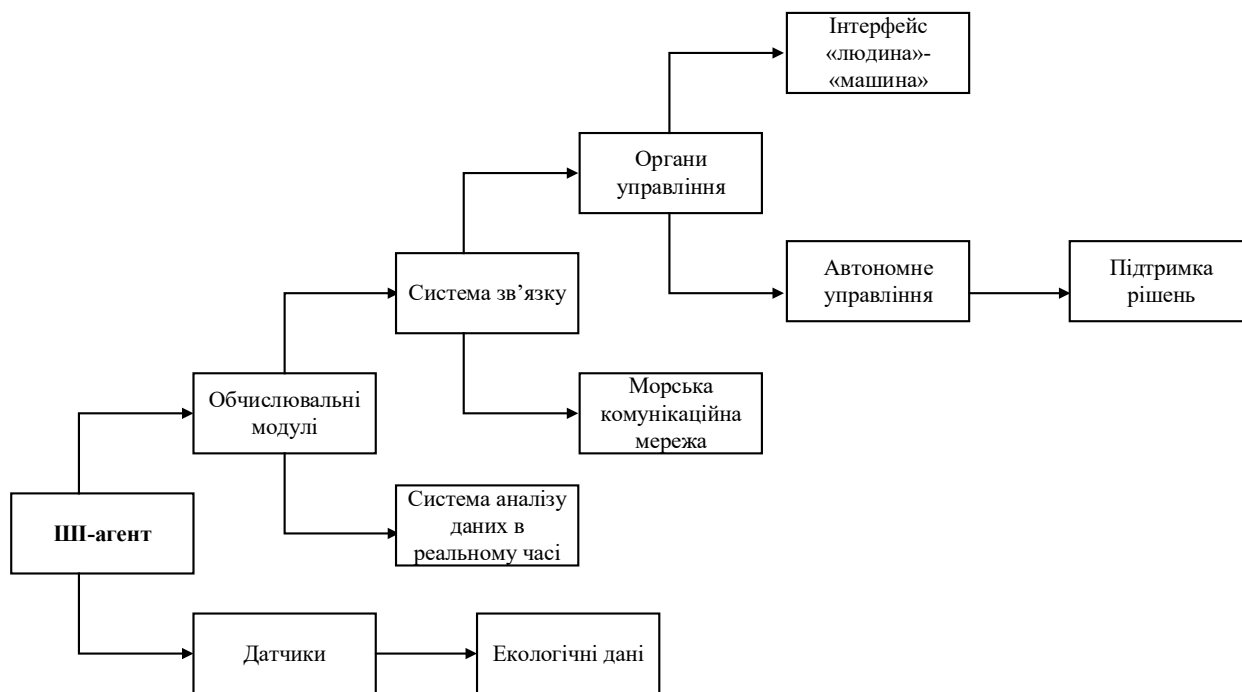


Рисунок 3. Високорівнева модель архітектури III-агента (розроблено автором)

Модель III-агентів реального часу в автономних морських системах структурована як багаторівнева структура, що інтегрує сенсорні функції, сприйняття, прийняття рішень, контроль та нагляд.

В основі цієї моделі лежить III-агент, який діє як автономна сутність, здатна обробляти вхідні дані, генерувати контекстно-залежні рішення та виконувати критично важливі для безпеки дії в умовах обмеженого часу й портової акваторії (див. рис. 3).

Апаратний та сенсорний рівень формують основу, що включає такі компоненти, як лідар, радар, гідролокатор, камери та приймачі AIS. Ці пристрої забезпечують безперервний потік даних, що описують навколишнє середовище судна та його внутрішній стан.

Над цим розташований рівень обробки та сприйняття даних, який використовує алгоритми машинного навчання, комп'ютерний зір та методи об'єднання даних датчиків для перетворення необроблених даних датчиків на практичну ситуаційну обізнаність. III-агент працює на цьому рівні, використовуючи ресурси периферійних обчислень для забезпечення швидкого та локалізованого прийняття рішень.

Рівень керування інтерпретує рішення, згенеровані III-агентом, та взаємодіє з системами навігації, руху та безпеки для виконання команд у режимі реального часу. Для гарантування безперервності критично важливих операцій передбачено резервування.

Рівень нагляду контролює загальний стан системи, підтримує співпрацю між людиною та штучним інтелектом і сприяє зовнішньому зв'язку. Він також дозволяє періодичну синхронізацію з хмарними системами для оновлення моделей, довгострокового архівування даних та колективного навчання між III-агентами.

Обчислювальні компоненти розподілені між цими рівнями для балансування ефективності обробки, енергоспоживання та стійкості системи. Периферійні обчислення забезпечують прийняття рішень з низькою затримкою, а хмарна інтеграція підтримує обмін інформацією на рівні парку пристроїв та прогнозні оновлення. Ця гібридна архітектура дозволяє III-агентам працювати автономно за нормальних умов та передавати рішення віддаленим операторам у виняткових ситуаціях.

Вбудовуючи агенти штучного інтелекту в багаторівневі системи, автономні судна отримують здатність адаптивно та безпечно реагувати на зміни в режимі реального часу, навіть у складних умовах портового трафіку та активно взаємодіяти з III-агентами портової інфраструктури.

Інтеграція III агентів в автономні морські транспортні системи є трансформаційним кроком

уперед, але він супроводжується суттєвими труднощами у впровадженні. Ці перешкоди охоплюють технічні обмеження, етичні та правові невизначеності, проблеми сумісності та інтерфейс взаємодії людини з машиною.

Інтеграція автономних суден з інтелектуальними портовими системами має одну з найбільш трансформаційних можливостей для морської логістики. Інтелектуальні порти, вдосконалені технологіями IoT, аналітикою великих даних та автоматизацією, можуть створити безперервний операційний континуум між судном і берегом. ШІ-агенти можуть координувати свої дії з портовими адміністраціями в режимі реального часу для обміну інформацією про місцезнаходження судна, орієнтовний час прибуття та розподіл причалів. Така синхронізація дозволяє динамічне планування, зменшує завантаженість порту та прискорює час виконання робіт.

Автономні судна також безпосередньо взаємодіють з автоматизованим портовим обладнанням, таким як роботизовані крани та керовані транспортні засоби, для оптимізації операцій завантаження та розвантаження. Така координація мінімізує людські помилки та підвищує безпеку й ефективність. Крім того, розумні порти можуть використовувати системи прогнозного обслуговування на основі штучного інтелекту, які контролюють стан критичної інфраструктури. Прогнозуючи збої до їх виникнення, порти можуть проактивно вирішувати потреби в технічному обслуговуванні, тим самим запобігаючи затримкам та підвищуючи надійність.

Окрім логістики, співпраця між ШІ-агентами на борту суден та системами моніторингу навколишнього середовища в портах може підтримувати управління викидами, відходами та якістю води в режимі реального часу. Ці спільні зусилля щодо забезпечення сталого розвитку узгоджуються з нормативними базами та демонструють цінність інтегрованих цифрових екосистем у досягненні як операційних, так і екологічних цілей.

Висновок. Інтеграція ШІ-агентів в автономні морські системи є трансформаційним зсувом у практиці морської логістики. ШІ-агенти в реальному часі підвищують безпеку, ефективність та сталий розвиток, підтримуючи навігацію, прийняття рішень та операційний контроль в портовій акваторії. Центральну роль вони відіграють у застосуванні запобігання зіткненням, виявленні аномалій, реагування на надзвичайні ситуації та механізмів безпеки, що значно знижує ризики та підвищує надійність.

ШІ-агенти не лише забезпечують ситуаційну обізнаність у режимі реального часу завдяки вдосконаленому об'єднанню даних датчиків, але й оптимізують маршрутизацію, споживання палива та технічне обслуговування, узгоджуючи це з галузевими цілями щодо зниження витрат та екологічної відповідальності. Важливо, що ці агенти сприяють дотриманню таких правил, як рекомендації ІМО щодо парникових газів та показник інтенсивності вуглецю (СІ), динамічно коригуючи операції суден у відповідь на екологічні та нормативні дані.

Незважаючи на свої переваги, впровадження ШІ-агентів створює певні труднощі. Технічні обмеження, такі як обчислювальна потужність та затримка, вимагають використання периферійних обчислень та модульних архітектур штучного інтелекту. Етичні та правові невизначеності вимагають створення систем підзвітності та прозорості. Взаємодія та людський нагляд залишаються важливими для забезпечення безперервної інтеграції з портовою інфраструктурою.

ЛІТЕРАТУРА

1. Hallman K. Artificial Intelligence, Zygotes, and Free Will. *International Journal of Undergraduate Research and Creative Activities*. 2023. Vol. 7: Iss. 2, Article 6. Pp. 1-11.
2. Дячук В. Штучний інтелект: що це і яку несе небезпеку. 2018. *Lifestyle* 24. URL: https://24tv.ua/techno/shtuchniy_intelekt_shho_tse_i_yaku_nese_nebezpeku_n914662
3. Улянівський Т. Штучний інтелект – це продовження еволюції. *ZBRUC*. 2017. URL: <https://zbruc.eu/node/71907>
4. Bahr, A.; Leonard, J.J.; Fallon, M.F. Cooperative Localization for Autonomous Underwater Vehicles. *Int. J. Robot. Res.* 2009, 28, 714–728.
5. Thieme, C.A.; Utne, I.B. A risk model for autonomous marine systems and operation focusing on human–

autonomy collaboration. Proc. Inst. Mech. Eng. Part O J. Risk Reliab. 2017, 231, 446–464.

6. Fruth, M.; Teuteberg, F. Digitization in maritime logistics—What is there and what is missing? Cogent Bus. Manag. 2017, 4, 1411066.

7. Kukreja, S.; Besharat, A.; Lee, S.-S. Projective fixed points for non-Fermi liquids: A case study of the Ising-nematic quantum critical metal. Phys. Rev. B 2024, 110, 155142.

8. Koo, K.Y.; Rødseth, Ø.J.; Lislebø, G.; Ulvensøen, J.H. Harmonizing Maritime Innovation: Enhancing International and National Standardization in Intelligent Ship Transport Systems. J. Phys. Conf. Ser. 2024, 2867, 012023.

9. Peng, Z.; Wang, D.; Li, T.; Han, M. Output-Feedback Cooperative Formation Maneuvering of Autonomous Surface Vehicles with Connectivity Preservation and Collision Avoidance. IEEE Trans. Cybern. 2020, 50, 2527–2535.

10. Pedrielli, G.; Xing, Y.; Peh, J.H.; Koh, K.W.; Ng, S.H. A Real Time Simulation Optimization Framework for Vessel Collision Avoidance and the Case of Singapore Strait. IEEE Trans. Intell. Transp. Syst. 2020, 21, 1204–1215.

11. Zhang, X.; Wang, C.; Chui, K.T.; Liu, R.W. A Real-Time Collision Avoidance Framework of MASS Based on B-Spline and Optimal Decoupling Control. Sensors 2021, 21, 4911.

12. An, Y.; Zhang, Y.; Guo, H.; Wang, J. Compressive Sensing-Based Three-Dimensional Laser Imaging with Dual Illumination. IEEE Access 2019, 7, 25708–25717.

13. Höyhty, M.; Martio, J. Integrated Satellite–Terrestrial Connectivity for Autonomous Ships: Survey and Future Research Directions. Remote Sens. 2020, 12, 2507.

14. Das, P. Optimizing Sensor Integration for Enhanced Localization in Underwater ROVS. IJSREM 2024, 8, 1–6.

15. Robards, M.D.; Silber, G.; Adams, J.; Arroyo, J.; Lorenzini, D.; Schwehr, K.; Amos, J. Conservation science and policy applications of the marine vessel Automatic Identification System (AIS)—A review. Bull. Mar. Sci. 2016, 92, 75–103.

16. Riyadh, M. Transforming the Shipping Industry with Autonomous Ships and Artificial Intelligence. J. Marit. Technol. Soc. 2024, 3, 16–21.

17. Allal, A.A.; Mansouri, K.; Youssfi, M.; Qbadou, M. Reliable and cost-effective communication at high seas, for a safe operation of autonomous ship. In Proceedings of the 2018 6th International Conference on Wireless Networks and Mobile Communications (WINCOM), Marrakesh, Morocco, 16–19 October 2018; pp. 1–8.

18. Alamoush, A.S.; Ölçer, A.I. Maritime Autonomous Surface Ships: Architecture for Autonomous Navigation Systems. J. Mar. Sci. Eng. 2025, 13, 122.

19. Бичковський Ю.В., Мельник О.М. (2022). Роль та місце людського елемента у ситуації навалу або зіткнення судна з причалом. Вчені записки ТНУ ім. Вернадського. Технічні науки 33(72) № 1 - С. 270 - 276. <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2022.1/41>

20. Elnoury, A.; Farag, S. The Impact of Inadequate Maritime Conventions on Implementing Autonomous Ship Technology. AIN J. 2023, 1, 66.

21. Čampara, L.; Hasanspahić, N.; Vujičić, S. Overview of MARPOL ANNEX VI regulations for prevention of air pollution from marine diesel engines. SHS Web Conf. 2018, 58, 01004.

22. Kim, M.; Joung, T.-H.; Jeong, B.; Park, H.-S. Autonomous shipping and its impact on regulations, technologies, and industries. J. Int. Marit. Saf. Environ. Aff. Shipp. 2020, 4, 17–25.

23. Issa, M.; Ilinca, A.; Ibrahim, H.; Rizk, P. Maritime Autonomous Surface Ships: Problems and Challenges Facing the Regulatory Process. Sustainability 2022, 14, 15630.

24. Lentarev, A.A. Analysis of the existing regulations on certification and training of autonomous vessels operators. Jour 2023, 15, 359–373.

REFERENCES

1. Hallman K. Artificial Intelligence, Zygotes, and Free Will. International Journal of Undergraduate Research and Creative Activities. 2023. Vol. 7: Iss. 2, Article 6. Pp. 1-11.

2. Dyachuk V. Shtuchnyy intelekt: shcho tse i yaku nese nebezpeku. 2018. Lifestyle 24. URL: https://24tv.ua/techno/shtuchniy_intelekt_shho_tse_i_yaku_nese_nebezpeku_n914662

3. Ulyaniv's'kyi T. Shtuchnyy intelekt – tse prodovzheniya evolyutsiyi. ZBRUC. 2017. URL: <https://zbruc.eu/node/71907>

4. Bahr, A.; Leonard, J.J.; Fallon, M.F. Cooperative Localization for Autonomous Underwater Vehicles. Int. J. Robot. Res. 2009, 28, 714–728.

5. Thieme, C.A.; Utne, I.B. A risk model for autonomous marine systems and operation focusing on human–autonomy collaboration. Proc. Inst. Mech. Eng. Part O J. Risk Reliab. 2017, 231, 446–464.

6. Fruth, M.; Teuteberg, F. Digitization in maritime logistics—What is there and what is missing? Cogent Bus. Manag. 2017, 4, 1411066.

7. Kukreja, S.; Besharat, A.; Lee, S.-S. Projective fixed points for non-Fermi liquids: A case study of the Ising-nematic quantum critical metal. *Phys. Rev. B* 2024, 110, 155142.
8. Koo, K.Y.; Rødseth, Ø.J.; Lislebø, G.; Ulvensøen, J.H. Harmonizing Maritime Innovation: Enhancing International and National Standardization in Intelligent Ship Transport Systems. *J. Phys. Conf. Ser.* 2024, 2867, 012023.
9. Peng, Z.; Wang, D.; Li, T.; Han, M. Output-Feedback Cooperative Formation Maneuvering of Autonomous Surface Vehicles with Connectivity Preservation and Collision Avoidance. *IEEE Trans. Cybern.* 2020, 50, 2527–2535.
10. Pedrielli, G.; Xing, Y.; Peh, J.H.; Koh, K.W.; Ng, S.H. A Real Time Simulation Optimization Framework for Vessel Collision Avoidance and the Case of Singapore Strait. *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.* 2020, 21, 1204–1215.
11. Zhang, X.; Wang, C.; Chui, K.T.; Liu, R.W. A Real-Time Collision Avoidance Framework of MASS Based on B-Spline and Optimal Decoupling Control. *Sensors* 2021, 21, 4911.
12. An, Y.; Zhang, Y.; Guo, H.; Wang, J. Compressive Sensing-Based Three-Dimensional Laser Imaging with Dual Illumination. *IEEE Access* 2019, 7, 25708–25717.
13. Höyhty, M.; Martio, J. Integrated Satellite–Terrestrial Connectivity for Autonomous Ships: Survey and Future Research Directions. *Remote Sens.* 2020, 12, 2507.
14. Das, P. Optimizing Sensor Integration for Enhanced Localization in Underwater ROVS. *IJSREM* 2024, 8, 1–6.
15. Robards, M.D.; Silber, G.; Adams, J.; Arroyo, J.; Lorenzini, D.; Schwehr, K.; Amos, J. Conservation science and policy applications of the marine vessel Automatic Identification System (AIS)-A review. *Bull. Mar. Sci.* 2016, 92, 75–103.
16. Riyadh, M. Transforming the Shipping Industry with Autonomous Ships and Artificial Intelligence. *J. Marit. Technol. Soc.* 2024, 3, 16–21.
17. Allal, A.A.; Mansouri, K.; Youssfi, M.; Qbadou, M. Reliable and cost-effective communication at high seas, for a safe operation of autonomous ship. In *Proceedings of the 2018 6th International Conference on Wireless Networks and Mobile Communications (WINCOM), Marrakesh, Morocco, 16–19 October 2018*; pp. 1–8.
18. Alamoush, A.S.; Ölçer, A.I. Maritime Autonomous Surface Ships: Architecture for Autonomous Navigation Systems. *J. Mar. Sci. Eng.* 2025, 13, 122.
19. Bychkov's'kyy YU.V., Mel'nyk O.M. (2022). Rol' ta mistse lyuds'koho elementu u sytuatsiyi navalu abo zitknennya sudna z pryhalom. *Vcheni zapysky TNU im. Vernads'koho. Tekhnichni nauky* 33(72) № 1 - C. 270 - 276. <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2022.1/41>
20. Elnoury, A.; Farag, S. The Impact of Inadequate Maritime Conventions on Implementing Autonomous Ship Technology. *AINJ.* 2023, 1, 66.
21. Čampara, L.; Hasanspahić, N.; Vujičić, S. Overview of MARPOL ANNEX VI regulations for prevention of air pollution from marine diesel engines. *SHS Web Conf.* 2018, 58, 01004.
22. Kim, M.; Joung, T.-H.; Jeong, B.; Park, H.-S. Autonomous shipping and its impact on regulations, technologies, and industries. *J. Int. Marit. Saf. Environ. Aff. Shipp.* 2020, 4, 17–25.
23. Issa, M.; Ilinca, A.; Ibrahim, H.; Rizk, P. Maritime Autonomous Surface Ships: Problems and Challenges Facing the Regulatory Process. *Sustainability* 2022, 14, 15630.
24. Lentarev, A.A. Analysis of the existing regulations on certification and training of autonomous vessels operators. *Jour* 2023, 15, 359–373.

Maranov O.V., Nosovsky A.A.,

MULTI-AGENT MODEL OF INTERACTION OF AUTONOMOUS MARINE PLATFORMS WITH PORT INFRASTRUCTURE

The explosive development of autonomous marine systems based on artificial intelligence agents has exacerbated the problem of real-time provision and coordination, decision-making and compliance with regulatory requirements. The aim of the article is to develop a multi-agent model of interaction of autonomous marine platforms with port infrastructure, which ensures the safety and environmental friendliness of operations. The aim of the article is achieved by the widespread use of artificial intelligence, which performs a number of functions to ensure the safe operation of autonomous vessels in complex marine environments. Each of these functions - navigation, obstacle detection, collision avoidance and real-time decision-making - is of crucial importance. Various artificial intelligence methods are used to support these functions, including machine learning, deep learning, reinforcement learning, computer vision and natural language processing. An overview of AI elements used in maritime safety systems is provided, as well as their advantages and disadvantages in terms of autonomous maritime system performance. A high-level model of the architecture of

AI agents operating in real-time in autonomous ship systems is proposed. This approach integrates modern technologies (sensory functions, perception, decision-making, control and supervision) to ensure safe, efficient and sustainable maritime operations. The model is based on an AI agent that acts as an autonomous entity capable of processing input data, generating context-sensitive decisions and performing safety-critical actions in time-constrained and port-based environments. AI agents not only provide real-time situational awareness through advanced sensor data fusion, but also optimize routing, fuel consumption and maintenance, in line with industry goals for cost reduction and environmental responsibility. The functions of AI agents at each level of the architecture are described in detail. The integration of autonomous ships with intelligent port systems using AI agents allows for improved dynamic planning, reduced port congestion, and faster turnaround times in maritime logistics. Smart ports, enhanced by IoT technologies, big data analytics, and automation, become the foundation for creating a seamless operational continuum between ship and shore.

Keywords: *navigation safety, navigation safety, navigation, emergency situations, ship, ship movement, navigation, traffic management, technical means of navigation, safety at sea, autonomous marine platforms, agent approach, maritime transport, port infrastructure, transport technologies, artificial intelligence*

Стаття прийнята 25.01.2026

© Кириченко О.С.

АНАЛІЗ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ХАРАКТЕРИСТИК МІНІАТЮРНОГО ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНОГО МОДУЛЯ ДЛЯ СУДНОВИХ ЕНЕРГЕТИЧНИХ І НАВІГАЦІЙНИХ СИСТЕМ

У роботі спроектовано термоелектричний модуль для суднових енергетичних і навігаційних систем на базі модуля ТЕС1-01703. Наведено математичні рівняння для аналізу експлуатаційних характеристик модуля при протіканні електричних, теплових і механічних процесів. Для проектування геометрії термоелектричного модуля використовується система автоматизованого проектування (САПР), а для розрахунку основних експлуатаційних характеристик спеціалізоване програмне середовище скінченно-елементного аналізу. Спроектований термоелектричний модуль має габаритні розміри $15 \times 15 \times 4,2$ мм, він містить 18 напівпровідників Р- і 18 напівпровідників N-типу, 37 металевих контактних комутаційних пластин. На цій основі створено термоелектричний ланцюг з 35 контактних з'єднань між напівпровідниками, які утворюють 18 термоелектричних пар. Габаритні розміри активної зони спроектованого термоелектричного модуля (П-подібного ланцюга) становлять $12 \times 12 \times 2,6$ мм. Розрахунок проведено чисельно з обраними граничними умовами по електричній, тепловій і механічній частині. У моделі охолодження модуля передбачено за рахунок примусової (вимушеної) конвекції вентиляторним способом охолодження при коефіцієнті тепловіддачі $h=50$ Вт/(м²·К) і температурі конвекції $t_{amb}=25$ °С. За допомогою комп'ютерного моделювання виявлено, як розподіляються основні показники моделі при силі струму 3,3 А. Ці показники включають електричну напругу, температуру, густина електричного струму, напруженість електричного поля, джоулевий нагрів, густина теплового потоку, механічні напруження та деформації. Під час моделювання виявлено області, де температура, механічні напруження та деформації мають підвищені значення. Також побудовано графіки залежностей робочих показників від сили струму при її зміні від 0 до 3,5 А. Ці графіки показують, як змінюються електрична напруга, температура, густина струму, напруженість електричного поля, джоулевий нагрів, густина теплового потоку, механічні напруження та деформації зі збільшенням сили струму. Аналіз отриманих даних дозволив встановити нелінійний характер залежностей робочих показників від сили струму. Визначено граничні режими роботи модуля, при яких забезпечується його ефективність, термічна стійкість та механічна надійність у складі суднових систем.

Ключові слова: ефект Пельтьє, термоелектричний модуль, суднові системи, проектування, чисельне моделювання, електротепломеханічні процеси, робочі параметри.

Постановка проблеми. Суднові енергетичні та навігаційні системи містять у своєму складі термоелектричне обладнання [1-3], яке відіграє важливу роль у функціонуванні судна. Термоелектричне обладнання забезпечує безперервну роботу шаф автоматики, розподільчих пристроїв, систем керування, силової електроніки, допоміжних вузлів, а також стабільність температурних умов чутливих навігаційних приладів. Робота термоелектричного обладнання, призначеного для охолодження і термостабілізації, базується на ефекті Пельтьє [4-6]. Він полягає у прямому перетворенні електричної енергії у тепловий потік. Незважаючи на відносно невеликий ККД, термоелектричне обладнання для охолодження та термостабілізації у ряді випадків має низку суттєвих переваг. Термоелектричні охолоджувачі компактні та не містять рухомих частин, під час їх роботи відсутні шум і вібрації, вони мають високу ефективність точкового охолодження при високій точності та швидкодії. Крім того, системи з термоелектричним охолодженням потребують мінімального експлуатаційного обслуговування на відміну від компресорних систем, що є складнішими, мають порівняно великі габарити та під час своєї роботи потребують регулярного технічного обслуговування і перевірки щодо

знос компресора, герметичності циркуляційних контурів і відсутності витоків холодоагенту (зокрема фреону). Підвищення вимог до безпеки водного транспорту зумовлює необхідність підвищення ефективності та надійності судових систем [7]. При цьому експлуатація термоелектричного обладнання за реальних судових умов залишається недостатньо дослідженою. Таким чином, виникає потреба в проектуванні сучасних компактних термоелектричних модулів з прогнозованими експлуатаційними характеристиками для судових енергетичних і навігаційних систем.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Огляд новітніх досліджень у галузі термоелектричного охолодження підтверджує зростаючу зацікавленість у застосуванні термоелектричних модулів у судових системах. У роботі [8] розглядаються термоелектричні матеріали як у процесі перетворення тепла в електрику, так і у зворотному процесі. Оскільки ці матеріали дозволяють здійснювати пряме перетворення тепла в електрику і навпаки, підвищення їхньої ефективності та удосконалення системної архітектури залишається центральним завданням. Розгляду сучасних досягнень у галузі термоелектричних матеріалів присвячена робота [9]. В ній зазначено, що на підвищення продуктивності термоелектричних ефектів впливає легування, розробка нових наноструктур і синтез нових сполук матеріалів.

У [10] запропоновано здійснювати виробництво електроенергії на судах з використанням тепла, що виділяється судовими двигунами. Розглянуто використання термоелектричних генераторів, встановлених у корпусі нижче ватерлінії. У роботі [11] розглянута система утилізації відпрацьованого тепла для застосування на судах, побудована на основі термоелектричного генератора та підвищувального DC/DC-перетворювача. Аналізуються характеристики і режими роботи такої системи в судовій DC-мережі. У статті [12] описано розробку автономної системи живлення судових двигунів термоелектричними генераторами за допомогою SEPIC-перетворювача, що забезпечує більш повний відбір енергії з відпрацьованих газів шляхом оптимізації режимів роботи.

У дослідженні [13] розглядаються напруження в термоелектричних модулях при механічних циклічних навантаженнях і пропонуються методи підвищення їх механічної стійкості на основі досвіду і чисельних досліджень. Застосування методу скінченних елементів у поєднанні з експериментальним підтвердженням дозволяє ефективно досліджувати конструкції щодо механічних напружень у них [14]. Проведений аналіз та отримані результати можуть бути корисними і при оцінці механічної надійності термоелектричних модулів для судових систем.

У роботі [15] розроблено модель термоелектричної системи дистиляції. Показано, що тепловіддача і температура мають великий вплив на процес теплообміну. Отримано наукові результати по аналізу умов охолодження термоелектричних модулів у системах суден. У [16] експериментально досліджується, наскільки ефективно перетворюється енергія у термоелектричній системі з примусовим охолодженням. Встановлено, що різниця температур, навантаження і умови теплообміну мають великий вплив на характеристики термоелектричного модуля і його вихідну потужність.

Наведені дослідження становлять значний науковий інтерес, проте не охоплюють у повній мірі застосування термоелектричних модулів в енергетичних і навігаційних системах. З огляду на те, що тематика застосування термоелектричних модулів в судових системах динамічно розвивається, аналіз електротепломеханічних процесів в реальних експлуатаційних режимах зумовлює необхідність подальших комплексних досліджень у цьому напрямі.

Мета роботи – проаналізувати струмові залежності основних робочих параметрів термоелектричного модуля для судових енергетичних і навігаційних систем, спроектованого на основі модуля ТЕС1-01703, з урахуванням примусової конвекції вентиляторним способом охолодження.

Виклад основного матеріалу та основні результати дослідження. Математичний опис електричних, теплових і механічних процесів у термоелектричному модулі для судових енергетичних і навігаційних систем може бути представлений наступними рівняннями.

Рівняння нерозривності електричного заряду:

$$\nabla \cdot (J + \partial D / \partial t) = 0, \quad (1)$$

де $\nabla \cdot$ – оператор дивергенції;

J – вектор густини електричного струму,

A/m^2 ; D – вектор електричної індукції,

Кл/м²; t – час, с.

Закон електропровідності з урахуванням термоелектричних ефектів:

$$\mathbf{J} = \sigma_e (-\nabla\varphi - S\nabla T), \quad (2)$$

де σ_e – електрична провідність,

См/м; φ – електричний потенціал, В;

S – коефіцієнт Зеєбека, В/К;

∇ – оператор градієнта;

T – температура, К.

Зв'язок електричного поля з потенціалом:

$$\mathbf{E} = -\nabla\varphi, \quad (3)$$

де \mathbf{E} – вектор напруженості електричного поля, В/м.

Рівняння теплопровідності:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k\nabla T) + q_J - \nabla \cdot \mathbf{q}_P \quad (4)$$

де ρ – густина матеріалу, кг/м³;

c – питома теплоємність, Дж/(кг·К);

k – коефіцієнт теплопровідності, Вт/(м·К);

q_J – об'ємна густина джоулевого тепловиділення, Вт/м³;

\mathbf{q}_P – вектор теплового потоку ефекту Пельтьє, Вт/м².

Джоулеве тепловиділення:

$$q_J = \mathbf{J} \cdot \mathbf{E}, \quad (5)$$

де “ \cdot ” – скалярний добуток.

Тепловий потік ефекту Пельтьє:

$$\mathbf{q}_P = S T \mathbf{J}. \quad (6)$$

Рівняння теплопровідності у стаціонарному режимі:

$$\nabla \cdot (k\nabla T) + \mathbf{J} \cdot \mathbf{E} - \nabla \cdot (S T \mathbf{J}) = 0. \quad (7)$$

Рівняння механічної рівноваги:

$$\nabla \cdot \boldsymbol{\sigma} + \mathbf{F} = 0, \quad (8)$$

де $\boldsymbol{\sigma}$ – тензор механічних напружень, Па;

\mathbf{F} – вектор об'ємних сил, Н/м³.

Закон пружності:

$$\boldsymbol{\sigma} = \mathbf{C} : (\boldsymbol{\varepsilon} - \boldsymbol{\varepsilon}_{th}), \quad (9)$$

де \mathbf{C} – тензор пружних сталей; $\boldsymbol{\varepsilon}$ – тензор деформацій; $\boldsymbol{\varepsilon}_{th}$ – термічна деформація.

Термічна деформація:

$$\boldsymbol{\varepsilon}_{th} = \alpha (T - T_0) \mathbf{I}, \quad (10)$$

де α – коефіцієнт лінійного теплового розширення, 1/К;

T_0 – опорна температура, К;

\mathbf{I} – одиничний тензор другого рангу.

При проєктуванні термоелектричного модуля для енергетичних і навігаційних систем за базовий приймається одноступеневий модуль ТЕС1-01703 з габаритними розмірами 15×15 мм при товщині 4,2 мм з максимально допустимим струмом до 4,07 А. Він виготовлений компанією Thermonamic Electronics (Jiangxi) Corp., Ltd. (Китай), що спеціалізується на виробництві термоелектричних модулів серії ТЕС [17].

Процес проєктування термоелектричного модуля для суднових енергетичних і навігаційних систем передбачає використання систем автоматизованого проєктування (САПР) при створенні геометрії, а також середовища чисельного моделювання на основі методу скінченних елементів (рис. 1) [18-21].

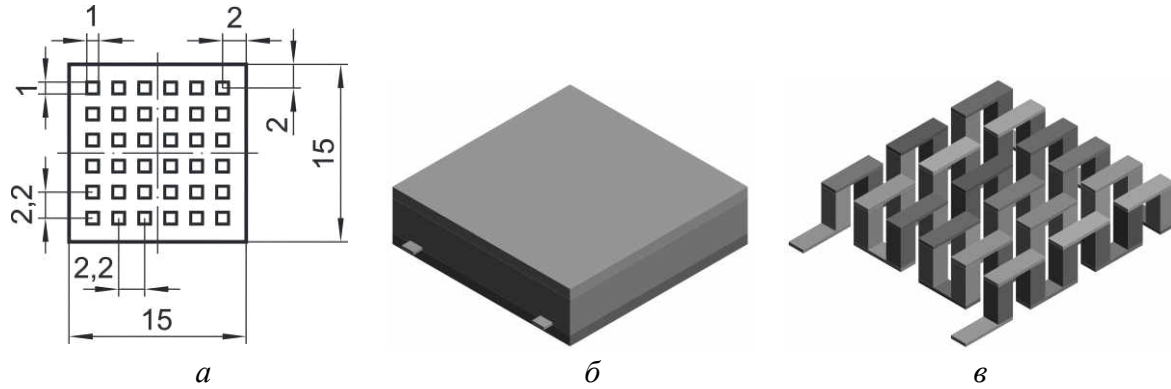


Рисунок 1 – Проектування геометрії термоелектричного модуля для суднових енергетичних і навігаційних систем на базі модуля TEC1-01703: *а* – схема плану розміщення напівпровідникових елементів; *б* – повна геометрична 3D-модель з пластинами кераміки і периметральним герметиком; *в* – виокремлена 3D-модель активної зони модуля

На схемі плану розташування напівпровідників спроектованого термоелектричного модуля з 36-х напівпровідників 1×1 мм (рис. 1, *а*) проілюстровано вертикальну та горизонтальну симетрію їх розміщення в 6 рядів та 6 стовпців в ізоляційному корпусі термоелектричного модуля з габаритами 15×15 мм, що відносить його до класу малих (мініатюрних) термоелектричних модулів. Модулі такого класу використовуються для дуже компактних пристроїв в суднових системах з обмеженнями щодо габаритних розмірів і маси. При площі 1 мм^2 кожного напівпровідника і висоті 2,2 мм об'єм кожного з них складає $2,2 \text{ мм}^3$. Відстань від краю ізоляційного корпусу до геометричних центрів крайніх напівпровідників (по контуру активної зони модуля) по горизонталі і по вертикалі становить 2 мм. Відстані між геометричними центрами всіх напівпровідників по горизонталі та по вертикалі становлять 2,2 мм. Спроектований термоелектричний модуль містить 18 напівпровідників *P*- і 18 напівпровідників *N*-типу і 37 металевих контактних комутаційних пластин. Це дозволило створити ланцюг з 35 контактних з'єднань між напівпровідниками, які утворюють 18 термоелектричних пар. Габаритні розміри активної зони спроектованого термоелектричного модуля (П-подібного ланцюга) становлять $12 \times 12 \times 2,6$ мм. Структура з'єднань термоелектричних елементів з класичною формою (топологією) П-подібного ланцюга використовується через зручне розміщення елементів (рівномірність при тепло- і електропровідному з'єднанні), ефективність охолодження (забезпечується правильний теплообмін між контактними пластинами), мінімальність втрат енергії (оптимальність шляху для електричного струму).

Повна геометрична 3D-модель термоелектричного модуля $15 \times 15 \times 4,2$ мм з керамічними пластинами і периметральним герметиком та виокремлена 3D-модель активної зони модуля проілюстровані на рис. 1, *б-в*. В якості матеріалу двох пластин ізоляційного корпусу з товщиною 0,8 мм кожна використано оксидну кераміку (Al_2O_3). Периметральний силіконовий герметик має товщину 0,5 мм. Кожен термоелектричний елемент представляє собою напівпровідникову *P-N*-термопару з геометрично ідентичними формами з'єднувальних контактних пластин-паралелепіпедів $3,2 \times 1 \times 0,2$ мм. Матеріалом напівпровідників є телурид вісмуту (Bi_2Te_3), а металевих контактних комутаційних пластин – мідь (Cu). *P*- і *N*-тип цих напівпровідників отримують за допомогою легування, коли в якості домішок можна застосувати відповідно сурму (Sb) і селен (Se).

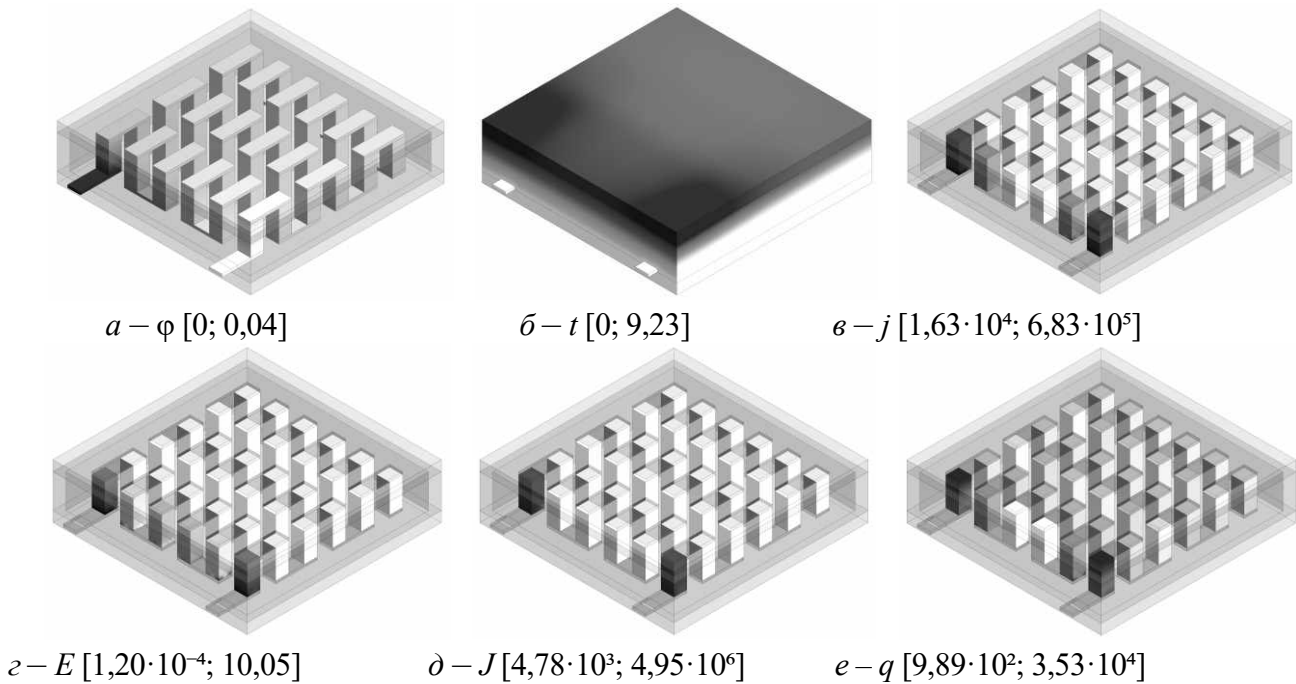


Рисунок 2 – Розподіл електричного потенціалу φ [В] (а), стаціонарного теплового поля t [°С] (б), густини струму j [А/м²] (в), напруженості електричного поля E [В/м] (г), омичного нагріву J [Вт/м³] (д), густини теплового потоку q [Вт/м²] (е) по термоелектричному модулю при силі струму $I=3,3$ А за коефіцієнта тепловіддачі $h=50$ Вт/(м²·К) і температури конвекції $t_{amb}=25$ °С

Розрахунок спроектованого термоелектричного модуля для суднових енергетичних і навігаційних систем проводиться чисельно з використанням методу скінченних елементів [22-25]. При цьому задано наступні граничні умови: електричний потенціал $\varphi_0=0$ В на крайній торцевій поверхні контактної комутаційної пластини, останньої в термоелектричному П-подібному ланцюзі; температура холодних пластин модуля вважалась зафіксованою $t_0=0$ °С; для першої і останньої контактної комутаційної пластини в термоелектричному ланцюзі крайні торцеві поверхні вважались нерухомими; крайні торцеві поверхні першої і останньої вивідних пластин вважались нерухомими. Матеріали всіх деталей термоелектричного модуля вважаються ізотропними [26-27]. Теплообмін з оточуючим середовищем здійснюється за допомогою примусової (вимушеної) конвекції з зовнішньої поверхні гарячої керамічної пластини вентиляторним способом охолодження при коефіцієнті тепловіддачі $h=50$ Вт/(м²·К) і температурі конвекції $t_{amb}=25$ °С. Термоелектричні коефіцієнти Зеєбека: $\alpha_P=200$ мкВ/К, $\alpha_N=-200$ мкВ/К; питомі електричні опори: $\rho_P=\rho_N=1,24 \cdot 10^{-5}$ Ом·м, $\rho_{Cu}=1,72 \cdot 10^{-8}$ Ом·м, $\rho_{Seal}=1,0 \cdot 10^{13}$ Ом·м, $\rho_{Cer}=3,16 \cdot 10^{13}$ Ом·м; теплопровідності: $k_P=k_N=1,29$ Вт/(м·К), $k_{Cu}=394$ Вт/(м·К), $k_{Seal}=0,2$ Вт/(м·К), $k_{Cer}=13,74$ Вт/(м·К); модулі Юнга $E_P=E_N=4,975 \cdot 10^{10}$ Па, $E_{Cu}=1,26 \cdot 10^{11}$ Па, $E_{Seal}=5,0 \cdot 10^6$ Па, $E_{Cer}=2,46 \cdot 10^{11}$ Па; коефіцієнти Пуассона $\nu_P=\nu_N=0,24$, $\nu_{Cu}=0,34$, $\nu_{Seal}=0,49$, $\nu_{Cer}=0,24$; коефіцієнти теплового розширення: $\alpha_{Pt}=\alpha_{Ni}=2,2 \cdot 10^{-5}$ К⁻¹, $\alpha_{Cu}=1,7 \cdot 10^{-5}$ К⁻¹, $\alpha_{Seal}=2,5 \cdot 10^{-4}$ К⁻¹, $\alpha_{Cer}=9,04 \cdot 10^{-6}$ К⁻¹. За стандартного підключення («+» червоний; «-» чорний) струм спочатку входить в P-напівпровідник модуля.

Розподіл робочих параметрів по спроектованому термоелектричному модулю для суднових енергетичних і навігаційних систем при силі струму $I=0,5$ А при примусовій конвекції із зовнішньої поверхні гарячої керамічної пластини при коефіцієнті тепловіддачі $h=50$ Вт/(м²·К) і температурі конвекції $t_{amb}=25$ °С зображено на рис. 2-3. Темні тони (до чорного) відповідають максимальним значенням величин, світлі (до білого) – мінімальним, а сірі – проміжним.

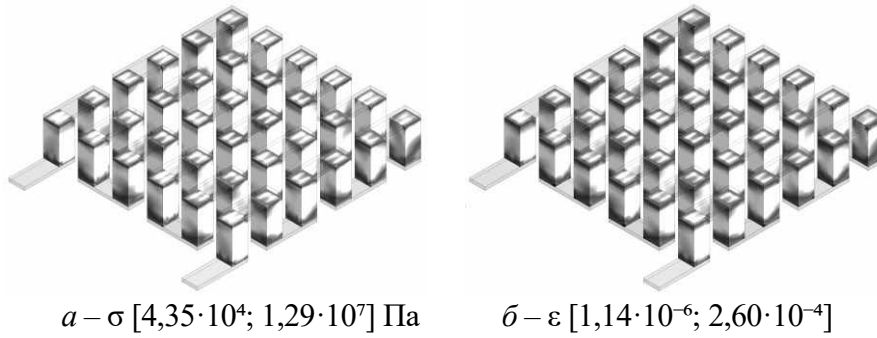


Рисунок 3 – Розподіл еквівалентного стресу σ [Па] (а) і деформацій ε [м] (б) в напівпровідниках термоелектричного модуля при силі струму $I=3,3$ А за коефіцієнта тепловіддачі $h=50$ Вт/(м²·К) і температури конвекції $t_{amb}=25$ °С

Результати розрахунку робочих параметрів спроектованого термоелектричного модуля для суднових енергетичних і навігаційних систем наведено на рис. 4 у вигляді функціональних залежностей $U(I), t(I), j(I), E(I), J(I), q(I), \sigma(I), \varepsilon(I)$ в діапазоні струмів $I=0-3,5$ А. Для примусової (вимушеної) конвекції вентиляторним способом охолодження прийнято коефіцієнт тепловіддачі $h=50$ Вт/(м²·К), температура конвекції $t_{amb}=25$ °С.

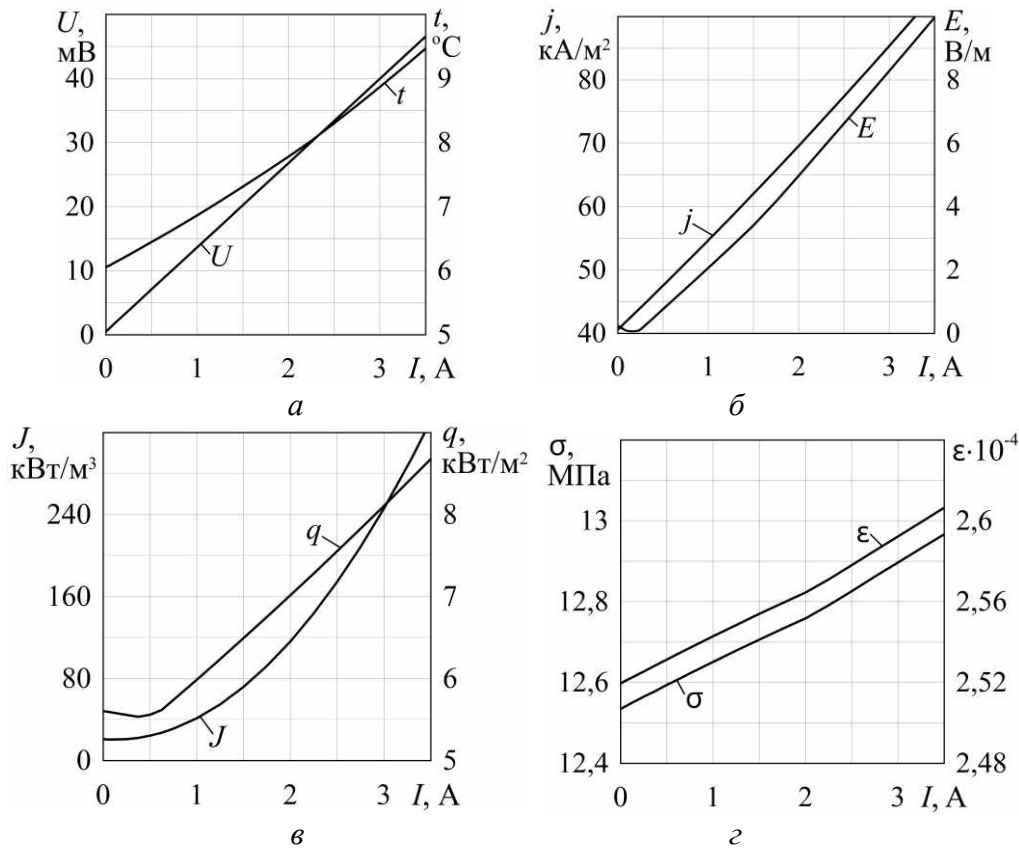


Рисунок 4 – Графіки функцій $U(I), t(I), j(I), E(I), J(I), q(I), \sigma(I), \varepsilon(I)$ по напрузі U (а), температурі на гарячій стороні t (а), густині струму j (б), напруженості електричного поля E (б), омичному нагріву J (в), густині теплового потоку q (в), еквівалентному стресу σ (з) та деформаціям ε (з) в термоелектричному модулі в залежності від сили струму I

Аналіз графіків при варіаціях сили струму I від 0 до 3,5 А дає можливість встановити, що отримані залежності мають нелінійний характер. При цьому електрична напруга U в спроектованому термоелектричному модулі для енергетичних і навігаційних систем зростає до 46,5 мВ, температура t до 9,5 °С, густина струму j до 89,9 кА/м², напруженість електричного поля E до 10,7 В/м, джоулевий

нагрів J до $331,6 \text{ кВт/м}^3$, густина теплового потоку q до $8,7 \text{ кВт/м}^2$, еквівалентні механічні напруження σ до $13,0 \text{ МПа}$, деформації ε до $2,6 \cdot 10^{-4}$.

Висновок. У дослідженні спроектовано термоелектричний модуль $15 \times 15 \times 4,2 \text{ мм}$ з 36 напівпровідниками на базі модуля TEC1-01703. Спроектований термоелектричний модуль містить 18 напівпровідників P - і 18 напівпровідників N -типу і 37 металевих контактних комутаційних пластин. Це дозволило створити ланцюг з 35 контактних з'єднань між напівпровідниками, які утворюють 18 термоелектричних пар. Габаритні розміри активної зони спроектованого термоелектричного модуля (П-подібного ланцюга) становлять $12 \times 12 \times 2,6 \text{ мм}$. Встановлено нелінійний характер залежностей основних робочих параметрів спроектованого термоелектричного модуля для суднових енергетичних і навігаційних систем від сили струму в номінальному діапазоні $0-3,5 \text{ А}$. При типовому струмі робочої області $I=2,5 \text{ А}$ спроектованого модуля напруга $U=3,3 \text{ В}$, температурний перепад між сторонами модуля $t=8,3 \text{ }^\circ\text{C}$, густина струму $j=73,1 \text{ кА/м}^2$, напруженість електричного поля $E=7,5 \text{ В/м}$, джоулевий нагрів $J=174,5 \text{ кВт/м}^3$, густина теплового потоку $q=7,6 \text{ кВт/м}^2$, механічні напруження $\sigma=12,8 \text{ МПа}$ і деформації $\varepsilon=2,58 \cdot 10^{-4}$.

ЛІТЕРАТУРА

1. Анатичук Л.І. Термоелектрика: монографія. Термоелектричні перетворювачі енергії: термоелементи. Елементна база термоелектрики. Чернівці: Інститут термоелектрики НАН України та МОН України, 2003. Т. 2. 376 с.
2. Анатичук Л.І., Семенюк В.О. Оптимальне керування властивостями термоелектричних матеріалів і приладів. Чернівці: ПРУТ, 1992. 264 с.
3. Анатичук Л.І. Термоелементи і термоелектричні пристрої: довідник. Київ: Наук. думка, 1979. 768 с.
4. Goldsmid H. J. Introduction to Thermoelectricity. 2nd edition. Berlin: Springer, 2016. 278 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-662-49256-7>
5. Rowe D.M. (Ed.) Thermoelectrics Handbook: Macro to Nano. Boca Raton: CRC Press, 2006. 1024 p.
6. Rowe D.M. (Ed.) CRC Handbook of Thermoelectrics. Boca Raton: CRC Press, 1995. 701 p.
7. Тимошук О.М., Мельник О.В. Формування механізму реалізації логістичної стратегії річкових портів. Проблеми економіки. 2013. № 3. С. 149-155.
8. Bell L.E. Cooling, Heating, Generating Power, and Recovering Waste Heat with Thermoelectric Systems. Science, 2008. 321, pp. 1457–1461. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.1158899>
9. Mele P. Recent Advances in Thermoelectric Materials for High Efficiency Energy Conversion and Refrigeration. Basel: MDPI, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/books978-3-0365-3504-3>
10. Armenakis Y., Chatzis S. Waste heat recovery and electrical power production on vessels by means of TEG arrays attached on the hull below the underwater line. 2019 IEEE Electric Ship Technologies Symposium (ESTS), Washington, DC, USA, 2019, pp. 430-437. DOI: <https://doi.org/10.1109/ESTS.2019.8847849>
11. Zogogianni C.G., Zarkadis N.A., Tatakis E.C. Energy savings in marine applications using thermoelectric modules and high step-up DC/DC converter. 8th IET International Conference on Power Electronics, Machines and Drives (PEMD 2016), Glasgow, UK, 2016, pp. 1-5. DOI: <https://doi.org/10.1049/cp.2016.0303>
12. Joseph R., Jet T.K., Qingyu Alex Yan, Lee Meng Yeong. Design of stand-alone thermoelectric power generation system for marine engine exhaust system. IECON 2016 - 42nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Florence, 2016, pp. 4078-4084. DOI: <https://doi.org/10.1109/IECON.2016.7793238>
13. Anatychuk L.I., Balazyuk V.N., Luste O.J., Malyshko V.V. Studying stresses in thermoelectric cooling modules for increasing their cyclic stability. Proceedings ICT'03. 22nd International Conference on Thermoelectrics (IEEE Cat. No.03TH8726), La Grande Motte, France, 2003, pp. 619-622. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICT.2003.1287589>
14. Vatulia G., Gerlici J., Lovska A., Fomin O., Okorokov A., Pavliuchenkov M. Experimental studies on the strength of a flatcar during shunting impacts. Applied Sciences. 2023, 13(8), 4901. <https://doi.org/10.3390/app13084901>
15. Al-Madhhachi H., Prest M., Min G. Evaluation of the convection heat transfer coefficient in a thermoelectric distillation system. 2016 International Conference for Students on Applied Engineering (ICSAE), Newcastle Upon Tyne, UK, 2016. pp. 213-217. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICSAE.2016.7810190>
16. Ionescu V., Neagu A.A. Investigation of the Energy Conversion Efficiency for a Thermoelectric Generator System with Forced Convection Cooling. 2023 17th International Conference on Engineering of Modern Electric Systems (EMES), Oradea, Romania, 2023. pp. 1-4. DOI: <https://doi.org/10.1109/EMES58375.2023.10171737>
17. Thermonamic Electronics (Jiangxi) Corp., Ltd. Specification of Thermoelectric Module TEC1-01703 [Електронний ресурс]. 2022. 3 р. Режим доступу: https://www.thermonamic.com/Pro_View.asp?Id=806

18. Kyrychenko O., Golubieva S., Morneva M. Modeling of Thermoelectric Modules with Thermal Stress Damping for Transport Electrical Equipment. 2023 IEEE 5th International Conference on Modern Electrical and Energy System (MEES, IEEE Scopus), Kremenchuk, Ukraine, 2023, pp. 1-6. DOI: <https://doi.org/10.1109/MEES61502.2023.10402432>
19. Кириченко О.С. Порівняльний аналіз характеристик термоелектричних модулів з різними геометричними формами напівпровідників для електрообладнання транспорту. Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки. Київ: ТНУ ім. В.І. Вернадського, 2023. Том 34 (73). № 1. С. 256-263. DOI: <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.1/39>
20. Тараненко С.В., Кириченко О.С., Пріступа С.В., Голубева С.М. Демпфування термічних напружень в термоелектричних модулях суднового електрообладнання. Водний транспорт. Збірник наукових праць Державного університету інфраструктури та технологій. – К.: ДУІТ, 2024. Вип. 1 (39). С. 69-82. DOI: <https://doi.org/10.33298/2226-8553.2024.1.39.07>
21. Кириченко О.С., Костюченко В.І., Захаров Д.О. Моделювання стаціонарних теплових полів струмопровідних шин різного профілю. Енергетика та комп'ютерно-інтегровані технології в АПК: науково-технічний журнал. Харків: ХНТУСГ ім. Петра Василенка, 2017. № 1 (6). С. 60-63.
22. Zienkiewicz O.C., Taylor R.L., Zhu J.Z. The Finite Element Method: Its Basis and Fundamentals. 7th edition. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2013. 756 p.
23. Logan D.L. A First Course in the Finite Element Method. 6th edition. Boston: Cengage Learning, 2017. 944 p.
24. Reddy J.N. An Introduction to the Finite Element Method. 3rd edition. New York: McGraw-Hill, 2005. 684 p.
25. Fish J., Belytschko T. A First Course in Finite Elements. Hoboken: Wiley, 2007. 336 p. DOI: <https://doi.org/10.1002/9780470510858>
26. Memon S. (Ed.) Advanced Thermoelectric Materials for Energy Harvesting Applications. London: IntechOpen, 2019. 142 p. DOI: <https://doi.org/10.5772/intechopen.89640>
27. Snyder G.J., Toberer E.S. Complex thermoelectric materials. Nature Materials, 2008. 7, pp. 105-114. DOI: <https://doi.org/10.1038/nmat2090>

REFERENCES

1. Anatyshuk, L. I. (2003). Termoelektryka: termoelektrychni peretvoriuvachi enerhii: termoelementy. Elementna baza termoelektryky [Thermoelectricity: thermoelectric energy converters: thermoelements. Element base of thermoelectricity] (Vol. 2). Chernivtsi: Instytut termoelektryky NAN Ukrainy ta MON Ukrainy.
2. Anatyshuk, L. I., & Semeniuk, V. O. (1992). Optymal'ne keruvannia vlastyvostiamy termoelektrychnykh materialiv i prykladiv [Optimal control of properties of thermoelectric materials and devices]. Chernivtsi: PRUT.
3. Anatyshuk, L. I. (1979). Termoelementy i termoelektrychni prystroi [Thermoelements and thermoelectric devices]. Kyiv: Naukova dumka.
4. Goldsmid, H. J. (2016). Introduction to thermoelectricity (2nd ed.). Berlin: Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-49256-7>
5. Rowe, D. M. (Ed.). (2006). Thermoelectrics handbook: Macro to nano. Boca Raton: CRC Press.
6. Rowe, D. M. (Ed.). (1995). CRC handbook of thermoelectrics. Boca Raton: CRC Press.
7. Tymoshchuk, O. M., & Melnyk, O. V. (2013). Formuvannia mekhanizmu realizatsii lohistychnoi stratehii richkovykh portiv [Formation of the mechanism for implementing the logistics strategy of river ports]. Problemy ekonomiky, 3, 149–155.
8. Bell, L. E. (2008). Cooling, heating, generating power, and recovering waste heat with thermoelectric systems. Science, 321, 1457–1461. <https://doi.org/10.1126/science.1158899>
9. Mele, P. (2022). Recent advances in thermoelectric materials for high efficiency energy conversion and refrigeration. Basel: MDPI. <https://doi.org/10.3390/books978-3-0365-3504-3>
10. Armenakis, Y., & Chatzis, S. (2019). Waste heat recovery and electrical power production on vessels by means of TEG arrays attached on the hull below the underwater line. In IEEE Electric Ship Technologies Symposium (ESTS) (pp. 430–437). <https://doi.org/10.1109/ESTS.2019.8847849>
11. Zogogianni, C. G., Zarkadis, N. A., & Tatakis, E. C. (2016). Energy savings in marine applications using thermoelectric modules and high step-up DC/DC converter. In IET International Conference on Power Electronics, Machines and Drives (PEMD) (pp. 1–5). <https://doi.org/10.1049/cp.2016.0303>
12. Joseph, R., Jet, T. K., Yan, Q. A., & Yeong, L. M. (2016). Design of stand-alone thermoelectric power generation system for marine engine exhaust system. In IEEE IECON 2016 (pp. 4078–4084). <https://doi.org/10.1109/IECON.2016.7793238>

13. Anatyshuk, L. I., Balazyuk, V. N., Luste, O. J., & Malyshko, V. V. (2003). Studying stresses in thermoelectric cooling modules for increasing their cyclic stability. In International Conference on Thermoelectrics (ICT) (pp. 619–622). <https://doi.org/10.1109/ICT.2003.1287589>
14. Vatulia, G., Gerlici, J., Lovska, A., Fomin, O., Okorokov, A., & Pavliuchenkov, M. (2023). Experimental studies on the strength of a flatcar during shunting impacts. Applied Sciences, 13(8), 4901. <https://doi.org/10.3390/app13084901>
15. Al-Madhhachi, H., Prest, M., & Min, G. (2016). Evaluation of the convection heat transfer coefficient in a thermoelectric distillation system. In ICSAE 2016 (pp. 213–217). <https://doi.org/10.1109/ICSAE.2016.7810190>
16. Ionescu, V., & Neagu, A. A. (2023). Investigation of the energy conversion efficiency for a thermoelectric generator system with forced convection cooling. In EMES 2023 (pp. 1–4). <https://doi.org/10.1109/EMES58375.2023.10171737>
17. Thermonamic Electronics (Jiangxi) Corp., Ltd. (2022). Specification of thermoelectric module TEC1-01703. Retrieved from https://www.thermonamic.com/Pro_View.asp?Id=806
18. Kyrychenko, O., Golubieva, S., & Morneva, M. (2023). Modeling of thermoelectric modules with thermal stress damping for transport electrical equipment. In IEEE MEES 2023 (pp. 1–6). <https://doi.org/10.1109/MEES61502.2023.10402432>
19. Kyrychenko, O. S. (2023). Porivnialnyi analiz kharakterystyk termoelektrychnykh moduliv z riznyimi heometrychnymi formamy napivprovodnykiv dlia elektroobladnannia transportu [Comparative analysis of characteristics of thermoelectric modules with different semiconductor geometries for transport electrical equipment]. Vcheni zapysky Tavriiskoho natsionalnoho universytetu. Serii: Tekhnichni nauky, 34(73), 256–263. <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.1/39>
20. Taranenko, S. V., Kyrychenko, O. S., Pristupa, S. V., & Holubieva, S. M. (2024). Dempfovannia termichnykh napruzhen v termoelektrychnykh modeliakh sudnovoho elektroobladnannia [Damping of thermal stresses in thermoelectric modules of ship electrical equipment]. Vodnyi transport, 1(39), 69–82. <https://doi.org/10.33298/2226-8553.2024.1.39.07>
21. Kyrychenko, O. S., Kostiuchenko, V. I., & Zakharov, D. O. (2017). Modeliuvannia statsionarnykh teplovykh poliv strumoprovidnykh shyn riznogo profilu [Modeling of stationary thermal fields of busbars of different profiles]. Enerhetyka ta kompiuterno-intehrovani tekhnolohii v APK, 1(6), 60–63.
22. Zienkiewicz, O. C., Taylor, R. L., & Zhu, J. Z. (2013). The finite element method: Its basis and fundamentals (7th ed.). Oxford: Butterworth-Heinemann.
23. Logan, D. L. (2017). A first course in the finite element method (6th ed.). Boston: Cengage Learning.
24. Reddy, J. N. (2005). An introduction to the finite element method (3rd ed.). New York: McGraw-Hill.
25. Fish, J., & Belytschko, T. (2007). A first course in finite elements. Hoboken: Wiley. <https://doi.org/10.1002/9780470510858>
26. Memon, S. (Ed.). (2019). Advanced thermoelectric materials for energy harvesting applications. London: IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.89640>
27. Snyder, G. J., & Toberer, E. S. (2008). Complex thermoelectric materials. Nature Materials, 7, 105–114. <https://doi.org/10.1038/nmat2090>

Kyrychenko O.S.

ANALYSIS OF THE OPERATING CHARACTERISTICS OF A MINIATURE THERMOELECTRIC MODULE FOR SHIPBOARD POWER AND NAVIGATION SYSTEMS

This work presents the design of a thermoelectric module for ship power and navigation systems based on the TESI-01703 module. Mathematical equations are presented for analyzing the operational characteristics of the module during electrical, thermal and mechanical processes. A computer-aided design (CAD) system is used to design the geometry of the thermoelectric module, and a specialized finite element analysis software environment is used to calculate the main operational characteristics. The designed thermoelectric module has overall dimensions of $15 \times 15 \times 4.2$ mm, it contains 18 P-type semiconductors and 18 N-type semiconductors, 37 metal interconnect plates. Based on this, a thermoelectric circuit of 35 contact connections between semiconductors, which form 18 thermoelectric pairs, was created. The overall dimensions of the active zone of the designed thermoelectric module (U-shaped circuit) are $12 \times 12 \times 2.6$ mm. The calculation was performed numerically with selected boundary conditions for the electrical, thermal and mechanical parts. In the model, the module is cooled by forced convection using a fan cooling method at a heat transfer coefficient $h=50$

W/(m²·K) and a convection temperature $t_{amb}=25$ °C. Using computer simulation, the distribution of the main parameters of the model at a current of 3.3 A was obtained. These parameters include electric voltage, temperature, electric current density, electric field strength, Joule heating, heat flux density, mechanical stresses and deformations. During the simulation, areas were identified where temperature, mechanical stresses and deformations have increased values. Also, graphs of the dependences of operating parameters on the current when it changes from 0 to 3.5 A were constructed. These graphs show how the electric voltage, temperature, current density, electric field strength, Joule heating, heat flux density, mechanical stresses and deformations change with increasing current. Analysis of the obtained data allowed us to establish the nonlinear nature of the dependences of operating parameters on the current. The limit operating modes of the module were determined, at which its efficiency, thermal stability and mechanical reliability as part of ship systems are ensured.

Keywords: *Peltier effect, thermoelectric module, shipboard systems, design, numerical modeling, electro-thermo-mechanical processes, operating parameters*

Стаття прийнята 10.02.2026

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЕКСПЛУАТАЦІЇ СУДЕН-КОНТЕЙНЕРОВОЗІВ ПІД ЧАС ТРАНСОКЕАНСЬКИХ ПЕРЕХОДІВ НА ОСНОВІ АДАПТИВНОЇ КОРЕКЦІЇ КУРСУ

Проведено аналіз особливостей експлуатації контейнеровозів під час трансокеанських переходів в умовах впливу змінних гідрометеорологічних факторів. Встановлено, що однією з ключових причин зниження ефективності експлуатації є відхилення судна від заданої траєкторії руху під впливом вітру, течій та хвиль, що призводить до збільшення витрат палива, тривалості рейсу та підвищення навігаційних ризиків. Показано, що традиційні методи утримання курсу, які базуються на періодичній корекції, не забезпечують необхідного рівня адаптивності в умовах невизначеності та динамічної зміни зовнішнього середовища. Обґрунтовано доцільність переходу до проактивних підходів управління рухом судна, які базуються на інтеграції сучасних навігаційних систем із зовнішніми джерелами даних. У роботі запропоновано метод адаптивної корекції курсу контейнеровоза, який передбачає безперервний аналіз навігаційної ситуації з використанням даних глобальних навігаційних супутникових систем (GNSS), електронних картографічних систем (ECDIS), а також інформації з погодних та океанографічних сервісів. Особливу увагу приділено використанню даних міжнародних центрів прогнозування, зокрема ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) та NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration), що дозволяє враховувати прогнози зміни зовнішніх умов у процесі управління рухом судна. Запропонований підхід доповнено використанням методів інтелектуального аналізу даних для виявлення закономірностей впливу зовнішніх факторів на відхилення судна від маршруту та оптимізації параметрів руху. Розроблено концепцію адаптивного коригування курсу, яка забезпечує мінімізацію відхилення від заданої траєкторії з урахуванням енергетичної ефективності руху. Показано, що впровадження адаптивної корекції курсу є особливо актуальним в умовах зростання світових цін на паливо та посилення екологічних вимог, зокрема в межах зон контролю викидів (ECA), де оптимізація маршруту дозволяє зменшити витрати на експлуатацію та забезпечити відповідність міжнародним стандартам.

Отримані результати підтверджують доцільність інтеграції адаптивних алгоритмів управління в сучасні навігаційні системи та системи підтримки прийняття рішень судноводія, що забезпечує підвищення точності руху судна, зниження витрат палива, покращення економічних показників експлуатації та підвищення рівня безпеки судноплавства.

Ключові слова: адаптивна корекція курсу, безпека судноплавства, ефективність експлуатації, зовнішні збурення, морський транспорт, навігація, судно-контейнеровоз, траєкторія руху, ECDIS, GNSS.

Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями. Морський та внутрішній водний транспорт відіграє ключову роль у забезпеченні ефективного функціонування світової логістичної системи та забезпечує стабільність глобальних логістичних процесів, при цьому значна частка вантажоперевезень здійснюється контейнеровозами на трансокеанських маршрутах. Зі збільшенням розмірів суден та інтенсифікацією перевезень зростають вимоги до ефективності їх експлуатації, що безпосередньо пов'язано з точністю дотримання заданої траєкторії руху.

У процесі трансокеанських переходів судно постійно піддається впливу зовнішніх факторів, таких як вітер, течії та хвилювання, що призводить до відхилення від курсу та необхідності його

корекції [1-3]. Традиційні методи управління рухом не забезпечують достатнього рівня адаптивності до змінних умов, що негативно впливає на витрати палива, тривалість рейсу та рівень безпеки [4-6].

Таким чином, актуальним є завдання розробки методів адаптивної корекції курсу, які дозволяють підвищити ефективність експлуатації суден-контейнеровозів в умовах невизначеностей.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Сучасні дослідження в галузі судноводіння та управління рухом морських суден спрямовані на підвищення точності навігації, ефективності експлуатації та безпеки судноплавства. Водночас, значна увага приділяється розвитку цифрових навігаційних технологій, інтегрованих інформаційних систем та алгоритмів оптимального управління, які забезпечують більш точне визначення параметрів руху судна та підтримку прийняття рішень судноводієм [7-9].

У наукових публікаціях широко розглядаються методи утримання курсу, що базуються на класичних підходах автоматичного регулювання, зокрема використання пропорційно-інтегрально-диференційних принципів керування, а також на методах оптимального управління, спрямованих на мінімізацію відхилення судна від заданої траєкторії. Окремий напрям досліджень пов'язаний із розробкою алгоритмів планування маршруту та оптимізації траєкторії руху суден з урахуванням обмежень навігаційного середовища. Значна частина досліджень присвячена врахуванню впливу зовнішніх збурень, таких як вітер, течії та хвильові процеси [10-12]. У межах цих робіт розробляються математичні моделі руху суден, що дозволяють оцінювати вплив гідродинамічних та метеорологічних факторів на курсову стійкість і точність руху [13-15]. Також досліджуються методи прогнозування траєкторій, які базуються на статистичних та аналітичних підходах [16-18].

Окрему групу становлять дослідження, присвячені оптимізації маршрутів суден з урахуванням погодних умов. Такі підходи дозволяють формувати більш ефективні траєкторії руху, що мінімізують вплив несприятливих факторів та сприяють зниженню витрат палива. Проте у більшості випадків ці рішення застосовуються на етапі попереднього планування рейсу та не передбачають динамічної корекції маршруту в процесі руху судна [19-21]. У сучасних наукових роботах також спостерігається тенденція до використання методів інтелектуального аналізу даних, які дозволяють обробляти великі обсяги інформації та виявляти закономірності впливу зовнішніх факторів на рух судна [22-24]. Це створює передумови для формування більш гнучких підходів до управління, орієнтованих на адаптацію до змінних умов експлуатації.

Разом з тим, проведений аналіз показує, що більшість існуючих рішень орієнтовані на умови відносної стабільності зовнішнього середовища або мають дискретний характер прийняття рішень. У випадку трансокеанських переходів, де вплив гідрометеорологічних факторів має виражений динамічний характер, такі підходи виявляються недостатньо ефективними. Крім того, недостатньо розробленими залишаються питання безперервної адаптації параметрів руху судна з урахуванням прогнозованих змін зовнішніх умов, а також інтеграції різнорідних джерел інформації в єдину систему підтримки прийняття рішень. Це свідчить про наявність нерозв'язаного науково-практичного завдання, що зумовлює необхідність розробки адаптивних методів управління рухом суден.

Наведений аналіз свідчить, що актуальним є створення підходів, які поєднують між собою аналіз навігаційної інформації, прогнозування зовнішніх впливів та адаптивну корекцію курсу. Саме це дозволить підвищити ефективність експлуатації суден-контейнеровозів, знизити витрати палива та забезпечити належний рівень безпеки судноплавства.

Формулювання цілей статті. Метою статті є розробка науково обґрунтованого методу підвищення ефективності експлуатації суден-контейнеровозів під час трансокеанських переходів на основі адаптивної корекції курсу з урахуванням впливу гідрометеорологічних факторів та невизначеностей зовнішнього середовища.

Виклад основного матеріалу. Функціонування сучасних морських портів в умовах зростаючої інтенсивності міжнародних вантажопотоків вимагає від адміністрацій та операторів забезпечення безперервного і безпечного судноплавства. Ефективність експлуатації суден-

контейнеровозів під час трансокеанських переходів визначається сукупністю технічних, навігаційних та економічних факторів, серед яких важливу роль відіграє здатність судна дотримуватись оптимальної траєкторії руху в умовах змінного зовнішнього середовища. У сучасних умовах інтенсифікації морських перевезень навіть незначні відхилення від запланованого маршруту можуть призводити до суттєвих економічних втрат, пов'язаних зі збільшенням витрат палива, тривалості рейсу та зниженням загальної ефективності експлуатації судна [25-27].

Однією з особливостей суден-контейнеровозів є значна площа надводної частини, яка формує підвищену чутливість до впливу вітрового навантаження. У поєднанні з океанічними течіями та хвильовими процесами це призводить до систематичного відхилення судна від заданого курсу. Традиційні підходи до управління рухом базуються на періодичній корекції курсу за результатами оцінки фактичного положення судна, що має реактивний характер і не дозволяє ефективно враховувати динамічні зміни зовнішніх умов [28-30]. У сучасній практиці судноводіння відбувається перехід до проактивних підходів управління, що базуються на інтеграції навігаційних систем із глобальними джерелами даних та використанні інтелектуального аналізу інформації. До таких джерел належать погодні та океанографічні сервіси, зокрема European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF), Європейський центр середньострокових прогнозів погоди, National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) та Національне управління океанічних і атмосферних досліджень США. Використання цих сервісів дозволяє отримувати високоточні прогнози вітру, хвиль і течій та враховувати їх у процесі управління рухом судна. Інтеграція навігаційних систем (GNSS, ECDIS, AIS) з погодними сервісами формує єдине інформаційне середовище, у якому здійснюється безперервний аналіз поточного положення судна, параметрів його руху та впливу на нього зовнішніх факторів [31-33]. Це створює передумови для реалізації адаптивної корекції курсу, яка передбачає не періодичне, а безперервне уточнення траєкторії руху з урахуванням прогнозованих змін навігаційної обстановки.

Сутність адаптивної корекції курсу полягає у переході від реактивного управління до прогнозно-орієнтованого, коли рішення щодо зміни курсу приймаються не після виникнення значного відхилення, а на основі аналізу тенденцій його формування. Такий підхід дозволяє мінімізувати амплітуду відхилень, зменшити кількість маневрів та забезпечити більш стабільний режим руху судна. Визначальним елементом реалізації цього підходу є використання методів інтелектуального аналізу даних, які дозволяють обробляти великі обсяги інформації, отриманої з різних джерел, та виявляти приховані закономірності впливу зовнішніх факторів на рух судна. На основі статистичних даних рейсів, метеорологічних умов та експлуатаційних параметрів можуть формуватися адаптивні моделі, здатні прогнозувати поведінку судна-контейнеровозу та оптимізувати параметри його руху.

Особливого значення цей підхід набуває в умовах нестабільної динаміки світових цін на нафту та бункерне паливо [34, 35]. У сучасних економічних умовах витрати на паливо становлять значну частину експлуатаційних витрат судноплавних компаній, що робить питання їх мінімізації критично важливим для забезпечення конкурентоспроможності перевезень. Адаптація курсу судна з урахуванням погодних умов та океанографічних факторів дозволяє уникати зон із підвищеним опором руху, оптимізувати швидкісний режим та, як наслідок, зменшувати витрати палива [36, 37].

Таким чином, адаптивна корекція курсу виступає не лише як інструмент підвищення безпеки судноплавства, але також й як ефективний механізм оптимізації комерційної складової експлуатації контейнеровозів.

Практична реалізація запропонованого підходу передбачає інтеграцію алгоритмів адаптивного управління у системи підтримки прийняття рішень судноводія. Такі системи можуть функціонувати у вигляді модулів, інтегрованих у ECDIS або окремих програмних комплексів, що аналізують дані в режимі реального часу та формують рекомендації щодо зміни курсу або корекції маршруту. Додатковим напрямом розвитку є використання концепції цифрового двійника судна, що дозволяє створити віртуальну модель руху контейнеровоза з урахуванням його індивідуальних характеристик та зовнішніх умов. Це дає можливість моделювати різні сценарії руху та обирати оптимальний варіант ще до фактичної зміни курсу.

На рис. 1 наведено приклад вибору адаптивного маршруту з урахуванням гідрометеорологічних умов на момент виходу судна з порту Наурпойнт до порту призначення Hong Kong. Запропонована система здійснює прогнозування сумарних експлуатаційних витрат залежно від обраного маршруту з урахуванням впливу погодних факторів, зокрема вітру, хвиль та течій. З наведеного прикладу можна зробити висновок, що найкоротший маршрут (позначений синім кольором) не є найбільш економічно доцільним, незважаючи на те, що його довжина є меншою більш ніж на 150 морських миль порівняно з альтернативними варіантами. Це пояснюється значним впливом несприятливих погодних умов на окремих ділянках маршруту, що призводить до збільшення витрат палива та зниження ефективності руху судна. Запропонована система виконує аналіз погодних умов у короткостроковому часовому інтервалі та оцінює їхній вплив на параметри руху судна. На основі цього формується адаптивний маршрут, який забезпечує більш економічний та безпечний перехід, навіть за умови збільшення загальної довжини шляху. Порівняння економічного впливу обраних маршрутів наведено на рис. 2, де представлено оцінку витрат палива та експлуатаційних показників залежно від траєкторії руху судна.

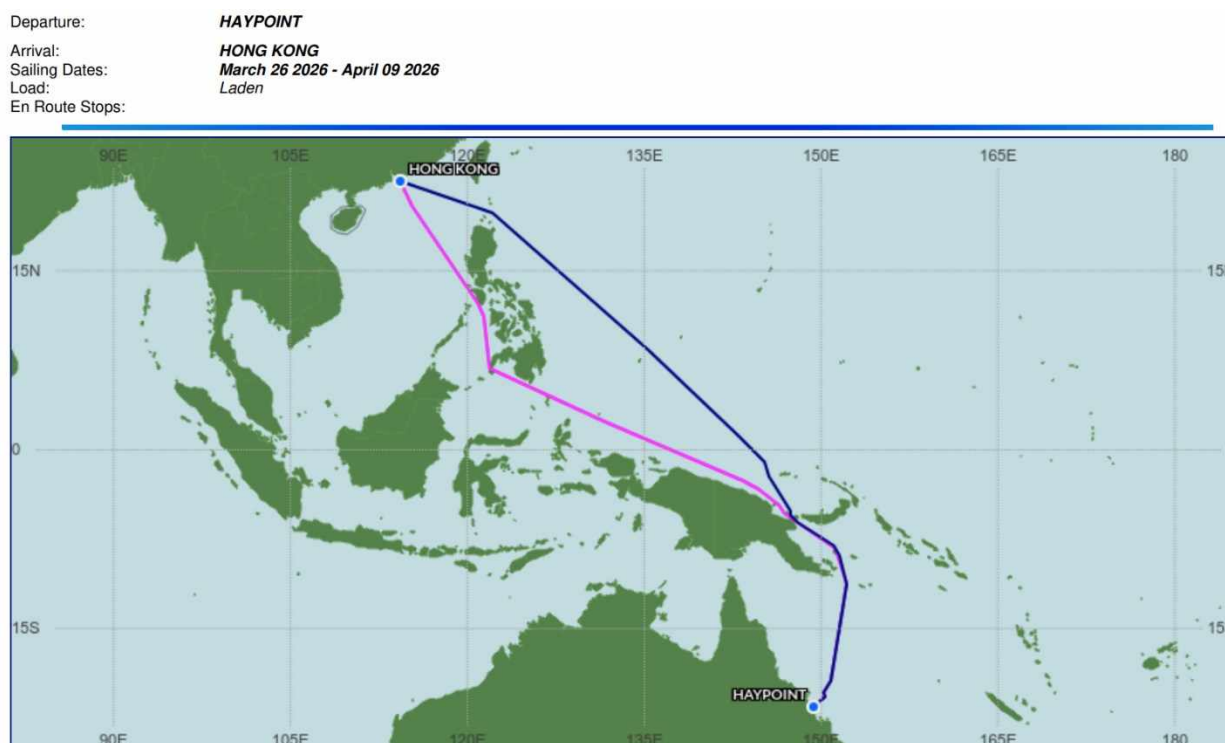


Рисунок 1 – Прогнозування адаптивного маршруту судна за напрямком Наурпойнт - Hong Kong

Voyage Estimates									
Route Comparison <small>Calculations are based on straight CP TERMS. Speed and Cons allowances are not included.</small>	Distance (NM)	Time (HRS) Days	ETA (UTC)		Consumption			ECA Time Dist	
			AvgSpd Wx/Cur Factor (kt)		FO (MT)	DO (MT)			
			TOTAL	ME		AUX			
●●● Actual Route CP Spd: 11.80kt CP Cons: 26.00 FO / 0.05 DO	3,748.2	323.7 13.5	09 Apr 09:44 11.58 -0.10 / 0.11		332.4	0.6	0.0	0.6	0.0 0.0
●●● Master's Intended Route CP Spd: 11.80kt CP Cons: 26.00 FO / 0.05 DO	3,882.3	337.3 14.1	09 Apr 23:21 11.51 -0.10 / 0.03		347.1	0.7	0.0	0.7	0.0 0.0

Cost Summary	Total Voyage Cost	Hire Cost	Fuel Cost				Emission CO2 (MT)	CII Rating Scale : Score
			FO (USD)	DO (USD)				
				TOTAL	ME	AUX		
●●● Act Route 11.80kt	\$529,106	\$215,814	\$312,280	\$1,012	\$0	\$1,012	1,037.1	B : 0.91
●●● Alt Route 11.80kt	\$552,075	\$224,888	\$326,129	\$1,059	\$0	\$1,059	1,083.1	B : 0.92

Cost Assumptions

- Sailing Time Cost 16000.08 USD per day (667 USD per hour)
- FO Cost 940 USD per metric ton
- DO Cost 1581 USD per metric ton

Рисунок 2 – Порівняння економічного впливу обраних маршрутів Наурпойнт - Hong Kong

Подібний підхід до аналізу маршрутів дозволяє наочно продемонструвати переваги адаптивного управління, зокрема зменшення відхилення від заданого курсу, скорочення часу переходу та оптимізацію витрат палива.

На рис. 3 наведено приклад вибору адаптивного маршруту з урахуванням гідрометеорологічних умов та обмежень, пов'язаних із плаванням у зонах контролю викидів (ЕСА), на переході з порту New Orleans до порту призначення Norfolk. Запропонована система здійснює прогнозування сумарних експлуатаційних витрат залежно від обраного маршруту з урахуванням впливу погодних факторів, а також підвищених витрат, пов'язаних із використанням низькосірчистого палива в межах ЕСА-зон.

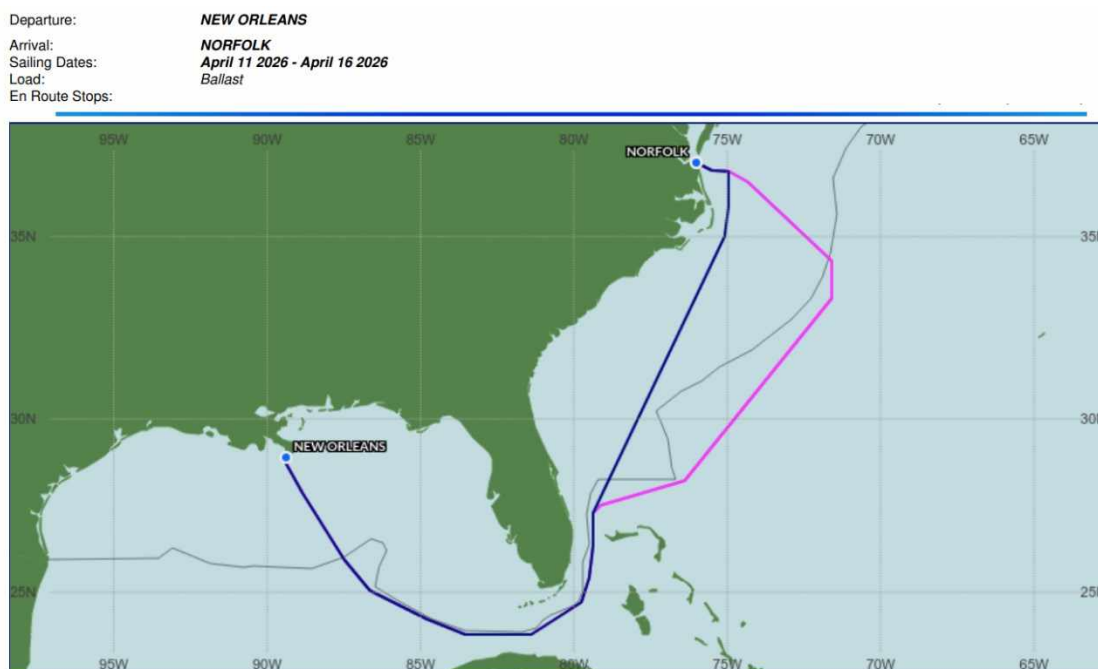


Рисунок 3 – Прогнозування адаптивного маршруту судна за напрямком New Orleans - Norfolk

Порівняння економічного впливу різних варіантів маршруту наведено на рис. 4, де представлено оцінку витрат палива та ключових експлуатаційних показників залежно від траєкторії руху судна. Аналіз наведених даних підтверджує, що вибір маршруту з урахуванням зон екологічного контролю та погодних умов дозволяє забезпечити більш економічно доцільний та безпечний режим експлуатації судна.

Voyage Estimates								
Route Comparison <small>Calculations are based on straight CP TERMS. Speed and Cons allowances are not included.</small>	Distance (NM)	Time (HRS) Days	ETA (UTC) AvgSpd Wx/Cur Factor (kt)	Consumption			ECA Time Dist	
				FO (MT)	DO (MT)			
					TOTAL	ME		AUX
●●● Actual Route CP Spd: 12.00kt CP Cons: 26.50 FO / 0.20 DO	1,518.4	129.2 5.4	16 Apr 21:13 11.75 -0.64 / 0.37	72.9	70.9	69.8	1.1	67.3 807.6
●●● Comparison Route/Speed CP Spd: 12.00kt CP Cons: 26.50 FO / 0.20 DO	1,746.1	151.7 6.3	17 Apr 19:39 11.51 -0.65 / 0.13	128.0	40.7	39.5	1.3	39.1 469.0

Cost Summary	Total Voyage Cost	Hire Cost	Fuel Cost			Emission CO2 (MT)	CII Rating Scale : Score <small>Not included into service</small>	
			FO (USD)	DO (USD)				
				TOTAL	ME			AUX
●●● Act Route 12.00kt	\$314,020	\$112,495	\$70,839	\$130,686	\$128,695	\$1,991	450.3	N/A
●●● Alt Route 12.00kt	\$331,487	\$132,022	\$124,416	\$75,049	\$72,726	\$2,323	526.9	N/A

Cost Assumptions	
● Sailing Time Cost	20893.68 USD per day (871 USD per hour)
● FO Cost	972 USD per metric ton
● DO Cost	1844 USD per metric ton

Рисунок 4 – Порівняння економічного впливу обраних маршрутів New Orleans- Norfolk

Узагальнюючи результати аналізу, можна стверджувати, що впровадження адаптивних алгоритмів управління рухом контейнеровозів дозволяє перейти до нового рівня організації судноплавства, у якому поєднуються безпека, ефективність та економічна доцільність. Використання сучасних навігаційних систем, глобальних погодних сервісів та методів інтелектуального аналізу даних створює основу для формування інтелектуальних систем управління, здатних забезпечити оптимальний режим руху судна в умовах невизначеності.

Подальший розвиток цього напрямку пов'язаний із розширенням функціональних можливостей систем за рахунок глибшої інтеграції з глобальними інформаційними платформами, підвищення точності прогнозування зовнішніх факторів та впровадження напівавтономних технологій судноводіння.

Висновки. У роботі розроблено метод підвищення ефективності експлуатації контейнеровозів при трансокеанських переходах на основі адаптивної корекції курсу. Запропонований підхід враховує вплив зовнішніх збурень та дозволяє забезпечити більш точне дотримання заданої траєкторії руху. Впровадження запропонованих рішень для суден-контейнеровозів сприяє скороченню тривалості рейсу (що прискорює перевезення вантажів) та зниженню витрати палива (що підвищує економічність та екологічність експлуатації).

Використання адаптивних алгоритмів у системах навігації створює передумови для розвитку інтелектуальних систем управління суднами та підвищення ефективності морських перевезень.

Подальші дослідження доцільно спрямувати на інтеграцію методів машинного навчання для підвищення точності прогнозування зовнішніх впливів.

ЛІТЕРАТУРА

1. Левченко О.В. Синтез варіантів дій судноводія у небезпечних ситуаціях з урахуванням часових та ресурсних обмежень у суднових СППР // Водний транспорт: Збірник наукових праць. – 2021. – Вип. 3(34). – С. 89-98. doi.org/10.33298/2226-8553/2021.3.34.10.
2. Левінський М.В., Левінський В.М. Вибір параметрів системи стабілізації курсу судна при дії водно-хвильових збурень // Автоматизація суднових технічних засобів : наук.-техн. зб. – 2020. – Вип. 26. – С.27-40. DOI: 10.31653/1819-3293-2020-1-26-27-40.
3. Sagin S.V., Sagin S.S., Madey V. Analysis of methods of managing the environmental safety of the navigation passage of ships of maritime transport // Technology Audit and Production Reserves. – 2023. – № 4 (3(72)). – P. 33–42. doi: <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2023.286039>.
4. Сагін С.В., Сагін С.С. Визначення методу управління рухом суден морського транспорту під час забезпечення їх безпечного розходження // Водний транспорт: Збірник наукових праць. – 2023. – Вип. 2(38). – С. 187-198. doi.org/10.33298/2226-8553/2023.2.38.20.
5. Ворохобін І.І., Бурмака І.О., Кулаков М.О., Петриченко О.О. Спосіб департаментизації електронної карти при зовнішньому управлінні розходження суден в зоні відповідальності СУРС // Судноводіння: науково-технічний збірник. – 2021. – Вип. 32. – Одеса : НУ «ОМА». – С. 26-33. DOI: 10.31653/2306-5761.32.2021.26-33.
6. Бурмака І.А., Ворохобін І.І., Федоров Д.Б. Учет динамики судов при автоматическом выборе маневра расхождения уклонением одного судна и пассивным торможением другого // Судноводіння : науково-технічний збірник. – 2021. – Вип. 31. – С. 80-88. DOI: 10.31653/2306-5761.31.2021.80-88.
7. Тимошко О.І., Левченко О.В., Руденко В.М., Сітков О.М. Використання гібридних роботизованих комплексів для інспекції морських нафтогазових об'єктів // Водний транспорт: Збірник наукових праць. – 2024. – Вип. 2(40). – С. 6-22. doi.org/10.33298/2226-8553.2024.2.40.01.
8. Petrychenko O. Levynskiy M., Prytula D., Vynohradova A. Fuel options for the future: a comparative overview of properties and prospects // Transport Systems and Technologies. – 2023. – № 41. – P. 96-106. <https://doi.org/10.32703/2617-9059-2023-41-8>.
9. Sagin S., Kuropyatnyk O., Sagin A., Tkachenko I., Fomin O., Píštěk V., Kučera P. Ensuring the Environmental Friendliness of Drillships during Their Operation in Special Ecological Regions of Northern Europe // Journal Marine Science and Engineering. – 2022. – Vol. 10(9). – P. 1331. <https://doi.org/10.3390/jmse10091331>.
10. Burmaka I., Vorokhobin I., Melnyk O., Burmaka O., Sagin S. Method of Prompt Evasive Maneuver Selection to Alter Ship's Course or Speed // Transactions on Maritime Science. – 2022. – Vol.11(1). – P. 1-9. <https://doi.org/10.7225/toms.v11.n01.w01>.
11. Sagin S., Kuropyatnyk O., Tkachenko I. Ensuring the environmental friendliness of marine diesel engines of specialized ships // Суднові енергетичні установки : науково-технічний збірник. – 2022. – Вип. 45. – Одеса : НУ «ОМА». – С. 5-16. doi: 10.31653/smf45.2022.5-16.
12. Sagin S., Sagin A. Development of method for managing risk factors for emergency situations when using low-sulfur content fuel in marine diesel engines // Technology Audit and Production Reserves. – 2023. – № 5 (1(73)). – P. 37–43. doi: <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2023.290198>.
13. Тимошук О.М., Мельник О.В. Аналіз можливості використання маневру розходження зміною курсу // Водний транспорт: Збірник наукових праць. – 2023. – Вип. 1(37). – С. 96-102. doi.org/10.33298/2226-8553.2023.1.37.10.
14. Левченко О.В., Маранов О.В. Інтеграція комбінованих систем підтримки ухвалення рішень для забезпечення навігаційної безпеки та оптимізації руху суден у портових акваторіях // Водний транспорт: Збірник наукових праць. – 2025. – Вип. 1(42). – С. 99-108. doi.org/10.33298/2226-8553.2025.1.42.14.
15. Левченко О.В., Ганношина І.М., Остапчук Т.В. Система інформаційного забезпечення процесів прийняття рішень на мості судна // Водний транспорт: Збірник наукових праць. – 2025. – Вип. 1(42). – С. 24-27. doi.org/10.33298/2226-8553.2025.1.42.04.
16. Levchenko O., Dvulit Z., Kozlenko O. Features of human resource management at railway transport enterprises // Efektyvna Ekonomika. – 2020. – № 6. – P. 1-7. doi: 10.32702/2307-2105-2020.6.72.
17. Shpak N., Dvulit Z., Maznyk L., Sroka W., Zaverbnyj A., Levchenko O. Optimisation of the export structure in transport companies: a case study // Central European business review. – 2023. – Vol. 12. – Iss. 1. – P. 115-132. <https://doi.org/10.18267/j.cebr.312>.
18. Сагін С.В., Сагін А.С. Контроль та діагностування надійності та економічності дизелів морських та річкових засобів транспорту // Суднові енергетичні установки : науково-технічний збірник. – 2023. – Вип. 46. – С. 118-131. doi: 10.31653/smf46.2023.118-131.

19. Sagin S., Haichenia O., Karianskyi S., Kuropyatnyk O., Razinkin R., Sagin A., Volkov O. Improving Green Shipping by Using Alternative Fuels in Ship Diesel Engines // *Journal of Marine Science and Engineering*. – 2025. – № 13. – P. 589. <https://doi.org/10.3390/jmse1303058924>.

20. Двуліт З.П., Тимошук О.М., Левченко О.В. Вдосконалення бізнес-процесів сучасних судноплавних компаній в сфері міжнародних морських вантажних перевезень // *Менеджмент та підприємництво в Україні: етапи становлення і проблеми розвитку*. – 2021. – № 3(1). – С. 1-12.

21. Сагін А.С., Сагін С.В. Експериментальне визначення оптимальних фаз подачі палива в циліндр судових дизелів // *Водний транспорт. Збірник наукових праць*. – 2024. – Вип. 1(39). – С. 206-215. doi.org/10.33298/2226-8553.2024.1.39.21.

22. Сагін С.В., Колегаєв М.О., Парменова Д.Г. Зниження ризиків інвазійного забруднення морських акваторії під час експлуатації суден морського та внутрішнього водного транспорту // *Суднові енергетичні установки : науково-технічний збірник*. – 2023. – Вип. 47. – С. 131-147. [doi: 10.31653/smf47.2023.131-147](https://doi.org/10.31653/smf47.2023.131-147).

23. Сагін С.В., Заблоцький Ю.В., Сагін А.С. Підвищення економічності роботи судових середньооберткових дизелів // *Водний транспорт. Збірник наукових праць*. – 2025. – Вип. 1(42). – С. 166-179. doi.org/10.33298/2226-8553.2025.1.42.20.

24. Тимошук О.М., Дакі О.А., Бойко О.А., Карадобрій Т.А. Аналітичний огляд адаптивних систем керування судном та шляхи їх побудови // *Водний транспорт. Збірник наукових праць*. – 2020. – Вип. 3(31). – С. 120-125. <https://doi.org/10.33298/2226-8553/2020.3.31.13>.

25. Сагін С.В., Столярик Т.О. Динаміка судових дизелів під час використання моторних мастил з різними структурними характеристиками // *Автоматизація судових технічних засобів : наук. -техн. зб.* – 2021. – Вип. 27. – С. 108-119. DOI: 10.31653/1819-3293-2021-1-27-108-119.

26. Сагін С.В., Заблоцький Ю.В. Діагностування технічного стану судових енергетичних установок засобів водного транспорту // *Водний транспорт*. – 2023. – № 2(38). – С. 164-175. doi.org/10.33298/2226-8553.2023.2.38.18.

27. Левченко О.В., Маранов О.В. Поточний стан дослідження питання прогнозування маневреності суден та їхньої гідродинаміки в обмежених водах // *Водний транспорт: Збірник наукових праць*. – 2025. – Вип. 1(42). – С. 55-60. doi.org/10.33298/2226-8553.2025.1.42.08.

28. Тимошук О.М., Боріна М.В. Дослідження методів підвищення екологічності судових енергетичних установок у водному середовищі // *Водний транспорт. Збірник наукових праць*. – 2022. – Вип. 2(36). – С. 240-252. doi.org/10.33298/2226-8553.2022.2.36.21.

29. Sagin S.V., Sagin S.S., Madey V. Analysis of methods of managing the environmental safety of the navigation passage of ships of maritime transport // *Technology Audit and Production Reserves*. – 2023. – № 4 (3(72)). – P. 33–42. [doi: https://doi.org/10.15587/2706-5448.2023.286039](https://doi.org/10.15587/2706-5448.2023.286039).

30. Сагін С.В., Бондар С.А. Розробка методу діагностування технічного стану елементів головної енергетичної установки засобів водного транспорту // *Водний транспорт*. – 2023. – № 2(38). – С. 175-186. doi.org/10.33298/2226-8553.2023.2.38.19.

31. Сагін С.В., Сагін С.С. Використання штучного інтелекту в ситуаціях надмірного зближення суден // *Водний транспорт. Збірник наукових праць*. – 2024. – Вип. 1(39). – С. 215-225. doi.org/10.33298/2226-8553.2024.1.39.22.

32. Сагін С.С., Ворохобін І.І. Мінімізація ризику виникнення небезпеки морських подій під час навігаційних переходів суден морського транспорту // *Водний транспорт: Збірник наукових праць*. – 2024. – Вип. 2(40). – С. 76-88.

33. Сагін С.В., Бондар С.А., Столярик Т.О. Оцінка безвідмовності судових дизелів за технічним станом моторного мастила циркуляційних систем мащення // *Водний транспорт*. – 2023. – № 1(37). – С. 59-70. doi.org/10.33298/2226-8553.2023.1.37.06.

34. Сагін С. В. Повышение надежности работы прецизионных пар топливной аппаратуры судовых дизелей за счет использования органических покрытий // *Вісник Одеськ. нац. мор. ун-ту*, 2018. – Вип. 4(57). – С. 109-120.

35. Сагін С.В. Зниження механічних втрат у судових середньооберткових дизелях за рахунок оптимізації роботи циркуляційних систем мащення // *Вісник Одеського національного морського університету : Зб. наук. праць*, 2020. – Вип. 1(61). – С. 87-96. [doi.org 10.47049/2226-1893-2020-1-87-96](https://doi.org/10.47049/2226-1893-2020-1-87-96).

36. Sagin S., Sagin A., Zablotskyi Y., Fomin O., Pišt'ek V., Kučera P. Method for Maintaining Technical Condition of Marine Diesel Engine Bearings // *Lubricants*/ – 2025. № 13. – P. 146. <https://doi.org/10.3390/lubricants13040146>.

37. Мадей В.В., Сагін С.В., Волков О.М. Управління процесом впорскування під час використання в судових дизелях паливних сумішей до складу яких входить паливо біологічного походження // *Водний транспорт. Збірник наукових праць*. – 2024. – Вип. 1(39). – С. 193-205. doi.org/10.33298/2226-8553.2024.1.39.20.

REFERENCES

1. Levchenko O. Synthesis of vessels' options in dangerous situations taking into account time and resource restrictions in vessel CDSS. // *Water transport*. – 2021. – № 3(34). – P. 89-98. doi.org/10.33298/2226-8553/2021.3.34.10.
2. Levynskiy M.V., Levynskiy V.M. Choosing the structure and parameters of vessel's course automatic control system under the influence of water-wave disturbances // *Automation of ship technical facilities*. – 2020. – Вип. 26. – С.27-40. DOI: 10.31653/1819-3293-2020-1-26-27-40.
3. Sagin S.V., Sagin S.S., Madey V. Analysis of methods of managing the environmental safety of the navigation passage of ships of maritime transport // *Technology Audit and Production Reserves*. – 2023. – № 4 (3(72)). – P. 33-42. doi: https://doi.org/10.15587/2706-5448.2023.286039.
4. Sagin S.V., Sagin S.S., Determination of the method of controlling the movement of marine transport vessels while ensuring their safe divergences *Water transport*. – 2023. – Вип. 2(38). – С. 187-198. doi.org/10.33298/2226-8553/2023.2.38.20.
5. Vorokhobin I., Burmaka I., Kulakov M., Petrychenko O.A Method of electronic chart departmentisation under external control of vessels' passing in VTS areas // *Shipping & Navigation: Research journal*. – 2021. – Vol.32. – P.26-33. doi.org/10.31653/2306-5761.32.2021.26-33.
6. Burmaka I., Vorokhobin I., Fedorov D. Account dynamics of ships at the automatic choice of manoeuvre of divergence by deviation of one ship and by the passive braking of the other // *Shipping & Navigation: Research journal*. – 2021. – Vol.31. – P.80-88. doi.org/10.31653/2306-5761.31.2021.80-88.
7. Tymochko O.I., Levchenko O.V., Rudenko V.M., Sitkov O.M. Use of hybrid robotic complex for inspection of marine oil and gas facilities // *Water transport*. – 2024. – Vol. 2(40). – P. 6-22. doi.org/10.33298/2226-8553.2024.2.40.01.
8. Petrychenko O. Levynskiy M., Prytula D., Vynohradova A. Fuel options for the future: a comparative overview of properties and prospects // *Transport Systems and Technologies*. – 2023. – № 41. – P. 96-106. https://doi.org/10.32703/2617-9059-2023-41-8.
9. Sagin S., Kuropyatnyk O., Sagin A., Tkachenko I., Fomin O., Píštěk V., Kučera P. Ensuring the Environmental Friendliness of Drillships during Their Operation in Special Ecological Regions of Northern Europe // *Journal Marine Science and Engineering*. – 2022. – Vol. 10(9). – P. 1331. https://doi.org/10.3390/jmse10091331.
10. Burmaka I., Vorokhobin I., Melnyk O., Burmaka O., Sagin S. Method of Prompt Evasive Manuever Selection to Alter Ship's Course or Speed // *Transactions on Maritime Science*. – 2022. – Vol. 11(1). – P. 1-9. https://doi.org/10.7225/toms.v11.n01.w01.
11. Sagin S., Kuropyatnyk O., Tkachenko I. Ensuring the environmental friendliness of marine diesel engines of specialized ships // *Ship power plants*. – 2022. – Vol. 45. – P. 5-16. doi: 10.31653/smf45.2022.5-16.
12. Sagin S., Sagin A. Development of method for managing risk factors for emergency situations when using low-sulfur content fuel in marine diesel engines // *Technology Audit and Production Reserves*. – 2023. – № 5 (1(73)). – P. 37–43. doi: https://doi.org/10.15587/2706-5448.2023.290198.
13. Tymoshchuk O., Melnyk O. Analysis of the possibility of using the divergence maneuver by changing the course // *Water Transport: Collection of scientific works*. – 2023 – Vol.1(37). – P.96-102. doi.org/10.33298/2226-8553.2023.1.37.10.
14. Levchenko O.V., Maranov O.V. Integration of combined decision support systems to ensure navigational safety and optimize vessel traffic in port areas // *Water transport*. – 2025. – № 1(42). – P. 99–108. doi.org/10.33298/2226-8553.2025.1.42.14.
15. Levchenko O.V., Hannoshyna I.M., Ostupchuk T.V. Information support system for decision-making processes on the bridge of a ship // *Water transport*. – 2025. – № 1(42). – P. 24–27. doi.org/10.33298/2226-8553.2025.1.42.04.
16. Levchenko O., Dvulit Z., Kozlenko O. Features of human resource management at railway transport enterprises // *Efektivna Ekonomika*. – 2020. – № 6. – P. 1-7. doi: 10.32702/2307-2105-2020.6.72.
17. Shpak N., Dvulit Z., Maznyk L., Sroka W., Zaverbnyj A., Levchenko O. Optimisation of the export structure in transport companies: a case study // *Central European business review*. – 2023. – Vol. 12. – Iss. 1. – P. 115-132. https://doi.org/10.18267/j.cebr.312.
18. Sagin S.V., Sagin A.S. Control and diagnosis of reliability and economy of diesel engines of sea and river means of transport // *Ship power plants*. – 2023. – Vol. 46. – P. 118-131. doi: 10.31653/smf46.2023.118-131.
19. Sagin S., Haichenia O., Karianskyi S., Kuropyatnyk O., Razinkin R., Sagin A., Volkov O. Improving Green Shipping by Using Alternative Fuels in Ship Diesel Engines // *Journal of Marine Science and Engineering*. – 2025. – № 13. – P. 589. https://doi.org/10.3390/jmse1303058924.
20. Dvulit Z.P., Tymoshchuk O.M., Levchenko O.V. Improvement of business processes in modern shipping companies in the field of international sea freight transportation // *Management and Entrepreneurship in Ukraine: the stages of formation and problems of development*. – 2021. – № 3(1). – С. 1-12.

21. Sagin A.S., Sagin S.V. Experimental determination of optimal phases of fuel supply to the cylinder of marine diesel engines // Water transport. – 2024. – Vol. 1(39). – P. 206-215. doi.org/10.33298/2226-8553.2024.1.39.21.
22. Sagin S.V., Kolegaev M.O., Parmenova D.G. Reducing the risks of invasive pollution of marine water areas during the operation of sea and inland water transport vessels // Ship power plants. – 2023. – № 47. – P. 131-147. doi: 10.31653/smf47.2023.131-147.
23. Sagin S.V., Zablotskyi Y.V. Sagin A.S. Increasing the efficiency of ship's medium-speed diesel engines // Water transport. – 2025. – Вип. 1(42). – С. 166-179. doi.org/10.33298/2226-8553.2025.1.42.20.
24. Tymoshchuk O., Daki O., Boyko O., Karadobriy T. Analytical Inspection of adaptive vessel control systems and ways of their construction // Water Transport: Collection of scientific works. – 2020. – Vol. 3(31). – P. 120-125. doi.org/10.33298/2226-8553/2020.3.31.13.
25. Sagin S.V., Stoliaryk T.O. Dynamics of marine diesel engines when using motor oils with different structural characteristics // Automation of ship facilities. – 2021. – № 27. – P. 108-119. DOI: 10.31653/1819-3293-2021-1-27-108-119.
26. Sagin S.V., Zablotskyi Yu.V. Development of a method for diagnosing the technical condition of elements of the main power plant of water transport // Water transport. – 2023. – Vol. 2(38). – P. 164-175. doi.org/10.33298/2226-8553.2023.2.38.18.
27. Levchenko O.V., Maranov O.V. The current state of research on predicting the manoeuvrability of ships and their hydrodynamics in confined waters // Water transport. – 2025. – № 1(42). – P. 55–60. doi.org/10.33298/2226-8553.2025.1.42.08.
28. Tymoshchuk O., Borina M. Research of methods of enhancing the environmental facility of ship power plants in the aquatic environment // Water transport. – 2022. – Vol. 2(36). – P. 240-252. doi.org/10.33298/2226-8553.2022.2.36.21.
29. Sagin S.V., Sagin S.S., Madey V. Analysis of methods of managing the environmental safety of the navigation passage of ships of maritime transport // Technology Audit and Production Reserves. – 2023. – № 4 (3(72)). – P. 33–42. doi: <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2023.286039>.
30. Sagin S.V., Bondar S.A. Development of a method for diagnosing the technical condition of elements of the main power plant of water transport // Water transport. – 2023. – Vol. 2(38). – P. 175-186. doi.org/10.33298/2226-8553.2023.2.38.19.
31. Sagin S.S., Sagin S.V. Use of artificial intelligence in the situations of excessive vessels approaching // Water Transport. – 2024. – № 1(39). – P. 215-225. doi.org/10.33298/2226-8553.2024.1.39.22.
32. Sagin S.S., Vorokhobin I.I. Minimizing the risk of maritime incidents during navigation passages of sea transport vessels // Water transport. – 2024. – Vol. 2(40). – P. 76-88.
33. Sagin S.V., Bondar S.A., Stoliaryk T.O. Assessment of the reliability of marine diesel engines according to the technical condition of engine oil of circulating lubrication systems // Water transport. – 2023. – Vol. 1(37). – P. 59-70. doi.org/10.33298/2226-8553.2023.1.37.06.
34. Sagin S.V. Increasing the reliability of precision pairs of marine diesel fuel equipment through the use of organic coatings // Herald of the Odessa National Maritime University. – 2018. – № 4(57). – P. 109–120.
35. Sagin S.V. Reducing mechanical losses in medium-speed marine diesel engines by optimizing the operation of circulating lubrication systems // Herald of the Odessa National Maritime University. – 2020. – № 1(61). – P. 87-96. doi.org/10.47049/2226-1893-2020-1-87-96.
36. Sagin S., Sagin A., Zablotskyi Y., Fomin O., Pišček V., Kučera P. Method for Maintaining Technical Condition of Marine Diesel Engine Bearings // Lubricants/ – 2025. № 13. – P. 146. <https://doi.org/10.3390/lubricants13040146>.
37. Madey V.V., Sagin S.V., Volkov O.M. Direction of the injection process during the use of fuel mixture that include fuel of biological origin in marine diesel engines // Water transport. – 2024. – Vol. 1(39). – P. 193-205. doi.org/10.33298/2226-8553.2024.1.39.20.

Sagin S.S., Sagin S.V.

INCREASING THE EFFICIENCY OF CONTAINER SHIP OPERATIONS DURING TRANSOCEANIC CROSSINGS BASED ON ADAPTIVE COURSE CORRECTION

The analysis of the features of container ship operation during transoceanic crossings under the influence of variable hydrometeorological factors was carried out. It was established that one of the key reasons for the decrease in operational efficiency is the deviation of the vessel from the set trajectory under the influence of wind, currents and waves, which leads to increased fuel consumption, voyage duration and increased navigational risks. It was shown that traditional methods of course maintenance, which are based on periodic correction, do not provide the necessary level of adaptability

in conditions of uncertainty and dynamic changes in the external environment. The feasibility of switching to proactive approaches to vessel traffic management, which are based on the integration of modern navigation systems with external data sources, is substantiated. The paper proposes a method for adaptive correction of the course of a container ship, which involves continuous analysis of the navigation situation using data from global navigation satellite systems (GNSS), electronic cartographic systems (ECDIS), as well as information from weather and oceanographic services. Particular attention is paid to the use of data from international forecasting centers, in particular ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) and NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration), which allows taking into account forecast changes in external conditions in the process of vessel movement management. The proposed approach is supplemented by the use of methods of intelligent data analysis to identify patterns of influence of external factors on vessel deviation from the route and optimization of movement parameters. The concept of adaptive course correction has been developed, which ensures minimization of deviation from the given trajectory taking into account the energy efficiency of movement. It is shown that the implementation of adaptive course correction is especially relevant in the context of rising world fuel prices and increasing environmental requirements, in particular within emission control areas (ECA), where route optimization allows reducing operating costs and ensuring compliance with international standards. The results obtained confirm the feasibility of integrating adaptive control algorithms into modern navigation systems and navigator decision support systems, which ensures increased accuracy of vessel movement, reduced fuel consumption, improved economic performance of operation and increased navigation safety.

Keywords: *adaptive course correction, container ship, ECDIS, external disturbances, GNSS, motion trajectory, navigation safety, navigation, operational efficiency, sea transport.*

Стаття прийнята 02.02.2026

© Сагін А.С., Заблоцький Ю.В.

ЕКСПЕДИРУВАННЯ ТА ПОСТАЧАННЯ СУДЕН В УМОВАХ БЛОКУВАННЯ МОРСЬКИХ ПРОТОК: ВИКЛИКИ, АДАПТАЦІЯ ТА ЕКОНОМІЧНІ НАСЛІДКИ

Визначено, що світове судноплавство є основою міжнародної торгівлі, забезпечуючи перевезення понад 80 % глобального товарообігу. Стійкість морських перевезень значною мірою залежить не лише від руху суден, але й від ефективності супутніх логістичних процесів, серед яких важливе місце займають експедирування та постачання суден морського транспорту. Під експедируванням суден розуміється комплекс організаційних, логістичних і координаційних заходів, спрямованих на забезпечення судна матеріально-технічними ресурсами, запасними частинами, провізією, технічним обслуговуванням та іншими необхідними засобами для безпечної та безперервної експлуатації. Сучасні системи судового постачання являють собою багаторівневі ланцюги постачання, які об'єднують судовласників, технічних менеджерів, агентів, виробників обладнання, постачальників і портову інфраструктуру. Ефективність таких систем значною мірою залежить від стабільності глобальних транспортних маршрутів та доступності основних морських транспортних коридорів. Особливу вразливість для глобальної морської логістики становлять стратегічні морські протоки, через які проходять значні обсяги світових вантажопотоків, зокрема енергетичні ресурси, сировина та контейнерні вантажі. Ці ділянки морських шляхів виконують функцію критичних у міжнародній транспортній системі, де навіть короточасні перебої або обмеження руху можуть мати масштабні наслідки для світових ланцюгів постачання. Їх часткове або повне блокування здатне порушити не лише регулярний рух флоту, але й стабільне функціонування систем постачання суден, включаючи експедирування запасних частин, бункерування, технічне обслуговування та організацію сервісних операцій у портах. У таких умовах виникають затримки в доставці критично важливих матеріалів, ускладнюється координація між учасниками логістичного ланцюга та зростає залежність від альтернативних маршрутів і транзитних хабів. Додатково спостерігається суттєве збільшення строків доставки, підвищення вартості логістичних операцій, а також зростання операційних ризиків, пов'язаних із необхідністю перенаправлення суден, зміною портів заходу та використанням більш дорогих і складних схем постачання. У сукупності ці фактори призводять до зниження ефективності морських перевезень і підвищення загальної вразливості глобальної судноплавної системи. За таких умов дослідження впливу блокування морських проток на процеси експедирування та постачання суден набуває практичної та наукової актуальності.

Ключові слова: адаптація судноплавних операторів, експедирування суден, запасні частини, ланцюги постачання, логістичні ризики, морська логістика, морський транспорт, морські транспортні коридори, операційні витрати, стійкість судноплавства, судове постачання, управління ризиками.

Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями. У сучасних умовах глобалізованої морської логістики стабільність ланцюгів постачання безпосередньо залежить від безперервності морських маршрутів, через які здійснюється не лише транспортування вантажів, але й забезпечення морських суден запасними частинами, технічними матеріалами, паливом та мастилом, а також надання сервісних послуг [1-3]. Блокування або обмеження проходу через основні транспортні коридори призводить до системних збоїв у координації постачання, зростання витрат і збільшення часу доставки, що формує суттєві ризики для безперервної експлуатації суден.

Актуальність даної проблеми зумовлена необхідністю забезпечення стійкості морських транспортних систем в умовах зростаючої геополітичної нестабільності та підвищення вразливості глобальних ланцюгів

поставки. Для судноплавних компаній та логістичних операторів критично важливим є формування адаптивних моделей експедирування, здатних функціонувати в умовах обмежень доступу до традиційних маршрутів [4-6]. Таким чином, дослідження впливу блокування морських проток має не лише наукове значення в контексті розвитку теорії морської логістики, але й практичну цінність для підвищення ефективності управління суднами морського транспорту, мінімізації операційних ризиків та оптимізації витрат у міжнародних перевезеннях.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Експедирування суден є складним багатокомпонентним процесом, що охоплює планування, закупівлю, організацію логістики, транспортування та доставку необхідних ресурсів безпосередньо на борт судна відповідно до його експлуатаційних потреб [7-9]. Цей процес на практиці включає як матеріально-технічне забезпечення (запасні частини, обладнання, витратні матеріали), також і постачання палива [10-12], мастила [13-15], провізії [16-18], а також організацію сервісного та аварійного обслуговування [19-21].

Даний процес має безперервний характер і інтегрується у загальну систему управління морським транспортом, оскільки будь-які затримки в постачанні можуть безпосередньо впливати на строки виконання рейсів, тривалість простоїв у портах та загальну економічну ефективність експлуатації судна [22-24]. Важливою особливістю експедирування є необхідність координації між великою кількістю учасників постачання, а також врахування географічних, регуляторних та часових обмежень.

Цей процес забезпечує безперервність роботи морського транспорту, підтримку технічної справності суден, дотримання вимог безпеки мореплавства, а також виконання міжнародних стандартів, встановлених класифікаційними товариствами [25-28]. В умовах сучасної глобальної логістики ефективність експедирування безпосередньо визначає рівень надійності судноплавних операцій і стійкість морських ланцюгів постачання.

Процес судового постачання є багатосторонньою системою у якій кожен учасник виконує чітко визначену функцію:

- судовласник або оператор морського судна – визначає загальну стратегію експлуатації судна, фінансує постачання та приймає ключові рішення щодо витрат і логістичних схем;
- технічний менеджер – відповідає за технічний стан судна, формує потреби в запасних частинах, контролює планове обслуговування та аварійні ремонти;
- закупівельний відділ – організовує процес закупівель, проводить вибір постачальників, узгоджує ціни та умови постачання;
- судовий агент у порту – координує всі портові операції, забезпечує взаємодію між судном, портовими службами та постачальниками, організовує доставку вантажів на борт;
- виробники обладнання – виготовляють оригінальні запасні частини та технічні компоненти відповідно до специфікацій судна;
- постачальники судового забезпечення – забезпечують матеріали, витратні ресурси, технічні товари та провізію;
- логістичні та кур'єрські компанії – здійснюють фізичне транспортування вантажів між країнами, регіонами та портами, включаючи термінові авіа-доставки;
- сервісні підрядники – надають технічні послуги, ремонтні роботи та виїзне обслуговування обладнання безпосередньо на судні або в порту;
- митні та портові органи – здійснюють контроль за переміщенням вантажів, оформленням документів, дотриманням регуляторних вимог та вимог з безпеки [29-31].

Таким чином, система постачання судна являє собою інтегровану логістичну мережу, у якій навіть доставка однієї критично важливої запасної частини може включати від 5 до 7 різних учасників та етапів узгодження.

Планування експедирування здійснюється на основі комплексного аналізу експлуатаційних потреб судна та включає декілька ключових джерел інформації:

- графіки технічного обслуговування – визначають періодичність заміни вузлів і агрегатів, планові ремонти та сервісні роботи;
- заявки екіпажу – формуються безпосередньо судовим персоналом відповідно до поточних потреб у запасних частинах, інструментах та витратних матеріалах;

- PMS-системи – цифрові системи управління технічним обслуговуванням, які автоматизують планування ремонтів та контроль стану обладнання;
- вимоги класифікаційних товариств – регуляторні стандарти, що встановлюють обов'язкові норми безпеки, технічного стану та періодичних перевірок суден;
- експлуатаційні маршрути судна – враховують географію рейсів, доступність портів, тривалість переходів та можливості для постачання в дорозі [32-35].

На основі цих факторів формується загальний план постачання, який дозволяє забезпечити баланс між мінімізацією витрат, скороченням простоїв та підтриманням безперервної експлуатації судна.

Специфіка суднового постачання обумовлена тим, що судно знаходиться в русі для виконання завдань, який постійно змінює своє положення та перебуває в умовах обмеженого часу стоянки в портах [36-38]. Тому процес постачання повинен бути чітко синхронізований із операційним графіком судна та його фактичним місцезнаходженням.

Ключовими факторами, з якими необхідно узгоджувати постачання, є:

- графік рейсу судна – визначає загальну траєкторію руху та доступні порти для здійснення постачання;
- ETA (Estimated Time of Arrival) – прогнозований час прибуття судна в порт, який є критичним для планування доставки вантажів на борт;
- тривалість стоянки в порту – обмежений часовий інтервал, протягом якого повинні бути виконані всі операції з постачання, обслуговування та вантажних робіт;
- портові обмеження – включають технічні, інфраструктурні та адміністративні фактори, такі як доступність причалів, вантажопідйомність, режим роботи порту [39-41].

Саме поєднання цих факторів робить процес експедирування суден морського транспорту значно більш чутливим до зовнішніх порушень, ніж у традиційній логістиці. Будь-які затримки у русі суден, обмеження доступу до портів або зміни маршрутів безпосередньо впливають на своєчасність постачання, збільшують логістичні витрати та ускладнюють координацію між усіма учасниками ланцюга постачання [42-44]. Додаткову складність у зазначені процеси вносить блокування або обмеження проходу через стратегічні морські протоки. У таких умовах судна змушені змінювати маршрути, що призводить до збільшення часу рейсу та порушення запланованих ETA, що, у свою чергу, ускладнює координацію доставки запасних частин і матеріалів у конкретні порти. Крім того, перенаправлення суден до альтернативних портів створює додаткове навантаження на портову інфраструктуру та логістичні компанії, які можуть бути не готові до різкого збільшення обсягів постачання [45-46]. Це призводить до зростання черг, затримок у митному оформленні та підвищення вартості термінових логістичних операцій, що суттєво знижує ефективність усього процесу експедирування.

Формулювання цілей статті. Метою статті є дослідження впливу блокування стратегічних морських проток на процеси експедирування та постачання суден, зокрема аналіз змін у логістичних ланцюгах, строках доставки та вартості постачання. У роботі передбачається розгляд структури учасників суднового постачання, виявлення ключових факторів вразливості морських логістичних систем у кризових умовах на прикладі Ормузької протоки, а також оцінка адаптаційних рішень судноплавних операторів. Додатково ставиться завдання визначити економічні наслідки таких обмежень та обґрунтувати перехід до більш стійких, ризик-орієнтованих моделей управління постачання і експедирування.

Виклад основного матеріалу. Розглянемо сучасні проблеми постачання в умовах блокування морських проток (на прикладі Ормузької протоки).

Ормузька протока є одним із найважливіших стратегічних морських вузлів світової транспортної системи та належить до критичних транспортних коридорів судноплавства. Через неї проходять значні обсяги танкерних перевезень, контейнерного трафіку, а також потоки суден, що забезпечують транспортування енергоресурсів, сировини та товарів між країнами Близького Сходу, Азії та Світовими ринками. Висока концентрація судноплавного руху в межах цього транспортного коридору робить його особливо чутливим до геополітичних ризиків, військових конфліктів, санкційних обмежень або потенційної блокади.

Блокування або навіть загроза обмеження проходу через протоку створює суттєвий вплив не лише на маршрути руху суден, але й на всю систему морської логістики та суднового постачання. Наслідками таких

порушень стають зміна маршрутів суден, скасування або перенесення портів заходу, збільшення строків доставки матеріально-технічного забезпечення, порушення ланцюгів постачання запасних частин, зростання страхових премій, операційних витрат і ризиків затримок. Одночасно обмеження проходу безпосередньо впливають на інтенсивність судноплавства, змінюють кількість суднозаходів до портів регіону, скорочують доступність портових сервісів та зміщують навантаження до альтернативних логістичних хабів.

Особливо відчутно такі порушення позначаються на процесах експедирування та судового постачання, оскільки вони базуються на прогнозованості маршрутів, визначених часових вікнах доставки та чіткій координації між усіма учасниками. У нормальних умовах постачання запасних частин, технічних матеріалів і сервісного обслуговування планується під конкретні порти заходу та графік судна. За умов блокування ця система втрачає стабільність – за цими обставинами зростає час поставок, ускладнюється доставка запасних частин, виникає зриви планових поставок, стає проблематичною організація та участь у обслуговуванні суден сервісних інженерів, дефіцит критичних комплектуючих підвищує технічні ризики експлуатації флоту.

Окремим викликом стає ускладнення самих логістичних схем. Якщо у стандартних умовах постачання часто реалізується за спрощеним ланцюгом виробник – логістичний центр – агент – судно, то в умовах блокування протоки цей ланцюг може доповнюватися транзитними хабами, альтернативними портами, внутрішніми перевезеннями та додатковими етапами доставки на борт. Кількість ланок у ланцюгу постачання може збільшуватися з 4...5 до 7...9 етапів, що пропорційно підвищує ймовірність затримок та операційних збоїв. У результаті доставка запасної частини, яка раніше займала 5...7 діб, може тривати 12...20 діб, а в окремих випадках і більше.

Такі зміни безпосередньо впливають і на вартість експедирування. Перенаправлення поставок через альтернативні маршрути здатне збільшувати транспортні витрати на 15...40 %, тоді як вартість термінових авіаперевезень може зростати на 50...200 %. Наприклад, стандартна доставка запасної частини вартістю 1500...2000 дол. США може трансформуватися у термінове постачання через альтернативний хаб із витратами до 4000...8000 дол. США. Додатково змінюються агентські витрати, з'являються повторні митні процедури, витрати на інші непрямі логістичні витрати, що здатні збільшувати загальну вартість постачання ще на 10...25 %.

Суттєво ускладнюється й сама робота експедитора, оскільки стандартне управління фактично переходить у режим турбулентності. Зростає потреба у резервних постачальниках, альтернативних маршрутах, переплануванні, роботі через декілька транзитних хабів та постійному перегляді ризиків зриву ЕТА. Особливо критичними стають аварійні поставки, де строки доставки можуть збільшуватися з 24...72 годин до 4...7 діб, а витрати – зростати у два-три рази.

Таким чином, блокування стратегічних морських проток трансформується не лише в навігаційну проблему, а у комплексний логістичний та економічний виклик, що впливає на вартість постачання, складність експедирування, надійність ланцюгів постачання та загальну стійкість судноплавних операцій. У подальшому для оцінки масштабу такого впливу доцільним є порівняльний аналіз показників роботи системи постачання до та після кризових обмежень, включаючи витрати, строки доставки та рівень логістичних ризиків. Порівняння витрат для стандартних умов та умов, що утворюються як результат блокування морських транспортних коридорів, наведено у табл. 1.

Таблиця 1 – Збільшення витрат на експедирування та постачання суден для стандартних умов та умов, що утворюються через блокування морських транспортних коридорів

Категорія витрат	Стандартні умови	В умовах блокування	Зростання
Стандартна доставка	100 %	130...150 %	30...50 %
Термінові доставка літаком	100 %	180...300 %	80...200 %
Агентські та портові витрати	100 %	110...125 %	10...25 %
Логістика через альтернативні хаби	100 %	140...170 %	40...70 %
Аварійні поставки	100 %	200...300 %	100...200 %

Розв'язання цієї проблеми можливо шляхом використання адаптаційних рішень операторів суден.

У відповідь на зростання логістичних ризиків, пов'язаних із блокуванням стратегічних морських проток, судноплавні оператори почали адаптувати традиційні моделі постачання, переходячи від реактивного підходу до більш проактивного та ризик-орієнтованого управління постачання. Основною метою таких змін стало зниження залежності від нестабільних маршрутів, мінімізація ризиків затримок і забезпечення безперервності експлуатації флоту.

Одним із перших адаптаційних рішень стало збільшення запасу на судні, тобто буферних запасів безпосередньо на борту суден. Якщо раніше багато операторів працювали за принципами заказ – доставка, орієнтованими на мінімальні складські залишки, то в умовах логістичної невизначеності відбувся перехід до формування резервних запасів. Насамперед збільшуються запаси:

- критичних запасних частин для головних і допоміжних механізмів;
- витратних матеріалів, фільтрів, мастил, ущільнень;
- аварійних ремонтних комплектів;

Наприклад, якщо раніше оператор міг тримати запас запчастин на 1...2 місяці експлуатації, то в кризових умовах цей буфер може збільшуватися до 3...6 місяців. Хоча така стратегія збільшує капітал, заморожений у запасах, вона знижує ризик аварійного дефіциту комплектуючих та залежність від нестабільних поставок.

Другим основним напрямом адаптації стало перепроектування логістичних маршрутів постачання. Серед основних рішень:

- використання альтернативних портів постачання замість традиційних точок заходу;
- доставка через сусідні регіональні логістичні хаби;
- застосування кур'єрів коли критичні деталі доставляються кур'єром безпосередньо на судно;
- використання передзамовлення, тобто попереднього розміщення запасів у стратегічних портах.

Наприклад, замість прямого постачання через порти регіону Перської затоки оператори можуть переносити логістику на великі транзитні вузли, такі як Сінгапур, Джебель-Алі або альтернативні порти Середземномор'я. Такі рішення часто збільшують витрати на логістику, однак суттєво підвищують стійкість до змін в логістиці.

Блокування стратегічних морських проток має суттєвий економічний вплив на процеси експедирування та постачання суден, формуючи як прямі логістичні витрати, так і непрямі операційні збитки. В умовах порушення стабільних маршрутів традиційна вартість постачання змінюється та може бути представлена як:

$$C=X+\Delta C+R;$$

де X – базова вартість постачання в стандартних умовах;

ΔC – додаткові витрати, викликані порушенням логістики;

R – витрати на управління ризиками та адаптаційні заходи.

Зростання витрат насамперед пов'язане зі зміною логістичних маршрутів, використанням термінових способів доставки та збільшенням кількості супутніх операцій. До основних джерел додаткових витрат належать термінові авіаперевезення вибір альтернативні маршрути, додаткова портова логістика, а також складні мультимодальні схеми постачання. За попередніми оцінками, вартість стандартних поставок може зростати на 15...30 %, постачання через альтернативні маршрути – на 40...70 %, а аварійні постачання – на 50...200 %.

Для прикладу, якщо стандартна доставка запасної частини коштувала близько 2000 дол. США, то в умовах кризового постачання через альтернативний хаб або із залученням авіадоставки її вартість може зрости до 4500...6000 дол. США або більше. Додатково виникають непрямі витрати, пов'язані із затримками ремонту, додатковими ризиками, простоями суден, порушенням графіків рейсів та потенційними втратами фрахтового доходу. У багатьох випадках навіть короткострокова затримка може генерувати втрати, що перевищують вартість самого постачання.

Суттєво зростають і операційні витрати на забезпечення стійкості поставок. Якщо до кризових обмежень модель постачання базувалася на відносно прогнозованих витратах, то після блокування проток до базових витрат додаються витрати на резервні запаси, диверсифікацію постачальників, утримання

буферних складських запасів та додаткові логістичні рішення. Таким чином, збільшується не лише вартість окремої доставки, а й загальна вартість підтримання надійності суднового постачання.

Порівняльний аналіз, що наведено у таблиці 2, демонструє суттєву трансформацію основних параметрів експедирування:

Таблиця 2 – Порівняльний аналіз зміни основних параметрів експедирування

Показник	До обмежень	Після обмежень
Час поставки	5...7 діб	1...20 діб
Вартість доставки	базова	збільшення на 20...50 %
Термін поставки	базовий	збільшення на 50...200 %
Кількість альтернативних постачальників	1...2	3...5
Буферний запас на борту	мінімальний	збільшений
Складність логістичних схем	низька	висока

Аналіз свідчить, що після блокування проток змінюються не лише окремі витратні показники, а вся економіка експедирування. Частина витрат переноситься із реактивного реагування на превентивні заходи, коли оператори інвестують у запас міцності для зниження майбутніх ризиків. У результаті суднове постачання стає дорожчим, складнішим і більш залежним від механізмів ризик-менеджменту. Загалом порівняння умов «до» та «після» показує, що блокування морських проток призводить до системного зростання вартості експедирування, яке може становити від десятків відсотків для стандартних поставок до кратного збільшення витрат для аварійних і критичних поставок. Це підтверджує, що економічні наслідки таких криз виходять далеко за межі окремих логістичних операцій і впливають на загальну ефективність експлуатації суден морського транспорту.

Висновки. Проведений аналіз показує, що блокування або навіть загроза обмеження проходу через стратегічні морські протоки має системний і багаторівневий вплив на процеси експедирування та постачання суден. На відміну від локальних логістичних збоїв, такі події порушують усталені глобальні ланцюги постачання, що призводить до одночасного зростання строків доставки, вартості логістики та загальної складності координації постачання. У ході дослідження встановлено, що блокування проток безпосередньо призводить до збільшення строків доставки запасних частин і технічного постачання, ускладнення логістичних маршрутів, зростання кількості учасників ланцюга постачання, підвищення операційних ризиків і суттєвого збільшення витрат на експедирування.

Встановлено, що основні наслідки виявляються у:

- збільшенні часу на забезпечення поставок у 1,5...3 рази;
- ускладненні логістичних схем (зростання кількості етапів постачання з 4...5 до 7...9);
- підвищенні вартості стандартних поставок на 15...50 % та аварійних – до 200 % і більше;
- зростанні операційних ризиків, пов'язаних із затримками ремонту, та простоями суден.

Окремо слід відзначити, що вплив блокування проток виходить за межі безпосередньо транспортної функції і трансформується у комплексний виклик для всієї системи судноплавства. Порушення прогнозованості маршрутів і часових параметрів постачання призводить до необхідності переходу від традиційної моделі до більш стійких і резервованих систем забезпечення.

У відповідь на ці виклики судноплавні оператори адаптують свої підходи до управління постачанням. Основними напрямками такої адаптації є:

- збільшення буферних запасів на борту суден та у логістичних хабах;
- диверсифікація постачальників і впровадження багатопрофільного планування;
- використання альтернативних маршрутів і портів постачання.

Разом із тим, зазначені заходи, хоча і підвищують стійкість системи експедирування та постачання, супроводжуються додатковими витратами, що збільшують загальну вартість експлуатації суден морського транспорту. Таким чином, формується новий баланс між економічною ефективністю та надійністю постачання.

Отримані результати свідчать про необхідність переходу від традиційних моделей управління постачанням до більш комплексних, ризик-орієнтованих підходів, які враховують нестабільність глобального середовища та можливість виникнення масштабних логістичних порушень. У цьому контексті особливого значення набуває розвиток стратегій управління ризиками, цифрових систем моніторингу ланцюгів постачання та інтеграції логістичних процесів у єдині інформаційні платформи.

Перспективи подальших досліджень доцільно пов'язати з:

- деталізацією статистичного аналізу судноплавного трафіку через стратегічні протоки (зокрема Ормузьку);
- побудовою економіко-математичних моделей оцінки зростання витрат на експедирування;
- розробкою практичних рекомендацій для судноплавних компаній щодо оптимізації поставок в умовах кризових обмежень.

У цілому, результати дослідження підтверджують, що блокування морських проток є не лише регіональною проблемою, а глобальним фактором впливу на ефективність і стійкість світового судноплавства.

Подальші дослідження будуть спрямовані на визначенні ефективних альтернативних способів експедирування та постачання суден морського транспорту в умовах їх обмеженого трафіку через ускладнення судноплавства через морські протоки.

ЛІТЕРАТУРА

1. Левченко О.В. Синтез варіантів дій судноводія у небезпечних ситуаціях з урахуванням часових та ресурсних обмежень у судових СППР // Водний транспорт: Збірник наукових праць. – 2021. – Вип. 3(34). – С. 89-98. doi.org/10.33298/2226-8553/2021.3.34.10.
2. Тимочко О.І., Левченко О.В., Руденко В.М., Сітков О.М. Використання гібридних роботизованих комплексів для інспекції морських нафтогазових об'єктів // Водний транспорт: Збірник наукових праць. – 2024. – Вип. 2(40). – С. 6-22. doi.org/10.33298/2226-8553.2024.2.40.01.
3. Sagin S., Kuropyatnyk O., Sagin A., Tkachenko I., Fomin O., Píštěk V., Kučera P. Ensuring the Environmental Friendliness of Drillships during Their Operation in Special Ecological Regions of Northern Europe // Journal Marine Science and Engineering. – 2022. – Vol. 10(9). – P. 1331. https://doi.org/10.3390/jmse10091331.
4. Levchenko O., Dvulit Z., Kozlenko O. Features of human resource management at railway transport enterprises // Efektyvna Ekonomika. – 2020. – № 6. – P. 1-7. doi: 10.32702/2307-2105-2020.6.72.
5. Сагін С.С., Сагін С.В. Забезпечення безпеки судноплавства під час розходження з суднами, що виконують днопоглиблювальні роботи // Водний транспорт. Збірник наукових праць. – 2025. – Вип. 2(43). – С. 149-160. doi.org/10.33298/2226-8553.2025.2.43.13.
6. Сагін С.С., Сагін С.В. Забезпечення безпеки маневрування великотоннажних суден в стиснених портових водах // Водний транспорт. Збірник наукових праць. – 2024. – Вип. 3(41). – С. 186-196. doi.org/10.33298/2226-8553.2024.3.41.21.
7. Сагін С.В., Бондар С.А., Столярик Т.О. Оцінка безвідмовності судових дизелів за технічним станом моторного мастила циркуляційних систем мащення // Водний транспорт. – 2023. – № 1(37). – С. 59-70. doi.org/10.33298/2226-8553.2023.1.37.06.
8. Сагін С.В., Бондар С.А. Розробка методу діагностування технічного стану елементів головної енергетичної установки засобів водного транспорту // Водний транспорт. – 2023. – № 2(38). – С. 175-186. doi.org/10.33298/2226-8553.2023.2.38.19.
9. Левченко О.В., Маранов О.В. Інтеграція комбінованих систем підтримки ухвалення рішень для забезпечення навігаційної безпеки та оптимізації руху суден у портових акваторіях // Водний транспорт: Збірник наукових праць. – 2025. – Вип. 1(42). – С. 99-108. doi.org/10.33298/2226-8553.2025.1.42.14.
10. Petrychenko O., Levinskyi M., Prytula D., Vynohradova A. Fuel options for the future: a comparative overview of properties and prospects // Transport Systems and Technologies. – 2023. – № 41. – P. 96-106. https://doi.org/10.32703/2617-9059-2023-41-8.
11. Sagin S., Kuropyatnyk O., Tkachenko I. Ensuring the environmental friendliness of marine diesel engines of specialized ships // Суднові енергетичні установки : науково-технічний збірник. – 2022. – Вип. 45. – Одеса : НУ «ОМА». – С. 5-16. doi: 10.31653/smf45.2022.5-16.

12. Sagin S., Sagin A. Development of method for managing risk factors for emergency situations when using low-sulfur content fuel in marine diesel engines // *Technology Audit and Production Reserves*. – 2023. – № 5 (1(73)). – P. 37–43. doi: <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2023.290198>.

13. Shpak N., Dvulit Z., Maznyk L., Sroka W., Zaverbnyj A., Levchenko O. Optimisation of the export structure in transport companies: a case study // *Central European business review*. – 2023. – Vol. 12. – Iss. 1. – P. 115-132. <https://doi.org/10.18267/j.cebr.312>.

14. Сагін С.В., Сагін А.С. Контроль та діагностування надійності та економічності дизелів морських та річкових засобів транспорту // *Суднові енергетичні установки : науково-технічний збірник*. – 2023. – Вип. 46. – С. 118-131. doi: [10.31653/smf46.2023.118-131](https://doi.org/10.31653/smf46.2023.118-131).

15. Sagin S., Haichenia O., Karianskyi S., Kuropyatnyk O., Razinkin R., Sagin A., Volkov O. Improving Green Shipping by Using Alternative Fuels in Ship Diesel Engines // *Journal of Marine Science and Engineering*. – 2025. – № 13. – P. 589. <https://doi.org/10.3390/jmse1303058924>.

16. Сагін С.В., Заблоцький Ю.В., Сагін А.С. Підвищення економічності роботи суднових середньооберткових дизелів // *Водний транспорт. Збірник наукових праць*. – 2025. – Вип. 1(42). – С. 166-179. doi: [10.33298/2226-8553.2025.1.42.20](https://doi.org/10.33298/2226-8553.2025.1.42.20).

17. Сагін С.В., Колегаєв М.О., Парменова Д.Г. Зниження ризиків інвазійного забруднення морських акваторій під час експлуатації суден морського та внутрішнього водного транспорту // *Суднові енергетичні установки : науково-технічний збірник*. – 2023. – Вип. 47. – С. 131-147. doi: [10.31653/smf47.2023.131-147](https://doi.org/10.31653/smf47.2023.131-147).

18. Тимошук О.М., Дакі О.А., Бойко О.А., Карадобрій Т.А. Аналітичний огляд адаптивних систем керування судном та шляхи їх побудови // *Водний транспорт. Збірник наукових праць*. – 2020. – Вип. 3(31). – С. 120-125. <https://doi.org/10.33298/2226-8553/2020.3.31.13>.

19. Сагін С.В., Столярик Т.О. Динаміка суднових дизелів під час використанні моторних мастил з різними структурними характеристиками // *Автоматизація суднових технічних засобів : наук.-техн. зб.* – 2021. – Вип. 27. – С. 108-119. DOI: [10.31653/1819-3293-2021-1-27-108-119](https://doi.org/10.31653/1819-3293-2021-1-27-108-119).

20. Сагін С.В., Заблоцький Ю.В. Діагностування технічного стану суднових енергетичних установок засобів водного транспорту // *Водний транспорт*. – 2023. – № 2(38). – С. 164-175. doi: [10.33298/2226-8553.2023.2.38.18](https://doi.org/10.33298/2226-8553.2023.2.38.18).

21. Sagin S., Kuropyatnyk O., Matieiko O., Razinkin R., Stoliaryk T., Volkov O. Ensuring Operational Performance and Environmental Sustainability of Marine Diesel Engines through the Use of Biodiesel Fuel // *Journal of Marine Science and Engineering*. – 2024. – Vol. 12(8). – P. 1440. <https://doi.org/10.3390/jmse12081440>.

22. 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*. – 2016. – Vol. 9. – Iss. 20. – P. 208-216. DOI: [10.17485/ijst/2016/v9i20/94490](https://doi.org/10.17485/ijst/2016/v9i20/94490).

23. Мадей В.В., Сагін С.В., Волков О.М. Управління процесом впорскування під час використання в суднових дизелях паливних сумішей до складу яких входить паливо біологічного походження // *Водний транспорт. Збірник наукових праць*. – 2024. – Вип. 1(39). – С. 193-205. doi: [10.33298/2226-8553.2024.1.39.20](https://doi.org/10.33298/2226-8553.2024.1.39.20).

24. Левченко О.В., Маранов О.В. Поточний стан дослідження питання прогнозування маневреності суден та їхньої гідродинаміки в обмежених водах // *Водний транспорт: Збірник наукових праць*. – 2025. – Вип. 1(42). – С. 55-60. doi: [10.33298/2226-8553.2025.1.42.08](https://doi.org/10.33298/2226-8553.2025.1.42.08).

25. Сагін С.В., Сагін С.С. Визначення методу управління рухом суден морського транспорту під час забезпечення їх безпечного розходження // *Водний транспорт. Збірник наукових праць*. – 2023. – Вип. 2(38). – С. 187-198. doi: [10.33298/2226-8553/2023.2.38.20](https://doi.org/10.33298/2226-8553/2023.2.38.20).

26. Burmaka I., Vorokhobin I., Melnyk O., Burmaka O., Sagin S. Method of Prompt Evasive Manuever Selection to Alter Ship's Course or Speed // *Transactions on Maritime Science*. – 2022. – Vol. 11(1). – P. 1-9. <https://doi.org/10.7225/toms.v11.n01.w01>.

27. Левченко О.В., Ганношина І.М., Остапчук Т.В. Система інформаційного забезпечення процесів прийняття рішень на мостіку судна // *Водний транспорт: Збірник наукових праць*. – 2025. – Вип. 1(42). – С. 24-27. doi: [10.33298/2226-8553.2025.1.42.04](https://doi.org/10.33298/2226-8553.2025.1.42.04).

28. Сагін А.С., Сагін С.В. Експериментальне визначення оптимальних фаз подачі палива в циліндр суднових дизелів // *Водний транспорт. Збірник наукових праць*. – 2024. – Вип. 1(39). – С. 206-215. doi: [10.33298/2226-8553.2024.1.39.21](https://doi.org/10.33298/2226-8553.2024.1.39.21).

29. Sagin S.V., Sagin S.S., Madey V. Analysis of methods of managing the environmental safety of the navigation passage of ships of maritime transport // *Technology Audit and Production Reserves*. – 2023. – № 4 (3(72)). – P. 33–42. doi: <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2023.286039>.

30. Левінський М.В., Левінський В.М. Вибір параметрів системи стабілізації курсу судна при дії водно-хвильових збурень // Автоматизація суднових технічних засобів : наук.-техн. зб. – 2020. – Вип. 26. – С.27-40. DOI: 10.31653/1819-3293-2020-1-26-27-40.
31. Тимошук О.М., Мельник О.В. Аналіз можливості використання маневру розходження зміною курсу // Водний транспорт. Збірник наукових праць. – 2023. – Вип. 1(37). – С. 96-102. doi.org/10.33298/2226-8553.2023.1.37.10.
32. Дзуліт З.П., Тимошук О.М., Левченко О.В. Вдосконалення бізнес-процесів сучасних судноплавних компаній в сфері міжнародних морських вантажних перевезень // Менеджмент та підприємництво в Україні: етапи становлення і проблеми розвитку. – 2021. – № 3(1). – С. 1-12.
33. Sagin S.V., Sagin S.S., Madey V. Analysis of methods of managing the environmental safety of the navigation passage of ships of maritime transport // Technology Audit and Production Reserves. – 2023. – № 4 (3(72)). – P. 33–42. doi: <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2023.286039>.
34. Сагін А.С., Заблоцький Ю.В. Аналіз ефективності морських перевантажувальних терміналів під час транспортування зрідженого природного газу суднами-газовозами // Суднові енергетичні установки : науково-технічний збірник. – 2024. – Вип. 48. – С. 114-125. doi: 10.31653/smf48.2024.114-125.
35. Будашко В.В., Заблоцький Ю.В. Аналіз термодинамічних циклів охолодження природного газу під час його транспортування морськими суднами-газовозами // Суднові енергетичні установки : науково-технічний збірник. – 2024. – Вип. 48. – С. 18-30. doi: 10.31653/smf48.2024.18-30.
36. Сагін С.В., Сагін С.С. Використання штучного інтелекту в ситуаціях надмірного зближення суден // Водний транспорт. Збірник наукових праць. – 2024. – Вип. 1(39). – С. 215-225. doi.org/10.33298/2226-8553.2024.1.39.22.
37. Сагін С.С., Ворохобін І.І. Мінімізація ризику виникнення небезпеки морських подій під час навігаційних переходів суден морського транспорт // Водний транспорт: Збірник наукових праць. – 2024. – Вип. 2(40). – С. 76-88.
38. Сагін С. В. Повышение надежности работы прецизионных пар топливной аппаратуры судовых дизелей за счет использования органических покрытий // Вісник Одеськ. нац. мор. ун-ту, 2018. – Вип. 4(57). – С. 109-120.
39. Сагін С.В. Зниження механічних втрат у суднових середньообертових дизелях за рахунок оптимізації роботи циркуляційних систем мащення // Вісник Одеського національного морського університету : Зб. наук. праць, 2020. – Вип. 1(61). – С. 87-96. doi.org 10.47049/2226-1893-2020-1-87-96.
40. Sagin S., Sagin A., Zablotskyi Y., Fomin O., Pišt'ek V., Kučera P. Method for Maintaining Technical Condition of Marine Diesel Engine Bearings // Lubricants/ – 2025. № 13. – P. 146. <https://doi.org/10.3390/lubricants13040146>.
41. Заблоцький Ю.В., Будашко В.В., Сагін А.С. Забезпечення технологічних операцій зі зрідженим природним газом під час його видобутку в морських прибережних акваторіях // Автоматизація суднових технічних засобів: наук.-техн. зб. – 2024. – Вип. 29. – С. 54–65. DOI: 10.31653/1819-3293-2024-1-29-54-65.
42. Сагін С.В., Заблоцький Ю.В. Використання інтегрованих діагностичних моделей для оцінки експлуатаційних характеристик суднового пропульсивного комплексу // Водний транспорт. Збірник наукових праць. – 2024. – Вип. 3(41). – С. 133-140. doi.org/10.33298/2226-8553.2024.3.41.15.
43. Сагін С.С., Сагін С.В. Використання гібридної системи координації руху морських суден під час їх маневрування в стиснених водах // Водний транспорт. Збірник наукових праць. – 2024. – Вип. 3(41). – С. 208-220. doi: 10.33298/2226-8553.2024.3.41.24.
44. Ворохобін І.І., Бурмака І.О., Кулаков М.О., Петриченко О.О. Спосіб департаментизації електронної карти при зовнішньому управлінні розходження суден в зоні відповідальності СУРС // Судноводіння : науково-технічний збірник. – 2021. – Вип. 32. –С. 26-33. DOI: 10.31653/2306-5761.32.2021.26-33.
45. Сагін С.В., Заблоцький Ю.В., Сагін А.С. Підвищення економічності роботи суднових середньообертових дизелів // Водний транспорт. Збірник наукових праць. – 2025. – Вип. 1(42). – С. 166-179. doi.org/10.33298/2226-8553.2025.1.42.20.
46. Сагін А.С., Заблоцький Ю.В. Огляд основних особливостей постачання та експедирування морських суден у сучасних умовах // Суднові енергетичні установки : науково-технічний збірник. – 2025. – Вип. 51. – С. 59-65. DOI: 10.31653/smf51.2025.59-65.

REFERENCES

1. Levchenko O. Synthesis of vessels' options in dangerous situations taking into account time and resource restrictions in vessel CDSS. // *Water transport*. – 2021. – № 3(34). – P. 89-98. doi.org/10.33298/2226-8553/2021.3.34.10.
2. Tymochko O.I., Levchenko O.V., Rudenko V.M., Sitkov O.M. Use of hybrid robotic complex for inspection of marine oil and gas facilities // *Water transport*. – 2024. – Vol. 2(40). – P. 6-22. doi.org/10.33298/2226-8553.2024.2.40.01.
3. Sagin S., Kuropyatnyk O., Sagin A., Tkachenko I., Fomin O., Píštěk V., Kučera P. Ensuring the Environmental Friendliness of Drillships during Their Operation in Special Ecological Regions of Northern Europe // *Journal Marine Science and Engineering*. – 2022. – Vol. 10(9). – P. 1331. https://doi.org/10.3390/jmse10091331.
4. Levchenko O., Dvulit Z., Kozlenko O. Features of human resource management at railway transport enterprises // *Efektivna Ekonomika*. – 2020. – № 6. – P. 1-7. doi: 10.32702/2307-2105-2020.6.72.
5. Sagin S.S., Sagin S.V. Ensuring the safety of navigation during encounters with vessels engaged in dredging operations // *Water transport*. – 2025. – Vol. 2(43). – P. 149-160. doi.org/10.33298/2226-8553.2025.2.43.13.
6. Sagin S.S., Sagin S.V. Ensuring the safe maneuvering of large-tonnage vessels in confined port waters // *Water transport*. – 2024. – Vol. 3(41). – P. 186-196. doi.org/10.33298/2226-8553.2024.3.41.21.
7. Sagin S.V., Bondar S.A., Stoliaryk T.O. Assessment of the reliability of marine diesel engines according to the technical condition of engine oil of circulating lubrication systems // *Water transport*. – 2023. – Vol. 1(37). – P. 59-70. doi.org/10.33298/2226-8553.2023.1.37.06.
8. Sagin S.V., Bondar S.A. Development of a method for diagnosing the technical condition of elements of the main power plant of water transport // *Water transport*. – 2023. – Vol. 2(38). – P. 175-186. doi.org/10.33298/2226-8553.2023.2.38.19.
9. Levchenko O.V., Maranov O.V. Integration of combined decision support systems to ensure navigational safety and optimize vessel traffic in port areas // *Water transport*. – 2025. – № 1(42). – P. 99–108. doi.org/10.33298/2226-8553.2025.1.42.14.
10. Petrychenko O., Levinskyi M., Prytula D., Vynohradova A. Fuel options for the future: a comparative overview of properties and prospects // *Transport Systems and Technologies*. – 2023. – № 41. – P. 96-106. https://doi.org/10.32703/2617-9059-2023-41-8.
11. Sagin S., Kuropyatnyk O., Tkachenko I. Ensuring the environmental friendliness of marine diesel engines of specialized ships // *Ship power plants*. – 2022. – Vol. 45. – P. 5-16. doi: 10.31653/smf45.2022.5-16.
12. Sagin S., Sagin A. Development of method for managing risk factors for emergency situations when using low-sulfur content fuel in marine diesel engines // *Technology Audit and Production Reserves*. – 2023. – № 5 (1(73)). – P. 37–43. doi: https://doi.org/10.15587/2706-5448.2023.290198.
13. Shpak N., Dvulit Z., Maznyk L., Sroka W., Zaverbnyj A., Levchenko O. Optimisation of the export structure in transport companies: a case study // *Central European business review*. – 2023. – Vol. 12. – Iss. 1. – P. 115-132. https://doi.org/10.18267/j.cebr.312.
14. Sagin S.V., Sagin A.S. Control and diagnosis of reliability and economy of diesel engines of sea and river means of transport // *Ship power plants*. – 2023. – Vol. 46. – P. 118-131. doi: 10.31653/smf46.2023.118-131.
15. Sagin S., Haichenia O., Karianskyi S., Kuropyatnyk O., Razinkin R., Sagin A., Volkov O. Improving Green Shipping by Using Alternative Fuels in Ship Diesel Engines // *Journal of Marine Science and Engineering*. – 2025. – № 13. – P. 589. https://doi.org/10.3390/jmse1303058924.
16. Sagin S.V., Zablotskyi Y.V., Sagin A.S. Increasing the efficiency of ship's medium-speed diesel engines // *Water transport*. – 2025. – Вып. 1(42). – С. 166-179. doi.org/10.33298/2226-8553.2025.1.42.20.
17. Sagin S.V., Kolegaev M.O., Parmenova D.G. Reducing the risks of invasive pollution of marine water areas during the operation of sea and inland water transport vessels // *Ship power plants*. – 2023. – № 47. – P. 131-147. doi: 10.31653/smf47.2023.131-147.
18. Tymoshchuk O., Daki O., Boyko O., Karadobriy T. Analytical Inspection of adaptive vessel control systems and ways of their construction // *Water Transport: Collection of scientific works*. – 2020. – Vol. 3(31). – P. 120-125. doi.org/10.33298/2226-8553/2020.3.31.13.
19. Sagin S.V., Stoliaryk T.O. Dynamics of marine diesel engines when using motor oils with different structural characteristics // *Automation of ship facilities*. – 2021. – № 27. – P. 108-119. DOI: 10.31653/1819-3293-2021-1-27-108-119.
20. Sagin S.V., Zablotskyi Yu.V. Development of a method for diagnosing the technical condition of elements of the main power plant of water transport // *Water transport*. – 2023. – Vol. 2(38). – P. 164-175. doi.org/10.33298/2226-8553.2023.2.38.18.
21. Sagin S., Kuropyatnyk O., Matieiko O., Razinkin R., Stoliaryk T., Volkov O. Ensuring Operational Performance and Environmental Sustainability of Marine Diesel Engines through the Use of Biodiesel Fuel // *Journal of Marine Science and Engineering*. – 2024. – Vol. 12(8). – P. 1440. https://doi.org/10.3390/jmse12081440.

22. 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*. – 2016. – Vol. 9. – Iss. 20. – P. 208-216. DOI: 10.17485/ijst/2016/v9i20/94490.

23. Madey V.V., Sagin S.V., Volkov O.M. Direction of the injection process during the use of fuel mixture that include fuel of biological origin in marine diesel engines // *Water transport*. – 2024. – Vol. 1(39). – P. 193-205. doi.org/10.33298/2226-8553.2024.1.39.20.

24. Levchenko O.V., Maranov O.V. The current state of research on predicting the manoeuvrability of ships and their hydrodynamics in confined waters // *Water transport*. – 2025. – № 1(42). – P. 55–60. doi.org/10.33298/2226-8553.2025.1.42.08.

25. Sagin S.V., Sagin S.S., Determination of the method of controlling the movement of marine transport vessels while ensuring their safe divergences *Water transport*. – 2023. – Вип. 2(38). – С. 187-198. doi.org/10.33298/2226-8553/2023.2.38.20.

26. Burmaka I., Vorokhobin I., Melnyk O., Burmaka O., Sagin S. Method of Prompt Evasive Manuever Selection to Alter Ship's Course or Speed // *Transactions on Maritime Science*. – 2022. – Vol. 11(1). – P. 1-9. <https://doi.org/10.7225/toms.v11i1.n01.w01>.

27. Levchenko O.V., Hannoshyna I.M., Ostupchuk T.V. Information support system for decision-making processes on the bridge of a ship // *Water transport*. – 2025. – № 1(42). – P. 24–27. doi.org/10.33298/2226-8553.2025.1.42.04.

28. Sagin A.S., Sagin S.V. Experimental determination of optimal phases of fuel supply to the cylinder of marine diesel engines // *Water transport*. – 2024. – Vol. 1(39). – P. 206-215. doi.org/10.33298/2226-8553.2024.1.39.21.

29. Sagin S.V., Sagin S.S., Madey V. Analysis of methods of managing the environmental safety of the navigation passage of ships of maritime transport // *Technology Audit and Production Reserves*. – 2023. – № 4 (3(72)). – P. 33-42. doi: <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2023.286039>.

30. Levinskyi M.V., Levinskyi V.M. Choosing the structure and parameters of vessel's course automatic control system under the influence of water-wave disturbances // *Automation of ship technical facilities*. – 2020. – Вип. 26. – С.27-40. DOI: 10.31653/1819-3293-2020-1-26-27-40.

31. Tymoshchuk O., Melnyk O. Analysis of the possibility of using the divergence maneuver by changing the course // *Water Transport: Collection of scientific works*. – 2023 – Vol.1(37). – P.96-102. doi.org/10.33298/2226-8553.2023.1.37.10.

32. Dvulit Z.P., Tymoshchuk O.M., Levchenko O.V. Improvement of business processes in modern shipping companies in the field of international sea freight transportation // *Management and Entrepreneurship in Ukraine: the stages of formation and problems of development*. – 2021. – № 3(1). – С. 1-12.

33. Sagin S.V., Sagin S.S., Madey V. Analysis of methods of managing the environmental safety of the navigation passage of ships of maritime transport // *Technology Audit and Production Reserves*. – 2023. – № 4 (3(72)). – P. 33–42. doi: <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2023.286039>.

34. Sagin A.S., Zablotskyi Y.V. Analysis of the efficiency of marine transshipment terminals during the transportation of liquefied natural gas by gas carriers // *Ship power plants*. 2024. – Vol. 48. – P. 114-125. doi: 10.31653/smf48.2024.114-125.

35. Budashko V.V., Zablotskyi Y.V. Analysis of thermodynamic cycles of natural gas cooling during its transportation by marine gas carriers // *Ship power plants*. 2024. – Vol. 48. – P. 18-30. doi: 10.31653/smf48.2024.18-30.

36. Sagin S.S., Sagin S.V. Use of artificial intelligence in the situations of excessive vessels approaching // *Water Transport*. – 2024. – №. 1(39). – P. 215-225. doi.org/10.33298/2226-8553.2024.1.39.22.

37. Sagin S.S., Vorokhobin I.I. Minimizing the risk of maritime incidents during navigation passages of sea transport vessels // *Water transport*. – 2024. – Vol. 2(40). – P. 76-88.

38. Sagin S.V. Increasing the reliability of precision pairs of marine diesel fuel equipment through the use of organic coatings // *Herald of the Odessa National Maritime University*. – 2018. – № 4(57). – P. 109–120.

39. Sagin S.V. Reducing mechanical losses in medium-speed marine diesel engines by optimizing the operation of circulating lubrication systems // *Herald of the Odessa National Maritime University*. – 2020. – № 1(61). – P. 87-96. doi.org 10.47049/2226-1893-2020-1-87-96.

40. Sagin S., Sagin A., Zablotskyi Y., Fomin O., Pišt'ek V., Kučera P. Method for Maintaining Technical Condition of Marine Diesel Engine Bearings // *Lubricants/* – 2025. № 13. – P. 146. <https://doi.org/10.3390/lubricants13040146>.

41. Zablotskyi Y., Budashko V., Sagin A. Ensuring technological operations with liquefied natural gas during its production in coastal sea water areas // *Automation of ship technical facilities* – 2024. – Vol. 29. – P. 54–65. DOI: 10.31653/1819-3293-2024-1-29-54-65.

42. Sagin S.V., Zablotskyi Y.V. Use of integrated diagnostic models to assess the operational characteristics of a ship's propulsion system // Water transport. – 2024. – Vol. 3(41). – P. 133-140. doi.org/10.33298/2226-8553.2024.3.41.15.
43. Sagin S.S., Sagin S.V. Using a hybrid system for coordinating the movement of sea vessels during their maneuvering in compressed waters // Water transport. – 2024. – Vol. 3(41). – PC. 208-220. doi: 10.33298/2226-8553.2024.3.41.24.
44. Vorokhobin I., Burmaka I., Kulakov M., Petrychenko O. A Method of electronic chart departmentisation under external control of vessels' passing in VTS areas // Shipping & Navigation: Research journal. – 2021. – Vol.32. – P.26-33. doi.org/10.31653/2306-5761.32.2021.26-33.
45. Sagin S.V., Zablotskyi Y.V. Sagin A.S. Increasing the efficiency of ship's medium-speed diesel engines // Water transport. – 2025. – Vol. 1(42). – P. 166-179. doi.org/10.33298/2226-8553.2025.1.42.20.
46. Sagin A.S., Zablotskyi Y.V. Overview of the main features of supply and forwarding of sea vessels in modern conditions // Ship power plants. – 2025. – Vol. 51. – P. 59-65. DOI: 10.31653/smf51.2025.59-65.

Sagin A.S., Zablotskyi Y.V.

**SHIP FORWARDING AND SUPPLY IN CONDITIONS OF BLOCKED SEA STRAITS:
CHALLENGES, ADAPTATION AND ECONOMIC CONSEQUENCES**

It has been determined that world shipping is the basis of international trade, providing transportation of more than 80% of global trade. The sustainability of maritime transportation largely depends not only on the movement of ships, but also on the efficiency of related logistics processes, among which an important place is occupied by forwarding and supply of ships of maritime transport. Ship forwarding is understood as a set of organizational, logistical and coordination measures aimed at providing the ship with material and technical resources, spare parts, provisions, technical maintenance and other necessary means for safe and continuous operation. Modern ship supply systems are multi-level supply chains that unite shipowners, technical managers, agents, equipment manufacturers, suppliers and port infrastructure. The effectiveness of such systems largely depends on the stability of global transport routes and the availability of key major maritime transport corridors. Of particular vulnerability to global maritime logistics are strategic sea lanes, through which significant volumes of global cargo flows pass, including energy resources, raw materials and containerized cargo. These sections of sea routes perform a critical function in the international transport system, where even short-term disruptions or restrictions on movement can have large-scale consequences for global supply chains. Their partial or complete blockage can disrupt not only the regular movement of the fleet, but also the stable functioning of ship supply systems, including the forwarding of spare parts, bunkering, maintenance and the organization of service operations in ports. In such conditions, delays occur in the delivery of critical materials, coordination between participants in the logistics chain becomes more difficult, and dependence on alternative routes and transit hubs increases. Additionally, there is a significant increase in delivery times, an increase in the cost of logistics operations, as well as an increase in operational risks associated with the need to redirect ships, change ports of call and use more expensive and complex supply schemes. Taken together, these factors lead to a decrease in the efficiency of maritime transportation and an increase in the overall vulnerability of the global shipping system. Under such conditions, the study of the impact of blocking sea straits on the processes of forwarding and supply of ships acquires practical and scientific relevance.

Keywords: *adaptation of shipping operators, ship forwarding, spare parts, supply chains, logistics risks, maritime logistics, maritime transport, maritime transport corridors, operating costs, shipping sustainability, ship supply, risk management.*

Стаття прийнята 20.02.2026

© Томчаковський Г. Г., Кучеренко Н. В., Капочкіна М. Б.

МІЖРІЧНА МІНЛИВІСТЬ ЛІТНЬОГО МУСОНУ У АРАВІЙСЬКОМУ МОРІ (ФАКТОРНИЙ АНАЛІЗ)

У роботі проаналізовано особливості міжрічної мінливості поверхневого хвилювання в зоні дії літнього Індоканського мусону у період 2010–2017 років у контексті задач морської логістики та безпеки мореплавства. Дослідження базується на узагальненні довготривалих рядів спостережень, що дозволило виявити закономірності формування хвильового режиму в різні роки та оцінити ступінь його варіабельності. На основі статистичного аналізу показано, що аномальні режими хвилювання можуть формуватися як у вигляді підвищеної інтегральної інтенсивності процесу, так і у формі сезонної динаміки без виражених екстремальних проявів. Це свідчить про складний характер міжрічної мінливості, який не завжди проявляється через очевидні штормові події, але може суттєво впливати на загальні умови мореплавства.

Встановлено, що класичні кліматичні індекси, зокрема ENSO та Індійськоокеанський диполь, не забезпечують однозначного пояснення фактичних відмінностей хвильового режиму Аравійського моря у зазначені роки. Це вказує на необхідність розширення існуючих підходів до інтерпретації кліматичних процесів і врахування додаткових чинників. Для ідентифікації причин виникнення аномальних проявів мусонної циркуляції обґрунтовано доцільність залучення геофізичних процесів до загальновідомого переліку впливових погодуутворюючих факторів. В результаті проведеного факторного аналізу міжрічної мінливості літнього мусону за 4-ма ознаками (було виділено 2010, 2013, 2015 та 2017 роки), на кількісному рівні підтверджено вплив мінливості кутової швидкості обертання Землі на літній мусон Аравійського моря. Залежності, які отримали у результаті цього аналізу дозволяють глибше зрозуміти механізми формування хвильового режиму та уточнити роль глобальних геофізичних процесів у динаміці мусонної циркуляції.

Отримані результати можуть бути використані для підвищення надійності прогнозування хвильових умов літнього мусону, оптимізації планування морських перевезень і зниження ризиків для судноплавства в Аравійському морі. Практичне значення дослідження полягає у можливості врахування виявлених закономірностей при розробленні моделей прогнозування та прийнятті управлінських рішень у сфері морської логістики.

Ключові слова: безпека мореплавства; літній Індоканський мусон; поверхневе хвилювання; міжрічна мінливість мусонів; ENSO; Індоканський диполь; геофізичні чинники.

Вступ

Аравійське море є одним із ключових вузлів світової логістики, де зосереджені судноплавні маршрути між Європою, Близьким Сходом та Південною Азією. Саме в цьому регіоні щорічно формується літній Індоканський мусон, що характеризується сильними вітрами і значним хвилюванням, які знижують безпеку мореплавства.

Як показано в роботах [1-4], класичне пояснення мусонної циркуляції базується на термічному контрасті між сушею та океаном. Динамічний підхід [5] доповнює це уявлення роллю загальної циркуляції атмосфери та планетарних хвиль. Проте, аналіз фактичних спостережень свідчить, що ці моделі не здатні пояснити реальну причину виникнення мусонних вітрів в Аравійському морі.

Особливий інтерес викликає міжрічна мінливість літнього мусону. Але, як зазначено у роботі [6], сучасні чисельні прогностичні моделі демонструють значні похибки прогнозування міжрічної мінливості мусонного вітру, що істотно знижує їх практичну цінність для забезпечення безпеки

мореплавства. Це може свідчити про неврахування у цих моделях впливових факторів, відповідальних за міжрічну мінливість літнього мусону.

У нашому дослідженні пропонується розглядати літній мусон в Аравійському морі в ширшому фізичному контексті – як елемент Індоканської системи океан–атмосфера, чутливий до змін гравітаційного поля, у тому числі за рахунок сезонної мінливості швидкості обертання Землі. Такий підхід, обґрунтований у наукових працях [7-9], дозволяє пояснити як регулярність виникнення літнього мусону, так і його міжрічну мінливість.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Аналіз наукових джерел свідчить, що дослідження мусонної циркуляції умовно можна згрупувати у три основні напрями.

Перший напрям представлений роботами, у яких мусонний клімат розглядається як термічно зумовлене явище, що формується внаслідок диференційного нагрівання суші та океану [1-4]. У межах цього підходу літній мусон інтерпретується як відповідь атмосфери на формування термічного мінімуму тиску над Індостаном. Разом із тим, результати спостережень показують часову неузгодженість між часом максимального прогріву суші, який фіксується наприкінці квітня, та початком мусонного вітру над Аравійським морем, який фіксується у червні і триває до вересня [6, 10].

Другий напрям охоплює динамічні моделі мусонної циркуляції, що базуються на загальній циркуляції атмосфери [5, 11]. Однак у тропічних широтах, зокрема над Аравійським морем, горизонтальна складова сили Кореолісу є малою, що істотно обмежує доцільність застосування геострофічного балансу. Як показано в [6, 12], величини баричних градієнтів, які спостерігаються в літній період, не забезпечують кількісно узгодженого пояснення реальної швидкості мусонних вітрів.

Третій напрям досліджень пов'язаний із врахуванням впливу геофізичних процесів на літній мусон у Аравійському морі [7-9, 13]. У цих роботах показано, що навіть незначні, але циклічні варіації регіонального гравітаційного поля та прискорення вільного падіння під час літнього максимуму швидкості обертання Землі навколо своєї осі, можуть призводити до перебудови регіонального баричного поля і відповідних змін у системі океан–атмосфера в Аравійському морі. Особливу роль у цьому контексті приділяється від'ємній аномалії геоїда Індійського океану, просторові та часові характеристики якої детально розглянуті в [14, 16, 17]. Наявність цієї аномалії створює умови для формування антициклонічної циркуляційної комірки над її центром, яка над Аравійським морем у червні – серпні співпадає з напрямком мусонного вітру.

В окрему групу можна виділити дослідження сезонного виникнення Сомалійської течії, як додаткового фактору формування літнього мусону за рахунок утворення апвелінгу холодних вод в Аравійському морі [6, 15]. Аналіз сезонної еволюції цих процесів свідчить про те, що генерація Сомалійської течії і, як наслідок, апвелінгу відбувається за відсутності південно - західного вітру, тобто передують виникненню мусонних вітрів Аравійського моря. Це суперечить класичному уявленню про виключно атмосферне походження мусонної циркуляції, та свідчить про активну роль океану у формуванні просторових термічних контрастів у приводному шарі повітря і, відповідно, у щорічній генерації та самопідтримці мусонного вітру у червні-серпні, як прояву процесу зі зворотнім позитивним зв'язком.

Сукупність результатів наукових досліджень, наведених у працях [7-9, 16, 17], вказує на необхідність врахування просторово-часової мінливості гравітаційного потенціалу у кількісних розрахунках міжрічної мінливості мусонної циркуляції в Індоканському регіоні. Це може підвищити якість забезпечення безпеки мореплавства в одному з найнебезпечніших регіонів світового судноплавства.

У роботі [16] вперше на кількісному рівні розглянуто механізм формування літнього мусонного вітру як наслідок взаємодії атмосфери з великомасштабною від'ємною аномалією сили тяжіння Індійського океану. Результати подальшого розвитку цього наукового підходу наведено в роботі [17], де показано, що мінливість інтенсивності мусонного вітру не може бути пояснена виключно варіаціями атмосферного тиску. У роботі [18] зроблено важливе наукове відкриття глобальної деформації Землі з річним циклом і екстремумами у березні і вересні.

Постановка проблеми

Одним із інструментів дослідження мусонного клімату обрано факторний аналіз. У виконаному нами дослідженні [16] на базі статистичних розрахунків було показано, що у травні 1997 року під час порушення гравітаційного балансу Землі ззовні, зафіксовано і аномалію мусонного клімату. У середині липня 1997 року зазначена аномалія почала поступово зникати. Формування відповідної аномалії поля геопотенціалу на рівні 200 гПа призводило до зміщення на південь кордону західних вітрів середніх широт [19].

Впливовий геодинамічний фактор регіонального рівня, що швидкоплинно (листопад 2001 - січень 2002 року) охопив Афро-Аравійсько-Індійський регіон і викликав аномальний літній мусон 2002 року, досліджувався нами в роботах [16, 17, 20, 21].

У продовження цього наукового напрямку, з метою визначення особливостей міжрічної мінливості літнього мусону Аравійського моря у 2010-2017 роках, було залучено низку загальновідомих факторів можливого зовнішнього впливу на мусонну циркуляцію.

Фактор № 1 – глобальна аномалія сейсмічних процесів планетарного масштабу в червні–вересні 2010 року. За даними [22], глобальна кількість опадів у 2010 році була максимальною за весь період інструментальних спостережень (з 1900 року). Принциповою особливістю 2010 року є синхронність антициклонічної аномалії над європейською територією РФ, що вважається однією з найпотужніших антициклонічних аномалій у Північній півкулі за весь період інструментальних спостережень, із нетиповими процесами в інших регіонах Північної півкулі, зокрема з аномально тривалим мусонним сезоном у Південній Азії та катастрофічною повінню в Пакистані.

Фактор № 2 – 2013 рік на глобальному рівні характеризувався вираженою кліматичною аномальністю: цей рік належить до найтепліших за весь інструментальний період. Характерною рисою 2013 року стало зростання частоти та інтенсивності екстремальних опадів у тропічних і субтропічних широтах. На регіональному рівні літній Індокіанський мусон 2013 року є прикладом максимальної інтенсивності референтної мусонної циркуляції.

Фактор № 3 – Ель-Ніньо 2015 року, для якого були характерні ослаблення пасатної циркуляції, перебудова системи екваторіальних течій та зміщення внутрішньотропічної зони конвекції. У контексті мусонних процесів 2015 рік відрізнявся підвищеною мінливістю атмосферної циркуляції, що суттєво вплинуло на стабільність літнього мусону [23].

Фактор № 4 – Ла-Нінья 2017 року, яка зумовила посилення пасатної циркуляції, інтенсифікацію західного переносу теплих вод і підсилення апвелінгу вздовж екватора. Це сприяло стабілізації великомасштабної циркуляції в тропіках. У мусонному контексті 2017 рік характеризувався більш упорядкованою структурою літнього мусону та зменшенням екстремальних відхилень.

Таким чином, у роботі виокремлено чотири фактори імовірного впливу процесів глобального масштабу на Індокіанську атмосферну циркуляцію мусонного типу. Визначено, що період 2010–2017 років на глобальному рівні характеризується високою міжрічною мінливістю ENSO:

2010 рік характеризувався сильною фазою Ла-Нінья, яка супроводжувалася посиленням пасатної циркуляції;

2013 рік співпав з періодом, коли роль ENSO була мінімальною, що робить 2013 рік показовим для аналізу процесів, не пов'язаних безпосередньо з ENSO;

2015 рік ознаменувався розвитком одного з найпотужніших Ель-Ніньо за весь інструментальний період спостережень і супроводжувався значним ослабленням пасатної циркуляції, перебудовою екваторіальних течій;

2017 рік фази Ла-Нінья, яка супроводжувалася посиленням пасатної циркуляції, інтенсифікацією апвелінгу.

Визначено також, що зазначений період на регіональному рівні характеризується високою міжрічною мінливістю IOD:

2010 рік відзначався позитивною фазою IOD, що супроводжувалася підвищенням температури Аравійського моря (прояви IOD були нерівномірними у часі);

2013 рік характеризувався нейтральною фазою IOD, тобто максимальна активність Індокоеанського мусону 2013 року реалізовувалася без домінуючого впливу IOD;

2015 рік відзначався позитивною фазою IOD, яка співала з Ель-Ніньо; і навіть за умов позитивного IOD мусон був пригніченим, що вказує на відсутність залежності між фазою IOD та інтенсивністю мусону;

2017 рік характеризувався нейтральною фазою IOD, коли спостерігалось пригнічення мусонної активності. Таким чином, можна зробити висновок, що IOD не може розглядатися як самодостатній фактор міжрічної мінливості Індокоеанського мусону.

Індійські мусони у 2010–2017 роках також характеризувалися як:

- 2013 р. – еталонний потужний мусон;
- 2010 р. – потужний фрагментований мусон;
- 2015 р. – найслабший фрагментований мусон;
- 2017 р. – стабільно слабкий мусон.

Для впорядкування виявлених факторів впливу на характеристики мусонної циркуляції міжрічного масштабу нам здалося можливим використати фізико - статистичний метод факторного аналізу.

Для розв'язання завдань факторного аналізу використано дані проєктів AVISO+ (просторово-часові зміни поверхневого хвилювання в Аравійському морі), а також матеріали сайтів [24] (синоптичні карти атмосферного тиску) і [25] (результати вимірювань кутової швидкості обертання Землі (КШОЗ)). Також були враховані результати досліджень [8, 16, 17, 26, 27], що підтверджують вплив геодинамічних процесів на мусонну циркуляцію атмосфери над Аравійським морем.

Виклад основного матеріалу дослідження

Для визначення зв'язку міжрічної відмінності літнього Індокоеанського мусону з геофізичними процесами було використано факторний аналіз. Було проаналізовано зміни баричного поля над Аравійським морем у літній сезон (червень, липень, серпень). У якості вихідних даних використано синоптичні карти з [24]. Важливо зазначити, що за результатами аналізу синоптичних карт, літні сезони 2010–2017 років практично не відрізнялися за конфігурацією баричного поля над Аравійським морем. Це свідчить про те, що відмінності в міжрічній інтенсивності та структурі літнього мусону в зазначені роки не можуть бути наслідком градієнтів атмосферного тиску. Тому у якості об'єктивної кількісної характеристики інтенсивності літніх мусонів у 2010–2017 роках ми вибрали характеристики поверхневого хвилювання в Аравійському морі, отримані за даними проєкту AVISO (щоденні поля поверхневих хвиль). Для літнього сезону (червень–серпень) в акваторії Аравійського моря було розраховано статистичні оцінки середнього значення, дисперсії та накопиченої суми позитивних екстремумів висот хвиль (табл. 1).

Таблиця 1 – Статистичні оцінки максимальних висот хвиль в Аравійському морі за червень-серпень 2010-2017 рр.

Рік	Середнє (м)	Дисперсія	Накопичена сума висот хвиль (м)
2010	3,7	0,52	345
2011	3,6	0,21	332
2012	3,7	0,19	341
2013	4,0	0,59	369
2014	3,7	0,75	340
2015	3,5	0,76	319
2016	3,7	0,49	341
2017	3,5	0,35	321

Отримані результати об'єктивно підтверджують, що 2013 рік чітко виділяється як рік максимальної активності літнього мусону: середня висота хвиль досягала 4 м, а накопичена сума висот хвиль за сезон була максимальною серед усіх років вибірки.

На противагу, 2015 та 2017 роки, обрані за екстремальним проявом системи Ель-Ніньо – Ла-Нінья, характеризуються мінімальними значеннями висоти хвиль ($\approx 3,5$ м) та екстремально низькими значеннями накопиченої суми висот хвиль, що свідчить про пригнічення літньої мусонної циркуляції. У 2015 році, який відповідає фазі Ель-Ніньо (фактор №3), зафіксовано максимальну дисперсію хвилювання (0,76), тобто, найвищу внутрішню сезонну мінливість. З огляду на те, що за умов епізодичних штормів середнє значення перевищує моду, є підстави вважати, що у 2015 році мусонний вітер мав фрагментований характер, періодично перериваючись штильовими умовами. Це опосередковано підтверджується найменшим значенням накопиченої суми висот хвиль, що відображає низьку інтегральну енергію мусону впродовж сезону. Отже, фактор Ель-Ніньо у 2015 році суттєво пригнічував мусонну циркуляцію в Аравійському морі.

Водночас, практично такий самий інтегральний ефект був зафіксований у 2017 році, що відповідає фазі Ла-Нінья (фактор №4) – антиподу Ель-Ніньо за знаком. Проте, на відміну від 2015 року, 2017 рік характеризувався меншою дисперсією хвилювання, тобто більш упорядкованою структурою літнього мусону без різких екстремальних відхилень. Таким чином, протилежні фази ENSO (Ель-Ніньо та Ла-Нінья) призводять до однакового результату – ослаблення літнього мусону, але реалізуються через різні механізми: у фазі Ель-Ніньо – через підвищену нестійкість і фрагментацію циркуляції; у фазі Ла-Нінья - через стабілізоване пригнічення.

Узагальнюючи наведені результати, можна зробити висновок, що система Ель-Ніньо – Ла-Нінья не є визначальним фактором міжрічної мінливості сили літнього мусону в Аравійському морі.

З метою поглибленого застосування факторного аналізу було вирішено виконати апроксимацію часових рядів поверхневого хвилювання у літній сезон 2010-2017 років поліномом другого ступеня:

$$= A \cdot T^2 + B \cdot T + C, \quad (1)$$

де, H – висота хвилі;

T – календарна дата літнього мусону;

A, B, C – відповідні розрахункові коефіцієнти поліноміальної регресійної моделі.

У результаті дослідження часової мінливості максимальних значень поверхневих хвиль в Аравійському морі під час літнього мусону було підтверджено, що типовий розвиток літнього мусону має чітко виражену сезонну структуру. Як правило, мусон починається на початку червня, досягає екстремальних значень у липні та завершується наприкінці серпня. Таким чином, період червень–серпень об'єктивно описується параболою з позитивним екстремумом у середині сезону. Коефіцієнти полінома в різні роки змінюватимуться за умов дії аномального зовнішнього впливу. Якщо міжрічні відмінності коефіцієнтів поліноміальної апроксимації є статистично значущими, то це створює формальну підставу для застосування факторного аналізу. Результати поліноміальної апроксимації літнього мусону за показником максимальних щоденних значень поверхневих хвиль у вигляді графіків показано на рис. 1.

За результатами якісного (візуального) аналізу отримані графіки умовно було поділено на дві групи: роки з очікуваним типом параболічної залежності (2014, 2015, 2016) та роки з аномальним типом графіку (2010, 2011, 2012, 2013, 2017).

Важливо відмітити, що мусон 2010 року не виділявся ні мінімальними, ні максимальними значеннями інтегральних показників поверхневого хвилювання. Проте аналіз параметрів поліноміальної апроксимації (табл. 2) свідчить про принципову відмінність мусону 2010 року. Зокрема, для 2010 року характерні екстремальні значення коефіцієнтів A, B і C , висока дисперсія коефіцієнта A а також максимальні значення медіани та середнього квадратичного відхилення залишків апроксимації поліноміальної моделі. Ці особливості вказують на порушення типової параболічної структури сезонного ходу поверхневого хвилювання, зростання випадкової складової та нестійкість моделі

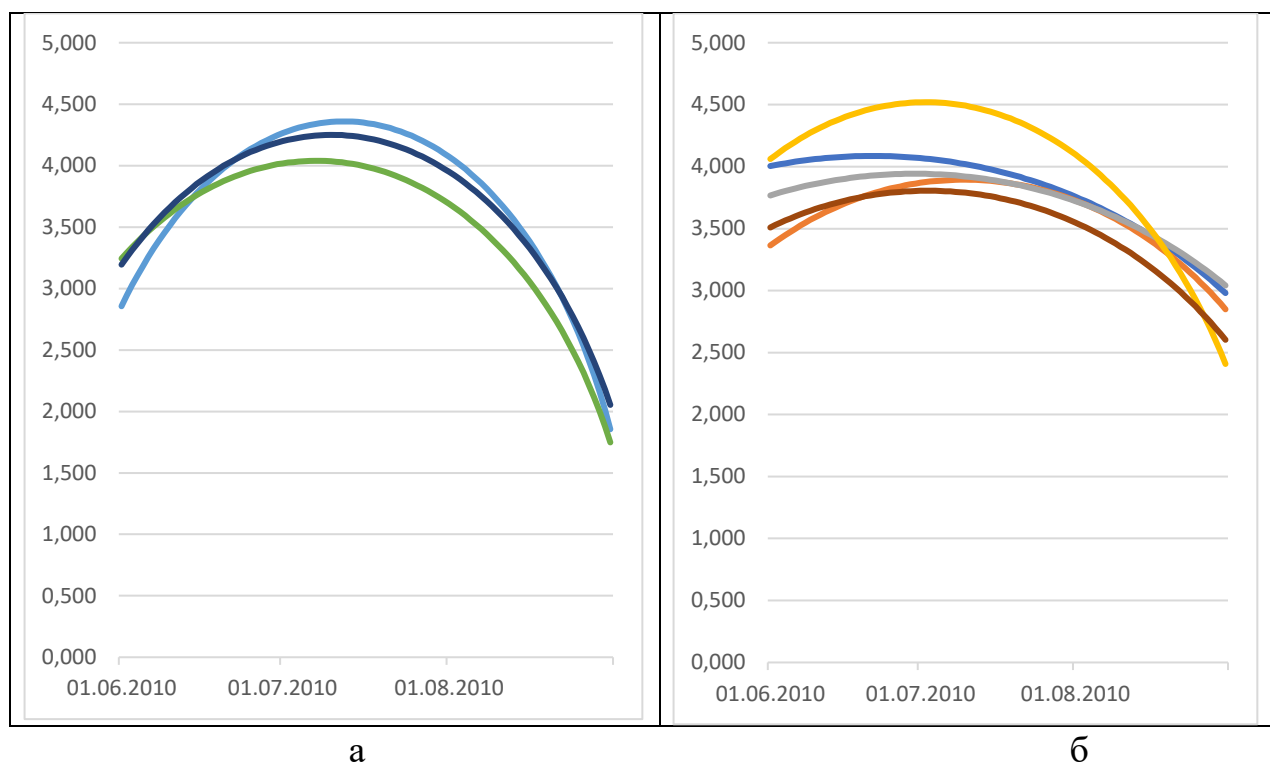


Рисунок 1 – Результати поліноміальної апроксимації літнього мусону за показником максимальних щоденних значень поверхневих хвиль: а) роки з очікуваним типом параболи (2014 – блакитна лінія, 2015 – помаранчева лінія, 2016 – синя лінія); б) роки з аномальним типом графіку (2010 – блакитна лінія, 2011 – червона лінія, 2012 – зелена лінія, 2013 – фіолетова лінія, 2017 – коричнева лінія).

У табл. 2 наведено статистичні характеристики поверхневого хвилювання (максимальна висота хвиль) в Аравійському морі (X – середнє значення, D – дисперсія, Σ – накоплена сума), коефіцієнти полінома другого ступеня (A , B , C), дисперсія коефіцієнту A , середнє квадратичне відхилення (СКВ) моделі поліноміальної апроксимації, медіана та СКВ залишків поліноміальної апроксимації поверхневого хвилювання під час літніх мусонів у 2010-2017 роках.

Таблиця 2 – Статистичні характеристики поверхневого хвилювання в Аравійському морі, у тому числі, поліноміальної апроксимації часових змін хвилювання

Рік	X	D	Σ	A	Дисперсія $A \cdot 10^{-4}$	B	C	СКВ моделі	Залишки моделі медіана	Залишки моделі СКВ
2010	3,7	0,52	345	-0,0002	8,4	0,0068	16,1	5,11	-0,92	5,02
2011	3,6	0,21	332	-0,0025	4,5	0,204	11,11	2,75	0,4	2,4
2012	3,7	0,19	341	-0,0016	4,6	0,1	14,1	2,8	-0,31	2,74
2013	4,0	0,59	369	-0,004	7,7	0,26	16,1	4,65	-0,23	4,57
2014	3,7	0,75	340	-0,06	7,8	0,54	7,6	4,6	-0,88	4,52
2015	3,5	0,76	319	-0,04	9,2	0,33	10,2	5,6	-0,103	5,49
2016	3,7	0,49	341	-0,05	6,8	0,41	9,8	4,1	-0,53	4,06
2017	3,5	0,35	321	-0,02	5,9	0,14	12,2	3,6	-0,446	3,54

Результат порівняння статистичних характеристик полінома другого ступеня поверхневого хвилювання в Аравійському морі 2010 та 2015 років є особливо показовим. Якщо у 2015 році (фактор №3 – Ель-Нін'ю) ослаблення мусонної циркуляції чітко проявляється в інтегральних показниках (табл. 1) – мінімальній середній висоті хвиль, мінімальній накопиченій сумі та максимальній мінливості, то у 2010 році аномалія має прихований характер і виявляється лише через

аналіз поліноміального тренду та статистик залишків. Отже, 2010 рік є прикладом «скритної аномалії», яка не ідентифікується на етапі першого наближення.

Таким чином, 2010 рік (фактор №1) за об'єктивними статистичними даними відрізняється тим, що має:

- має екстремальні значення коефіцієнтів А, В і С;
- характеризується низькою достовірністю оцінки коефіцієнта А (велика дисперсія $A \cdot 10^{-4}$);
- демонструє максимальні значення медіани та СКВ залишків;
- має підвищені, але не екстремальні інтегральні показники хвилювання (дисперсія 0,52; накопичена сума 345).

Це означає, що у 2010 році аномалія не проявлялася як ослаблення або посилення мусону за середніми характеристиками, а виявлялася саме як порушення звичної сезонної еволюції хвилювання.

Узагальнюючи наведені результати, можна зробити висновок, що аналіз поліноміальних трендів і статистик залишків є критично важливим для ідентифікації аномальних років літньої мусонної циркуляції. Літній мусон в Аравійському морі реагує на зовнішній вплив не уніфіковано, а тому його коректний аналіз потребує одночасного врахування як енергетичних показників (середнє значення, накопичена сума), так і структурних характеристик (форма сезонного тренду, параметри апроксимації). Саме такий підхід є принципово важливим для подальших наукових досліджень і для задач прогнозування небезпечних умов мореплавства. Таким чином, аномальні роки вказують на вплив зовнішніх факторів, що порушують типову параболічну сезонну структуру хвилювання літнього мусону.

Якщо розглядати кутову швидкість обертання Землі (КШОЗ), як причину мінливості системи океан-атмосфера в районі літнього мусону в Аравійському морі, то за наявності вхідних даних за більш тривалий період (2002-2017 роки) можливості факторного аналізу суттєво збільшуються. Часові ряди КШОЗ були апроксимовані поліномом другого ступеня відповідно до алгоритму, задіяного для обробки часових рядів поверхневого хвилювання. Результати поліноміальної апроксимації літнього мусону за показником КШОЗ у вигляді графіків показано на рис. 2, 3.

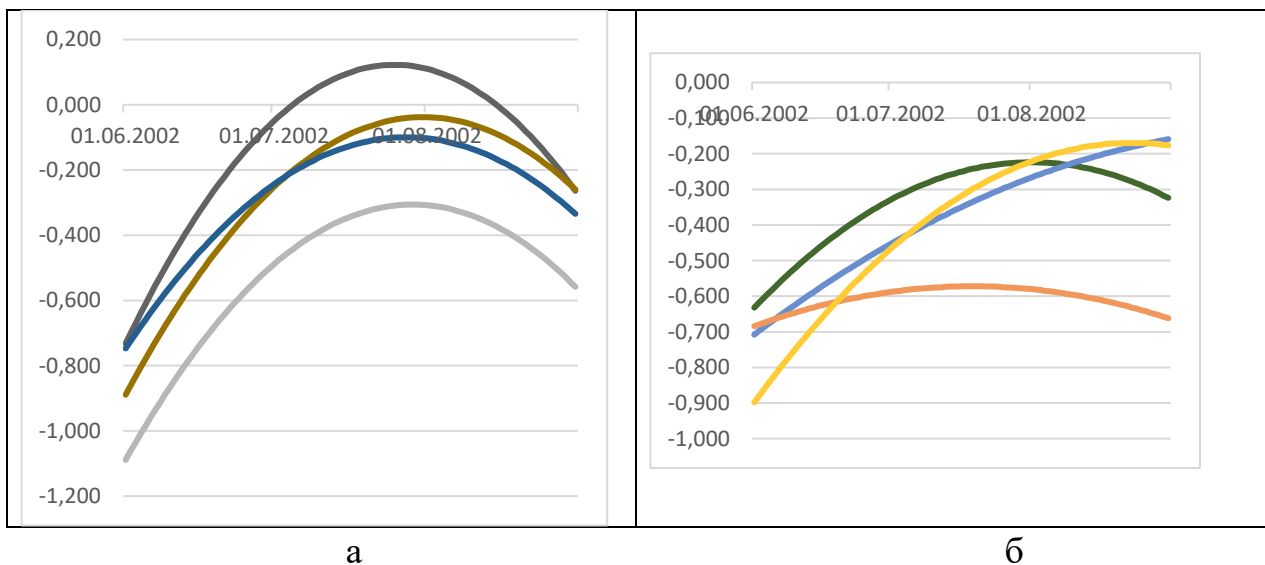


Рисунок 2 – Результати поліноміальної апроксимації КШОЗ під час літнього мусону: а) роки з очікуваним типом параболи (2010 - зелена лінія, 2011 - фіолетова лінія, 2012 - синя лінія, 2016 - салатна лінія); б) роки з аномальним типом графіку (2013 - коричнева лінія, 2014 - блакитна лінія, 2015 - рожева лінія, 2017 - фіолетова лінія).

За результатами суб'єктивного (візуального) аналізу даних розрахунків, загальна кількість графіків була розділена на дві групи. Перша група (роки з очікуваним типом параболи) включала: 2010,

2011, 2012, 2016 роки; а друга група (роки з аномальним типом графіку): графіки 2013, 2014, 2015, 2017 років.

Графіки поліноміальної апроксимації кутової швидкості обертання Землі у літній сезон (червень – серпень) демонструють наявність чітко вираженого сезонного екстремуму, який у більшості років може бути описаний параболою другого порядку. Разом із тим, уже на рівні графічного представлення помітно, що форма парабол істотно відрізняється між роками. В окремих випадках вершина параболи є чітко визначеною, симетричною та локалізованою в середині сезону, тоді як в інших – спостерігається асиметрія, сплюснення екстремуму або його зсув. Це означає, що навіть за наявності формально подібної апроксимації динамічна структура сезонної мінливості КШОЗ не є однорідною.

З досліджуваних 4-х факторів впливу на літній мусон, у першу групу потрапив 2010 рік, а у другу - 2013, 2015, 2017. Таким чином можна констатувати, що три (2013, 2015, 2017) з чотирьох років (2010, 2013, 2015, 2017) літнього мусону, обраних за критерієм факторного аналізу, відбулися в роки з аномальним типом КШОЗ під час щорічного позитивного екстремуму у червні – серпні. Результати поліноміальної апроксимації даних КШОЗ наведено у табл. 3.

Таблиця коефіцієнтів полінома другого ступеня (А, В, С), стандартних похибок коефіцієнта А та середньоквадратичного відхилення (СКВ) моделі дозволяє перейти від описової до структурної інтерпретації сезонної мінливості КШОЗ.

Коефіцієнт А визначає інтенсивність і форму сезонного екстремуму. Аналіз числових значень показує, що його діапазон є дуже широким: від слабо від’ємних значень до різко виражених негативних екстремумів. Це означає, що в різні роки швидкість формування та амплітуда сезонного максимуму КШОЗ істотно змінюється.

Таблиця 3 – Результати поліноміальної апроксимації даних КШОЗ

Рік	Коефіцієнт $A \cdot 10^{-4}$	СКВ $A \cdot 10^{-5}$	Коефіцієнт В	Коефіцієнт С	СКВ моделі
2002	-0,134	3,04	0,004	-0,21	0,183
2003	-1,68	1,81	0,016	-0,22	0,109
2004	-2,08	1,53	0,022	-0,44	0,093
2005	-0,98	2,04	0,012	-0,035	0,123
2007	-0,69	1,36	0,015	-0,90	0,082
2008	-0,73	1,09	0,012	-0,55	0,066
2009	-2,40	1,38	0,028	-1,07	0,083
2010	-2,90	1,17	0,032	-0,76	0,07
2011	-2,34	1,04	0,029	-0,92	0,063
2012	-2,01	1,83	0,023	-0,77	0,11
2013	-1,10	1,47	0,014	-0,64	0,09
2014	-4,03	1,34	0,009	-0,71	0,081
2015	-4,86	1,09	0,005	-0,69	0,120
2016	-2,32	1,68	0,027	-1,12	0,100
2017	-1,06	1,64	0,016	-0,91	0,100

Аналіз графіків на рис. 2 свідчить про міжрічний максимум і максимальну кривизну позитивного екстремуму КШОЗ у 2010 році; його максимальну асиметрію екстремуму від липня до серпня. Тобто, 2010 рік, обраний за фактором №1, є прикладом «скритної аномалії КШОЗ».

Таким чином, в результаті проведених досліджень міжрічної мінливості літнього мусону за визначеними факторами, які виділяли 2010, 2013, 2015 та 2017 роки, було підтверджено незвичайний характер, за ознакою «впливового» на мусон, фактору КШОЗ саме у ці роки.

За наявності вхідних даних за період 2002-2017 роки, виникла можливість виконати дослідження і стосовно мусонів 2002 і 2005 років, що сформувалися в умовах геофізичних аномалій (за даними [16,

17]) регіонального і глобального масштабів відповідно. На рис. 3 наведено результати поліноміальної апроксимації літнього позитивного екстремуму КШОЗ у 2002-2009 роках.

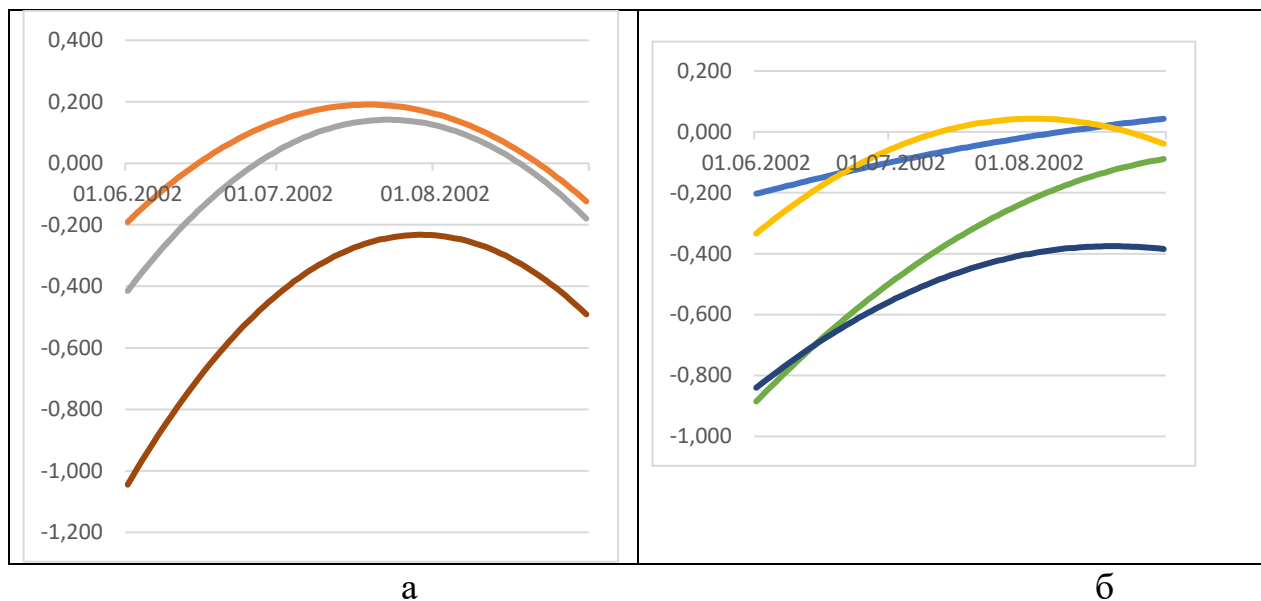


Рисунок 3 – Результати поліноміальної апроксимації літнього мусону за показником КШОЗ: а) роки з очікуваним типом параболи (2003 – рожева лінія, 2004 – зелена лінія, 2009 – коричнева лінія); б) роки з аномальним типом графіку (2002 – блакитна лінія, 2005 – фіолетова лінія, 2007 – жовта лінія, 2008 – синя лінія).

За об'єктивними даними 2002 рік, як рік незвичайної тектонічної активізації Східно-Африканського рифту та екстремальної посухи в Індії [16, 17], у таблиці 3 за 5-ма статистичними показниками з 5-ти сформувався під аномальним впливом КШОЗ. Тобто, 2002 рік чітко виділяється серед усіх досліджених років як рік з максимальною структурною аномальністю сезонної мінливості кутової швидкості обертання Землі. Саме для цього року зафіксовано максимальне значення коефіцієнта А, мінімальним значенням коефіцієнта В, що свідчить про різко порушену симетрію сезонного ходу, максимальним значенням коефіцієнта С, тобто екстремальним зсувом фонового рівня КШОЗ, а також найгіршою якістю поліноміальної апроксимації, що підтверджується максимальними значеннями середньоквадратичного відхилення моделі. Таким чином, 2002 рік відрізняється за всіма статистичними показниками, що дозволяє розглядати його як унікальний випадок глибокої структурної перебудови сезонної мінливості КШОЗ. Цей статистичний висновок узгоджується з незалежними геофізичними спостереженнями, відповідно до яких 2002 рік був роком незвичайної тектонічної активізації Східно-Африканського рифту, а також роком екстремальної посухи в Індії, що свідчить про масштабний характер геодинамічних процесів у цей період.

На другому місці за показником аномальності є 2005 рік (рік глобальної геодинамічної кризи [21]), для якого екстремальні значення зафіксовано за трьома з п'яти статистичних показників (табл. 3). Таким чином, результати факторного аналізу дозволили додатково підтвердити висновки, опубліковані нами у роботах [16, 17] стосовно того, що незвичайні геофізичні умови 2002 і 2005 років вплинули на мусонну циркуляцію опосередковано в результаті аномальної мінливості літнього позитивного екстремуму кутової швидкості обертання Землі у ці роки.

Висновки

В результаті проведених досліджень міжрічної мінливості літнього мусону у Аравійському морі (за факторним аналізом виділяли 2010, 2013, 2015 та 2017 роки), було підтверджено вплив на літній мусонний клімат часових змін кутової швидкості обертання Землі навколо своєї осі у червні-серпні. Отримані результати свідчать, що КШОЗ може розглядатися як геофізичний фактор, здатний впливати на структурні перебудови тропічної зони системи океан-атмосфера в зоні дії літнього Індоканського мусону в Аравійському морі. На відміну від кліматичних індексів (ENSO, IOD), вплив яких на літній

мусон виявився неоднозначним, фактор КШОЗ демонструє здатність формувати як енергетичні, так і структурні міжрічні аномалії літнього мусону Аравійського моря.

Таким чином, результати дослідження підтверджують доцільність інтеграції фактору КШОЗ у чисельні моделі прогнозування літнього мусону.

З позицій морської логістики, використання інформації про міжрічну та внутрішньосезонну мінливість КШОЗ відкриває можливість завчасної класифікації літніх мусонних сезонів за типом очікуваного хвильового режиму (потужний, слабкий, структурно аномальний). Це, у свою чергу, створює основу для оптимізації сезонного планування перевезень, вибору маршрутів, графіків заходу суден у порти та управління ризиками простою флоту.

ЛІТЕРАТУРА

1. Webster P. J. The elementary monsoon. *Monsoons* / ed. by J. Fein, P. Stephens. – New York: Wiley, 1987. P. 3–32.
2. Gadgil S. The Indian monsoon and its variability. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*. 2003. Vol. 31. P. 429–467.
3. Krishnamurti T. N., Bhalme H. N. Oscillations of a monsoon system. Part I. Observational aspects. *Journal of the Atmospheric Sciences*. 1976. Vol. 33. P. 1937–1954.
4. Meehl G. A. The annual cycle and interannual variability in the tropical Pacific and Indian Ocean regions. *Monthly Weather Review*. 1987. Vol. 115. P. 27–50.
5. Gill A. E. Some simple solutions for heat-induced tropical circulation // *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. 1980. Vol. 106. P. 447–462.
6. Indian monsoons under close scrutiny of scientists [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://courier.unesco.org/ru/articles/indiyskie-mussony-pod-pristalnym-vnimaniem-uchenykh> (дата звернення: 12.01.2026).
7. Максимов І. В. Зміна швидкості обертання Землі та баричне поле північної півкулі Землі. 1973. Т. 210, № 1. С. 67–70.
8. Сидоренков Н. С. Атмосферні процеси та обертання Землі.: Гідрометеоіздат, 2002. 366 с.
9. Сидоренков Н. С., Сумерова К. А. Геодинамічні причини декадних змін клімату. 2012. Вип. 348. С. 195–214.
10. Wang B. The Asian monsoon. Berlin: Springer, 2006. 787 p.
11. Holton J. R. An Introduction to Dynamic Meteorology. 4th ed. Amsterdam: Elsevier, 2004. 535 p.
12. Соколикіна Е. В. Циркуляція атмосфери синоптичного масштабу в період явища Ель-Ніньо – Південне коливання : автореф. дис. ... канд. геогр. наук., 2004. 24 с.
13. Lambeck K. The Earth's variable rotation: Geophysical causes and consequences. Cambridge: Cambridge University Press, 1980. 449 p.
14. Hager B. H., Clayton R. W., Richards M. A., et al. Lower mantle heterogeneity, dynamic topography and the geoid. *Nature*. 1985. Vol. 313. P. 541–545.
15. Schott F. A., McCreary J. P. The monsoon circulation of the Indian Ocean *Progress in Oceanography*. 2001. Vol. 51. P. 1–123.
16. Кучеренко Н. В., Томчаковський Г. Г., Капочкіна М. Б., Калініченко Є. В. Умови формування мусонного вітру над Індокіанською аномалією сили тяжіння *Водний транспорт. Збірник наукових праць Державного університету інфраструктури та технологій*. Київ: ДУІТ, 2025. Вип. 1 (42). С. 115–130. DOI: <https://doi.org/10.33298/2226-8553.2025.1.42>.
17. Томчаковський Г. Г., Капочкіна М. Б. Результати дослідження причин мусонного вітру над Індокіанською аномалією сили тяжіння. *Водний транспорт*. 2025. № 2 (43). С. 57–74. DOI: <https://doi.org/10.33298/2226-8553.2025.2.43.05>.
18. Blewitt G., Lavallée D., Clarke P., Nurutdinov K. A new global mode of Earth deformation: seasonal cycle detected // *Science*. 2001. Vol. 294, No. 5550. P. 2342–2345. DOI: 10.1126/science.1065328.
19. Climate Assessment for 1994–1998 [Електронний ресурс] / U.S. Department of Commerce, National Weather Service, Climate Prediction Center. Режим доступу: <https://www.cpc.ncep.noaa.gov> (дата звернення: 12.01.2026).
20. Войтенко С. П., Учитель І. Л., Ярошенко В. Н., Капочкін Б. Б. Геодинаміка. Основи кінематичної геодезії. Одеса: Астропринт, 2007. 259 с.
21. Учитель І. Л., Ярошенко В. Н., Капочкін Б. Б. Геодинаміка. Основи динамічної геодезії / под ред. С. П. Войтенко. Одеса: Астропринт, 2008. 311 с.

22. Global Climate Report: 2010 [Електронний ресурс] / NOAA NCEI. Режим доступу: <https://www.ncei.noaa.gov/access/monitoring/monthly-report/global/201013> (дата звернення: 12.01.2026).
23. El Niño and the record years 1998 and 2016 [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.realclimate.org/index.php/archives/2017/11/el-nino-and-the-record-years-1998-and-2016/> (дата звернення: 12.01.2026).
24. Deutscher Wetterdienst (DWD) [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.dwd.de/> (дата звернення: 12.01.2026).
25. International Earth Rotation and Reference Systems Service (IERS) [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://hpiers.obspm.fr/> (дата звернення: 12.01.2026).
26. Томчаковський Г. Г., Капочкіна М. Б., Калініченко Є. В. Дослідження мінливості «мусонної депресії» у Бенгальській затоці. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*. 2025. Вип. 51. С. 250–262. DOI: 10.31498/2225-6733.51.2025.344961.
27. Бороздич Э. В. Вплив короткоживучих підкіркових локальних збурень на літо-, гідро- та атмосферу. 1990. С. 130–140.
28. Колесник А. В., Доля В. Д., Кучеренко Н. В. Використання ГІС для вивчення причин формування мусонів Індійського океану// *Часопис картографії*. 2015. Вип. 12. С. 82–89. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/ktvsh_2015_12_11 (дата звернення: 12.01.2026).

REFERENCES

- Webster, P. J. (1987). The elementary monsoon. In J. Fein & P. Stephens (Eds.), *Monsoons* (pp. 3–32). New York: Wiley.
- Gadgil, S. (2003). The Indian monsoon and its variability. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 31, 429–467.
- Krishnamurti, T. N., & Bhalme, H. N. (1976). Oscillations of a monsoon system. Part I: Observational aspects. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 33, 1937–1954.
- Meehl, G. A. (1987). The annual cycle and interannual variability in the tropical Pacific and Indian Ocean regions. *Monthly Weather Review*, 115, 27–50.
- Gill, A. E. (1980). Some simple solutions for heat-induced tropical circulation. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 106, 447–462.
- Indian monsoons under close scrutiny of scientists. (n.d.). Retrieved September 12, 2024, from <https://courier.unesco.org/ru/articles/indiyskie-mussony-pod-pristalnym-vnimaniem-uchenykh>
- Maksimov, I. V. (1973). Zmina shvydkosti obertannia Zemli ta barychne pole pivnichnoi pivkuli Zemli [Changes in Earth's rotation rate and the baric field of the Northern Hemisphere]. *Doklady Akademii Nauk SSSR*, 210(1), 67–70.
- Sidorenkov, N. S. (2002). *Atmosferni protsesy ta obertannia Zemli* [Atmospheric processes and Earth rotation]. Saint Petersburg: Gidrometeoizdat. 366 p.
- Sidorenkov, N. S., & Sumerova, K. A. (2012). Heodynamichni prychny dekadnykh zmin klimatu [Geodynamic causes of decadal climate variability]. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 348, 195–214.
- Wang, B. (2006). *The Asian monsoon*. Berlin: Springer. 787 p.
- Holton, J. R. (2004). *An introduction to dynamic meteorology* (4th ed.). Amsterdam: Elsevier. 535 p.
- Sokolyhina, E. V. (2004). Tsyrukuliatsiia atmosfery synoptychnoho masshtabu v period yavvyshcha El-Nino – Pivdenne kolyvannia [Atmospheric circulation at synoptic scale during ENSO] (Extended abstract of candidate's thesis). 24 p.
- Lambeck, K. (1980). *The Earth's variable rotation: Geophysical causes and consequences*. Cambridge: Cambridge University Press. 449 p.
- Hager, B. H., Clayton, R. W., Richards, M. A., et al. (1985). Lower mantle heterogeneity, dynamic topography and the geoid. *Nature*, 313, 541–545.
- Schott, F. A., & McCreary, J. P. (2001). The monsoon circulation of the Indian Ocean. *Progress in Oceanography*, 51, 1–123.
- Kucherenko, N. V., Tomchakovskiy, H. H., Kapochkina, M. B., & Kalinichenko, Ye. V. (2025). Umovy formuvannia musonnoho vitru nad Indookeanskoiu anomalieiu syly tiazhinnia [Conditions of monsoon wind formation over the Indian Ocean gravity anomaly]. *Vodnyi transport*, 1(42), 115–130. <https://doi.org/10.33298/2226-8553.2025.1.42>

17. Tomchakovskiy, H. H., & Kapochkina, M. B. (2025). Rezultaty doslidzhennia prychnyn musonnoho vitru nad Indookeanskoiu anomalieiu syly tiazhinnia [Results of studying the causes of monsoon wind]. *Vodnyi transport*, 2(43), 57–74. <https://doi.org/10.33298/2226-8553.2025.2.43.05>
18. Blewitt, G., Lavallée, D., Clarke, P., & Nurutdinov, K. (2001). A new global mode of Earth deformation: Seasonal cycle detected. *Science*, 294(5550), 2342–2345. <https://doi.org/10.1126/science.1065328>
19. U.S. Department of Commerce, National Weather Service, Climate Prediction Center. (n.d.). Climate assessment for 1994–1998. Retrieved September 12, 2024, from <https://www.cpc.ncep.noaa.gov>
20. Voitenko, S. P., Uchytel, I. L., Yaroshenko, V. N., & Kapochkin, B. B. (2007). *Heodynamika. Osnovy kinematychnoi heodezii* [Geodynamics: Fundamentals of kinematic geodesy]. Odesa: Astroprint. 259 p.
21. Uchytel, I. L., Yaroshenko, V. N., & Kapochkin, B. B. (2008). *Heodynamika. Osnovy dynamichnoi heodezii* [Geodynamics: Fundamentals of dynamic geodesy]. Odesa: Astroprint. 311 p.
22. NOAA NCEI. (n.d.). Global climate report: 2010. Retrieved September 12, 2024, from <https://www.ncei.noaa.gov/access/monitoring/monthly-report/global/201013>
23. El Niño and the record years 1998 and 2016. (2017). Retrieved September 12, 2024, from <https://www.realclimate.org/index.php/archives/2017/11/el-nino-and-the-record-years-1998-and-2016/>
24. Deutscher Wetterdienst (DWD). (n.d.). Retrieved September 12, 2024, from <https://www.dwd.de/>
25. International Earth Rotation and Reference Systems Service (IERS). (n.d.). Retrieved September 12, 2024, from <https://hpiers.obspm.fr/>
26. Tomchakovskiy, H. H., Kapochkina, M. B., & Kalinichenko, Ye. V. (2025). Doslidzhennia minlyvosti “musonnoi depresii” u Benhalskii zatozi [Study of variability of the monsoon depression in the Bay of Bengal]. *Visnyk Pryazovskoho derzhavnogo tekhnichnogo universytetu. Seriya: Tekhnichni nauky*, 51, 250–262. <https://doi.org/10.31498/2225-6733.51.2025.344961>
27. Borozdych, E. V. (1990). Vplyv korotkozhyvuchykh pidkirkovykh lokalnykh zburien na lito-, hidro- ta atmosferu [Influence of short-lived subcrustal disturbances on lithosphere, hydrosphere and atmosphere]. 130–140.
28. Kolesnyk, A. V., Dolia, V. D., & Kucherenko, N. V. (2015). Vykorystannia HIS dlia vyvchennia prychnyn formuvannia musoniv Indiiskoho okeanu [Use of GIS to study monsoon formation]. *Chasopys kartohrafiï*, 12, 82–89. Retrieved September 12, 2024, from http://nbuv.gov.ua/UJRN/ktvsh_2015_12_11

Tomchakovsky G., Kucherenko N., Kapochkina M.

THE INTERANNUAL VARIABILITY OF THE SUMMER MONSOON IN THE ARABIAN SEA (FACTOR ANALYSIS)

The paper analyzes the features of the interannual variability of surface waves in the area of action of the summer Indian Ocean monsoon in the period 2010–2017 in the context of the tasks of maritime logistics and navigation safety. The study is based on the generalization of long-term observation series, which made it possible to identify the regularities of the formation of the wave regime in different years and assess the degree of its variability. Based on statistical analysis, it is shown that anomalous wave regimes can be formed both in the form of an increased integral intensity of the process and in the form of seasonal dynamics without pronounced extreme manifestations. This indicates the complex nature of interannual variability, which is not always manifested through obvious storm events, but can significantly affect the general conditions of navigation.

It is established that classical climate indices, in particular ENSO and the Indian Ocean Dipole, do not provide an unambiguous explanation of the actual differences in the wave regime of the Arabian Sea in the indicated years. This indicates the need to expand existing approaches to the interpretation of climate processes and take into account additional factors. To identify the causes of anomalous manifestations of monsoon circulation, the feasibility of including geophysical processes in the well-known list of influential weather-forming factors has been substantiated. As a result of the factor analysis of the interannual variability of the summer monsoon by 4 characteristics (2010, 2013, 2015 and 2017 were highlighted), the influence of the variability of the Earth's angular velocity on the summer monsoon of the Arabian Sea was confirmed at the quantitative level. The dependencies which were formed as the result of the given analyses provide a deeper

understanding of the mechanisms of wave regime formation and clarify the role of global geophysical processes in the dynamics of monsoon circulation.

The results obtained can be used to increase the reliability of forecasting wave conditions of the summer monsoon, optimize the planning of maritime transportation and reduce risks for shipping in the Arabian Sea. The practical significance of the study lies in the possibility of taking into account the identified patterns when developing forecasting models and making management decisions in the field of maritime logistics.

Keywords: *maritime safety; summer Indian Ocean monsoon; surface turbulence; interannual monsoon variability; ENSO; Indo-Ocean Dipole; geophysical factors.*

Стаття прийнята 01.02.2026

© Тимошук О. М., Коломієць О.М., Левченко О.В.

ГІДРОМЕТЕОРОЛОГІЧНІ ЧИННИКИ УПРАВЛІННЯ НАВІГАЦІЙНИМИ ВОДНИМИ РЕСУРСАМИ

У статті розглянуто комплекс гідрометеорологічних чинників, які впливають на ефективність управління навігаційними ресурсами водних шляхів. Проаналізовано основні гідрологічні та метеорологічні параметри, що визначають навігаційні умови, включаючи рівневий режим водотоків, витрати води, льодовий режим, вітрові умови та опади. Обґрунтовано необхідність інтеграції гідрометеорологічних даних у системи управління навігацією для забезпечення безпеки судноплавства та оптимізації використання водних ресурсів.

Ключові слова: *гідрометеорологічні чинники, навігаційні водні ресурси, управління водними шляхами, рівневий режим, безпека судноплавства, гідрометеорологічне прогнозування.*

Метою статті є комплексний аналіз гідрометеорологічних чинників, що впливають на навігаційні умови водних шляхів, та обґрунтування підходів до їх урахування в системах управління водними ресурсами.

Невирішена частина проблеми. Проблематика гідрометеорологічного забезпечення навігації активно досліджується світовою науковою спільнотою, особливо в контексті зростаючого впливу кліматичних змін на водні ресурси. Аналіз сучасних публікацій дозволяє виділити кілька ключових напрямків досліджень.

Автори [1] досліджували зв'язок між метеорологічними умовами та кількістю днів зі зниженою навігаційною глибиною. Дослідження показало, що кліматична мінливість суттєво впливає на надійність гарантованих глибин на ключових європейських річках. В роботі [2] автори систематизували основні метеорологічні ризики для судноплавства та запропонували методологію їх оцінки в контексті довгострокових кліматичних трендів. PIANC у своєму звіті PTG Climate Change Task Group 3 [3] визначила регіональні відмінності у прояві кліматичних змін та необхідності розробки диференційованих стратегій адаптації.

Інноваційні методи моніторингу та гідрологічного прогнозування досліджено у роботах [4, 5]. WMO у своїх методичних рекомендаціях [6] систематизувала підходи до верифікації гідрологічних прогнозів, що є важливою складовою забезпечення їх надійності для прийняття управлінських рішень.

Стратегії адаптації до кліматичних змін розглядаються у звіті робочої групи PTG Climate Change Task Group 3 [7]. Документ підкреслює необхідність розробки комплексних стратегій адаптації, що враховують множинність функцій водної інфраструктури та її роль у забезпеченні стійкості водних ресурсів. Також Проект EU PLATINA3 [8] розробив стратегії адаптації до кліматичних змін для внутрішнього водного транспорту, що включають технічні, організаційні та економічні заходи.

Наукові праці українських авторів [9-12] зосереджуються на проблемах впливу кліматичних змін на водні ресурси, гідрологічні процеси й атмосферні явища. Значну увагу приділено методологічним підходам до оцінювання ризиків виснаження водних ресурсів, прогнозуванню екстремальних гідрологічних явищ, а також дослідженню сезонної та просторової мінливості гідрометеорологічних характеристик.

Незважаючи на значний науковий доробок у сфері гідрометеорології та управління водними ресурсами, низка питань щодо врахування гідрометеорологічних чинників в управлінні навігаційними водними ресурсами залишається недостатньо опрацьованою. Передусім це стосується комплексної інтеграції гідрологічних і метеорологічних даних у єдину систему підтримки управлінських рішень для забезпечення безпеки та ефективності судноплавства.

Постановка проблеми. Управління навігаційними водними ресурсами є комплексним завданням, що потребує врахування численних природних чинників, серед яких гідрометеорологічні умови відіграють визначальну роль. Ефективна навігація на внутрішніх водних шляхах безпосередньо залежить від своєчасного отримання та аналізу гідрометеорологічної інформації, що дозволяє забезпечити безпеку судноплавства, оптимізувати маршрути та знизити експлуатаційні витрати.

Виклад основного матеріалу. Управління навігаційними водними ресурсами розглядається як цілеспрямований процес планування, організації та контролю використання водних об'єктів для забезпечення безперебійного та безпечного судноплавства. Навігаційні водні ресурси характеризуються просторово-часовою мінливістю, що зумовлюється природними гідрологічними та метеорологічними процесами. Тому управління ними потребує системного врахування природних чинників, прогнозування їх змін та адаптації експлуатаційних режимів водних шляхів.

Навігаційні водні ресурси характеризуються просторово-часовою мінливістю, що зумовлюється природними гідрологічними та метеорологічними процесами. Тому управління ними потребує системного врахування природних чинників, прогнозування їх змін та адаптації експлуатаційних режимів водних шляхів.

Гідрологічні чинники є визначальними для формування навігаційних умов на внутрішніх водних шляхах. До основних з них належать рівень води, витрати стоку, швидкість течії, льодовий режим та замулення русел.

Коливання рівнів води безпосередньо впливають на глибини суднових ходів, що може обмежувати вантажопідйомність суден або призводити до тимчасового припинення навігації. Періоди маловоддя створюють ризики для стабільності судноплавства, тоді як паводки та повені підвищують небезпеку для гідротехнічних споруд і навігаційної інфраструктури.

Льодові явища є сезонним обмежувальним фактором навігації в помірних широтах. Тривалість льодоставу, товщина льоду та інтенсивність льодоходу визначають терміни відкриття і закриття навігації, а також потребу в застосуванні криголамного флоту.

Метеорологічні чинники суттєво впливають на експлуатацію навігаційних водних ресурсів. До ключових метеорологічних чинників належать вітер, опади, туман, температура повітря та атмосферний тиск.

Сильні вітри та шторми ускладнюють керування суднами, особливо на відкритих ділянках річок, водосховищ та лиманів. Інтенсивні опади можуть спричинити різкі зміни рівнів води, погіршення видимості та зростання ризику аварійних ситуацій. Тумани значно знижують безпеку навігації, вимагаючи обмеження руху або застосування спеціальних навігаційних заходів.

Систематичний облік метеорологічної інформації та її оперативне використання є необхідною умовою ефективного управління рухом суден і мінімізації навігаційних ризиків.

Сучасні кліматичні зміни посилюють нестабільність гідрометеорологічних умов та ускладнюють прогнозування навігаційних режимів. Зростання середніх температур, зміна режиму опадів і збільшення частоти екстремальних явищ призводять до трансформації гідрологічного режиму водних об'єктів.

Для управління навігаційними водними ресурсами це означає необхідність переходу до адаптивних моделей управління, які враховують довгострокові кліматичні тенденції та сценарії розвитку. Особливої актуальності набуває розвиток систем гідрометеорологічного моніторингу, прогнозування та цифровізації управлінських процесів.

До основних гідрометеорологічних чинників навігації відноситься такі.

- Рівневий режим водотоків. Рівень води є одним із найважливіших параметрів, що визначає можливість та безпеку судноплавства. Навігаційні глибини прямо залежать від рівневого режиму річок, який характеризується значною мінливістю в часі та просторі. Критичними є періоди низьких межених рівнів, коли навігаційні глибини можуть бути недостатніми для проходження суден з повним

завантаженням. Для управління навігацією необхідний систематичний моніторинг рівнів води на гідрологічних постах, розташованих вздовж водних шляхів. Прогнозування рівнів води на основі метеорологічних даних та моделей стоку дозволяє завчасно планувати навігаційні операції, оптимізувати завантаження суден та визначати можливість проходження складних ділянок водного шляху.

– Витрати води та швидкості течії. Витрати води визначають гідродинамічні характеристики водотоку, насамперед швидкості течії, які безпосередньо впливають на умови судноплавства. Високі швидкості течії ускладнюють маневрування суден, збільшують витрати палива при русі проти течії та створюють додаткові ризики при проходженні звужених ділянок русла. Особливу увагу слід приділяти періодам паводків та повеней, коли різке зростання витрат води супроводжується формуванням небезпечних швидкостей течії, появою вирів та інших гідродинамічних явищ, що становлять загрозу для судноплавства. Моніторинг витрат води та прогнозування паводкових ситуацій є невід'ємною частиною систем управління навігаційною безпекою.

– Льодовий режим. Льодові явища суттєво обмежують або повністю унеможливають навігацію на більшості внутрішніх водних шляхів помірних широт. Параметри льодового режиму – дати початку льодоставу, льодоходу та очищення від льоду, товщина льодового покриву, інтенсивність льодоходу – визначають тривалість навігаційного сезону та впливають на планування річного обсягу перевезень. Прогнозування термінів настання та завершення льодових явищ базується на аналізі температурного режиму повітря та води, враховує багаторічні спостереження та кліматичні тенденції. Розвиток методів льодового прогнозування дозволяє більш точно планувати початок та закінчення навігаційного сезону, оптимізувати роботу флоту в перехідні періоди.

– Вітрові умови. Вітер є одним із найбільш мінливих метеорологічних елементів, що впливають на безпеку судноплавства. Сильний вітер створює вітрове хвилювання, яке обмежує можливість руху суден, особливо на водосховищах та широких ділянках річок. Бічний вітер ускладнює управління судном, збільшує ризик навалу на берег або інші об'єкти. Моніторинг вітрових умов здійснюється за допомогою метеорологічних станцій та автоматизованих постів спостереження. Короткострокові прогнози вітру використовуються для оперативного управління рухом суден, визначення необхідності відстою в захищених акваторіях при несприятливих метеоумовах.

– Атмосферні опади та видимість. Інтенсивні атмосферні опади можуть призводити до зменшення видимості, що ускладнює орієнтування та підвищує ризик навігаційних інцидентів. Тривалі дощі у водозборі впливають на рівневий та витратний режим водотоків, що необхідно враховувати при прогнозуванні навігаційних умов. Тумани критично знижують видимість, що може потребувати призупинення або обмеження судноплавства на найбільш складних ділянках водних шляхів.

– Основні гідрометеорологічні чинники навігації водних шляхів наведені у табл. 1.

Ефективне управління навігаційними водними ресурсами потребує наявності розгалуженої, технічно оснащеної та надійної мережі гідрометеорологічних спостережень, яка забезпечує безперервне отримання актуальної інформації про стан водного середовища та атмосферні умови. Основу такої системи становлять гідрологічні пости, що здійснюють регулярні вимірювання рівнів води, витрат стоку та швидкості течії, від яких безпосередньо залежать навігаційні глибини й безпека судноплавства. Важливу роль відіграють метеорологічні станції, призначені для спостереження за температурою повітря, атмосферним тиском, вітровим режимом, кількістю та інтенсивністю опадів, оскільки ці параметри істотно впливають на гідрологічний режим водних шляхів і формування небезпечних навігаційних явищ.

Суттєвим елементом сучасної системи моніторингу є автоматизовані вимірювальні комплекси, оснащені датчиками та каналами зв'язку, що забезпечують передачу даних у режимі реального часу. Їх використання дозволяє оперативно реагувати на різкі зміни гідрометеорологічної обстановки, своєчасно коригувати режими експлуатації навігаційних водних ресурсів та підвищувати рівень безпеки судноплавства. Доповнюють наземні спостереження радіолокаційні системи, які забезпечують визначення просторового розподілу та інтенсивності опадів, а також

відстеження переміщення атмосферних фронтів, що є особливо важливим для прогнозування паводкових ситуацій і штормових явищ.

Таблиця 1 – Основні гідрометеорологічні чинники управління навігаційними водними ресурсами

№	Гідрометеорологічний чинник	Основні характеристики	Вплив на навігацію	Управлінські аспекти
1	Рівневий режим водотоків	Коливання рівнів води в часі та просторі; меженні, паводкові та повеневі рівні	Визначає навігаційні глибини та можливість безпечного проходження суден	Моніторинг рівнів води; прогнозування для планування навігаційних операцій
2	Витрати води та швидкості течії	Обсяг стоку, швидкість течії, гідродинамічні умови русла	Впливають на маневрування суден і витрати палива; підвищують ризики при паводках	Моніторинг витрат води; прогнозування паводкових ситуацій
3	Льодовий режим	Дати льодоставу та льодоходу, товщина льоду, інтенсивність льодових процесів	Обмежує або припиняє навігацію; визначає тривалість навігаційного сезону	Прогнозування льодових явищ; планування термінів навігації
4	Вітрові умови	Швидкість і напрям вітру, поривчастість, хвилювання	Ускладнюють керування суднами, особливо на відкритих ділянках	Оперативний моніторинг і короткострокове прогнозування вітру
5	Атмосферні опади та видимість	Інтенсивність опадів, тумани, дальність видимості	Знижують безпеку навігації та орієнтування	Урахування прогнозів; обмеження руху в несприятливих умовах

Джерело: систематизовано автором на основі [1-4, 6]

Вагоме значення в управлінні навігаційними водними ресурсами мають супутникові системи дистанційного зондування Землі, які дають змогу здійснювати моніторинг льодової обстановки, коливань рівнів води на великих водних об'єктах, змін берегової лінії та інших процесів, недоступних для суто наземних спостережень. Інтеграція даних, отриманих із різних систем спостереження, в єдині інформаційно-аналітичні платформи забезпечує комплексну оцінку гідрометеорологічної ситуації, підвищує точність і завчасність прогнозів навігаційних умов, а також створює підґрунтя для прийняття обґрунтованих управлінських рішень у сфері сталого використання та розвитку внутрішніх водних шляхів.

У табл. 2 наведено основні гідрометеорологічні параметри, що безпосередньо впливають на умови та безпеку навігації на внутрішніх водних шляхах. Кожен із представлених показників відображає певний аспект взаємодії природного середовища з процесом судноплавства та має критичні значення, перевищення або недотримання яких створює загрози для ефективної експлуатації навігаційних водних ресурсів.

Рівень води є базовим навігаційним параметром, оскільки саме він визначає наявні навігаційні глибини та можливість проходу суден з певною осадкою. Зниження рівня води нижче гарантованої глибини призводить до обмеження руху суден, зменшення вантажопідйомності або повного припинення навігації на окремих ділянках водних шляхів.

Швидкість течії істотно впливає на умови маневрування суден і рівень енерговитрат під час руху, особливо на річках зі складною конфігурацією русла. Перевищення швидкості течії понад 2,5

м/с ускладнює керування судном, підвищує ризик аварійних ситуацій та знижує ефективність навігаційних операцій.

Таблиця 2 - Основні гідрометеорологічні параметри та їх вплив на навігацію.

Параметр	Вплив на навігацію	Критичні значення
Рівень води	Визначає навігаційні глибини	Менше гарантованої глибини
Швидкість течії	Впливає на маневрування та енерговитрати	Більше 2,5 м/с
Вітер	Створює хвилювання, ускладнює управління	Більше 15 м/с
Товщина льоду	Обмежує або унеможлиблює навігацію	Більше 5 см
Видимість	Впливає на безпеку орієнтування	Менше 500 м

Джерело: систематизовано автором на основі [2, 3, 6-8]

Вітровий режим визначає інтенсивність хвилювання та стабільність руху суден, особливо на відкритих ділянках водних об'єктів і водосховищах. За швидкості вітру понад 15 м/с значно ускладнюється управління судном, погіршуються умови швартування та зростає ймовірність пошкодження суден і гідротехнічних споруд.

Товщина льоду є критичним чинником у холодний період року, оскільки формування льодового покриву безпосередньо обмежує або повністю унеможлиблює судноплавство. За товщини льоду понад 5 см навігація стає небезпечною або потребує застосування спеціальних заходів, зокрема льодокольного забезпечення.

Видимість належить до ключових метеорологічних параметрів, що впливають на безпеку орієнтування та навігаційного маневрування. Зменшення видимості до рівня менше 500 м, зокрема в умовах туману, опадів або димки, істотно підвищує ризик зіткнень і аварій, що вимагає введення обмежень або тимчасового припинення руху суден.

Таким чином, представлені основні гідрометеорологічні чинники мають визначальний вплив на навігаційні умови, та підкреслює необхідність їх постійного моніторингу, прогнозування і врахування в процесі управління навігаційними водними ресурсами.

Гідрометеорологічне прогнозування для потреб навігації базується на комплексному застосуванні різних методів, що дає змогу всебічно оцінювати розвиток навігаційних умов та підвищувати надійність прогнозів. Одним із традиційних напрямів є використання фізико-статистичних методів, які ґрунтуються на встановлених статистичних залежностях між гідрометеорологічними характеристиками та їх подальшим розвитком у часі. Аналіз багаторічних рядів спостережень дозволяє виявити типові режими коливань рівнів води, сезонні особливості течії, строки утворення та руйнування льодового покриву, а також закономірності формування сприятливих і несприятливих навігаційних умов. Фізико-статистичні моделі відзначаються відносною простотою реалізації та ефективністю при короткостроковому й середньостроковому прогнозуванні рівнів води, термінів настання льодових явищ і змін гідрологічного режиму.

Важливе місце в системі навігаційного прогнозування посідають гідродинамічні моделі, які ґрунтуються на математичному описі руху води в річкових і каналних системах на основі рівнянь гідродинаміки. Застосування таких моделей дає змогу з високою точністю відтворювати просторово-часовий розподіл рівнів води, швидкостей течії та інших параметрів, за умов наявності детальної інформації про морфометричні характеристики русла, шорсткість дна, гідротехнічні споруди та граничні умови. Гідродинамічні моделі є особливо ефективними для прогнозування

проходження паводкових хвиль, оцінювання впливу водосховищ і регулювання стоку, а також розрахунку навігаційних параметрів на складних і критичних ділянках внутрішніх водних шляхів.

Сучасні тенденції розвитку гідрометеорологічного прогнозування передбачають активне використання ансамблевих прогнозів, які базуються на поєднанні результатів кількох моделей або варіантів розрахунків із різними початковими та граничними умовами. Такий підхід дозволяє враховувати невизначеність прогнозних оцінок і визначати діапазон можливих сценаріїв розвитку гідрометеорологічної ситуації. Імовірнісні прогнози, отримані на основі ансамблевих методів, забезпечують більш повну інформаційну підтримку управління навігацією, оскільки дають змогу оцінювати ризики, пов'язані з екстремальними явищами, та приймати обґрунтовані управлінські рішення з урахуванням різних варіантів розвитку подій.

Ефективне використання гідрометеорологічної інформації в сучасних умовах можливе лише за умови її повноцінної інтеграції в комплексні системи управління навігацією, які забезпечують безперервний інформаційний супровід судноплавства на внутрішніх водних шляхах. Такі системи базуються на поєднанні інформаційно-аналітичних, прогнозних та управлінських компонентів і спрямовані на підвищення безпеки, ефективності та надійності навігаційних процесів.

Ключовим елементом комплексних систем управління є інформаційні системи збору, обробки та аналізу гідрометеорологічних даних, які акумулюють інформацію з гідрологічних постів, метеорологічних станцій, автоматизованих вимірювальних комплексів, радіолокаційних і супутникових систем. Використання сучасних технологій обробки даних, зокрема геоінформаційних систем та цифрових баз даних, дозволяє здійснювати оперативний аналіз поточної гідрометеорологічної обстановки, виявляти небезпечні тенденції та забезпечувати актуальність інформації для користувачів водних шляхів.

Важливу роль у таких системах відіграють системи прогнозування навігаційних умов різної завчасності, які охоплюють короткострокові, середньострокові та довгострокові прогнози. Вони дають змогу оцінювати ймовірні зміни рівнів води, течій, вітрового режиму, хвилювання, льодових явищ та інших факторів, що визначають умови судноплавства. Застосування прогнозних моделей сприяє завчасному плануванню руху суден, оптимізації графіків перевезень і зниженню ризиків, пов'язаних з екстремальними гідрометеорологічними явищами.

Невід'ємною складовою комплексних систем управління навігацією є платформи для розповсюдження гідрометеорологічної інформації серед користувачів водних шляхів, які забезпечують оперативний доступ до актуальних даних і прогнозів. Такі платформи можуть функціонувати у вигляді вебпорталів, мобільних застосунків або спеціалізованих навігаційних сервісів, що підвищує поінформованість судовласників, капітанів і диспетчерських служб та сприяє прийняттю обґрунтованих рішень у реальному часі.

Особливе значення мають системи підтримки прийняття рішень, призначені для диспетчерських служб і капітанів суден, які інтегрують гідрометеорологічну інформацію з навігаційними, технічними та експлуатаційними даними. Такі системи дозволяють моделювати різні сценарії розвитку ситуації, оцінювати потенційні ризики та обирати оптимальні маршрути і режими руху суден з урахуванням поточних і прогнозованих умов.

Важливим елементом комплексних систем управління є також автоматизовані системи попередження про небезпечні гідрометеорологічні явища, які забезпечують своєчасне інформування про загрози, зокрема паводки, штормові вітри, тумани, льодові затори чи різкі коливання рівнів води. Функціонування таких систем сприяє підвищенню рівня безпеки судноплавства, зменшенню ймовірності аварійних ситуацій та забезпеченню сталого використання навігаційних водних ресурсів.

Розвиток цифрових технологій, зокрема технологій Інтернету речей (IoT), великих даних (Big Data) та штучного інтелекту, відкриває нові можливості для підвищення ефективності управління навігаційними ресурсами на основі гідрометеорологічної інформації. Впровадження інтелектуальних

систем аналізу даних дозволяє виявляти складні нелінійні залежності, покращувати точність прогнозів та оптимізувати процеси прийняття рішень.

Управління навігаційними водними ресурсами в умовах змін клімату стикається з низкою взаємопов'язаних викликів, що суттєво ускладнюють процес прийняття управлінських рішень і забезпечення стабільних умов судноплавства. Передусім спостерігається зростання мінливості та екстремальності гідрометеорологічних явищ, що проявляється у частішому виникненні тривалих періодів маловоддя, інтенсивних паводків, штормових вітрів і різких погодних коливань, які безпосередньо впливають на безпеку та регулярність навігації.

Одночасно відбувається зміна типових режимів річкового стоку та льодового режиму, що призводить до порушення традиційних сезонних графіків відкриття й закриття навігації, скорочення тривалості льодоставу або, навпаки, ускладнення льодових процесів у перехідні періоди. За таких умов актуалізується необхідність адаптації методів гідрологічного та метеорологічного прогнозування до нових кліматичних реалій, зокрема шляхом урахування довгострокових тенденцій і сценаріїв кліматичних змін, а не лише історичних спостережень.

Водночас посилюється потреба в модернізації мереж гідрометеорологічних спостережень та систем моніторингу, що має забезпечити отримання більш детальної, оперативної та достовірної інформації для підтримки ефективного управління навігаційними водними ресурсами в умовах зростаючої кліматичної невизначеності.

Отже, перспективними напрямками розвитку управління навігаційними водними ресурсами у сфері гідрометеорології є розширення мережі автоматизованих гідрометеорологічних спостережень із передачею даних у режимі реального часу, впровадження високороздільних гідродинамічних моделей для локального та оперативного прогнозування навігаційних умов, активне використання даних дистанційного зондування Землі для комплексного моніторингу стану водних об'єктів, розробка інтегрованих систем управління навігаційними водними ресурсами з використанням елементів штучного інтелекту та аналітики великих даних, а також посилення міжнародної кооперації в обміні гідрометеорологічною інформацією з метою підвищення ефективності управління транскордонними водними шляхами.

Висновки. Гідрометеорологічні чинники відіграють визначальну роль в управлінні навігаційними водними ресурсами, безпосередньо впливаючи на безпеку та економічну ефективність судноплавства. Комплексний підхід до моніторингу та прогнозування гідрометеорологічних умов є необхідною умовою для оптимального використання внутрішніх водних шляхів.

Сучасні технології спостережень, моделювання та обробки інформації створюють передумови для суттєвого підвищення якості гідрометеорологічного забезпечення навігації. Інтеграція різних джерел даних, використання ансамблевих прогнозів та інтелектуальних систем аналізу дозволяють краще враховувати невизначеність та ризики при прийнятті управлінських рішень.

В умовах змін клімату особливої актуальності набуває розвиток адаптивних систем управління, здатних оперативно реагувати на зміни гідрометеорологічного режиму водних об'єктів. Ефективне управління навігаційними водними ресурсами потребує тісної взаємодії між гідрометеорологічними службами, організаціями водного транспорту та науковими установами. Інтеграція систем управління навігаційними водними ресурсами з використанням штучного інтелекту та аналітики великих даних дає можливість створення сучасних систем підтримки прийняття рішень, що забезпечують максимальну безпеку та ефективність використання водних шляхів.

Подальший розвиток досліджень у цьому напрямі має зосередитися на вдосконаленні методів прогнозування екстремальних явищ, оцінки їх впливу на навігаційні умови та розробці ефективних стратегій адаптації.

ЛІТЕРАТУРА

1. Christodoulou A., Christidis P., Bisselink B. Forecasting the impacts of climate change on inland waterways. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. 2020. Vol. 82. Art. 102159. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trd.2019.10.012>
2. Assessing the impact of climate change and weather conditions endangering inland waterway navigation / Liang Zhenzhen et al. *Transportation Research Procedia*. 2023. Vol. 72. P. 3516–3523. DOI: <https://ieeexplore.ieee.org/document/10146208>
3. PIANC. Waterborne Transport, Ports and Waterways: A 2023 Update of Climate Change Drivers and Impacts. Report of PIANC PTG Climate Change Task Group 3. Brussels: PIANC, 2023. 142 p. URL: <https://www.pianc.org/publications/climate-change>
4. Meier F., Schindler D., Wilhelm C. Implementing hydrological forecasting services supporting waterway management and transportation logistics relating to hydroclimatic impacts. *Atmosphere*. 2022. Vol. 13. Iss. 10. Art. 1606. DOI: <https://doi.org/10.3390/atmos13101606>
5. Li Y., Hu Y., Rigo P., Lefler F. E., Zhao G. (Eds.). *Proceedings of PIANC Smart Rivers 2022: Green Waterways and Sustainable Navigations*. Singapore: Springer Nature, 2023. 1296 p. (Lecture Notes in Civil Engineering, vol 264). DOI: <https://doi.org/10.1007/978-981-19-6138-0>
6. WMO. Guidelines on the Verification of Hydrological Forecasts. WMO-No. 1364. Geneva: World Meteorological Organization, 2025. 186 p. URL: <https://wmo.int/publications/guidelines-verification-of-hydrological-forecasts>
7. PIANC. Design of Navigation Locks. Report of InCom Working Group 206. Brussels: PIANC, 2025. 248 p. [InCom-WG-206-Press-Release.pdf](https://www.pianc.org/publications/incom-working-group-206-press-release)
8. Climate change adaptation strategies for inland waterway transport / European Commission PLATINA3. Brussels: EU, 2021. 98 p. URL: <https://platina3.eu/climate-change-adaptation-strategies>.
9. Loboda N.S., Otchenash N.D., Kozlov M.O. *Methodological approaches to assessing the risks of water resources depletion in the context of climate change (using plain territories of Ukraine as an example)*. *Ukrainian Hydrometeorological Journal*, 2024, No. 33, 5-17. DOI: <https://doi.org/10.31481/uhmj.33.2024.01>
10. Shakirzanova Z.R., Perevozchikov I.M., Shevchenko O.P. *Application of the method of territorial long-term forecasts to determine the maximum water discharge rates under the conditions of spring flood 2022-2023 formation across the Desna basin*. *Ukrainian Hydrometeorological Journal*, 2023, No. 31, 5-21. DOI: <https://doi.org/10.31481/uhmj.31.2023.01>
11. Ilyin Yu.P. *Average condition and seasonal variability of the structure and dynamics of transitional waters in the Dnieper-Bug estuary region*. *Ukrainian Hydrometeorological Journal*, 2023, No. 32, 63-79. DOI: <https://doi.org/10.31481/uhmj.32.2023.05>
12. Shcheglov O.A., Shpyh V.M., Fomichev N.R. Atmospheric rivers: potential impact on atmospheric processes and meteorological phenomena in Ukraine. *Meteorology. Hydrology. Environmental Monitoring*, 2022, 2(2), 4-10. DOI: <http://doi.org/10.15407/Meteorology2022.02.004>

Tymoshchuk O.M., Kolomoiec O.M., Levchenko O.V.

HYDROMETEOROLOGICAL FACTORS OF NAVIGATIONAL WATER RESOURCES MANAGEMENT

The article considers a complex of hydrometeorological factors that affect the efficiency of navigational resource management of waterways. The main hydrological and meteorological parameters that determine navigational conditions are analyzed, including the level regime of watercourses, water discharge, ice regime, wind conditions and precipitation. The need to integrate hydrometeorological data into navigational management systems is substantiated to ensure navigation safety and optimize the use of water resources

Key words: *hydrometeorological factors, navigational water resources, waterway management, level regime, navigation safety, hydrometeorological forecasting*

Стаття прийнята 15.01.2026

© Кучеренко Н. В., Капочкіна М. Б.

ШЛЯХИ ТРАНСФОРМАЦІЇ МІЖНАРОДНОЇ СИСТЕМИ ПОШУКУ І ПОРЯТУНКУ НА МОРІ В УМОВАХ ТРЕТЬОЇ СВІТОВОЇ ВІЙНИ НОВОГО ГІБРИДНОГО ТИПУ (SAR)

Міжнародна система пошуку і порятунку (SAR) у морському транспорті традиційно спирається на електромагнітні та супутникові канали зв'язку і позиціонування COSPAS-SARSAT, GMDSS, ефективність яких у війні нового гібридного типу знижується через РЕБ, спуфінг та інші форми електромагнітної зброї. У статті обґрунтовано напрями трансформації SAR, які пов'язані з поверненням до гідроакустичних засобів моніторингу та позиціонування місць катастроф на базі хвилеводу SOFAR як каналу, стійкого до електромагнітних впливів, та придатного для прихованої атрибуції підводних інцидентів, критичних для безпеки судноплавства й підводної інфраструктури. Показано, що емпірична гідроакустика не дозволяє пояснити просторову мінливість ефективності SOFAR, а також його практично відсутність у Чорному та Середземному морях, що має прямі наслідки для майбутніх маршрутів і логістики морського транспорту з урахуванням ризиків сучасної SAR. Запропоновано фізичну інтерпретацію формування SOFAR на основі теорії Ньютона—Лапласа з акцентом на ролі пружності води та структурних ефектів, притаманних виключно водному середовищу. Отримані результати формують наукові підстави для інтеграції пасивних донних і мережевих гідроакустичних систем у SAR морського транспорту як резервного/дублюючого контуру в умовах гібридної війни: ризиків диверсій, аварій і втрати зв'язку.

Ключові слова: морський транспорт; пошук і порятунок (SAR); підводна інфраструктура; гідроакустичний хвилевід SOFAR; структура води; швидкість звуку, гібридна війна.

Постановка проблеми. Міжнародна система пошуку і порятунку (SAR - Search and Rescue) ґрунтується на гармонізованому застосуванні авіаційних та морських (надводних і підводних) технологій з метою своєчасного виявлення осіб і об'єктів, що зазнали лиха, та організації рятувальних операцій. Ключовими елементами глобальної архітектури SAR є супутникова система виявлення сигналів лиха COSPAS-SARSAT, яка забезпечує виявлення та локалізацію аварійних маяків (EPIRB - на суднах, ELT - на повітряних суднах, PLB - для окремих осіб). Зазначена система включає орбітальні сегменти LEOSAR, GEOSAR і MEOSAR, наземні станції прийому (LUT) та центри управління місіями (MCC). Доповнювальним елементом є Глобальна морська система зв'язку під час лиха та для забезпечення безпеки (GMDSS), яка забезпечує передачу сигналів лиха, координацію дій і зв'язок між учасниками рятувальних операцій, зокрема з використанням супутникових систем зв'язку Inmarsat та радіомаякових засобів. Сукупно ці компоненти забезпечують глобальне покриття, швидке реагування та міжнародну координацію, що дозволяє рятувати тисячі людських життів щорічно.

Водночас сучасні безпекові умови характеризуються трансформацією характеру збройних конфліктів у напрямі війн нового гібридного типу, початок яких у науковому та військово-політичному дискурсі пов'язують з 2013 роком. Дослідження присвячене визначенню перспектив удосконалення системи SAR в умовах гібридної війни. Актуальність цієї проблематики підтверджується аналізом положень, викладених у публікації [1], у якій акцентується увага на досягненні стратегічних цілей без повномасштабної війни, розмитті меж між станами війни та миру, а також на переважанні невоєнних засобів впливу над військовими з одночасним анонімним застосуванням сили через проксі-структури та спеціальні операції [1].

Практичним підтвердженням зазначених положень є події у Балтійському морі у 2023–2025 роках, пов'язані з диверсіями проти підводних кабельних систем. Як зазначається в аналітичному

звіті Atlantic Council «How the Baltic Sea Nations Have Tackled Suspicious Cable Cuts» (2025), під час цих інцидентів фіксувалися анонімні атаки радіоелектронної боротьби, зокрема спуфінг сигналів глобальних навігаційних супутникових систем, що використовувався для створення навігаційної та інформаційної невизначеності [2].

У цих умовах як один із можливих напрямів підвищення стійкості системи SAR розглядається повернення та інтеграція гідроакустичних засобів спостереження. Особливий інтерес становить використання гідроакустичного каналу SOFAR (*Sound Fixing and Ranging*), який забезпечує наддалеке поширення низькочастотних звукових сигналів в океані. На відміну від електромагнітних каналів зв'язку і позиціонування (радіозв'язок, GPS, супутникові системи), які є вразливими до засобів радіоелектронної боротьби, спуфінгу та навмисного глушіння, канал SOFAR не використовує електромагнітний спектр, а отже не піддається впливу потужних електромагнітних перешкод або обману навігаційних сигналів. В умовах сучасної гібридної війни, що часто ведеться анонімно та без чітко вираженої кінетичної фази, а засоби радіоелектронної боротьби та кібероперації застосовуються для створення невизначеності та порушення функціонування інформаційних систем, використання SOFAR надає можливість здійснювати пасивний, скритний та стійкий до контрзаходів моніторинг підводного й надводного середовища без демаскуючого випромінювання. Додатковими перевагами є знижена вразливість до кібератак на електромагнітні системи, зокрема атак типу DDoS на супутникові мережі, можливість функціонування в умовах електромагнітного деніалу, а також забезпечення довготривалого моніторингу з мінімальними енергетичними витратами, що відзначається у звіті CyberPeace Institute «Cyber Dimensions of a Hybrid Warfare» (2025) [3].

Таким чином, у зазначених умовах SOFAR може розглядатися як ефективна альтернативна або додаткова технологія в системі SAR, що дозволяє реалізувати акустичне позиціонування та виявлення об'єктів без ризиків, притаманних електромагнітним каналам.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Гідроакустичний канал SOFAR у сучасних дослідженнях розглядається як ефективний інструмент далекодистанційного виявлення та локалізації джерел акустичних сигналів, зокрема вибухів і руйнувань, шляхом реєстрації низькочастотних імпульсів, що поширюються на великі відстані з мінімальними втратами енергії. Використання мереж гідрофонів дозволяє з високою точністю визначати координати джерел акустичних сигналів методом триангуляції. В умовах гібридної війни це набуває критичного значення для атрибуції скритних актів саботажу, коли відсутні візуальні або електромагнітні сліди. До ключових переваг SOFAR відносять пасивний характер спостереження (без активного зондування середовища), стійкість до перешкод та високу просторову точність локалізації.

Прикладом практичного застосування принципів дії SOFAR у сучасних умовах є виявлення координат підривів газопроводів Nord Stream 1 та Nord Stream 2 26 вересня 2022 року. Як зазначається в публікації Nord Stream Attacks [4], донні сейсмічні та гідроакустичні станції, розташовані на території Данії, Швеції, Німеччини, Фінляндії та Норвегії, зафіксували акустичні сигнали вибухів і дозволили визначити їхні координати навіть за відсутності прямих візуальних підтверджень [4].

Важливо зазначити, що принципи SOFAR традиційно застосовувалися для виявлення аварій підводних човнів за акустичними ознаками руйнування корпусу або вибухів, сигнали яких поширюються на тисячі кілометрів і локалізуються за допомогою гідрофонних мереж. У контексті перспектив розвитку цивільних підводних вантажних суден, зокрема для арктичних маршрутів і транспортування скрапленого природного газу (LNG), значення SOFAR істотно зростає. Автономні підводні фрахтові системи (наприклад, концепції на основі переосмислення платформ класу Turphoon) потребують стійкого позиціонування в умовах льодового покриву, де електромагнітні засоби навігації є ненадійними. При цьому низький тиск на корпус для неглибокого занурення підвищує ризики аварій, що робить можливість швидкого акустичного виявлення місця інциденту за допомогою SOFAR критично важливим.

Історично канал SOFAR активно застосовувався в пошуково-рятувальних операціях на морі (SAR), зокрема для гідроакустичного визначення координат місця аварії літаків і суден у період Другої світової війни. Як зазначено в огляді [5], система передбачала автоматизований скид спеціальних вибухових пристроїв (SOFAR bombs — заряди масою близько 4 фунтів TNT), які занурювалися до глибини осі каналу (приблизно 1000–1500 м) і детонували, створюючи низькочастотний акустичний імпульс [5]. Завдяки рефракції звуку в шарі мінімальної швидкості поширення, сигнал розповсюджувався на тисячі кілометрів з мінімальними втратами енергії. Берегові гідрофонні станції, зокрема на Бермудських островах і Барбадосі, фіксували азимут приходу сигналу, що дозволяло методом триангуляції визначити координати місця вибуху (аварії) та оперативно спрямовувати рятувальні сили в умовах ненадійного радіозв'язку. Розгортання систем SOFAR в інтересах SAR потребувало інвестицій у створення мережі берегових гідрофонних станцій. У цей період (Другої світової війни) ВМС США фінансували відповідні програми в межах проєктів протичовнової боротьби та рятування, з бюджетами на акустичні дослідження, які в сучасних оцінках досягають десятків мільйонів доларів. Подальший розвиток цих технологій привів до створення системи SOSUS, витрати на яку вже обчислювалися мільярдами доларів, хоча первинні SAR-рішення на основі SOFAR залишалися відносно економічними завдяки використанню простих зарядних пристроїв і наявної гідрофонної інфраструктури [6].

Незважаючи на доведену ефективність, активне використання SOFAR у SAR було поступово згорнуте внаслідок появи більш оперативних і зручних технологій, зокрема радіомаяків ELT/EPIRB та супутникових систем COSPAS-SARSAT, які забезпечують майже реальний час і високу точність. Починаючи з 1950-х років, основний фокус застосування принципів SOFAR змістився у військову сферу, передусім для виявлення підводних човнів, хоча гідрофонні мережі продовжували функціонувати в пасивному режимі.

На сучасному етапі канал SOFAR не використовується в стандартних SAR-операціях, які спираються на супутникові системи, радіомаяки (406 МГц), безпілотні платформи та алгоритми штучного інтелекту. Водночас його принципи знаходять застосування в нішевих сценаріях, зокрема під час аналізу акустичних сигналів пінджерів бортових самописців літаків (пошуки рейсів MH370 або Air France 447), а також у постінцидентних розслідуваннях із використанням пасивних гідрофонних мереж, таких як СТВТО або колишні елементи SOSUS.

Виявлення невирішених раніше частин загальної проблеми. Принцип дії SOFAR ґрунтується на використанні шару океану з мінімальною швидкістю звуку, в якому низькочастотні акустичні хвилі поширюються з найменшими втратами енергії. Сучасні дослідження вказують на можливість інтеграції цих принципів у донні мережеві системи підводного акустичного зв'язку, що використовують гідроакустичні модеми-ретранслятори [7], а також у системи акустичного позиціонування з використанням пінджерів [8].

Донні мережі, розміщені на океанському дні, здатні виконувати функції, аналогічні SOFAR, зокрема далекодістанційне виявлення сигналів, пасивне спостереження та точне позиціонування. Їх архітектура передбачає використання фіксованих вузлів (гідрофонів, акустичних модемів, пінджерів), з'єднаних кабельними або бездротовими ретрансляторами, з передачею даних на берегові станції або обробкою в реальному часі. Такі мережі не лише відтворюють принципи SOFAR, але й перевершують класичні системи за рахунок адаптивності та програмної обробки сигналів, включно з алгоритмами штучного інтелекту (наприклад, у фреймворках SUNSET або DESERT), що дозволяє здійснювати локалізацію місця аварії в реальному часі [9].

Однак, канал SOFAR є природним утворенням, яке можна і слід використати в SAR-операціях на морі в сучасних складних умовах гібридної війни. Але тут слід зауважити, що наразі невирішеним залишається питання фізичної природи формування та стабільності існування у часі і просторі хвилеводу SOFAR в умовах просторово-часової мінливості океанографічних параметрів. На рисунку 1 наведено схему поширення звуку в хвилеводі SOFAR, де звукові хвилі, що виходять

від джерела, заломлюються в область із меншою швидкістю звуку, «захоплюючи» енергію сигналу в межах каналу [10].

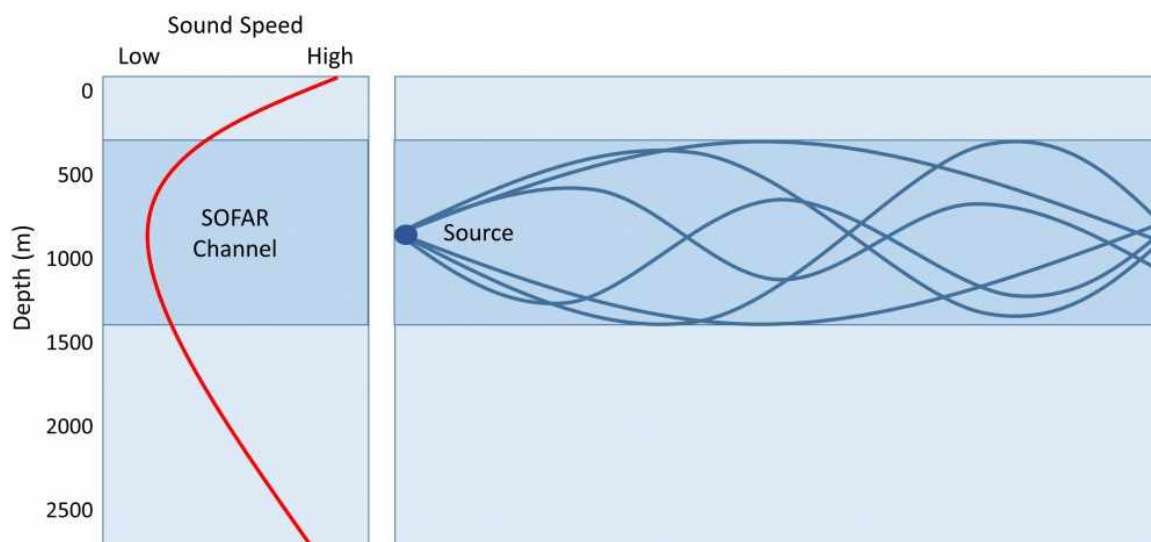


Рисунок 2 - Схема поширення звуку в каналі SOFAR [10].

Розглянемо проблему невизначеності фізичної природи формування гідроакустичного хвилеводу SOFAR, адже відсутність коректної фізичної моделі формування цього гідроакустичного хвилеводу не дозволяє однозначно пояснити причини його різної ефективності в різних океанічних басейнах, зокрема в Індійському, Тихому та Атлантичному океанах. Як підтвердження цієї невизначеності наведемо усереднені значення основних океанологічних параметрів у шарі осі хвилеводу SOFAR для зазначених океанів.

Таблиця 1 — Усереднені значення океанологічних параметрів на осі гідроакустичного хвилеводу SOFAR у трьох океанах

Океан	Глибина осі SOFAR, м	Температура, °C	Солоність, г/кг	Щільність, кг/м ³	Швидкість звуку на осі, м/с
Тихий (центральний)	1050–1150	3,3–3,8	34,55–34,62	1027,78 – 1027,88	1482 – 1484
Індійський	1150–1350	2,3–3,0	34,60–34,70	1028,05 – 1028,18	1479 – 1482
Атлантичний	1100–1300	3,8–4,8	34,85–35,00	1027,95 – 1028,15	1484 – 1488

Згідно з наведеними даними, найбільш сприятливі умови для формування та функціонування хвилеводу SOFAR спостерігаються в Індійському океані, де фіксується мінімальне значення швидкості звуку (≈ 1479 м/с). Друге місце за ефективністю займає Тихий океан (мінімум ≈ 1482 м/с). Найменш сприятливі умови виявлено в Атлантичному океані, де швидкість звуку на осі хвилеводу досягає максимальних значень (до 1488 м/с), що погіршує умови акустичного захоплення та дальність поширення сигналів.

Другим критичним проявом невизначеності фізичної природи SOFAR є його обмежена географія. Зокрема, у Чорному та Середземному морях на глибинах 1000–1200 м мінімум швидкості звуку не формується, внаслідок чого глибоководний гідроакустичний хвилевод SOFAR у цих морських басейнах відсутній з причин, що досі не мають однозначного фізичного пояснення.

Так, у Чорному морі, починаючи з глибини приблизно 70 м, швидкість звуку з глибиною монотонно зростає в середньому приблизно від 1450 м/с на глибині 200 м до 1550 м/с поблизу дна. У Середземному морі вертикальна структура швидкості звуку є складнішою, проте результат аналогічний: глибоководний мінімум швидкості звуку, характерний для океанічного SOFAR-каналу, не формується.

Таблиця 2 — Порівняння океанологічних умов на глибині 1000 м в різних акваторіях

Параметр	Світовий океан	Чорне море	Середземне море
Температура, °C	2–5	~9	13–14
Зміна температури з глибиною	~0	~0	~0
Солоність, ‰	~34,7	~22,5	~38,6
Зміна солоності з глибиною	~0	~0	~0
Мінімум швидкості звуку	Так	Ні	Ні

Отже, у Чорному та Середземному морях на глибинах близьких до 1000 м відсутній мінімум швидкості звуку, незважаючи на те, що, як і в океані, вертикальні градієнти температури та солоності на цих глибинах є практично відсутніми, а гідростатичний тиск монотонно зростає з глибиною. Це суперечить класичним уявленням про механізм формування SOFAR-каналу та вказує на неповноту наявної фізичної моделі. У зв'язку з цим, у межах дослідження виконано критичний огляд сучасних уявлень щодо фізики формування глибоководного гідроакустичного хвилеводу SOFAR.

Загальноприйнятим є підхід, згідно з яким мінімум швидкості звуку на глибинах приблизно 1000 м формується внаслідок зростання гідростатичного тиску, що підвищує швидкість звуку, за умов, коли вплив вертикальних градієнтів температури та солоності на швидкість звуку стає незначним [10]. На рис. 2 наведено схематичне зображення профілів температури та тиску як факторів формування мінімуму швидкості звуку. Відповідно до класичних уявлень та рисунку, швидкість звуку є максимальною поблизу поверхні океану внаслідок високих температур, а також на великих глибинах через домінуючий вплив високого гідростатичного тиску, тоді як між цими зонами формується шар мінімальної швидкості звуку - вісь SOFAR-каналу [10].

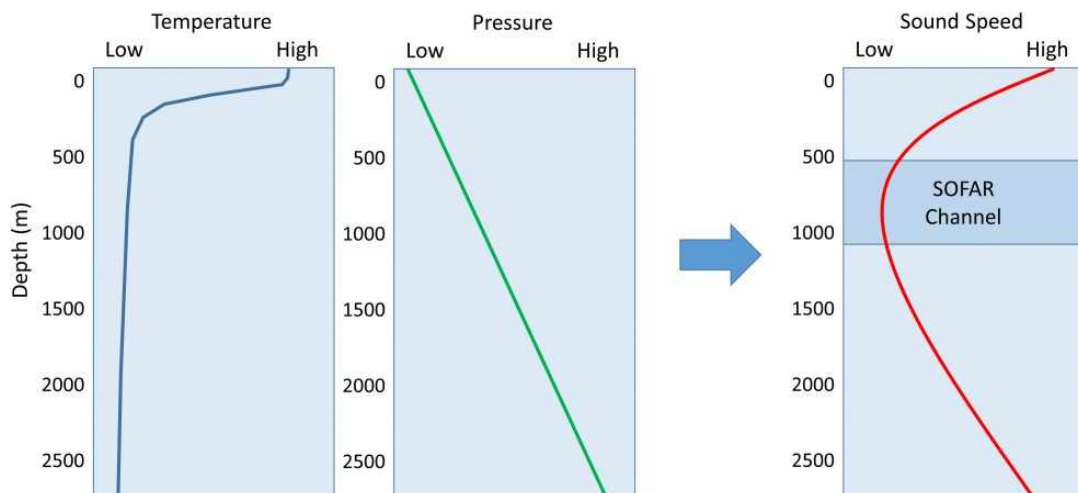


Рисунок 2 - Типові профілі змін температури, тиску та швидкості звуку з глибиною [10].

Таким чином констатується, що у верхньому шарі океану (орієнтовно 0–800 м) домінує зниження температури води з глибиною, яке є основною причиною зменшення швидкості звуку. Нижче головного океанського термоклину вплив температури на зменшення швидкості звуку поступово слабшає, тоді як вплив гідростатичного тиску, що зростає з глибиною, стає домінуючим і зумовлює збільшення швидкості звуку. У шарі, де від’ємний температурний градієнт повністю компенсується додатним градієнтом тиску, формується мінімум швидкості звуку, який інтерпретується як вісь гідроакустичного хвилеводу (зазвичай на глибинах близьких до 1000 м). Отже, загальноприйнята концепція стверджує, що на глибинах, де істотні зміни температури й солоності вже відсутні, саме зростання гідростатичного тиску є тим фактором, який змушує швидкість звуку знову зростати з глибиною, створюючи мінімум швидкості звуку - хвилевід SOFAR [10]. Наведемо результати розрахунків та проведемо аналіз утворення типового SOFAR у тропічній зоні центральної частини Тихого океану.

Таблиця 3 — Результати розрахунків типового SOFAR у тропічній зоні центральної частини Тихого океану

Глибина, м	Тиск, дбар	T, °C	Швидкість звуку, м/с	Густина ρ , кг/м ³
700	710	7,2	1498	1026,9
1100 (SOFAR)	1120	3,8	1483	1027,8
1500	1520	2,7	1492	1028,3
2000	2030	1,9	1510	1029,1
4000	4070	1,4	1568	1031,1

Проаналізуємо зміни температури та щільності води вище і нижче осі SOFAR. Вище осі SOFAR (від 700 м до 1100 м) температура знижується на 3,4 °C, тоді як густина води зростає на 0,9 кг/м³ (1026,9 → 1027,8 кг/м³). Нижче осі SOFAR (від 1100 м до 4000 м) температура знижується лише на 2,4 °C (3,8 → 1,4 °C), а густина продовжує зростати плавно і монотонно (1027,8 → 1031,1 кг/м³). Таким чином, на глибині осі SOFAR у розрахункових даних не спостерігається стрибкоподібної зміни чи різкого зростання густини води, що б свідчило на вплив тиску на підвищення швидкості звуку.

Узагальнення даних вертикальних профілів CTD/Argo (з урахуванням того, що густина ρ розраховується за стандартними рівняннями стану морської води) демонструє такі типові закономірності:

- густина води на глибині шару SOFAR змінюється (зростає) плавно та монотонно з глибиною як вище, так і нижче мінімуму швидкості звуку;
- типовий градієнт густини в шарі 800–1500 м становить приблизно $+0,15 \div 0,30$ кг/м³ на 100 м;
- на глибині осі SOFAR не фіксується пікнометричних «стрибків» або локального прискорення зростання щільності.

Отже, нами показано, що формування мінімуму (від’ємного екстремуму) швидкості звуку в шарі гідроакустичного хвилеводу SOFAR у Світовому океані відбувається в умовах, коли вертикальні градієнти T, S, і ρ не мають інверсій — тобто сам мінімум швидкості звуку виникає не внаслідок “аномалій” або “переломів” у профілях основних параметрів, а в межах монотонних однонаправлених змін характеристик водної товщі.

Для подальшого аналізу і пошуку причин формування мінімуму швидкості звуку в шарі гідроакустичного хвилеводу SOFAR здається доцільним розглянути існуючу суперечність між теоретичною та емпіричною гідроакустикю.

У межах теоретичної гідроакустики відповідно до формули Ньютона—Лапласа швидкість звуку визначається фундаментальними фізичними властивостями середовища: модулем об’ємної пружності (K - опір стисканню) та густиною (ρ - інерційна характеристика маси). Однак у «емпіричній» гідроакустиці швидкість звуку зазвичай обчислюють за формулами такого вигляду:

$$C = f(T, S, P), \quad (1)$$

де аргументами виступають температура (T), солоність (S) та тиск (P) (або глибина z), тобто параметри, які не є причинами змін швидкості звуку, а фактично наслідками впливу термодинамічного стану та складу морської води на пружність та густину морської води. У цьому сенсі має місце методологічна «підміна причин наслідками», що історично зумовлено обмеженнями прямих вимірювань. Наприклад, густину води можна точно визначати інструментально тільки у лабораторних умовах, а модуль об'ємної пружності *in situ* теж практично не вимірюється. Саме тому емпіричні рівняння швидкості звуку використовують T , S , P як доступні для вимірювання «аргументи», а K і ρ залишаються «прихованими» у структурі коефіцієнтів емпіричних рівнянь швидкості звуку.

Важливо враховувати, що сучасні емпіричні рівняння для розрахунку швидкості звуку в морській воді (Del Grosso 1974, Mackenzie 1981, Coppens 1965/1981, UNESCO/Chen–Millero–Li 1987, TEOS-10 2010) фактично є поліноміальними апроксимаціями змін швидкості звуку, отриманих емпірично в певних умовах змін температури, тиску та солоності. А фундаментальна фізична причина — надмолекулярна структура води, міжмолекулярні взаємодії неявно проявлені в коефіцієнтах апроксимації швидкості звуку. У зв'язку з цим емпіричні формули містять перехресні та нелінійні члени (наприклад, $P \cdot T$, $P \cdot T^2$, $P^2 \cdot T$ тощо), які і формалізують приховані нелінійні зв'язки між функцією C та аргументами T , S , P . Принципово важливо, що саме ці нелінійні та перехресні члени в рівняннях забезпечують появу мінімуму швидкості звуку на глибинах 1000–1300 м. Як практичну ілюстрацію цьому можна зазначити: якщо в рівняннях типу Del Grosso або Chen–Millero–Li вилучити перехресні члени (тобто, звести залежності до суто лінійних), то за $T \approx 3^\circ\text{C}$ швидкість звуку починає зростати вже з 300–400 м, а канал SOFAR, як мінімум швидкості звуку, не проявляється у розрахунках за визначенням. Це вказує, що «просте пояснення» механізму формування SOFAR як компенсації двох монотонних градієнтів - слабкого від температури та сильного від тиску - є надмірним спрощенням і не відображає дійсної природи процесу.

Враховуючи зазначене, виникають наукові підстави для критичного перегляду твердження про причину утворення глибоководного гідроакустичного хвилеводу SOFAR: «Вважається загальновизначеним, що мінімум швидкості звуку в хвилеводі SOFAR на глибинах ≈ 1000 – 1200 м утворюється завдяки зростанню гідростатичного тиску, який збільшує швидкість звуку, в умовах, коли вертикальний градієнт температури і солоності стає не впливовим на процес формування мінімальних значень швидкості звуку» [10].

Постановка задачі та її розв'язання. У результаті виконаного дослідження вперше запропоновано фізичну модель гідроакустичного хвилеводу SOFAR, яка базується на універсальній для усіх речовин теорії швидкості звуку Ньютона-Лапласа, та додатково враховує специфічні властивості водного середовища, пов'язані з його надмолекулярною структурною організацією.

Формула Ньютона-Лапласа:

$$C = \sqrt{(K / \rho)}, \quad (2)$$

де C — швидкість звуку;

K — адіабатичний модуль об'ємної пружності речовини;

ρ — густина речовини.

Запропонований підхід дозволяє поєднати фундаментальні фізичні причини поширення звуку (модуль об'ємної пружності та густину) з особливостями води як асоційованої рідини, що не враховуються в класичних гідроакустичних моделях.

Вирішенню задачі пояснення механізму формування глибоководного гідроакустичного хвилеводу SOFAR сприяло обґрунтування доцільності включення до алгоритму обчислення швидкості звуку у воді, поряд із пружністю та густиною, параметрів, що описують зміну надмолекулярної структури води. Показано, що за досягнення критичних значень гідростатичного тиску на глибинах близьких чи дещо понад 1 км відбуваються структурні перебудови водного середовища, які досі не були явно враховані в рамках класичної гідроакустичної теорії. Наявність критичного впливу тиску на руйнування або трансформацію структурованості води підтверджується результатами сучасних експериментальних досліджень, зокрема роботами, що присвячені можливості існування рідинно-рідинної критичної точки у воді [11].

У першому наближенні для врахування структурних ефектів води в запропонованій фізичній моделі пропонується використовувати загальновідому аномалію щільності прісної води за температури 3,98 °С. Зазначена аномалія полягає в тому, що максимальна щільність води досягається не за температури кристалізації, як у більшості речовин, а за температури близької до 3,98 °С. За подальшого охолодження нижче цієї температури щільність води зменшується, що є наслідком формування просторово розвинених водневих зв'язків і кластерних структур. Саме наявність водневих зв'язків, характерних лише для води серед поширених природних рідин, зумовлює її унікальні термодинамічні та акустичні властивості (рисунок 3).

Запропонований підхід дозволяє розглядати формування мінімуму швидкості звуку в шарі SOFAR не як результат компенсації монотонних градієнтів температури та тиску, а як наслідок глибинних змін мікро- та надмолекулярної структури води під дією високого гідростатичного тиску за певних температур (близьких до температури максимальної щільності прісної води). Це створює підґрунтя для побудови узгодженої фізичної моделі гідроакустичного хвилеводу SOFAR, яка поєднує класичні положення теорії акустики з сучасними уявленнями про структурну організацію водного середовища.

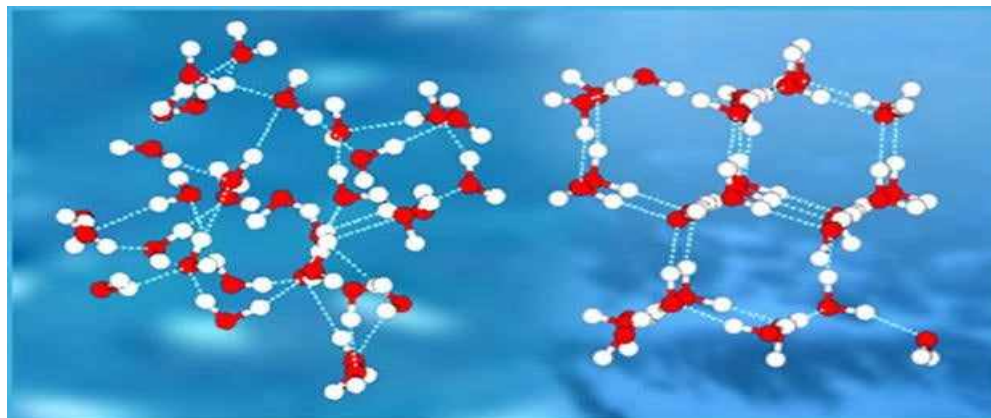


Рисунок 3 - Структурованість води у рідкому (ліворуч) та кристалізованому (праворуч) станах [12].

Зі зниженням температури води від 3,98 °С вплив водневих зв'язків істотно зростає внаслідок зменшення температури як міри середньої кінетичної енергії теплового руху молекул. У водному середовищі починає формуватися тетрадральна квазіструктура, близька за конфігурацією до структури льоду. Це призводить до збільшення середньої міжмолекулярної відстані та, відповідно, до складних і неочевидних змін фундаментальних фізичних властивостей води — модуля об'ємної пружності (опору стисканню) та густини (інерційної характеристики маси), як основних параметрів, що визначають швидкість звуку. Важливо підкреслити наявність принципової фізичної невизначеності: за таких умов об'єм води збільшується приблизно на 0,012 %, тобто маса фіксованого об'єму зменшується. Водночас унаслідок формування надмолекулярної

структурованості зростає маса кластерів води: тетраедральні кластери мають відносну молекулярну масу близько 108 (як міру інерції), на відміну від відносної молекулярної маси окремої молекули води, яка дорівнює 18. Гіпотетично, якщо припустити незмінність модуля об'ємної пружності, швидкість звуку в «мережі» таких кластерів була б приблизно у 2,45 рази меншою, ніж у цьому ж об'ємі, але у мономолекулярному середовищі.

З іншого боку, виникнення структурованості впливає і на модуль об'ємної пружності води. Гіпотетично, не враховуючи змін густини але враховуючи лише зміну пружності, швидкість звуку могла б зменшитися приблизно на 5,1 %, що відповідає зниженню на ~75–80 м/с.

Таким чином, реальний вплив змін структурованості водного середовища на швидкість звуку визначається взаємодією двох факторів — зміни густини та зміни модуля об'ємної пружності, причому їх сумарний ефект не може бути однозначно передбачений у межах класичних емпіричних моделей. За умов невизначеності фактичного внеску змін пружності та густини у формування швидкості звуку в морській воді за температур, близьких до кристалізації та максимальної щільності (характерних для умов утворення глибоководного гідроакустичного хвилеводу SOFAR), доцільно розглянути спрощений варіант аналізу його формування. Розглянемо зміни модуля об'ємної пружності (K) та густини (ρ) на глибинах 800–1500 м, тобто, без прямого врахування структурних перетворень води.

У Світовому океані на глибинах 800–1200 м мінімальні температури води перебувають у діапазоні 2,3–3,8 °С. У цьому температурному інтервалі модуль об'ємної пружності виявляє максимальну чутливість до температурних змін ($\partial K/\partial T \approx 2,2\text{--}2,5$ МПа/°С). Це означає, що зниження температури лише на 0,1 °С призводить до зменшення K приблизно на 0,23 МПа, що є істотним. Водночас зростання гідростатичного тиску призводить до збільшення модуля об'ємної пружності приблизно на +16,5 МПа на кожні 1000 м глибини. Вважається, що щільність води на цих глибинах за даних температур перебуває поблизу свого максимуму і змінюється значно повільніше.

Таким чином, у діапазоні глибин 800–1200 м модуль об'ємної пружності починає швидко зменшуватися, і відповідно до формули Ньютона—Лапласа, швидкість звуку досягає мінімуму саме на глибині осі SOFAR. Наведене узагальнення підтверджується розрахунками, виконаними на основі реального вертикального профілю океанологічних даних у центральній частині Тихого океану (вимірювання Argo № 5904460, 2023 рік, таблиця 4).

Таблиця 4 – Вертикальний розподіл океанологічних параметрів та розрахункових характеристик

Глибина, м	Тиск, дбар	T, °С	Солоність, psu	c (вимір), м/с	ρ , кг/м ³	K (розрах.), ГПа
800	810	5,85	34,62	1494,8	1027,125	2,2945
900	912	4,92	34,61	1489,8	1027,395	2,2790
1000	1014	4,17	34,60	1486,2	1027,625	2,2678
1100	1116	3,65	34,59	1484,9	1027,805	2,2628
1200	1218	3,25	34,59	1485,8	1027,975	2,2655
1500	1523	2,61	34,58	1492,1	1028,455	2,2820
2000	2030	2,05	34,57	1507,8	1029,185	2,3365
4000	4070	1,41	34,55	1568,2	1031,420	2,5365

Розрахунки за формулою Ньютона—Лапласа свідчать, що на глибині осі гідроакустичного хвилеводу SOFAR (1100 м) модуль об'ємної пружності K досягає абсолютного мінімуму (2,2628 ГПа). Вище осі SOFAR (800–1100 м) зменшення K ($\Delta K = -0,0317$ ГПа) та зростання густини ($\Delta \rho = +0,68$ кг/м³), призводить до зниження швидкості звуку. Нижче осі SOFAR (1100–1400 м) модуль

об'ємної пружності навпаки, зростає ($\Delta K = +0,0137$ ГПа), як і густина; однак, густина зростає значно повільніше, ніж вище осі ($\Delta \rho = +0,49$ кг/м³), унаслідок чого швидкість звуку починає поволі зростати.

Отже, у повній відповідності до фундаментальної формули Ньютона—Лапласа (у першому наближенні), мінімум швидкості звуку в шарі гідроакустичного хвилеводу SOFAR зумовлений локальним мінімумом модуля об'ємної пружності води, а не безпосередньо зростанням гідростатичного тиску, як це прийнято в класичній інтерпретації [10].

Новизна виконаного дослідження полягає в обґрунтуванні того, що сучасна гідроакустика, яка базується переважно на емпіричних рівняннях швидкості звуку, не враховує фундаментального механізму формування глибоководного гідроакустичного хвилеводу SOFAR, пов'язаного з трансформацією тетрадральної структурованості води та колапсом кластерів під дією критичних значень тиску. У роботах [13, 14, 15] показано, що за температур нижче 4 °C і тиску до ~10 МПа вода демонструє посилену тетрадральну структурованість, підтверджену сучасними методами і засобами вимірювань, яка з підвищенням тиску зазнає флуктуацій і поступового руйнування. За таких умов пружність води зменшується, оскільки тетрадральні кластери з порожнинами роблять середовище «м'якшим». Таким чином, у наслідок одночасного зменшення модуля об'ємної пружності та аномалії максимуму густини в морській воді за температури нижче ~4 °C обидва фактори діють в одному напрямі і зменшують швидкість звуку. Отже, можна констатувати, що саме зміна структури води направлено впливає на її пружність та густина, що формує мінімум швидкості звуку, який лежить в основі акустичного каналу SOFAR.

Однак, на глибинах більше 1100 м тенденція зміни швидкості звуку різко змінюється на протилежну – швидкість звуку починає зростати. Очевидно, що відбулися не поступові а практично моментальні якісні структурні перетворення. Швидкість звуку зростає, бо холодна глибинна вода під більшим тиском стає більш пружно-жорсткою, наближаючись за акустичними властивостями до твердого стану звичайної речовини, яка вже майже не має структури за рахунок водневих зв'язків, і реагує на поступове збільшення тиску відповідним поступовим збільшенням опору – пружність зростає. Отже існують концептуальні підстави для того, що вода під сильним стиском різко набуває властивостей, ближчих до щільно упакованих (мало структурованих) станів. Частково це підтверджується молекулярно-динамічними моделями та експериментальними даними [16].

Було вирішено спробувати дослідити похибки емпіричних рівнянь, на прикладі розрахунку адіабатичного модуля об'ємної пружності, з застосуванням факторного методу аналізу. Для тестових розрахунків методом факторного аналізу було обрано шість варіантів ідентичних умов (ідеалізований океан, повністю перемішаний до дна), які відрізнялися лише температурою води. Діапазон температур охоплював значення від 2 °C до 7 °C (максимальна температура, за якої зафіксовано формування гідроакустичного хвилеводу SOFAR). За класичними уявленнями гідроакустики результати розрахунків вертикального розподілу адіабатичного модуля об'ємної пружності повинні підпорядковуватися єдиним загальним тенденціям. Водночас добре відома аномалія густини прісної води поблизу 4 °C свідчить про існування процесів структурної перебудови, які стандартними гідроакустичними підходами не враховуються.

Перший результат розрахунків показав, що для води з температурою 2 °C та для води з температурами 3–7 °C тенденції зміни другої похідної модуля об'ємної пружності за глибиною (K'') є кількісно різними (таблиця 5). Отже, емпіричне рівняння адіабатичного модуля об'ємної пружності, побудоване з використанням формул Chen–Millero (для швидкості звуку c) та UNESCO EOS-80 (для густини води ρ) за солоності $S = 35$ psu, демонструє неочікувані розбіжності у вертикальному розподілі K'' для температур нижче та вище 2 °C.

Таблиця 5 - Друга похідна модуля об'ємної пружності (K'') за глибиною для шести температурних варіантів

Глибина, м	K'' (2 °C)	K'' (3 °C)	K'' (4 °C)	K'' (5 °C)	K'' (6 °C)	K'' (7 °C)
500	-60	-74	-81	-86	-92	-97
600	-53	-66	-74	-79	-85	-90
700	-47	-60	-68	-73	-79	-84
800	-40	-56	-61	-67	-73	-78
900	-35	-49	-56	-62	-68	-73
1000	-29	-43	-50	-56	-62	-67
1100	-24	-38	-44	-51	-57	-62
1200	-19	-33	-40	-46	-52	-58
1300	-14	-29	-36	-42	-48	-54
1400	-10	-25	-32	-38	-44	-50
1500	-5	-21	-28	-34	-41	-47
1600	-1	-17	-25	-31	-37	-43
1700	3	-14	-21	-28	-34	-40
1800	6	-10	-18	-25	-31	-37
1900	10	-7	-15	-22	-28	-34
2000	13	-4	-12	-19	-26	-32

У ході аналізу було встановлено специфічну закономірність: для температури 2 °C (і нижче) та для температур 3 °C (і вище) характер зміни другої похідної модуля об'ємної пружності з глибиною належить до різних класів поведінки, що вказує на зміну режиму розрахункової залежності.

Для узагальнення результатів було обчислено середню різницю значень K'' між температурними парами (таблиця 6). Аналіз показав, що значення +14,67 Па/м² для пари температур 2–3 °C у 4,0–4,2 рази перевищує середнє значення ~3,52 Па/м², характерне для інших температурних пар у діапазоні 3–7 °C. Величини ~3,47–3,54 Па/м² є практично однаковими (відхилення не перевищують 2 %), що свідчить про спільний, однаковий за природою розрахунковий механізм зміни модуля об'ємної пружності в цьому температурному інтервалі. Особливо показовим є інтервал температур ≥ 4 –7 °C, де відхилення між парами не перевищують 0,0004 %.

Таблиця 6 - Середня різниця другої похідної модуля об'ємної пружності води (K'') між температурними парами

Пара температур, °C	Середня різниця K'' , Па/м ²
2 – 3	+14,67
3 – 4	+3,47
4 – 5	+3,53
5 – 6	+3,54
6 – 7	+3,53

Таким чином, значення 14,67 Па/м² для пари 2–3 °C інтерпретується не як реальна фізична властивість води, а як прояв аномального режиму роботи емпіричної формули, що пов'язаний із домінуванням структурних ефектів (водневі зв'язки, тетраедральна та надмолекулярна впорядкованість), які у використаних рівняннях не параметризовані. Натомість значення ~3,5 Па/м² відповідає звичайному термодинамічному режиму, в якому емпіричні залежності працюють коректно.

Різниця масштабів (~400 %) свідчить про те, що в температурному інтервалі 2–3 °С емпірична формула переходить у якісно інший режим похибок

Другий результат факторного аналізу вказує на існування критичного діапазону тиску, що відповідає глибинам близьким до 800–900 м, де фіксуються максимальні відхилення між інтерпольованими та розрахованими за формулою значеннями K'' (таблиця 7). Саме на цій глибині проявляються екстремальні розбіжності, що не можуть бути пояснені гладкою апроксимацією.

Таблиця 7 - Різниця (фактичне – інтерпольоване значення) для K''

Глибина, м	2 °С (Па/м ²)	3 °С (Па/м ²)	4 °С (Па/м ²)	5 °С (Па/м ²)	6 °С (Па/м ²)	7 °С (Па/м ²)
600	0,06	-0,17	0,06	0,02	0,02	-0,02
700	-0,29	0,69	-0,30	-0,09	-0,09	0,01
800	0,50	-0,91	0,57	0,23	0,23	0,20
900	-0,39	0,23	-0,40	-0,30	-0,30	-0,43
1000	0,12	0,37	-0,17	0,23	0,23	0,20
1100	-0,02	-0,18	0,45	-0,09	-0,09	0,21
1200	0,03	-0,09	-0,27	0,02	0,02	-0,24
1300	-0,01	0,05	0,06	-0,00	0,00	0,07

Подальше порівняння середніх значень різниці (розраховане – інтерпольоване) на інших глибинах (600–1300 м, за винятком 800 м) зі значенням на глибині 800 м показало, що за абсолютною величиною відхилення є статистично значущими для температур $T = 2-4$ °С (0,571–1,039 Па/м²), тоді як для температур $T = 5-7$ °С відхилення стабільно менші (0,230–0,262 Па/м²) і відрізняються як за середнім значенням, так і за дисперсією (таблиця 8).

Таблиця 8 - Відхилення K'' на глибині 800 м відносно середнього на інших глибинах

Температура, °С	Середнє K'' на 7-ми глибинах (без глибини 800 м), Па/м ²	($K''_{800} - K''_{\text{середнє}}$), Па/м ²
2	-0,071	0,571
3	0,129	-1,039
4	-0,072	0,642
5	-0,032	0,262
6	-0,032	0,262
7	-0,030	0,230

Це свідчить про існування різних режимів похибок емпіричних рівнянь у діапазоні низьких температур (2–4 °С) та вищих температур (5–7 °С), що узгоджується з гіпотезою про чутливість структурних ефектів води до тиску та температури в областях, близьких до температур замерзання та максимальної густини прісної води. Отже, виявлені аномалії слід трактувати не як особливості реальної пружності води, а як обмеження застосовності емпіричних формул, у яких параметр структурованості води відсутній.

Висновки. Встановлено, що міжнародна система пошуку і порятунку (SAR), орієнтована переважно на електромагнітні та супутникові канали зв'язку і позиціонування (COSPAS-SARSAT, GMDSS), є вразливою в умовах війни нового гібридного типу, коли застосовуються засоби радіоелектронної боротьби, спуфінгу та електромагнітного деніалу. Це створює критичні ризики для безпеки морського транспорту, підводної інфраструктури та судноплавних маршрутів.

Обґрунтовано доцільність трансформації системи SAR у напрямі інтеграції гідроакустичних засобів спостереження та позиціонування, зокрема на основі невразливого гідроакустичного хвилеводу SOFAR. Застосування SOFAR дозволяє забезпечити пасивне (скритне) та стійке до контрзаходів виявлення аварій, вибухів і руйнувань, що є принципово важливим для морського транспорту в умовах анонімних диверсій і втрати зв'язку.

Показано, що загальноприйнята інтерпретація формування хвилеводу SOFAR як простої компенсації температурного градієнту, який практично відсутній на цих глибинах, та градієнту тиску за глибиною, який постійний у всьому діапазоні глибин, є методично неповною і не пояснює ані різну ефективність SOFAR в океанах, ані його відсутність у Чорному та Середземному морях. Це обмежує можливості прогнозування ефективності акустичних засобів SAR на конкретних ділянках морських акваторій.

Запропоновано фізичну інтерпретацію процесу формування SOFAR-каналу на основі фундаментальної теорії Ньютона-Лапласа, відповідно до якої мінімум швидкості звуку на осі хвилеводу зумовлений локальним мінімумом адиабатичного модуля об'ємної пружності води, а не безпосередньо зростанням гідростатичного тиску. Такий підхід узгоджується з результатами розрахунків за реальними океанологічними профілями (Argo) і дозволяє фізично коректно інтерпретувати умови утворення хвилеводу. Показано, що структурованість води за температур, близьких до ~ 4 °C призводить до зменшення модуля об'ємної пружності та збереження тенденції аномалії максимуму густини, внаслідок чого обидва фактори діють узгоджено у напрямі зменшення швидкості звуку. Подальша різка зміна тенденції зменшення модуля об'ємної пружності на його збільшення та ослаблення аномалії максимуму густини призводить до зміни тенденції і швидкості звуку – швидкість звуку починає зростати. Саме цей механізм швидкої (практично моментальної) перебудови структури водневих зв'язків створює фізичну основу для формування глибоководного акустичного каналу SOFAR, придатного для наддалекого поширення акустичних сигналів у системі SAR.

Практичне значення отриманих результатів полягає у можливості використання раніше невідомих фізичних принципів формування глибоководного акустичного каналу SOFAR для розроблення та модернізації систем SAR морського транспорту, зокрема шляхом створення пасивних донних гідроакустичних мереж, як резервного або автономного каналу пошуку, локалізації аварій та забезпечення безпеки судноплавства в умовах світової війни нового гібридного типу.

ЛІТЕРАТУРА

1. The Primakov, Not Gerasimov, Doctrine in Action // Carnegie Endowment for International Peace. 2019. URL: <https://carnegieendowment.org/research/2019/06/the-primakov-not-gerasimov-doctrine-in-action> (дата звернення: 02.01.2026).
2. How the Baltic Sea nations have tackled suspicious cable cuts // Atlantic Council. URL: <https://www.atlanticcouncil.org/in-depth-research-reports/issue-brief/how-the-baltic-sea-nations-have-tackled-suspicious-cable-cuts/> (дата звернення: 02.01.2026).
3. Cyber Dimensions of a Hybrid Warfare // CyberPeace Institute. URL: <https://cyberpeaceinstitute.org/news/cyber-dimensions-of-a-hybrid-warfare/> (дата звернення: 10.01.2026).
4. Nord Stream attacks highlight vulnerability of undersea pipelines in west // The Guardian. 2022. URL: <https://www.theguardian.com/business/2022/sep/29/nord-stream-attacks-highlight-vulnerability-undersea-pipelines-west> (дата звернення: 10.01.2026).
5. History of the SOFAR Channel // Discovery of Sound in the Sea. 2022. URL: <https://dosits.org/science/movement/sofar-channel/history-of-the-sofar-channel/> (дата звернення: 20.01.2026).
6. History of the SOFAR Channel. URL: <https://dosits.org/science/movement/sofar-channel/history-of-the-sofar-channel/> (дата звернення: 20.01.2026).
7. SOSUS: The “Secret Weapon” of Undersea Surveillance // Undersea Warfare. URL: <https://www.scirp.org/reference/referencespapers?referenceid=1864574> (дата звернення: 20.01.2026).
8. Underwater Acoustic Communications: Design Considerations // Massachusetts Institute of Technology. URL: <https://stuff.mit.edu/people/millitsa/resources/pdfs/garmisch.pdf.pdf> (дата звернення: 1.02.2026).
9. Software-defined underwater acoustic networks // Florida Atlantic University. URL: <https://www.fau.edu/engineering/directory/faculty/sklivanitis/personal/underwatermag15.pdf> (дата звернення: 02.02.2026).
10. Sound // Roger Williams University. URL: <https://rwu.pressbooks.pub/webboceanography/chapter/6-4-sound/> (дата звернення: 10.02.2026).
11. Experimental tests for a liquid-liquid critical point in water. URL: https://www.researchgate.net/publication/345810643_Experimental_tests_for_a_liquid-liquid_critical_point_in_water (дата звернення: 10.02.2026).

12. Nature up close: Water, and life as we know it // CBS News. URL: <https://www.cbsnews.com/news/nature-up-close-water-and-life-as-we-know-it-judy-lehmborg/> (дата звернення: 22.02.2026).
13. Signatures of a liquid–liquid transition in an ab initio deep neural network model for water // Proceedings of the National Academy of Sciences. URL: <https://www.pnas.org/doi/10.1073/pnas.2015440117> (дата звернення: 22.02.2026).
14. Molecular structure and dynamics of liquid water. URL: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:854642/FULLTEXT03.pdf> (дата звернення: 25.02.2026).
15. The anomalies and criticality of liquid water. URL: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC7959589/> (дата звернення: 25.02.2026).
16. Microheterogeneity in Liquid Water Associated with Hydrogen-Bond Cooperativity: IR Spectroscopic and MD Simulation Study of Temperature Effect. URL: <https://www.mdpi.com/1422-0067/26/11/5187#:~:text=Water%20is%20the%20most%20common,acceptor%20character%20of%20water%20molecules.> (дата звернення: 25.02.2026).

REFERENCES

1. Carnegie Endowment for International Peace (2019). *The Primakov, Not Gerasimov, Doctrine in Action*. Available at: <https://carnegieendowment.org/research/2019/06/the-primakov-not-gerasimov-doctrine-in-action> (accessed: 02 January 2026).
2. Atlantic Council. (n.d.). *How the Baltic Sea nations have tackled suspicious cable cuts*. Available at: <https://www.atlanticcouncil.org/in-depth-research-reports/issue-brief/how-the-baltic-sea-nations-have-tackled-suspicious-cable-cuts/> (accessed: 02 January 2026).
3. CyberPeace Institute. (n.d.). *Cyber Dimensions of a Hybrid Warfare*. Available at: <https://cyberpeaceinstitute.org/news/cyber-dimensions-of-a-hybrid-warfare/> (accessed: 10 January 2026).
4. The Guardian. (2022). *Nord Stream attacks highlight vulnerability of undersea pipelines in west*. Available at: <https://www.theguardian.com/business/2022/sep/29/nord-stream-attacks-highlight-vulnerability-undersea-pipelines-west> (accessed: 10 January 2026).
5. Discovery of Sound in the Sea. (2022). *History of the SOFAR Channel*. Available at: <https://dosits.org/science/movement/sofar-channel/history-of-the-sofar-channel/> (accessed: 20 January 2026).
6. Discovery of Sound in the Sea. (n.d.). *History of the SOFAR Channel*. Available at: <https://dosits.org/science/movement/sofar-channel/history-of-the-sofar-channel/> (accessed: 20 January 2026).
7. Undersea Warfare. (n.d.). *SOSUS: The “Secret Weapon” of Undersea Surveillance*. Available at: <https://www.scirp.org/reference/referencespapers?referenceid=1864574> (accessed: 20 January 2026).
8. Massachusetts Institute of Technology. (n.d.). *Underwater Acoustic Communications: Design Considerations*. Available at: <https://stuff.mit.edu/people/millitsa/resources/pdfs/garmisch.pdf.pdf> (accessed: 1 February 2026).
9. Florida Atlantic University. (n.d.). *Software-defined underwater acoustic networks*. Available at: <https://www.fau.edu/engineering/directory/faculty/sklivanitis/personal/underwatermag15.pdf> (accessed: 02 February 2026).
10. Roger Williams University. (n.d.). *Sound*. Available at: <https://rwu.pressbooks.pub/webboceanography/chapter/6-4-sound/> (accessed: 10 February 2026).
11. ResearchGate. (n.d.). *Experimental tests for a liquid-liquid critical point in water*. Available at: https://www.researchgate.net/publication/345810643_Experimental_tests_for_a_liquid-liquid_critical_point_in_water (accessed: 10 February 2026).
12. CBS News. (n.d.). *Nature up close: Water, and life as we know it*. Available at: <https://www.cbsnews.com/news/nature-up-close-water-and-life-as-we-know-it-judy-lehmborg/> (accessed: 22 February 2026).
13. Proceedings of the National Academy of Sciences. (n.d.). *Signatures of a liquid–liquid transition in an ab initio deep neural network model for water*. Available at: <https://www.pnas.org/doi/10.1073/pnas.2015440117> (accessed: 22 February 2026).
14. Diva Portal. (n.d.). *Molecular structure and dynamics of liquid water*. Available at: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:854642/FULLTEXT03.pdf> (accessed: 25 February 2026).
15. PubMed Central. (n.d.). *The anomalies and criticality of liquid water*. Available at: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC7959589/> (accessed: 25 February 2026).
16. MDPI. (n.d.). *Microheterogeneity in Liquid Water Associated with Hydrogen-Bond Cooperativity: IR Spectroscopic and MD Simulation Study of Temperature Effect*. Available at: <https://www.mdpi.com/1422->

[0067/26/11/5187#:~:text=Water%20is%20the%20most%20common,acceptor%20character%20of%20water%20molecules](#) (accessed: 25 February 2026).

Kucherenko N. V., Kapochkina M. B

WAYS OF TRANSFORMATION OF THE INTERNATIONAL SYSTEM OF SEARCH AND RESCUE AT SEA IN THE CONDITIONS OF THE THIRD WORLD WAR OF THE NEW HYBRID TYPE (SAR)

The international search and rescue (SAR) system in maritime transport traditionally relies on electromagnetic and satellite communication and positioning channels COSPAS-SARSAT, GMDSS, the effectiveness of which in a new hybrid type of war is reduced due to electronic warfare, spoofing and other forms of electromagnetic weapons. The article substantiates the directions of SAR transformation, which are associated with a return to hydroacoustic means of monitoring and positioning disaster sites based on the SOFAR waveguide as a channel resistant to electromagnetic influences and suitable for covert attribution of underwater incidents critical for the safety of shipping and underwater infrastructure. It is shown that empirical hydroacoustics does not allow explaining the spatial variability of SOFAR efficiency, as well as its practical absence in the Black and Mediterranean Seas, which has direct consequences for future routes and logistics of maritime transport, taking into account the risks of modern SAR. A physical interpretation of the formation of SOFAR is proposed based on the Newton-Laplace theory with an emphasis on the role of water elasticity and structural effects inherent exclusively to the aquatic environment. The results obtained form the scientific basis for the integration of passive bottom and network hydroacoustic systems in SAR of maritime transport as a backup/backup circuit in conditions of hybrid warfare: risks of sabotage, accidents and loss of communication.

Keywords: maritime transport; search and rescue (SAR); underwater infrastructure; SOFAR hydroacoustic waveguide; water structure; speed of sound, hybrid warfare.

Стаття прийнята 03.03.2025

МЕТОД АВТОМАТИЗОВАНОГО ОТРИМАННЯ ПАРАМЕТРІВ СУДНА З ВІЗУАЛЬНОГО ІНТЕРФЕЙСУ НАВІГАЦІЙНОГО ТРЕНАЖЕРА

У статті запропоновано метод автоматизованого відновлення навігаційних і керуючих параметрів судна на основі аналізу візуального інтерфейсу навігаційного тренажера без звернення до його внутрішніх телеметричних модулів. Актуальність роботи зумовлена тим, що більшість існуючих підходів передбачає використання службових журналів або цифрових потоків даних, доступ до яких визначається архітектурою конкретної програмної платформи. Така залежність обмежує відтворюваність експериментів, ускладнює міжплатформне порівняння результатів і знижує універсальність отриманих висновків.

Запропонований підхід ґрунтується на трактуванні екранного простору як структурованого інформаційного поля, у межах якого локалізуються стабільні зони відображення окремих показників. Після конфігурації цих зон здійснюється автоматизоване перетворення графічних та числових елементів інтерфейсу у синхронізовані часові послідовності параметрів руху. Дискретність реконструкції узгоджується з частотою оновлення індикаторів і за відповідних технічних умов може досягати 10 Гц. Сформований багатовимірний масив даних дозволяє аналізувати траєкторію руху, перехідні режими, часові затримки реакції та взаємозв'язок між керуючими впливами і динамікою судна.

Експериментальна перевірка методу виконана на мостиковому тренажері повного типу. Для курсу середня абсолютна похибка реконструкції не перевищувала 1° , а для частоти обертів рушія залишалася меншою за 2% від номінального значення. Отримані часові ряди зберігають фізичну послідовність процесу маневрування, відтворюють характерні екстремуми та не містять суттєвих фазових спотворень. Результати підтверджують можливість використання візуального шару інтерфейсу як самостійного та універсального джерела експериментальних даних у дослідженнях динаміки руху судна.

Ключові слова: навігаційні тренажери, навігаційні дані, візуальні інтерфейси, аналіз у реальному часі, моделювання руху судна, навігаційні параметри, підтримка прийняття рішень

Постановка проблеми. Попри широке використання судових тренажерів у дослідженнях динаміки руху, отримання параметрів симуляції залишається залежним від внутрішньої архітектури програмної системи. Доступ до телеметричних потоків і службових журналів або обмежений, або прив'язаний до конкретної платформи. Унаслідок цього виникає методологічна проблема: результати експериментів не є повністю відтворюваними поза межами конкретного тренажера, а порівняння сценаріїв між різними системами ускладнюється.

Водночас екранний інтерфейс тренажера містить повний набір параметрів, необхідних для прийняття навігаційних рішень. Це дає підстави розглядати його як потенційне альтернативне джерело експериментальних даних.

Задачею дослідження є розроблення способу реконструкції навігаційних і керуючих параметрів руху судна на основі аналізу візуального інтерфейсу без інтеграції з внутрішніми модулями тренажера.

Аналіз літературних джерел. Навігаційні тренажери у сучасних дослідженнях розглядаються як складні людино-машинні системи, що інтегрують модель руху судна, навігаційне середовище та дії оператора в межах єдиного інтерактивного процесу [1–4]. Такий підхід дозволяє відтворювати сценарії

підвищеної складності в контрольованих умовах і забезпечує широкі можливості для дослідницького аналізу.

Найбільш поширеним напрямом є використання внутрішніх цифрових журналів і телеметричних потоків для післясимуляційного аналізу. У цих роботах параметри руху – курс, швидкість, траєкторія, взаємодія з навігаційними об'єктами – застосовуються для оцінювання якості маневрування та порівняння сценаріїв [5–8]. Такий підхід забезпечує високу деталізацію даних, проте прив'язаний до архітектури конкретного тренажера і формату його внутрішніх записів.

Окремий напрям досліджень зосереджений на аналізі дій оператора в тренажерному середовищі. У центрі уваги перебувають часові характеристики реакції, послідовність керуючих дій, дотримання процедур і якість прийняття рішень у змодельованих навігаційних ситуаціях [9–11]. Для кількісного оцінювання використовуються поведінкові маркери, аналіз не технічних навичок, фіксація візуальної уваги та показники когнітивного навантаження, отримані під час роботи у мостиковому тренажері. У такому підході динаміка руху судна здебільшого розглядається як відображення поведінки оператора – як результат його реакції, інтерпретації ситуації та вибору керуючих впливів – тоді як сама траєкторія рідко виступає самостійним об'єктом кількісного аналізу.

Дослідження, присвячені математичному та фізичному моделюванню руху судна, орієнтовані на уточнення гідродинамічних характеристик, впливу вітру, хвилювання та течій [12–14]. У таких роботах формуються системи рівнянь руху з урахуванням зовнішніх збурень та взаємодії сил, виконується ідентифікація гідродинамічних коефіцієнтів і калібрування моделей на основі експериментальних або чисельних даних. Отримані результати використовуються для підвищення точності прогнозування траєкторії та аналізу маневрування, проте формування даних відбувається всередині математичної чи чисельної моделі і не передбачає альтернативного способу їх незалежного відновлення на основі зовнішнього інформаційного поля.

У суміжних галузях активно розвиваються методи аналізу візуальної інформації для реконструкції параметрів технічних процесів за їх екранним відображенням [15–18]. Ці підходи довели свою ефективність у промислових системах моніторингу та керування, зокрема в автоматичному зчитуванні інформації з індикаторів, оцінці стану обладнання та контролі відповідності процедурам. Однак у сфері судових навігаційних тренажерів вони практично не застосовуються для незалежного відновлення навігаційних параметрів у процесі симуляції.

Незважаючи на різноманітність підходів, існуючі дослідження об'єднує спільна методологічна залежність від внутрішньої структури симуляційної системи. Формування даних відбувається або через доступ до службових модулів тренажера, або через інтерпретацію поведінки оператора на основі цих даних. Така модель аналізу передбачає наявність стандартизованих інтерфейсів експорту або спеціалізованих інструментів інтеграції, що обмежує універсальність результатів і ускладнює їх відтворюваність на інших платформах.

Крім того, переважна частина досліджень орієнтована на післясимуляційний аналіз. Динамічні процеси розглядаються ретроспективно, що знижує можливість дослідження реакції системи в умовах змінюваного середовища безпосередньо під час симуляції. Питання реконструкції параметрів руху на основі зовнішнього візуального представлення при цьому практично не розглядається.

Жодне з проаналізованих досліджень не розглядає можливість відновлення параметрів виключно на основі візуального шару інтерфейсу без доступу до внутрішніх даних. Таким чином, у наявних дослідженнях спостерігається методологічний розрив: або використовується прямий доступ до внутрішніх даних тренажера, або аналіз обмежується поведінкою оператора. Питання універсального способу відновлення навігаційних і керуючих параметрів на основі візуального відображення інтерфейсу залишається невирішеним. Відсутність такого підходу ускладнює міжплатформне порівняння результатів та обмежує можливості дослідження динаміки руху судна без інтеграції з програмною архітектурою конкретної системи.

Мета статті – розроблення та перевірка універсального методу отримання навігаційних і керуючих параметрів судна безпосередньо з візуального інтерфейсу навігаційного тренажера без звернення до його внутрішніх програмних модулів.

Викладення основного матеріалу. Після окреслення проблеми доцільно перейти до безпосереднього опису запропонованого підходу. У центрі уваги перебуває інтерфейс навігаційного тренажера як простір, у межах якого відображається стан симуляційної моделі судна та навігаційного середовища. Саме через це візуальне поле оператор взаємодіє із системою, оцінює обстановку та приймає рішення. З дослідницької точки зору воно може бути розглянуте як зовнішній шар представлення внутрішніх процесів моделі.

Під час симуляції оператор одночасно аналізує кілька інформаційних потоків: положення судна на електронній карті, його курс і швидкість, режим роботи рушійної установки, реакцію судна на переключення стерна, зміни навігаційної обстановки. Для людини ці елементи інтегруються у цілісну ситуаційну картину. Для дослідника ж вони можуть бути інтерпретовані як система взаємопов'язаних змінних, що змінюються у часі та підлягають кількісному опису.

Інтерфейс у цьому контексті не є випадковим набором графічних компонентів. Його структура підпорядкована логіці керування судном: ключові показники розташовані у фіксованих зонах, мають сталі формати представлення та оновлюються з певною періодичністю. Така впорядкованість створює передумови для систематичного виділення параметрів без втручання у внутрішню архітектуру тренажера.

У межах дослідження інтерфейс розглядається як зовнішній інформаційний контур симуляційної системи. Його елементи трактуються як носії даних, що допускають локалізацію в межах екранного простору та подальше перетворення у формалізовані змінні. Перехід від візуального сприйняття до математичного опису становить ключовий етап побудови методу.

Метод ґрунтується на припущенні, що візуальне поле тренажера відображає поточний стан його внутрішньої моделі. Зміна курсу, швидкості або положення судна неминуче знаходить відображення на відповідних індикаторах чи картографічному полі. Таким чином, екранне представлення може слугувати каналом спостереження за динамікою системи.

У запропонованому підході тренажер розглядається як замкнена система, для якої доступним є лише вихідний шар відображення. Вхідними впливами виступають дії оператора та зміни навігаційного середовища, тоді як вихід – це сукупність графічних і числових елементів інтерфейсу. Аналіз зосереджено саме на цьому рівні.

Процес отримання параметрів можна описати як послідовність перетворень. Спочатку фіксується екранне зображення з визначеною часовою дискретністю. Далі ідентифікуються інформаційні області, що містять значущі показники. Наступним кроком є інтерпретація візуальних елементів у числові або геометричні значення. Отримані величини синхронізуються та формують послідовності, придатні для подальшого аналізу.

Такий підхід дозволяє розглядати інтерфейс як універсальне джерело даних, не прив'язане до конкретної програмної реалізації тренажера. Водночас слід враховувати, що точність відновлення параметрів залежить від характеристик відображення – роздільної здатності, частоти оновлення інтерфейсу та стабільності графічного представлення.

Мостиковий інтерфейс сучасного навігаційного тренажера відтворює просторову та функціональну логіку реальної ходової рубки. На екрані одночасно відображаються картографічне поле, індикатори курсу та швидкості, координати судна, параметри рушійної установки, положення стерна та інші елементи керування. Така організація забезпечує безперервне представлення поточного стану моделі у процесі симуляції.

З позиції аналізу даних інтерфейс доцільно розглядати як впорядковану сукупність інформаційних зон, локалізованих у межах екранного простору. Частина показників має безпосереднє числове представлення – курс, швидкість, координати, частота обертів рушійної установки, кут переключення стерна. Інші відображаються у вигляді шкал або стрілочних індикаторів, що потребують геометричної інтерпретації. Картографічна область формує просторовий контекст, у якому відображається траєкторія руху та взаємодія судна з навігаційними об'єктами.

Для формалізації інтерфейс можна подати як двовимірний простір з координатами (x, y) , у межах якого кожен елемент займає визначену область Z_i . Нехай $I(x, y, t)$ – функція, що описує

візуальне представлення інтерфейсу у момент часу t . Кожній зоні Z_i відповідає параметр $p_i(t)$, який відображає певний показник стану судна.

Водночас внутрішня модель тренажера описується вектором стану $S(t)$, що включає змінні кінематики, динаміки та взаємодії із середовищем. Інтерфейс не містить повного опису цього вектора, а відображає лише ту його частину, яка необхідна для керування та контролю. Отже, між внутрішнім станом системи та екранним зображенням існує відображення, яке можна інтерпретувати як інформаційну проєкцію.

У межах дослідження розглядається побудова відображення

$$F: I(x, y, t) \rightarrow P(t),$$

де, $P(t)$ є підмножиною внутрішнього стану $S(t)$, що може бути відновлена на основі візуального представлення.

Таке відображення не є взаємно однозначним: частина змінних внутрішньої моделі не має прямого графічного аналога, тоді як окремі елементи інтерфейсу можуть агрегувати декілька параметрів. Тому реконструкція обмежується тими показниками, які мають сталі та однозначно інтерпретовані відображення.

Точність такого відображення залежить від характеристик зображення – роздільної здатності, частоти оновлення інтерфейсу та масштабу відображення. Ці фактори враховуються при виборі дискретності фіксації та способу інтерпретації графічних елементів.

Ефективність реконструкції параметрів безпосередньо залежить від стабільності просторової організації інтерфейсу. У більшості тренажерних систем інформаційні блоки мають фіксоване розташування, що дозволяє розглядати зони Z_i як сталі області екранного простору, пов'язані з конкретними показниками. Така сталість є необхідною умовою коректного зіставлення візуального елемента з параметром $p_i(t)$.

Разом із тим інтерфейс не є абсолютно незмінним. Можливі варіації масштабу картографічного поля, зміни роздільної здатності, графічні особливості окремих сценаріїв або налаштувань відображення. У зв'язку з цим відображення F має зберігати інваріантність щодо подібних перетворень. Це досягається шляхом нормалізації координатного простору та використання відносних характеристик зон – наприклад, їх положення у частках від розмірів екрану, а не в абсолютних піксельних координатах.

Забезпечення інваріантності дозволяє зберігати відповідність між зоною та параметром навіть за змін умов відображення. У результаті метод набуває універсальності та може застосовуватися до різних тренажерних платформ без зміни загальної логіки формалізації.

Окреме значення параметра у момент часу відображає лише поточний стан системи. Проте аналіз маневрування або реакції судна на керуючі впливи потребує розгляду послідовності змін, а не ізольованих значень. Саме на цьому етапі відбувається методологічний перехід – від опису стану до опису процесу.

Послідовність значень дозволяє виявляти затримки реакції, коливальні режими, тенденції до стабілізації або відхилення від заданої траєкторії. У такому поданні інтерфейс стає не лише джерелом фіксації окремих параметрів, а засобом реконструкції логіки керування та розвитку навігаційної ситуації у часі.

Таким чином, формування часової структури даних є не технічним доповненням до формалізації, а її необхідним продовженням.

Після визначення зон Z_i та встановлення відображення F ключовим завданням стає отримання параметрів із заданою часовою дискретністю Δt . Хоча екранне поле відображає безперервний процес, його фіксація здійснюється у дискретні моменти часу, що узгоджуються з частотою оновлення інтерфейсу.

Для кожного параметра формується послідовність $p_i(t_1), p_i(t_2), \dots, p_i(t_k)$, яка відображає еволюцію відповідного показника протягом симуляції. У такому поданні рух судна описується як багатовимірний процес, у якому окремі змінні змінюються узгоджено або з певними затримками.

Особливої уваги потребує синхронізація параметрів у межах єдиного часового масштабу. Курсові зміни, реакція стерна та варіації швидкості повинні аналізуватися в однакових інтервалах спостереження, що дозволяє встановлювати причинно-наслідкові зв'язки між керуючими діями та реакцією судна.

У результаті формується багатовимірний часовий опис симуляційного процесу, придатний для порівняння сценаріїв, оцінювання стійкості руху та дослідження ефективності керуючих рішень.

Реконструкція параметрів на основі екранного відображення неминуче пов'язана з певним рівнем похибки. На відміну від внутрішніх телеметричних потоків, де значення формуються безпосередньо у моделі, у запропонованому підході вони відновлюються шляхом інтерпретації графічного образу. Тому оцінювання точності є необхідною складовою перевірки працездатності методу.

На точність впливають декілька факторів: роздільна здатність зображення, частота оновлення інтерфейсу, масштаб картографічного поля, а також спосіб графічного представлення окремих індикаторів. Для числових показників ключовим є коректність зчитування символів, тоді як для шкальних або стрілочних елементів – точність визначення їх геометричних характеристик. У картографічній зоні додатковий вплив має масштабування та особливості відображення координатної сітки.

Якщо позначити відновлене значення параметра через $p_i^*(t)$, а його еталонне значення у моделі – через $p_i(t)$, то миттєва різниця між ними описується як

$$\varepsilon_i(t) = p_i^*(t) - p_i(t).$$

Оскільки оцінювання здійснюється на часовому інтервалі, доцільно використовувати інтегральну характеристику похибки. У роботі застосовано середню абсолютну похибку, що визначається як

$$MAE_i = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N | p_i^*(t_k) - p_i(t_k) |,$$

де N – кількість дискретних моментів спостереження на вибраному інтервалі.

Експериментальна перевірка показала, що для основних навігаційних параметрів – зокрема курсу та частоти обертів рушія – середня абсолютна похибка не перевищує 1° для HDG та становить менш ніж 2% від номінального значення для RPM. Такі значення є достатніми для аналізу динаміки руху, оцінювання маневрування та дослідження перехідних режимів. Часова затримка між відображенням параметра на екрані та його фіксацією не перевищує інтервал дискретизації Δt .

Метод не є універсальним для всіх типів змінних. Він дозволяє відновлювати лише ті параметри, що мають стабільне графічне представлення. Зміна структури інтерфейсу або довільне переміщення інформаційних блоків потребує повторної локалізації зон. Крім того, параметри, що не відображаються на екрані безпосередньо, залишаються поза межами реконструкції.

Разом з тим отримана точність є достатньою для дослідження траєкторії руху, аналізу реакції судна на керуючі впливи та порівняння сценаріїв симуляції без інтеграції з внутрішніми модулями тренажера.

Практична реалізація та експериментальна перевірка методу

Теоретичне обґрунтування підходу потребує підтвердження його працездатності в умовах реальної симуляції. З цією метою було виконано програмну реалізацію методу та проведено серію експериментів на базі навігаційного тренажера мостикового типу. Метою апробації було оцінити можливість стабільного відновлення навігаційних і керуючих параметрів у процесі симуляції без звернення до внутрішніх телеметричних модулів системи.

Експериментальна перевірка передбачала три послідовні етапи: конфігурацію інформаційних зон інтерфейсу, автоматизоване формування часових послідовностей параметрів та їх подальший аналіз. Особлива увага приділялася узгодженості відновлених величин у часі, стабільності їх отримання

при зміні навігаційної обстановки та відповідності еталонним значенням у контрольованому режимі.

У цьому розділі наведено опис програмної реалізації методу, структуру відновлюваних параметрів та результати експериментальної перевірки, що дозволяють оцінити його практичну придатність для аналізу динаміки руху судна.

Експериментальна перевірка методу проводилася на базі навігаційного тренажера мостикового типу, інтерфейс якого наведено на рис. 1. Екран відображає сукупність навігаційних і технічних параметрів, що характеризують поточний стан судна у процесі симуляції.



Рисунок 1 – Інтерфейс навігаційного тренажера, використаний під час експерименту

У верхній частині інтерфейсу представлено основні навігаційні показники, зокрема курс (HDG), курс відносно магнітного меридіана (MAG), курс відносно ґрунту (COG), швидкість (SOG), параметри дрейфу та кутова швидкість повороту (ROT). Центральна область містить кругову шкалу курсового індикатора, що відображає орієнтацію судна у просторі.

У нижній частині інтерфейсу розташовані індикатори частоти обертів рушії (RPM), кута перекладки стерна (Rudder Angle), швидкості зміни курсу (Rate of Turn) та органи керування двигуном. Така структура забезпечує повне відображення стану системи керування рухом судна. Це візуальне поле слугувало джерелом даних для відновлення параметрів у межах запропонованого методу.

Подальший етап експерименту передбачав локалізацію інформаційних зон інтерфейсу та формування шаблону їх обробки.

Після визначення інтерфейсу як джерела даних наступним етапом експерименту стала локалізація інформаційних зон, у межах яких відображаються навігаційні та керуючі параметри. З огляду на фіксовану структуру інтерфейсу більшість показників має стабільне просторове розташування, що дозволяє сформувати набір областей обробки.

У межах експерименту для кожного параметра було визначено окрему зону Z_i , яка охоплює відповідний елемент інтерфейсу. Конфігурація зон виконувалася у напівавтоматичному режимі шляхом виділення відповідних областей екранного простору. Приклад сформованого набору зон наведено на рис. 2. До таких зон належали числові індикатори курсу та швидкості, шкали частоти обертів рушії, індикатор кута стерна та показник швидкості повороту. Для картографічної області

було задано окремий шаблон обробки, орієнтований на визначення положення судна відносно координатної сітки.

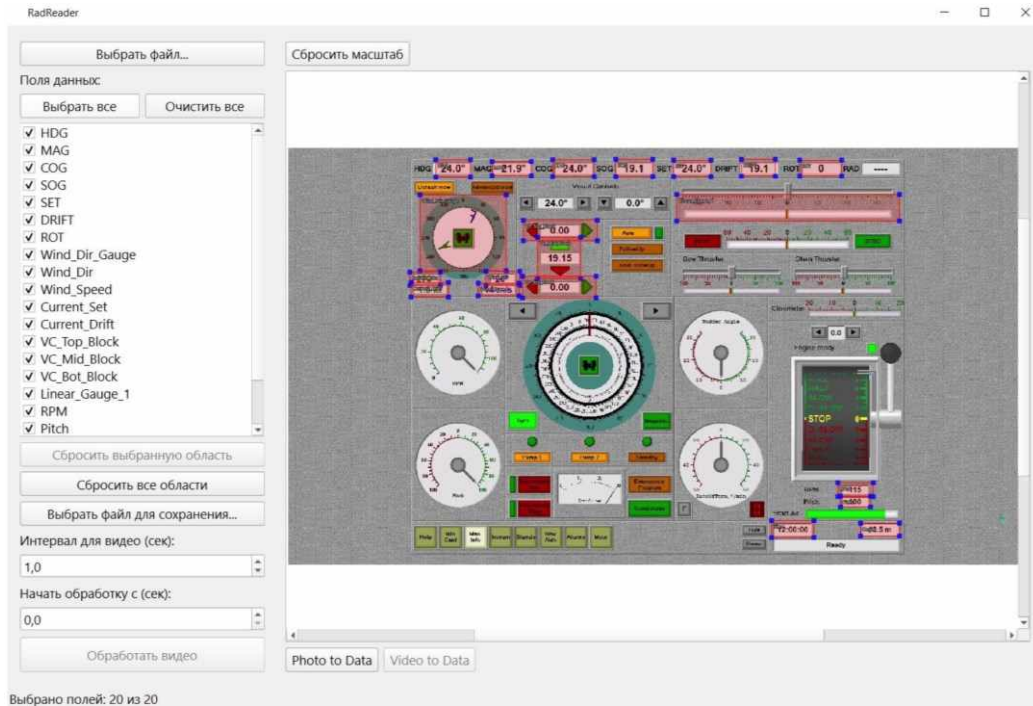


Рисунок 2 – Локалізація інформаційних зон для відновлення навігаційних параметрів

Конфігурація зон здійснювалася один раз для конкретного інтерфейсу та надалі використовувалася у автоматичному режимі. У разі зміни роздільної здатності або масштабу відображення координати зон нормалізувалися відносно розмірів екрану, що забезпечувало збереження їх просторової відповідності.

Локалізація інформаційних зон дозволила перейти від загального зображення інтерфейсу до структурованого набору областей спостереження, у межах яких виконувалося відновлення параметрів у часі.

Після конфігурації інформаційних зон було виконано серію експериментальних запусків у режимі обробки відеопотоку. У наведеному експерименті фіксація параметрів здійснювалася з інтервалом дискретизації $\Delta t = 1$ с, що відповідає частоті 1 Гц та узгоджується з частотою оновлення основних індикаторів інтерфейсу тренажера. Такий інтервал забезпечує достатню деталізацію динаміки руху без надмірного збільшення обсягу даних і зменшує ймовірність появи псевдоколивань, пов'язаних із графічними особливостями відображення.

Разом з тим структура методу та швидкодія обробки зображення допускають підвищення частоти реконструкції до 10 Гц за умови відповідної частоти оновлення інтерфейсу та стабільності візуального представлення параметрів. Збільшення частоти дискретизації не потребує зміни загальної концепції підходу і пов'язане насамперед із технічними характеристиками обчислювального середовища.

Для кожного моменту часу t_k формувався вектор параметрів

$$P(t_k) = \{p_1(t_k), p_2(t_k), \dots, p_n(t_k)\},$$

де компоненти відповідають відновленим навігаційним і керуючим показникам. Набір параметрів, використаний у серії експериментів, наведено в табл. 1 разом із зазначенням типу відображення та призначення кожної змінної в подальшому аналізі.

У результаті обробки формується синхронізована таблиця значень, у якій кожний рядок відповідає дискретному моменту часу, а кожний стовпець – окремому параметру. Така структура дозволяє розглядати процес симуляції як багатовимірний часовий ряд, придатний для аналізу не лише траєкторних змін, а й причинно-наслідкових зв'язків між діями оператора та реакцією судна.

Таблиця 1 – Фрагмент сформованої часової послідовності навігаційних параметрів

HDG, град	COG, град	SOG	SET, град	DRIFT	ROT	Wind_Dir, град	Wind_Speed, м/с	RPM	Depth, м	Time
24.0	24.0	24.3	24.0	24.3	0	34	21	098	8.7	12:00:00
23.8	18.9	23.0	276.2	2.0	0	32	20	098	9.9	12:00:09
24.2	18.5	22.6	278.2	2.3	5	32	20	098	9.7	12:00:19
25.2	18.5	22.3	280.9	2.6	7	31	20	098	10.7	12:00:29
26.1	18.7	22.0	282.4	2.8	9	310	20	098	10.9	12:00:39
27.5	19.9	21.6	283.6	2.9	9	30	20	097	11.3	12:00:49
28.6	20.9	21.3	284.2	2.9	9	30	20	097	10.0	12:00:59
29.5	22.0	21.0	284.1	2.8	8	30	20	097	10.1	12:01:09
30.3	22.8	20.7	284.6	2.8	3	30	20	097	10.8	12:01:19
31.2	23.8	20.4	284.3	2.7	2	290	20	097	8.4	12:01:29
31.8	24.6	20.2	284.1	2.6	0	290	20	096	7.6	12:01:39
32.1	24.9	19.9	283.7	2.6	0	30	20	096	6.7	12:01:49
32.3	25.2	19.7	283.5	2.5	0	30	19	096	8.5	12:01:59
32.5	25.3	19.5	284.1	2.6	0	30	19	096	10.1	12:02:09
32.7	25.5	19.3	284.3	2.5	0	30	19	096	8.5	12:02:19
32.9	25.8	19.1	283.7	2.4	4	30	19	096	6.8	12:02:29
32.9	26.0	18.9	283.2	2.4	2	30	19	096	6.7	12:02:39
32.8	25.9	18.7	282.7	2.3	2	30	19	096	6.4	12:02:49
32.6	25.7	18.5	281.7	2.3	-2	310	19	095	8.4	12:02:59

Отримані масиви даних застосовувалися для оцінювання узгодженості керуючих впливів і динаміки руху. У межах аналізу розглядалися часові зсуви між переключенням стерна та зміною курсу, характер стабілізації після завершення маневру, а також зв'язок між режимом роботи рушійної установки та зміною швидкості. Такий підхід дозволяє перейти від опису окремих станів до інтерпретації процесу керування як динамічної системи з характерними перехідними режимами.

Для подальшої обробки сформовані таблиці експортувалися у стандартний формат, сумісний із середовищами статистичного аналізу та візуалізації. Це забезпечило можливість побудови графіків, узагальненого оцінювання похибок та порівняння різних сценаріїв симуляції в єдиному форматі даних.

Експериментальний аналіз проводився на часовому інтервалі, що відповідає активній фазі маневру, визначеній за характером зміни кутової швидкості повороту. Такий підхід дозволив зосередитися на ділянці, де відбувається взаємодія керуючих впливів і динамічної реакції судна.

На рис. 3 наведено згладжені часові ряди курсу судна (HDG) та кутової швидкості повороту (ROT). Після початку маневру спостерігається зростання ROT, що передуює основній зміні курсу. Максимум кутової швидкості досягається раніше, ніж формується основний приріст HDG, що відповідає інерційній природі повороту. Надалі відбувається поступове зменшення ROT і стабілізація курсу на новому рівні. Характер перехідного процесу відображає демпфування коливань без виражених автоколивальних режимів, що підтверджує коректність реконструкції динаміки.

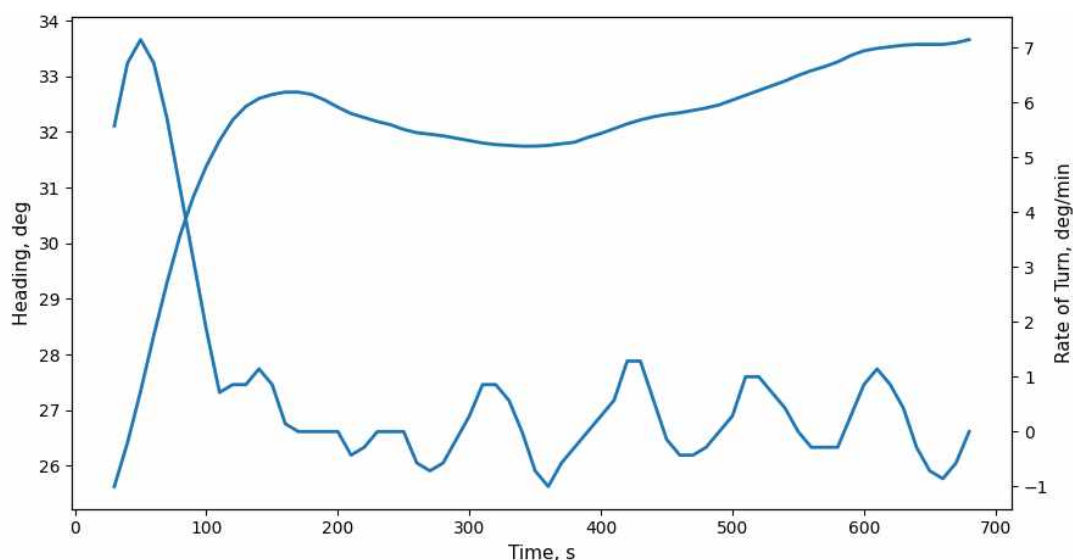


Рисунок 3 – Часові ряди курсу судна (HDG) та кутової швидкості повороту (ROT) на інтервалі маневру

Рис. 4 демонструє зміну частоти обертів рушія на тому самому часовому інтервалі. Відображено поступове зниження RPM без різких стрибків, що узгоджується зі сценарієм переходу до іншого режиму руху. Синхронність змін RPM із динамікою курсу та ROT підтверджує можливість комплексного аналізу кінематичних і енергетичних параметрів на основі сформованих часових послідовностей.

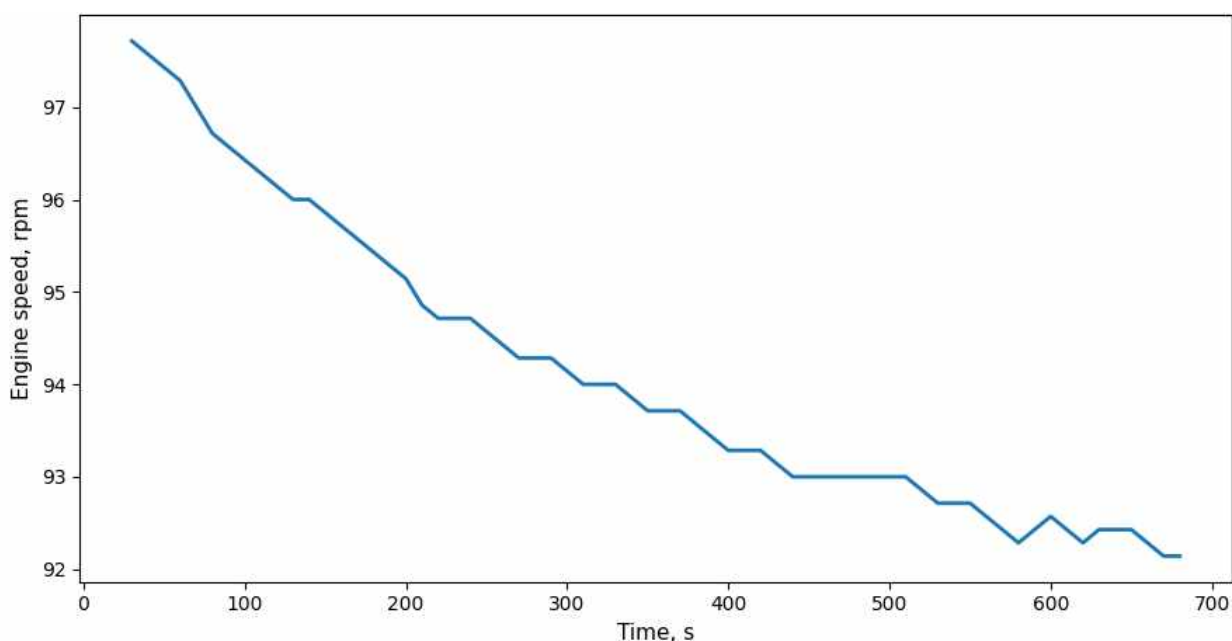


Рисунок 4 – Часовий ряд частоти обертів рушія (RPM) на інтервалі маневру

Кількісний аналіз показав, що характерні екстремуми та точки перегину часових рядів відтворюються стабільно при повторних запусках експерименту. Середній часовий зсув між піком ROT і моментом найбільшої швидкості зміни курсу становив кілька секунд, що відповідає фізичній інерційності моделі судна. Відхилення від еталонних значень залишалися в межах, прийнятних для дослідження маневрених характеристик.

Отримані результати свідчать про те, що реконструкція навігаційних параметрів на основі екранного відображення забезпечує достатню точність для аналізу динаміки керування, дослідження перехідних режимів та порівняння альтернативних сценаріїв руху.

Обговорення результатів. Отримані результати підтверджують можливість реконструкції динаміки руху судна на основі аналізу екранного відображення тренажера без звернення до внутрішніх телеметричних потоків. Часові ряди, сформовані в ході експерименту, дозволяють відтворити не лише послідовність станів, а й характер переходів між ними, що є принципово важливим для дослідження процесів керування.

Порівняння часових рядів курсу та кутової швидкості повороту демонструє збереження фізичної логіки процесу. Пік ROT передує основній зміні HDG, що відповідає інерційній природі маневру. Відсутність фазових спотворень або паразитних коливань свідчить про те, що реконструкція не вносить суттєвих систематичних викривлень у часову структуру сигналу. Це особливо важливо при аналізі перехідних режимів, де навіть незначні часові зсуви можуть змінити інтерпретацію процесу.

Зміна частоти обертів рушія на тому ж інтервалі підтверджує можливість одночасного аналізу кінематичних і енергетичних параметрів. Узгодженість трендів RPM із динамікою повороту відкриває перспективу дослідження взаємозв'язку між режимами роботи рушійної установки та маневреними характеристиками. Таким чином, метод дозволяє перейти від локального аналізу окремого параметра до комплексного розгляду системи «керуючий вплив – реакція судна».

У наявних дослідженнях отримання навігаційних параметрів у тренажерному середовищі зазвичай передбачає використання внутрішніх логів або стандартних телеметричних протоколів. Запропонований підхід відрізняється тим, що спирається виключно на візуально доступну інформацію. Це розширює можливості використання тренажерів як дослідницьких платформ у випадках, коли доступ до внутрішньої архітектури системи обмежений або відсутній.

Методологічно важливим є те, що інтерфейс розглядається як інформаційна проєкція стану системи. Такий погляд дозволяє трактувати екран не як допоміжний засіб відображення, а як структуроване поле даних, придатне для формалізованого аналізу. У цьому контексті тренажерне середовище набуває властивостей експериментальної установки, а процес симуляції – статусу контролюваного експерименту.

Разом із тим результати вказують на межі застосування підходу. Точність реконструкції залежить від стабільності структури інтерфейсу, якості візуалізації та частоти оновлення індикаторів. У випадку динамічної зміни конфігурації екрану або використання адаптивних панелей керування виникає необхідність повторної локалізації зон. Параметри, що не мають прямого графічного відображення, залишаються поза межами відновлення, що обмежує повноту реконструкції внутрішнього стану моделі.

Незважаючи на ці обмеження, проведена апробація показує, що екранне представлення містить достатній обсяг структурованих даних для дослідження маневрених характеристик, аналізу перехідних режимів і порівняння альтернативних сценаріїв керування. Це створює передумови для використання підходу у навчальних дослідженнях, експериментальних роботах та оцінюванні ефективності різних алгоритмів керування.

Висновки. У роботі обґрунтовано та експериментально перевірено можливість отримання навігаційних параметрів на основі аналізу екранного відображення тренажерного інтерфейсу без звернення до внутрішніх телеметричних потоків. Показано, що інтерфейс може розглядатися як структурована інформаційна проєкція стану системи, придатна для формалізованої обробки та формування синхронізованих часових послідовностей.

Розроблено підхід до локалізації інформаційних зон і реконструкції параметрів у дискретні моменти часу, що дозволяє формувати багатовимірний масив даних для аналізу динаміки руху судна. Експериментальна апробація на базі навігаційного тренажера підтвердила збереження фізичної логіки процесу в отриманих часових рядах: взаємозв'язок між кутовою швидкістю повороту, зміною курсу та режимом роботи рушійної установки відтворюється без суттєвих спотворень.

Отримані результати свідчать про можливість використання тренажерних систем як джерела експериментальних даних у дослідницьких цілях навіть за умов обмеженого доступу до внутрішньої архітектури програмного комплексу. Метод забезпечує достатню точність для аналізу перехідних режимів, дослідження маневрених характеристик та порівняння альтернативних сценаріїв керування.

Практичне значення роботи полягає у створенні інструменту, який дозволяє формувати структуровані навігаційні дані з відкритого візуального середовища. Це розширює можливості використання тренажерів у навчальних, наукових та експериментальних задачах без втручання у внутрішні модулі системи.

Подальший розвиток підходу може бути пов'язаний із підвищенням стійкості до змін конфігурації інтерфейсу, розширенням переліку відновлюваних параметрів та інтеграцією отриманих часових масивів із методами статистичного й алгоритмічного аналізу динаміки руху.

ЛІТЕРАТУРА

1. Munim Z. H., Krabbel H., Haavardtun P., Kim T. E., Bustgaard M., Thorvaldsen H. Scenario design, data measurement, and analysis approaches in maritime simulator training: A systematic review // *Methodologies and intelligent systems for technology enhanced learning, workshops – 13th International Conference MIS4TEL 2023 : Lecture Notes in Networks and Systems*. Cham : Springer, 2023. Vol. 769. DOI: 10.1007/978-3-031-42134-1_4.
2. Sellberg C. Simulators in bridge operations training and assessment: A systematic review and qualitative synthesis // *WMU Journal of Maritime Affairs*. 2016. DOI: 10.1007/s13437-016-0114-8.
3. Hetherington C., Flin R., Mearns K. Safety in shipping: The human element // *Journal of Safety Research*. 2006. Vol. 37, No. 4. P. 401–411. DOI: 10.1016/j.jsr.2006.04.007.
4. Tusher H. M., Munim Z. H., Nazir S. An evaluation of maritime simulators from technical, instructional, and organizational perspectives: A hybrid multi-criteria decision-making approach // *WMU Journal of Maritime Affairs*. 2024. Vol. 23. P. 165–194. DOI: 10.1007/s13437-023-00318-1.
5. Frette V., Kleppe G., Christensen K., Garrido P. L. Analysis of ship maneuvering data from simulators // *AIP Conference Proceedings*. 2011. Vol. 1332. P. 276–283. DOI: 10.1063/1.3577668.
6. Li H., Zhao N., Zhou J., Chen X., Wang C. Uncertainty analysis and maneuver simulation of standard ship model // *Journal of Marine Science and Engineering*. 2024. Vol. 12, No. 7. Article 1230. DOI: 10.3390/jmse12071230.
7. Pires da Silva P. Sensitivity analysis of ship manoeuvring mathematical models // *Journal of Marine Science and Engineering*. 2023. Vol. 11, No. 2. Article 416. DOI: 10.3390/jmse11020416.
8. He H., Lataire E., Van Zwijnsvoorde T., Delefortrie G. A ship manoeuvring desktop simulator for developing and validating automatic control algorithms // *TransNav: The International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*. 2023. Vol. 17. P. 607–616. DOI: 10.12716/1001.17.03.12.
9. Saeed F., Bury A., Bonsall S., Riahi R. A proposed evidential reasoning methodology for quantitative assessment of non-technical skills amongst merchant navy deck officers in a ship's bridge simulator environment // *TransNav: The International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*. 2018. Vol. 12, No. 3. P. 597–608. DOI: 10.12716/1001.12.03.20.
10. Atik O., Arslan O. Use of eye tracking for assessment of electronic navigation competency in maritime training // *Journal of Eye Movement Research*. 2019. Vol. 12, No. 3. DOI: 10.16910/jemr.12.3.7.
11. Ronca V. et al. Neurophysiological assessment of an innovative maritime emergency training intervention in a full-mission bridge simulator // *Brain Sciences*. 2023. Vol. 13, No. 9. Article 1319. DOI: 10.3390/brainsci13091319.
12. Yasukawa H., Yoshimura Y. Introduction of MMG standard method for ship maneuvering predictions // *Journal of Marine Science and Technology*. 2015. Vol. 20, No. 1. P. 37–52. DOI: 10.1007/s00773-014-0293-y.
13. Lee J., Nam B. W., Lee J.-H., Kim Y. Development of enhanced two-time-scale model for simulation of ship maneuvering in ocean waves // *Journal of Marine Science and Engineering*. 2021. Vol. 9, No. 7. Article 700. DOI: 10.3390/jmse9070700.
14. Kim D., Tezdogan T., Incecik A. A high-fidelity CFD-based model for the prediction of ship manoeuvrability in currents // *Ocean Engineering*. 2022. Vol. 256. Article 111492. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2022.111492.
15. Smith R. An overview of the Tesseract OCR engine // *Proceedings of the Ninth International Conference on Document Analysis and Recognition (ICDAR 2007)*. 2007. P. 629–633. DOI: 10.1109/ICDAR.2007.4376991.
16. Wuest T., Weimer D., Irgens C., Thoben K.-D. Machine learning in manufacturing: Advantages, challenges, and applications // *Production & Manufacturing Research*. 2016. Vol. 4, No. 1. P. 23–45. DOI: 10.1080/21693277.2016.1192517.

17. Szeliski R. *Computer vision: Algorithms and applications*. London : Springer, 2010. DOI: 10.1007/978-1-84882-935-0.

18. Rehman M. S., Shafiq M. T., Ullah F. Automated computer vision-based construction progress monitoring: A systematic review // *Buildings*. 2022. Vol. 12, No. 7. Article 1037. DOI: 10.3390/buildings12071037.

REFERENCES

1. Munim, Z. H., Krabbel, H., Haavardtun, P., Kim, T. E., Bustgaard, M., & Thorvaldsen, H. (2023). Scenario design, data measurement, and analysis approaches in maritime simulator training: A systematic review. In Z. Kubincová, F. Caruso, T. E. Kim, M. Ivanova, L. Lancia, & M. A. Pellegrino (Eds.), *Methodologies and intelligent systems for technology enhanced learning, workshops – 13th International Conference MIS4TEL 2023* (Lecture Notes in Networks and Systems, Vol. 769). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-42134-1_4
2. Sellberg, C. (2016). Simulators in bridge operations training and assessment: A systematic review and qualitative synthesis. *WMU Journal of Maritime Affairs*. <https://doi.org/10.1007/s13437-016-0114-8>
3. Hetherington, C., Flin, R., & Mearns, K. (2006). Safety in shipping: The human element. *Journal of Safety Research*, 37(4), 401–411. <https://doi.org/10.1016/j.jsr.2006.04.007>
4. Tusher, H. M., Munim, Z. H., & Nazir, S. (2024). An evaluation of maritime simulators from technical, instructional, and organizational perspectives: A hybrid multi-criteria decision-making approach. *WMU Journal of Maritime Affairs*, 23, 165–194. <https://doi.org/10.1007/s13437-023-00318-1>
5. Frette, V., Kleppe, G., Christensen, K., & Garrido, P. L. (2011). Analysis of ship maneuvering data from simulators. *AIP Conference Proceedings*, 1332, 276–283. <https://doi.org/10.1063/1.3577668>
6. Li, H., Zhao, N., Zhou, J., Chen, X., & Wang, C. (2024). Uncertainty analysis and maneuver simulation of standard ship model. *Journal of Marine Science and Engineering*, 12(7), 1230. <https://doi.org/10.3390/jmse12071230>
7. Pires da Silva, P. (2023). Sensitivity analysis of ship manoeuvring mathematical models. *Journal of Marine Science and Engineering*, 11(2), 416. <https://doi.org/10.3390/jmse11020416>
8. He, H., Lataire, E., Van Zwijnsvoorde, T., & Delefortrie, G. (2023). A ship manoeuvring desktop simulator for developing and validating automatic control algorithms. *TransNav: The International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, 17, 607–616. <https://doi.org/10.12716/1001.17.03.12>
9. Saeed, F., Bury, A., Bonsall, S., & Riahi, R. (2018). A proposed evidential reasoning methodology for quantitative assessment of non-technical skills amongst merchant navy deck officers in a ship's bridge simulator environment. *TransNav: The International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, 12(3), 597–608. <https://doi.org/10.12716/1001.12.03.20>
10. Atik, O., & Arslan, O. (2019). Use of eye tracking for assessment of electronic navigation competency in maritime training. *Journal of Eye Movement Research*, 12(3). <https://doi.org/10.16910/jemr.12.3.7>
11. Ronca, V., et al. (2023). Neurophysiological assessment of an innovative maritime emergency training intervention in a full-mission bridge simulator. *Brain Sciences*, 13(9), 1319. <https://doi.org/10.3390/brainsci13091319>
12. Yasukawa, H., & Yoshimura, Y. (2015). Introduction of MMG standard method for ship maneuvering predictions. *Journal of Marine Science and Technology*, 20(1), 37–52. <https://doi.org/10.1007/s00773-014-0293-y>
13. Lee, J., Nam, B. W., Lee, J.-H., & Kim, Y. (2021). Development of enhanced two-time-scale model for simulation of ship maneuvering in ocean waves. *Journal of Marine Science and Engineering*, 9(7), 700. <https://doi.org/10.3390/jmse9070700>
14. Kim, D., Tezdogan, T., & Incecik, A. (2022). A high-fidelity CFD-based model for the prediction of ship manoeuvrability in currents. *Ocean Engineering*, 256, 111492. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.111492>
15. Smith, R. (2007). An overview of the Tesseract OCR engine. In *Proceedings of the Ninth International Conference on Document Analysis and Recognition (ICDAR 2007)* (pp. 629–633). <https://doi.org/10.1109/ICDAR.2007.4376991>
16. Wuest, T., Weimer, D., Irgens, C., & Thoben, K.-D. (2016). Machine learning in manufacturing: Advantages, challenges, and applications. *Production & Manufacturing Research*, 4(1), 23–45. <https://doi.org/10.1080/21693277.2016.1192517>
17. Szeliski, R. (2010). *Computer vision: Algorithms and applications*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-1-84882-935-0>
18. Rehman, M. S., Shafiq, M. T., & Ullah, F. (2022). Automated computer vision-based construction progress monitoring: A systematic review. *Buildings*, 12(7), 1037. <https://doi.org/10.3390/buildings12071037>

Kalinichenko Y., Koliesnik O.

METHOD OF AUTOMATED OBTAINING OF VESSEL PARAMETERS FROM THE VISUAL INTERFACE OF THE NAVIGATION SIMULATOR

The article proposes a method for automated reconstruction of navigational and control parameters of a vessel based on the analysis of a navigation simulator's visual interface, without accessing its internal telemetry modules. The relevance of the study arises from the fact that most existing approaches rely on service logs or digital data streams, access to which depends on the architecture of a specific software platform. Such dependence limits experimental reproducibility, complicates cross-platform comparison of results, and reduces the universality of the conclusions obtained.

The proposed approach treats the screen space as a structured information field in which stable zones corresponding to individual indicators are localized. After configuring these zones, graphical and numerical interface elements are automatically transformed into synchronized time series of motion parameters. The reconstruction rate is aligned with the update frequency of interface indicators and, under appropriate technical conditions, can reach up to 10 Hz. The resulting multidimensional dataset enables analysis of vessel trajectory, transient regimes, response delays, and the relationship between control actions and vessel dynamics.

Experimental validation was carried out using a full-mission bridge simulator. For heading, the mean absolute reconstruction error did not exceed 1°, while for propeller shaft revolutions it remained below 2% of the nominal value. The obtained time series preserve the physical sequence of maneuvering processes, reproduce characteristic extrema, and do not exhibit significant phase distortions. The results confirm the feasibility of using the visual interface layer as an independent and universal source of experimental data for studies of ship motion dynamics.

Keywords: navigation simulators; navigational data; visual interfaces; real-time analysis; ship dynamics modeling; navigational parameters; decision support.

Стаття прийнята 19.01.2026

© Головань А.І., Монюшко М.М.

АЛГОРИТМІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ІНТЕГРОВАНІХ НАВІГАЦІЙНО-ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ КОНТЕЙНЕРОВОЗІВ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЕКСПЛУАТАЦІЇ

Зростання масштабів трансокеанських перевезень і впровадження контейнеровозів великої та надвеликої місткості ULCV обумовлюють підвищені вимоги до точності навігації, енергоефективності та обґрунтованості управлінських рішень в умовах невизначеності морського середовища. Традиційні підходи до навігації, що базуються на використанні ізольованих джерел даних та детермінованих моделей, не забезпечують належного рівня адаптивності до змінних зовнішніх впливів і обмежують можливості оптимізації експлуатаційних параметрів суден. Метою роботи є розробка алгоритмічного забезпечення інтегрованих навігаційно-інформаційних систем контейнеровозів на основі обробки великих обсягів даних, математичного моделювання руху судна та методів інтелектуальної обробки інформації. У дослідженні запропоновано підхід, що поєднує дані глобальних навігаційних супутникових систем GNSS, гідроакустичних засобів вимірювання та метеорологічних спостережень із використанням методів адаптивної фільтрації, зокрема фільтрів Калмана, для формування узгодженого вектору стану судна. Уточнено математичну модель руху судна на основі 3DOF-підходу з урахуванням впливу хвиль, вітру та течій, доповнену коригуючими членами, що формуються на основі асиміляції даних у реальному часі. Запропоновано алгоритм інтегрованої обробки навігаційних даних і підтримки прийняття рішень, який забезпечує прогнозування траєкторії руху судна та оптимізацію маршруту за багатокритеріальними показниками, такими як витрати палива, тривалість переходу та рівень навігаційної безпеки. Отримані результати свідчать про підвищення точності оцінки параметрів руху та прогнозування траєкторії, а також про зниження експлуатаційних витрат за рахунок більш раціонального вибору режимів руху. Показано, що запропонований підхід є універсальним і може бути застосований для контейнеровозів різних класів, зокрема ULCV, з урахуванням їх інерційних характеристик. Практична цінність роботи полягає у можливості інтеграції розробленого алгоритмічного забезпечення в сучасні навігаційні системи та цифрові платформи управління морським транспортом, що створює передумови для подальшого розвитку інтелектуальних і автономних судноплавних технологій.

Ключові слова: ефективність експлуатації; контейнеровози; ULCV; навігаційно-інформаційні системи; GNSS; гідроакустичні системи; метеорологічні дані; математичне моделювання руху судна; алгоритми підтримки прийняття рішень; штучний інтелект.

Постановка проблеми. Сучасний розвиток морських перевезень характеризується стійкою тенденцією до збільшення розмірів і вантажомісткості контейнеровозів, зокрема впровадженням суден класу Ultra Large Container Vessel (ULCV). Зростання геометричних параметрів і дедвейту таких суден обумовлює суттєве підвищення їх інерційності, що ускладнює процеси керування рухом, маневрування та утримання заданої траєкторії, особливо в умовах трансокеанських переходів. У таких умовах навіть незначні похибки у навігаційних рішеннях можуть призводити до накопичення відхилень, збільшення витрат палива та зниження загальної ефективності експлуатації.

Додатковим ускладнюючим фактором є стохастичний характер морського середовища. Хвильові процеси, вітрові навантаження та морські течії мають нелінійний і змінний за часом вплив на динаміку руху судна, що суттєво ускладнює побудову адекватних математичних моделей і прогнозування траєкторії. Водночас точність врахування цих факторів безпосередньо визначає якість навігаційних рішень, зокрема при оптимізації маршрутів і режимів руху.

Сучасні навігаційно-інформаційні системи контейнеровозів використовують широкий спектр джерел даних, включаючи супутникові системи позиціонування, автоматичну ідентифікаційну

систему, гідроакустичні засоби вимірювання та метеорологічні спостереження. Проте ці дані, як правило, обробляються ізольовано або в рамках слабо інтегрованих підсистем, що призводить до їх фрагментарного використання. Відсутність узгоджених процедур синхронізації, фільтрації та об'єднання різнорідної інформації обмежує можливості формування цілісної картини навігаційної ситуації та знижує ефективність прийняття рішень.

Особливої актуальності набуває проблема відсутності інтегрованих алгоритмічних рішень, здатних забезпечити обробку великих обсягів даних у реальному часі з урахуванням динаміки зовнішнього середовища та технічного стану судна. Існуючі підходи переважно базуються на детермінованих моделях або статичних алгоритмах, які не забезпечують достатньої адаптивності до змінних умов експлуатації та не використовують повною мірою потенціал сучасних методів інтелектуальної обробки даних.

Таким чином, ключова науково-прикладна проблема полягає у недостатній ефективності існуючих навігаційних систем контейнеровозів, що зумовлено відсутністю єдиного алгоритмічного ядра, яке забезпечує інтеграцію різнорідних навігаційних даних, їх адаптивну обробку та підтримку прийняття оптимальних рішень у реальному часі. Вирішення цієї проблеми потребує розробки нових підходів до алгоритмічного забезпечення інтегрованих навігаційно-інформаційних систем із використанням методів математичного моделювання та штучного інтелекту.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Сучасні дослідження у сфері підвищення ефективності експлуатації контейнеровозів формують кілька ключових наукових напрямів, що охоплюють як класичні підходи до моделювання руху суден, так і сучасні методи інтеграції даних та інтелектуальної обробки інформації.

Класичні детерміновані моделі маневрування суден, зокрема моделі типу Nomoto та MMG, залишаються базовим інструментом для опису динаміки руху суден. Результати досліджень свідчать, що модифіковані MMG-моделі здатні забезпечити високу точність прогнозування маневрених характеристик контейнеровозів, зокрема покращення точності оцінки параметрів повороту до 78% та досягнення низьких значень RMSE для основних показників руху [1]. Розширення моделей до 4-DOF дозволяє враховувати взаємодію крену та курсового руху, що підвищує адекватність опису динаміки на високих швидкостях [2].

Водночас встановлено, що класичні моделі мають обмежену адаптивність до реальних умов експлуатації, що пов'язано зі складністю врахування змінних гідродинамічних характеристик та зовнішніх збурень [3]. Нелінійні модифікації моделей Nomoto підвищують точність у динамічних режимах, однак супроводжуються зростанням обчислювальної складності, що обмежує їх використання в режимі реального часу [4]. Крім того, традиційні моделі мають знижену точність при низькошвидкісних режимах та складних маневрах, що потребує їх подальшого вдосконалення [5].

Суттєвий розвиток сучасних навігаційних систем пов'язаний із впровадженням методів багатосенсорної інтеграції. Дослідження показують, що поєднання даних GNSS, компасів, лагів та інших сенсорів із використанням фільтрів Калмана дозволяє значно підвищити точність і надійність оцінки стану судна [6]. Зокрема, застосування Unscented Kalman Filter забезпечує ефективну обробку нелінійних систем і врахування впливу зовнішніх факторів, таких як течії [7].

Багатосенсорна інтеграція дозволяє компенсувати обмеження окремих технологій, зокрема GNSS, шляхом використання комплементарних характеристик різних сенсорів [8]. Це забезпечує підвищення точності позиціонування та надійності навігаційних рішень у складних умовах експлуатації [9]. Водночас ефективність інтеграції значною мірою залежить від обраних алгоритмів обробки даних, включаючи як класичні методи, так і підходи, засновані на машинному навчанні [10].

Метео-орієнтована маршрутизація є важливим інструментом підвищення ефективності експлуатації контейнеровозів у трансокеанських перевезеннях. Дослідження демонструють, що врахування вітру, хвиль та течій при плануванні маршруту дозволяє досягти зниження витрат палива, яке у окремих випадках може перевищувати 10% [11]. Використання алгоритмів оптимізації, таких як модифікований алгоритм Дейкстри або методи динамічного програмування, забезпечує ефективний пошук оптимальних маршрутів [12].

Окремі дослідження також показують покращення енергоефективності та зменшення часу переходу при використанні метеоданих [13]. При цьому ефект може варіюватися від помірнього (близько 1-2%) до значного залежно від умов експлуатації [14]. Нові адаптивні моделі маршрутизації демонструють потенціал суттєвого підвищення ефективності експлуатації без значного збільшення довжини маршруту [15].

Інтенсивний розвиток інтелектуальних технологій зумовив активне впровадження AI та data-driven підходів у задачі навігації. Дослідження показують, що сучасні методи глибокого навчання дозволяють значно підвищити точність прогнозування траєкторії руху суден порівняно з традиційними моделями [16]. Зокрема, використання LSTM-мереж забезпечує високу точність і стійкість прогнозів [17].

Використання історичних даних AIS дозволяє формувати більш точні моделі поведінки суден та оцінювати множинні сценарії розвитку траєкторії [18]. Гібридні підходи, що поєднують фізичні моделі та нейронні мережі, демонструють покращення точності та зниження невизначеності прогнозів [19]. Водночас ефективність AI-підходів залежить від якості вхідних даних та доступності обчислювальних ресурсів [20].

Проведений аналіз показує, що існуючі підходи мають як суттєві переваги, так і обмеження. Класичні моделі забезпечують фізичну інтерпретованість, але мають обмежену адаптивність; сенсорна інтеграція підвищує точність оцінки стану судна, однак потребує складних алгоритмів обробки; метео-орієнтована маршрутизація дозволяє знизити витрати, але залежить від якості прогнозів; AI-підходи забезпечують високу точність прогнозування, проте вимагають значних обсягів даних. Це обґрунтовує необхідність розробки інтегрованих алгоритмічних рішень, що поєднують переваги зазначених підходів у межах єдиної навігаційно-інформаційної системи.

Мета дослідження полягає у розробці алгоритмічного забезпечення інтегрованої навігаційно-інформаційної системи контейнеровоза, що забезпечує підвищення ефективності експлуатації на основі обробки великих обсягів даних та інтелектуальних методів підтримки рішень.

Основні результати дослідження. Для формалізації процесів керування рухом контейнеровоза в умовах трансокеанських перевезень використано спрощену математичну модель на основі тривимірної площинної динаміки (3DOF), що враховує поступальні рухи вздовж осей (x , y) та кутове обертання відносно вертикальної осі (yaw). Такий підхід є достатнім для опису основних навігаційних режимів при русі у відкритому морі та широко застосовується в рамках моделей типу MMG.

Математична модель руху судна

Система рівнянь руху судна у зв'язаній системі координат має вигляд:

$$\begin{cases} m(\dot{u} - vr) = X_H + X_P + X_R + X_E \\ m(\dot{v} + ur) = Y_H + Y_R + Y_E \\ I_z \dot{r} = N_H + N_R + N_E \end{cases},$$

де u , v – поздовжня та поперечна швидкості судна; r – кутова швидкість обертання; m – маса судна; I_z – момент інерції відносно вертикальної осі; X, Y, N – проекції сил і моментів відповідно до осей координат; індекси H, P, R, E відповідають корпусу (hydrodynamic hull forces), рушійній установці (propeller), рулю (rudder) та зовнішнім впливам (environmental forces).

Гідродинамічні сили корпусу X_H, Y_H, N_H визначаються як нелінійні функції швидкостей і кутів дрейфу, тоді як сили від рушія та рулю враховують режими роботи енергетичної установки та кути відхилення керма.

Особливу увагу в моделі приділено зовнішнім збуренням, що мають стохастичний характер та суттєво впливають на динаміку руху судна. До них віднесено:

- хвильовий вплив, який проявляється у вигляді додаткових сил опору та збурюючих моментів, що змінюються у часі та залежать від спектра хвиль;

- вітрове навантаження, яке визначається відносною швидкістю вітру, аеродинамічними характеристиками надводної частини судна та курсовим кутом;
- морські течії, що викликають зсув траєкторії та впливають на ефективну швидкість руху судна відносно ґрунту.

Зовнішні сили та моменти можуть бути представлені у вигляді:

$$\begin{aligned} X_E &= X_{wave} + X_{wind} + X_{current}, \\ Y_E &= Y_{wave} + Y_{wind} + Y_{current}, \\ N_E &= N_{wave} + N_{wind} + N_{current}. \end{aligned}$$

Однак використання виключно детермінованої моделі не забезпечує достатньої точності прогнозування руху судна в реальних умовах експлуатації через наявність неврахованих факторів, похибок вимірювань та змінності параметрів середовища. З метою підвищення адекватності моделі запропоновано її модифікацію шляхом введення коригуючого члена, що формується на основі інтеграції даних від навігаційних сенсорів у реальному часі.

Модифіковане рівняння для поздовжньої складової сили може бути записано у вигляді:

$$X = X_H + X_P + X_R + X_E + X_{corr}$$

де коригуючий член X_{corr} визначається як функція великих обсягів даних:

$$X_{corr} = f(\text{GNSS, hydroacoustic, meteo})$$

Аналогічні коригуючі члени вводяться для поперечної сили та моменту (Y_{corr}, N_{corr}).

Функція корекції реалізується у вигляді адаптивного алгоритму, який:

- оцінює відхилення між прогнозованими та фактичними параметрами руху;
- виконує ідентифікацію неврахованих збурень;
- коригує параметри моделі або додає компенсуючі впливи.

У якості джерел даних використовуються:

- GNSS – для визначення координат, швидкості та курсу відносно ґрунту;
- гідроакустичні системи – для оцінки швидкості відносно води та характеристик потоку;
- метеорологічні дані – для уточнення вітрових і хвильових впливів.

Запропонована модифікація дозволяє реалізувати механізм асиміляції даних у реальному часі та підвищити точність прогнозування траєкторії руху судна. Це, у свою чергу, створює передумови для ефективної роботи алгоритмів підтримки навігаційних рішень та оптимізації експлуатаційних параметрів контейнеровозів.

Архітектура інтегрованої навігаційно-інформаційної системи

З метою забезпечення ефективної обробки великих обсягів даних та реалізації алгоритмів підтримки навігаційних рішень запропоновано багаторівневу архітектуру інтегрованої навігаційно-інформаційної системи контейнеровоза. Архітектура побудована за ієрархічним принципом і включає чотири функціональні рівні (Рис. 1): сенсорний, рівень обробки даних, алгоритмічний рівень та рівень прийняття рішень.

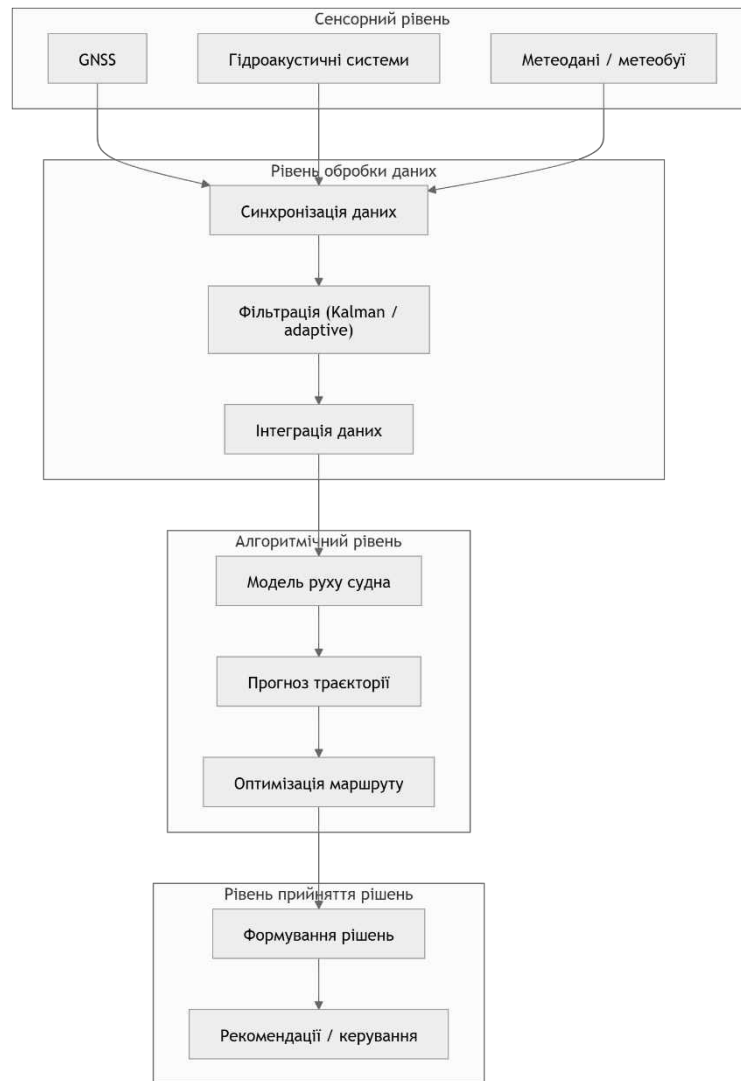


Рисунок 1 – Архітектура інтегрованої навігаційно-інформаційної системи

Сенсорний рівень забезпечує первинний збір даних із різномірних джерел навігаційної інформації. До його складу входять:

- GNSS-системи, що забезпечують визначення координат, швидкості та курсу судна відносно ґрунту;
- гідроакустичні системи, які надають інформацію про швидкість судна відносно води, глибину та характеристики підводного середовища;
- метеорологічні засоби (включаючи метеобуї), що формують дані про вітер, хвилювання та інші параметри морського середовища.

Характерною особливістю цього рівня є різна частота оновлення, точність і формат даних, що зумовлює необхідність їх подальшої узгодженої обробки.

На рівні обробки даних реалізується попередня обробка інформації, що включає:

- синхронізацію часових рядів;
- фільтрацію шумів і викидів;
- узгодження координатних систем.

Ключовим інструментом є використання фільтрів Калмана (Kalman Filter) та їх адаптивних модифікацій, які дозволяють:

- оцінювати стан судна (позиція, швидкість, курс);
- зменшувати вплив похибок вимірювань;

- інтегрувати дані з різних джерел у єдиному векторі стану.

Адаптивні фільтри додатково враховують змінність характеристик середовища та сенсорів, що підвищує стійкість системи.

Алгоритмічний рівень є ядром системи та реалізує основні функції прогнозування та оптимізації. До його складу входять:

- моделі прогнозування руху судна, побудовані на основі математичної моделі (розділ 4) із урахуванням коригуючих членів;
- алгоритми оптимізації маршруту, які мінімізують витрати палива, час переходу або ризику, враховуючи зовнішні умови.

На цьому рівні можуть застосовуватися:

- методи оптимального керування;
- чисельні алгоритми оптимізації;
- елементи штучного інтелекту для адаптації до змінних умов.

Верхній рівень системи – рівень прийняття рішень, забезпечує формування рекомендацій або автоматизованих рішень для судноводія чи системи керування. Основні функції:

- оцінка альтернативних сценаріїв руху;
- вибір оптимальної стратегії навігації;
- формування керуючих впливів або рекомендацій (курс, швидкість, маршрут).

На цьому рівні інтегруються результати прогнозування та оптимізації з урахуванням заданих критеріїв ефективності (паливна економічність, безпека, дотримання графіка).

Алгоритмічне забезпечення обробки навігаційних даних та підтримки прийняття рішень

Ключовим елементом запропонованої інтегрованої навігаційно-інформаційної системи є алгоритмічне забезпечення, що реалізує повний цикл обробки великих обсягів даних, прогнозування руху судна та формування оптимальних навігаційних рішень. На відміну від традиційних підходів, алгоритм орієнтований на роботу в умовах невизначеності та забезпечує адаптивність за рахунок використання даних у реальному часі.

Алгоритм інтегрованої обробки навігаційних даних і підтримки прийняття рішень базується на поетапному перетворенні первинної інформації у керуючі впливи або рекомендації для судноводія. Вхідними даними є синхронізовані потоки інформації від глобальних навігаційних супутникових систем, гідроакустичних засобів вимірювання та метеорологічних джерел. Виходом алгоритму є множина оптимальних навігаційних рішень, що відповідають заданим критеріям ефективності.

На першому етапі здійснюється збір та синхронізація даних, що надходять із різних джерел із різною частотою оновлення. Це дозволяє сформувати узгоджений у часі інформаційний масив, придатний для подальшої обробки. Далі виконується фільтрація шумів, усунення аномальних значень і приведення даних до єдиної координатної та метричної системи. Для цього використовуються методи оптимальної фільтрації, зокрема фільтр Калмана та його адаптивні модифікації.

На наступному етапі формується оцінка вектора стану судна, який включає координати, швидкість, курс та їх похідні. Отриманий вектор використовується як початковий стан для прогнозування траєкторії руху судна на основі математичної моделі, наведеної вище. Прогнозування здійснюється з урахуванням зовнішніх впливів і внутрішніх характеристик судна.

З метою підвищення точності прогнозу застосовується механізм корекції, що базується на асиміляції даних у реальному часі. На цьому етапі виконується порівняння прогнозованих параметрів із фактичними вимірюваннями, після чого формується коригуючий вплив, який враховує невизначеності середовища та похибки моделі.

Після уточнення траєкторії здійснюється оцінка ефективності можливих сценаріїв руху за сукупністю критеріїв, серед яких основними є витрати палива, тривалість переходу та рівень навігаційної безпеки. Це дозволяє перейти до фінального етапу – генерації оптимального навігаційного рішення, яке може бути представлене у вигляді рекомендацій щодо зміни курсу, швидкості або маршруту.

Формалізований вигляд алгоритму наведено нижче.

Algorithm 1: Integrated Navigation Data Processing and Decision Support

Input: GNSS data, hydroacoustic data, meteorological data

Output: Optimal navigation decision set

Steps:

1. Acquire and synchronize input data
2. Filter noise and inconsistencies
3. Estimate vessel state vector
4. Predict trajectory using dynamic model
5. Apply correction based on real-time data
6. Evaluate performance criteria (fuel, time, safety)
7. Generate optimal decision

Запропонований алгоритм забезпечує замкнений цикл обробки даних і прийняття рішень, що дозволяє підвищити точність прогнозування руху судна, знизити вплив невизначеностей морського середовища та покращити експлуатаційні показники контейнеровозів у трансокеанських перевезеннях. Важливою перевагою є можливість масштабування алгоритму та його інтеграції з сучасними системами підтримки прийняття рішень і інтелектуальними навігаційними платформами.

Обговорення результатів

Отримані результати свідчать про доцільність застосування інтегрованого алгоритмічного підходу до обробки навігаційних даних у задачах підвищення ефективності експлуатації контейнеровозів. Запропонована система, що поєднує математичне моделювання руху судна з механізмами асиміляції даних у реальному часі, демонструє покращення точності прогнозування траєкторії та стабільності навігаційних рішень у порівнянні з традиційними підходами.

Інтерпретація результатів показує, що ключовим фактором підвищення ефективності є саме синергія різнорідних джерел даних, яка дозволяє компенсувати обмеження окремих сенсорів. Зокрема, використання GNSS забезпечує високу точність позиціонування відносно ґрунту, тоді як гідроакустичні системи дозволяють уточнювати швидкість відносно води, а метеорологічні дані – коригувати вплив зовнішнього середовища. Їх інтеграція в межах єдиного алгоритмічного контуру забезпечує більш адекватну оцінку стану судна та умов його руху.

Разом з тим, результати дослідження необхідно розглядати з урахуванням низки обмежень, пов'язаних із характеристиками вихідних даних та умовами їх отримання.

По-перше, затримки та похибки GNSS-вимірювань можуть впливати на точність оцінки координат і швидкості судна. У реальних умовах можливі короточасні втрати сигналу, часові затримки, що призводить до розбіжностей між фактичним і оціненим положенням судна. Незважаючи на застосування фільтрації, ці ефекти можуть накопичуватися та впливати на якість прогнозу.

По-друге, шум і нестабільність даних гідроакустичних систем (зокрема лагів і ехолотів) обумовлені гідродинамічними явищами, турбулентністю потоку та станом морського середовища. Це може призводити до похибок у визначенні швидкості судна відносно води, що критично для коректного моделювання руху та оцінки впливу течій.

По-третє, нестабільність метеорологічних даних є суттєвим фактором невизначеності. Дані від метеобуїв або прогнозних моделей можуть мати обмежену просторово-часову роздільну здатність, що ускладнює точне врахування локальних змін вітру та хвильових умов. У випадку швидкої зміни погодних умов це може призводити до зниження ефективності алгоритмів оптимізації маршруту.

Таким чином, хоча запропонована система демонструє покращення експлуатаційних показників, її ефективність значною мірою залежить від якості вхідних даних та надійності сенсорної інфраструктури. Це вказує на необхідність подальших досліджень у напрямі підвищення стійкості алгоритмів до невизначеностей, зокрема шляхом використання більш розвинених методів адаптивної фільтрації, машинного навчання та прогнозування параметрів морського середовища.

У перспективі доцільним є також розширення системи за рахунок додаткових джерел даних (наприклад, супутникового дистанційного зондування або флотських мереж обміну даними), що дозволить підвищити повноту та достовірність інформаційного забезпечення навігаційних рішень.

Висновки.

Розроблено алгоритмічне забезпечення інтегрованої навігаційно-інформаційної системи контейнеровозів, яке базується на поєднанні математичної моделі руху судна та механізмів асиміляції великих обсягів даних у реальному часі. Запропонований підхід забезпечує формування цілісного інформаційного середовища для підтримки навігаційних рішень.

Встановлено, що інтеграція даних GNSS, гідроакустичних та метеорологічних систем із використанням адаптивної фільтрації дозволяє суттєво підвищити точність оцінки параметрів руху судна та прогнозування його траєкторії порівняно з традиційними підходами.

Доведено, що застосування алгоритмів прогнозування та оптимізації маршруту на основі уточнених моделей руху сприяє зниженню експлуатаційних витрат, зокрема витрат палива та часу переходу, за рахунок більш раціонального вибору режимів руху та траєкторії.

Показано, що запропонована архітектура системи та алгоритмічні рішення є універсальними та можуть бути адаптовані для використання на контейнеровозах ULCV, враховуючи їх інерційні характеристики та специфіку експлуатації у трансокеанських перевезеннях.

Отримані результати підтверджують перспективність застосування інтегрованих навігаційно-інформаційних систем із елементами інтелектуальної обробки даних як інструменту підвищення ефективності експлуатації морського транспорту, що створює передумови для подальшого розвитку цифрових та автономних технологій у судноплаванні.

ЛІТЕРАТУРА

1. Zeinurrohman, R., Trimulyono, A., Wicaksono, A., Hadi, E. S., Samuel, S., Hakim, M. L., & Purwanto, D. B. (2024). Analysis of empirical method for predicting maneuverability of ultra-large container ship using Maneuvering Modelling Group (MMG) model. *SINERGI*, 28(2), 369. <https://doi.org/10.22441/sinergi.2024.2.016>
2. Okuda, R., Yasukawa, H., & Matsuda, A. (2023). Validation of maneuvering simulations for a KCS at different forward speeds using the 4-DOF MMG method. *Ocean Engineering*, 284, 115174. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.115174>
3. Lesnevskiy, V. M., & Kalinichenko, Y. V. (2025). Analysis of current approaches to identifying the dynamic characteristics of ship maneuvering. *Reporter of the Priazovskyi State Technical University. Section: Technical Sciences*, 52, 197–204. <https://doi.org/10.31498/2225-6733.52.2025.351125>
4. Atasayan, E., Milanov, E., & Alkan, A. D. (2024). A Study Evaluating the Performance of Nonlinear Nomoto Models in Predicting the Manoeuvring of Car Carrier. *2024 8th International Artificial Intelligence and Data Processing Symposium (IDAP)*, 1–4. <https://doi.org/10.1109/IDAP64064.2024.10710751>
5. Taniguchi, T., & Maki, A. (2025). A proposal of the maneuvering motion model for low-speed operations in harbor. *Ocean Engineering*, 330, 121172. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2025.121172>
6. Tiano, A., Zirilli, A., Cuneo, M., & Pagnan, S. (2005). Multisensor Data Fusion Applied to Marine Integrated Navigation Systems. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment*, 219(3), 121–130. <https://doi.org/10.1243/147509005X10512>
7. Liu, W., Liu, Y., & Bucknall, R. (2023). Filtering based multi-sensor data fusion algorithm for a reliable unmanned surface vehicle navigation. *Journal of Marine Engineering & Technology*, 22(2), 67–83. <https://doi.org/10.1080/20464177.2022.2031558>
8. Zhuang, Y., Sun, X., Li, Y., Huai, J., Hua, L., Yang, X., Cao, X., Zhang, P., Cao, Y., Qi, L., Yang, J., El-Bendary, N., El-Sheimy, N., Thompson, J., & Chen, R. (2023). Multi-sensor integrated navigation/positioning systems using data fusion: From analytics-based to learning-based approaches. *Information Fusion*, 95, 62–90. <https://doi.org/10.1016/j.inffus.2023.01.025>
9. Zhang, Y. (2024). Application of multi-sensor fusion technology. *Highlights in Science, Engineering and Technology*, 119, 752–757. <https://doi.org/10.54097/bb6dztv74>
10. Iqbal, U., Abosekeen, A., Elsheikh, M., Noureldin, A., & Korenberg, M. J. (2022). A Review of Sensor System Schemes for Integrated Navigation. *2022 5th International Conference on Communications, Signal Processing, and Their Applications (ICCSPA)*, 1–5. <https://doi.org/10.1109/ICCSPA55860.2022.10019177>
11. Hermawan, Y. A., Adinda Rahmi, L. P., Widjaja, R. S., & Yulianto, T. (2025). Weather-Based Ship Route Planning by Considering Added Resistance for Improving Fuel Efficiency. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1461(1), 012028. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1461/1/012028>

12. Cheng, C.-W., Tzeng, Y.-A., Chang, M.-H., Liu, S.-C., Cheung, H.-K., & Hsin, C.-Y. (2024). Application of Computational Fluid Dynamics and Semi-Empirical Speed Loss Prediction for Weather Routing. *Journal of Marine Science and Engineering*, 13(1), 42. <https://doi.org/10.3390/jmse13010042>
13. Kobayashi, E., Hashimoto, H., Taniguchi, Y., & Yoneda, S. (2015). Advanced optimized weather routing for an ocean-going vessel. *2015 International Association of Institutes of Navigation World Congress (IAIN)*, 1–8. <https://doi.org/10.1109/IAIN.2015.7352247>
14. Putri Adinda Rahmi, L., & Hermawan, Y. A. (2025). Mitigating Schedule Delays in Maritime Operations Through Weather-Based Routing Strategies. *BIO Web of Conferences*, 157, 11001. <https://doi.org/10.1051/bioconf/202515711001>
15. Pennino, S., Gaglione, S., Innac, A., Piscopo, V., & Scamardella, A. (2020). Development of a New Ship Adaptive Weather Routing Model Based on Seakeeping Analysis and Optimization. *Journal of Marine Science and Engineering*, 8(4), 270. <https://doi.org/10.3390/jmse8040270>
16. Jiang, Y., Chang, Y., Zhang, B., Ge, Y., & Zhao, X. (2026). A review of vessel trajectory prediction research: Methodological evolution, current challenges, and future directions. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 18, 100754. <https://doi.org/10.1016/j.ijnaoe.2026.100754>
17. Liu, R. W., Liang, M., Nie, J., Deng, X., Xiong, Z., Kang, J., Yang, H., & Zhang, Y. (2021). Intelligent Data-Driven Vessel Trajectory Prediction in Marine Transportation Cyber-Physical System. *2021 IEEE International Conferences on Internet of Things (iThings) and IEEE Green Computing & Communications (GreenCom) and IEEE Cyber, Physical & Social Computing (CPSCom) and IEEE Smart Data (SmartData) and IEEE Congress on Cybermatics (Cybermatics)*, 314-321. <https://doi.org/10.1109/iThings-GreenCom-CPSCom-SmartData-Cybermatics53846.2021.00058>
18. Murray, B., & Perera, L. P. (2020). A dual linear autoencoder approach for vessel trajectory prediction using historical AIS data. *Ocean Engineering*, 209, 107478. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.107478>
19. Zhu, M., Han, P., Wang, C., Skulstad, R., Zhang, H., & Li, G. (2025). An AIS Data-Driven Hybrid Approach to Ship Trajectory Prediction. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 55(1), 96–109. <https://doi.org/10.1109/TSMC.2024.3458469>
20. Zhang, X., Fu, X., Xiao, Z., Xu, H., & Qin, Z. (2022). Vessel Trajectory Prediction in Maritime Transportation: Current Approaches and Beyond. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 23(11), 19980–19998. <https://doi.org/10.1109/TITS.2022.3192574>

REFERENCES

1. Zeinurrohman, R., Trimulyono, A., Wicaksono, A., Hadi, E. S., Samuel, S., Hakim, M. L., & Purwanto, D. B. (2024). Analysis of empirical method for predicting maneuverability of ultra-large container ship using Maneuvering Modelling Group (MMG) model. *SINERGI*, 28(2), 369. <https://doi.org/10.22441/sinergi.2024.2.016>
2. Okuda, R., Yasukawa, H., & Matsuda, A. (2023). Validation of maneuvering simulations for a KCS at different forward speeds using the 4-DOF MMG method. *Ocean Engineering*, 284, 115174. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.115174>
3. Lesnevskiy, V. M., & Kalinichenko, Y. V. (2025). Analysis of current approaches to identifying the dynamic characteristics of ship maneuvering. Reporter of the Priazovskyi State Technical University. Section: Technical Sciences, 52, 197–204. <https://doi.org/10.31498/2225-6733.52.2025.351125>
4. Atasayan, E., Milanov, E., & Alkan, A. D. (2024). A Study Evaluating the Performance of Nonlinear Nomoto Models in Predicting the Manoeuvring of Car Carrier. *2024 8th International Artificial Intelligence and Data Processing Symposium (IDAP)*, 1–4. <https://doi.org/10.1109/IDAP64064.2024.10710751>
5. Taniguchi, T., & Maki, A. (2025). A proposal of the maneuvering motion model for low-speed operations in harbor. *Ocean Engineering*, 330, 121172. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2025.121172>
6. Tiano, A., Zirilli, A., Cuneo, M., & Pagnan, S. (2005). Multisensor Data Fusion Applied to Marine Integrated Navigation Systems. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment*, 219(3), 121–130. <https://doi.org/10.1243/147509005X10512>
7. Liu, W., Liu, Y., & Bucknall, R. (2023). Filtering based multi-sensor data fusion algorithm for a reliable unmanned surface vehicle navigation. *Journal of Marine Engineering & Technology*, 22(2), 67–83. <https://doi.org/10.1080/20464177.2022.2031558>
8. Zhuang, Y., Sun, X., Li, Y., Huai, J., Hua, L., Yang, X., Cao, X., Zhang, P., Cao, Y., Qi, L., Yang, J., El-Bendary, N., El-Sheimy, N., Thompson, J., & Chen, R. (2023). Multi-sensor integrated navigation/positioning systems using data fusion: From analytics-based to learning-based approaches. *Information Fusion*, 95, 62–90. <https://doi.org/10.1016/j.inffus.2023.01.025>

9. Zhang, Y. (2024). Application of multi-sensor fusion technology. *Highlights in Science, Engineering and Technology*, 119, 752–757. <https://doi.org/10.54097/bb6dzv74>
10. Iqbal, U., Abosekeen, A., Elsheikh, M., Noureldin, A., & Korenberg, M. J. (2022). A Review of Sensor System Schemes for Integrated Navigation. 2022 5th International Conference on Communications, Signal Processing, and Their Applications (ICCSIPA), 1–5. <https://doi.org/10.1109/ICCSIPA55860.2022.10019177>
11. Hermawan, Y. A., Adinda Rahmi, L. P., Widjaja, R. S., & Yulianto, T. (2025). Weather-Based Ship Route Planning by Considering Added Resistance for Improving Fuel Efficiency. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1461(1), 012028. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1461/1/012028>
12. Cheng, C.-W., Tzeng, Y.-A., Chang, M.-H., Liu, S.-C., Cheung, H.-K., & Hsin, C.-Y. (2024). Application of Computational Fluid Dynamics and Semi-Empirical Speed Loss Prediction for Weather Routing. *Journal of Marine Science and Engineering*, 13(1), 42. <https://doi.org/10.3390/jmse13010042>
13. Kobayashi, E., Hashimoto, H., Taniguchi, Y., & Yoneda, S. (2015). Advanced optimized weather routing for an ocean-going vessel. 2015 International Association of Institutes of Navigation World Congress (IAIN), 1–8. <https://doi.org/10.1109/IAIN.2015.7352247>
14. Putri Adinda Rahmi, L., & Hermawan, Y. A. (2025). Mitigating Schedule Delays in Maritime Operations Through Weather-Based Routing Strategies. *BIO Web of Conferences*, 157, 11001. <https://doi.org/10.1051/bioconf/202515711001>
15. Pennino, S., Gaglione, S., Innac, A., Piscopo, V., & Scamardella, A. (2020). Development of a New Ship Adaptive Weather Routing Model Based on Seakeeping Analysis and Optimization. *Journal of Marine Science and Engineering*, 8(4), 270. <https://doi.org/10.3390/jmse8040270>
16. Jiang, Y., Chang, Y., Zhang, B., Ge, Y., & Zhao, X. (2026). A review of vessel trajectory prediction research: Methodological evolution, current challenges, and future directions. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 18, 100754. <https://doi.org/10.1016/j.ijnaoe.2026.100754>
17. Liu, R. W., Liang, M., Nie, J., Deng, X., Xiong, Z., Kang, J., Yang, H., & Zhang, Y. (2021). Intelligent Data-Driven Vessel Trajectory Prediction in Marine Transportation Cyber-Physical System. 2021 IEEE International Conferences on Internet of Things (iThings) and IEEE Green Computing & Communications (GreenCom) and IEEE Cyber, Physical & Social Computing (CPSCom) and IEEE Smart Data (SmartData) and IEEE Congress on Cybermatics (Cybermatics), 314–321. <https://doi.org/10.1109/iThings-GreenCom-CPSCom-SmartData-Cybermatics53846.2021.00058>
18. Murray, B., & Perera, L. P. (2020). A dual linear autoencoder approach for vessel trajectory prediction using historical AIS data. *Ocean Engineering*, 209, 107478. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.107478>
19. Zhu, M., Han, P., Wang, C., Skulstad, R., Zhang, H., & Li, G. (2025). An AIS Data-Driven Hybrid Approach to Ship Trajectory Prediction. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 55(1), 96–109. <https://doi.org/10.1109/TSMC.2024.3458469>
20. Zhang, X., Fu, X., Xiao, Z., Xu, H., & Qin, Z. (2022). Vessel Trajectory Prediction in Maritime Transportation: Current Approaches and Beyond. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 23(11), 19980–19998. <https://doi.org/10.1109/TITS.2022.3192574>

Holovan A.I., Moniushko M.M.

ALGORITHMIC SUPPORT FOR INTEGRATED NAVIGATION AND INFORMATION SYSTEMS ON CONTAINER SHIPS TO IMPROVE OPERATIONAL EFFICIENCY

The growth in transoceanic shipping volumes and the introduction of large- and ultra-large-capacity container ships ULCVs have led to increased demands for navigational accuracy, energy efficiency, and sound management decisions in the face of the uncertainties of the maritime environment. Traditional approaches to navigation, based on the use of isolated data sources and deterministic models, do not provide an adequate level of adaptability to changing external influences and limit the possibilities for optimizing ship operational parameters. The aim of this work is to develop algorithmic support for integrated navigation and information systems for container ships based on big data processing, mathematical modeling of ship motion, and methods of intelligent information processing. The study proposes an approach that combines data from global navigation satellite systems GNSS, hydroacoustic measurement devices, and meteorological observations using adaptive filtering methods, in particular Kalman filters, to form a consistent ship state vector. A mathematical model of ship motion based on the 3DOF approach has been refined to account for the effects of waves, wind, and currents, supplemented by correction terms generated through real-time data assimilation. An algorithm for integrated processing of navigation data and decision support is proposed, which enables ship trajectory

prediction and route optimization based on multi-criteria indicators such as fuel consumption, voyage duration, and navigation safety. The results obtained demonstrate an increase in the accuracy of motion parameter estimation and trajectory prediction, as well as a reduction in operating costs due to a more rational selection of motion modes. It is shown that the proposed approach is universal and can be applied to container ships of various classes, in particular ULCVs, considering their inertial characteristics. The practical value of this work lies in the possibility of integrating the developed algorithmic software into modern navigation systems and digital maritime transport management platforms, which creates prerequisites for the further development of intelligent and autonomous navigation technologies.

Keywords: *operational efficiency; container ships; ULCV; navigation and information systems; GNSS; hydroacoustic systems; meteorological data; mathematical modeling of ship motion; decision support algorithms; artificial intelligence.*

Стаття прийнята 10.03.2026

© Васалатій Н.В., Монюшко М.М.

ОСОБЛИВОСТІ ГІДРОЛОГІЧНОГО РЕЖИМУ ТЕЧІЇ КУРОСІО В ПЕРІОД ФОРМУВАННЯ ТА РОЗВИТКУ ВЕЛИКОГО МЕАНДРУ LM2017

Проведені дослідження просторово-часової мінливості течії Куросіо на основі супутникових даних рівня моря (SSH) та геострофічних швидкостей, а також даних натурних експедиційних досліджень (температури та солоності морської води) Національного управління океанічних і атмосферних досліджень (NOAA). На різних розрізах в районі течії Куросіо розраховані та побудовані карти просторового розподілу геострофічних швидкостей течій та розраховані витрати води. Виявлено двоядерну структуру течії, яка може бути зумовлена меандруванням основного потоку та впливом підводного рельєфу. Показано, що течія Куросіо характеризується стійким існуванням меандрів, географічне положення яких зберігається в часі, тоді як їх конфігурація є змінною. Отримані результати узгоджуються з супутниковими даними та можуть бути використані для подальших досліджень океанічної циркуляції та прикладних задач, зокрема в галузі морської навігації.

Ключові слова. Течія Куросіо, акваторія, геострофічні швидкості течій, меандри, вихори.

Вступ. Течія Куросіо є однією з найпотужніших західних прикордонних течій Світового океану та відіграє ключову роль у формуванні гідродинамічних умов на значній акваторії північно-західної частини Тихого океану. Її висока швидкість, просторово-часова мінливість, а також здатність до формування складних меандрів і вихрових структур безпосередньо впливають на безпеку судноплавства та ефективність морських перевезень. У районах, де швидкість Куросіо у поверхневому шарі може перевищувати 100 см/с, а в ядрі течії сягати до 200 см/с, судна зазнають суттєвих поперечних і поздовжніх гідродинамічних впливів, що позначається на їх керованості, курсостійкості та навігаційних характеристиках. З огляду на інтенсивність торговельних та енергетичних транспортних потоків у Тихому океані, а також стратегічне значення регіону Японського архіпелагу, дослідження впливу течії Куросіо на планування морських маршрутів є критично важливим. Неврахування або неточна оцінка гідродинамічних умов може призводити до значних відхилень від заданого курсу, збільшення витрат палива, небезпечного зближення з береговою лінією та підвищення ризику аварійних ситуацій. Крім того, великі меандри та вихрові структури, характерні для Куросіо, суттєво ускладнюють прогнозування умов плавання та потребують використання високоточної океанографічної інформації. Таким чином, систематичне дослідження динаміки течії Куросіо, її поперечних компонент, просторової структури та короточасної мінливості є необхідною передумовою для формування безпечних і оптимальних маршрутів морських суден, зниження навігаційних ризиків та підвищення ефективності морських перевезень у Тихому океані.

Аналіз останніх досліджень. Останні дослідження течії Куросіо зосереджені на її багатомасштабній мінливості, ролі великих меандрів та вплив на взаємодію океану та атмосфери північно-західної частини Тихого океану. Особливу увагу в сучасній літературі приділено довготривалому епізоду великого меандру, що розпочався у 2017 році (LM2017), який суттєво змінив уявлення про динаміку цієї західної прикордонної течії.

У комплексному огляді Н. Hirata et al. (2025) показано [2,3,4], що великий меандр Куросіо є стійким режимом циркуляції, який призводить до значної перебудови просторового розподілу

швидкостей, температури та структури водних мас як у поверхневому, так і в підповерхневому шарі океану. Автори підкреслюють [2,3,4], що LM2017 є найдовшим зареєстрованим епізодом такого типу, що дозволило виявити нові механізми взаємодії між океаном і атмосферою, а також впливу на екосистеми та рибні ресурси.

Дослідження, присвячені мезомасштабній мінливості, демонструють, що головними факторами змінності Куросіо є взаємодія сезонних процесів і вихрової активності [1]. Зокрема, радіолокаційні спостереження показують, що підхід антициклонічних і циклонічних вихорів істотно змінює швидкість течії та положення її осі, що призводить до чергування прямолінійних і нестабільних фаз потоку. Це підтверджує ключову роль вихрової динаміки у формуванні просторово-часової структури Куросіо.

Окремий напрям сучасних досліджень стосується взаємодії великих меандрів з атмосферними процесами. Показано, що під час фази великого меандру змінюється інтенсивність турбулентних теплових потоків між океаном і атмосферою, що впливає на регіональні кліматичні умови в районі Японського архіпелагу та прилеглих акваторій. Крім того, довготривала стабільність LM2017 дозволила встановити його вплив на формування субтропічних водних мас і зміну циркуляції у системі Kuroshio–Kuroshio Extension (K–KE) system. У сучасних роботах також широко застосовуються лагранжеві методи аналізу та супутникові дані висотної альтиметрії, які дозволяють відстежувати транспортні шляхи водних мас і структуру динамічних бар'єрів у потоці. Ці підходи показують, що Куросіо не є стаціонарним струменем, а формує складну систему взаємопов'язаних течій, меандрів і вихрових структур, що визначають його загальну поведінку як нелінійної динамічної системи.

Таким чином, сучасні дослідження узгоджуються в тому, що течія Куросіо є високодинамічною західною прикордонною течією з вираженою мезомасштабною та субмезомасштабною мінливістю. Ключовими факторами її мінливості виступають великі меандри, вихрова активність та взаємодія океану з атмосферою. Водночас відкритими залишаються питання точного прогнозування тривалості меандрів, їх впливу на навігаційні умови та кількісної оцінки поперечних компонент швидкості для задач морської навігації.

Мета роботи. Дослідити особливості гідрологічного режиму течії Куросіо в період формування та розвитку великого меандру 2017 року (LM2017), зокрема зміни структури течії, швидкісного поля та просторово-часової мінливості гідрологічних характеристик.

Основна частина. У якості вихідних матеріалів у даній роботі використано дані Національного управління океанічних і атмосферних досліджень (NOAA) [6]. Основу інформаційної бази становлять результати натурних експедиційних спостережень розподілу температури та солоності морської води на різних розрізах в акваторії течії Куросіо.

Сучасні дослідження глобальних і регіональних процесів у Світовому океані значною мірою орієнтовані на поєднання та калібрування супутникових даних із результатами судових вимірювань, що дозволяє підвищити точність оцінок океанографічних параметрів. У зв'язку з цим для аналізу просторово-часових характеристик меандрування течії Куросіо були використані щоденні сіткові дані рівня моря над геоїдом (SSH), аномалій рівня моря (SLA) та поверхневої геострофічної швидкості з просторовою роздільною здатністю $0,25^\circ$ з CMEMS (<https://data.marine.copernicus.eu/>; Global Ocean Gridded L 4 Sea Surface Heights And Derived Variables Nrt. E.U. Copernicus Marine Service Information (CMEMS); Copernicus Marine Service)) [5].

Куросіо (як і Гольфстрім) є яскравим прикладом інтенсифікації течій, що проходять уздовж західних берегів океану в низьких широтах. Доказом постійного існування меандрів може вважатися той факт, що вони зберігаються не лише під час побудови карт динамічної топографії за матеріалами окремих зйомок, але й при осередненні океанографічних характеристик за багаторічний період. Слід зазначити, що постійним є лише географічне положення цих меандрів, тоді як їх конфігурація безперервно змінюється.

Нижче представлені карти горизонтального розподілу висоти морської поверхні (SSH) та векторів поверхневої геострофічної океанічної течії зі швидкістю понад 0,3 м/с (стрілки) з квітня 2017 по квітень 2023 року, отримані на основі супутникових спостережень (рис.1) [2].

Подія великого меандру Куросіо (LM2017) розпочалася у серпні 2017 року і тривала до березня 2025 р.

Формування LM2017 почалося з невеликого меандру, що виник на південний схід від о. Кюсю, який потім змістився на схід, пройшовши через полуострів Кіі, і сформував великий меандр. Це відповідає механізму формування інших великих меандрів, проте LM2017 має низку унікальних особливостей.

Формування LM зазвичай пов'язане з трьома факторами: позитивними аномаліями висоти морської поверхні на схід від Тайваню, західним поширенням негативних аномалій у районі Куросіо та стабільним станом Куросіо над хребтом Ідзу. Для LM2017 перші два фактори були виконані, проте Куросіо в момент формування LM2017 перебував у нестабільному стані, що робить його винятком серед попередніх подій.

Однією з унікальних характеристик LM2017 є його тривалість. Починаючи з 1950 року було зафіксовано вісім великих меандрів, і саме LM2017 виявився найдовготривалішим серед них. Таке тривале існування меандру пояснюється низьким рівнем транспортування Куросіо та стабільністю системи течії на схід від хребта Ідзу після 2018 року. Це, в свою чергу, зменшило вплив західних збурень і сприяло стабілізації положення Куросіо (рис. 1).

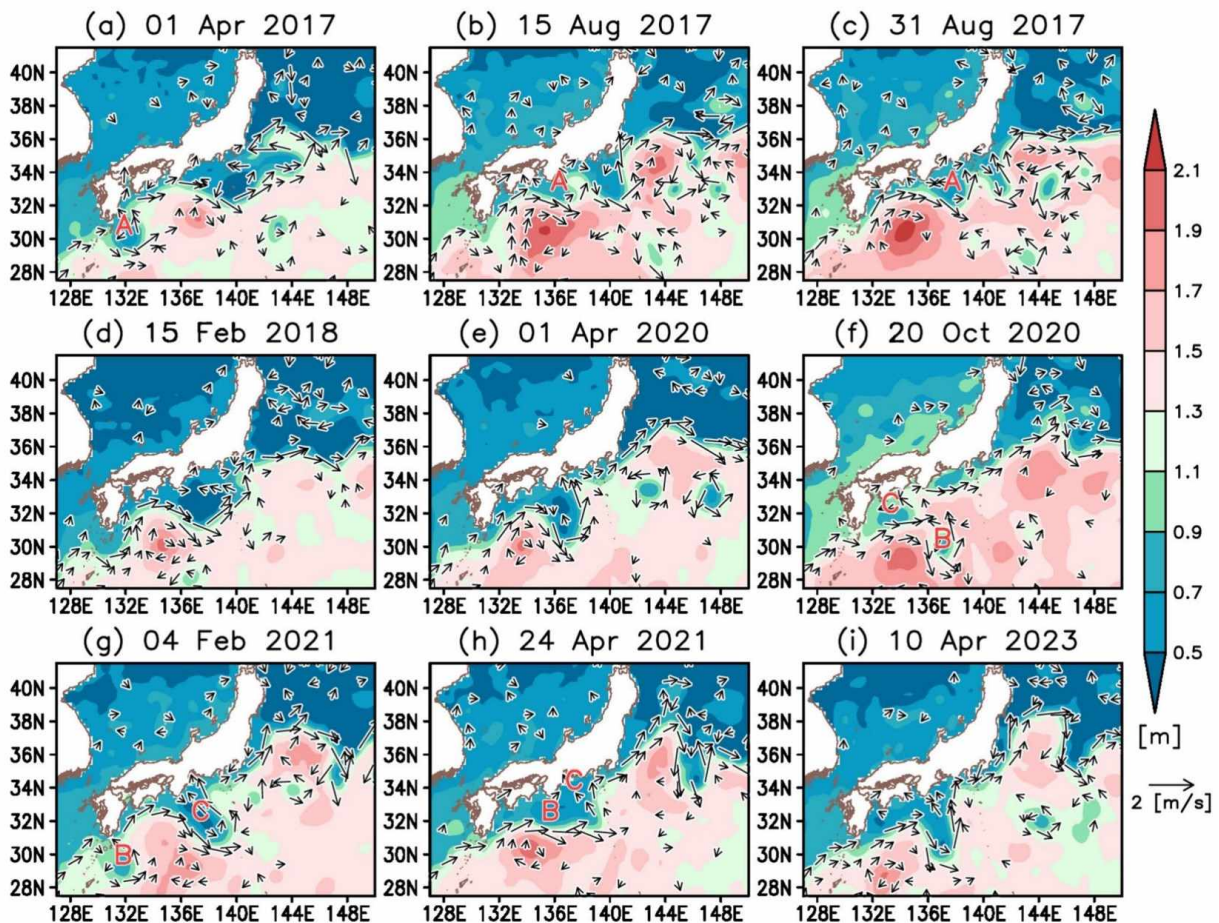


Рисунок 1 – Горизонтальний розподіл SSH та векторів поверхневої геострофічної течії за період квітень 2017-квітень 2023 Global Ocean Gridded L4 provided by the CMEMS) [2]

Також унікальні варіації шляху та структури течії. Слід зазначити, що відносно сталим залишається географічне положення меандру, тоді як його конфігурація безперервно змінюється.

Взагалі, меандри або хвилі, що утворюються потоком Куросіо, мають амплітуду близько 100-150 км при довжині їх близько 300-500 км. Окремі хвилі мають дуже крутий вигин і відокремлюються від основного потоку у вигляді вихорів. Як і в Гольфстрімі, ліворуч від потоку утворюють антициклонічні вихори, а справа - циклонічні. Окрім утворення великих меандрів у прикордонних шарах Куросіо (тобто праворуч і ліворуч від потоку) постійно формуються вихори різних розмірів (рис.1). Ці прикордонні вихори мають антициклонічний напрям обертання на правій межі Куросіо та циклонічний — на лівій. Особливістю цих вихорів є те, що на правій (океанічній) межі Куросіо вони є більш масштабними за розмірами та поширюються вглиб до 500 м. Вихори на лівій (прибережній) межі є меншими, а глибина їх поширення не перевищує 100 м.

Від'єднання циклональних вихорів також є унікальним явищем для LM2017. Вихори відокремлювалися від S-образного шляху течії і потім знову поглиналися Куросіо, що призводило до тимчасової редукції амплітуди меандру та його подальшого швидкого відновлення. Аналогічні процеси раніше спостерігалися лише наприкінці 1970-х років. Таким чином, LM2017 характеризується значною тривалістю, нестабільним раннім шляхом течії, S-подібною кривизною на пізніх етапах, а також унікальними процесами від'єднання та повторного приєднання вихорів, що відрізняє його від попередніх великих меандрів Куросіо.

З метою аналізу просторової структури та мінливості течії Куросіо виконані розрахунки швидкостей течії на основі даних натурних експедиційних досліджень температури та солоності морської води. Обробку та візуалізацію даних здійснено за допомогою програмного пакету OCEAN DATA VIEW на різних гідрологічних розрізах (рис. 2 – 4).

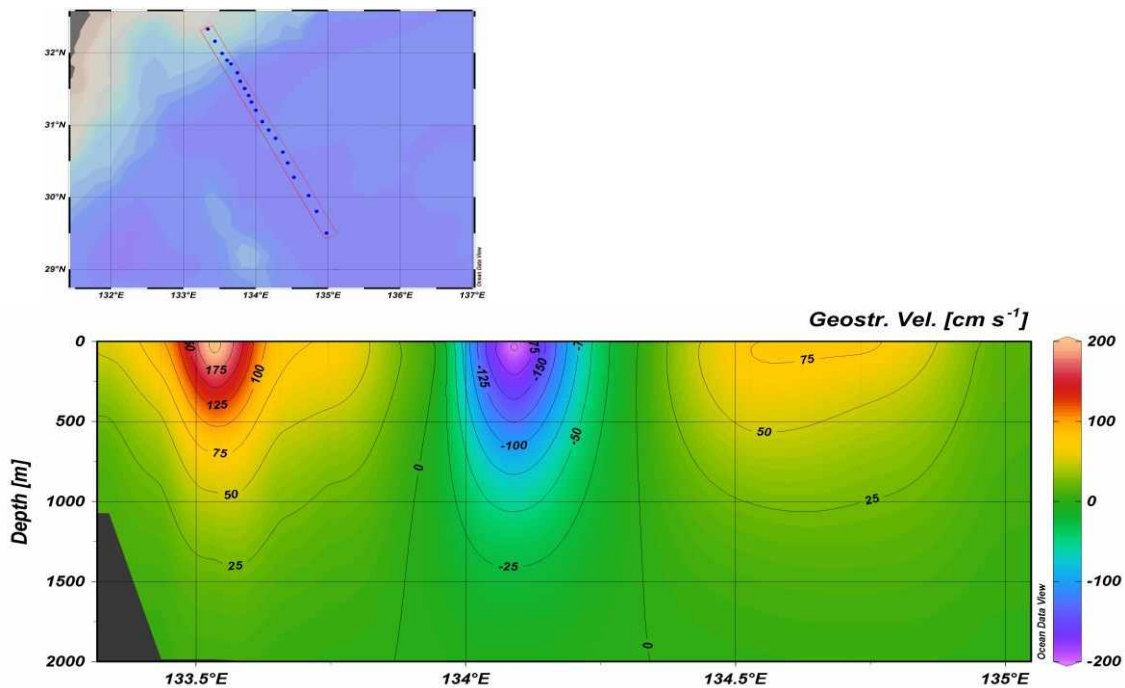


Рисунок 2 – Карта просторового розподілу геострофічних швидкостей течій на розрізі (29,6-32,5°пн.ш.;133,3-135°сх.д., серпень 2017р.)

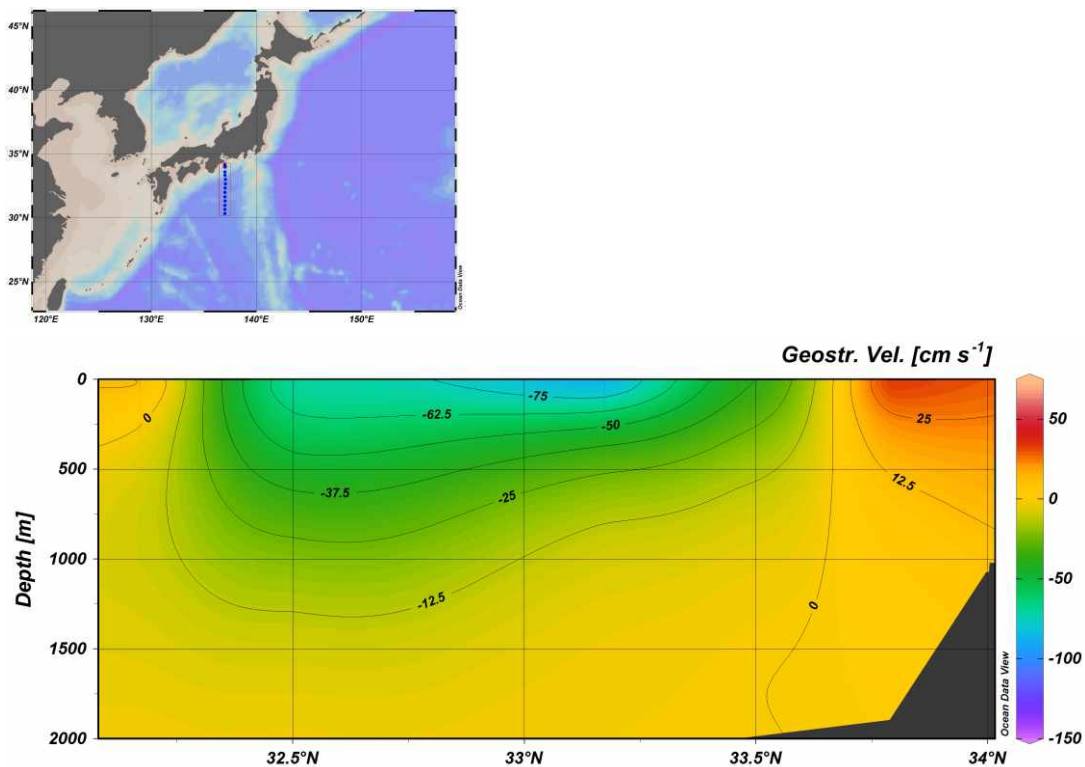


Рисунок 3 – Карта просторового розподілу геострофічних швидкостей течій на розрізі по 137°сх.д. (жовтень 2022р.)

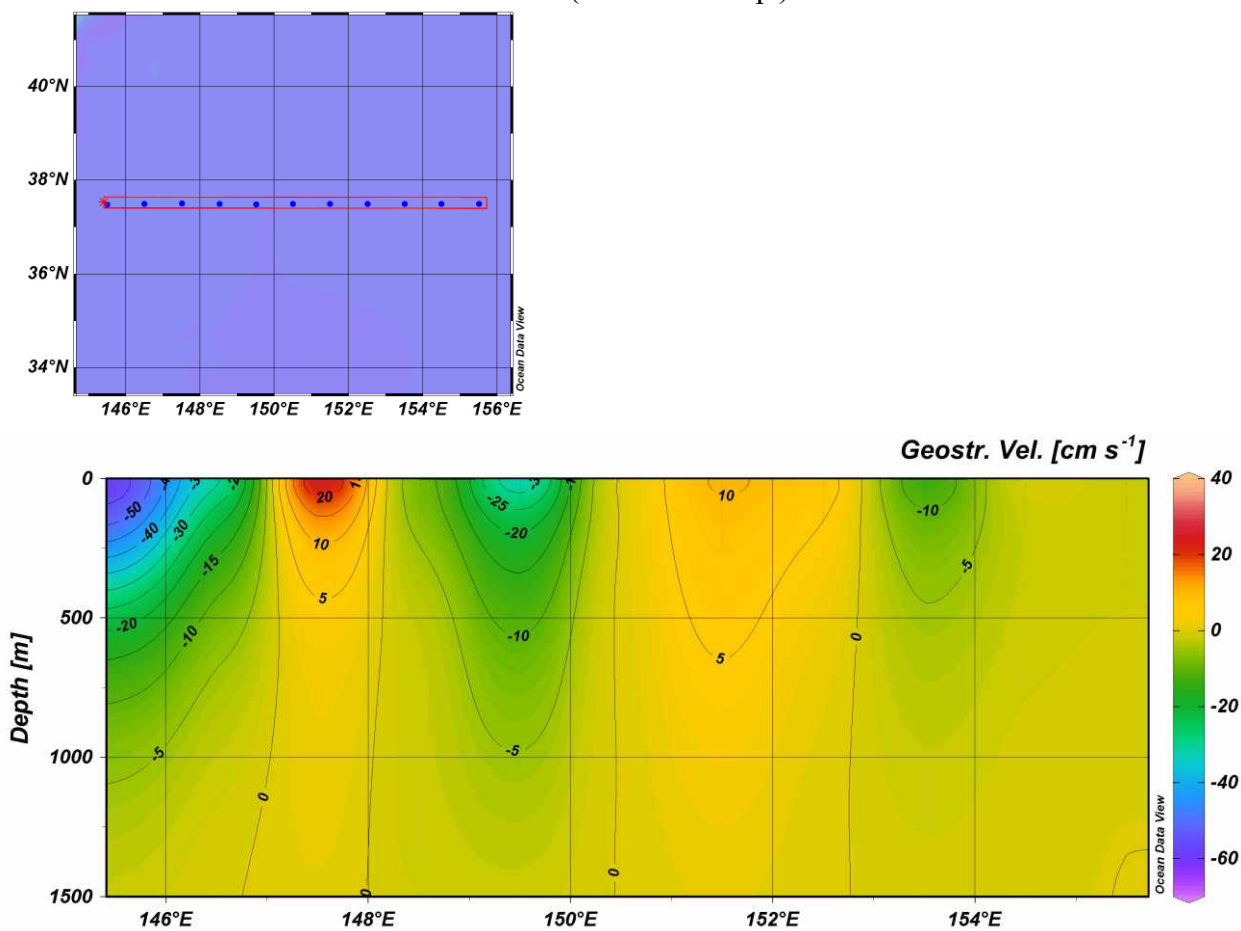


Рисунок 4 – Карта просторового розподілу геострофічних швидкостей течій на розрізі по 37,5°пн.ш.

На основі побудованих карт просторового розподілу геострофічних швидкостей течій (рис. 2-4), встановлено, що максимальні значення швидкостей (до 200 см/с) спостерігаються в південній частині досліджуваного району (рис. 2). Це може бути пов'язано з тим, що в даній області проходить основна струя течії Куросіо на вході в район акваторії на широті Японських островів. На цій ділянці течія ще не повністю стабілізована і може зміщуватися як на південь, так і на північ. Крім того, тут часто спостерігаються ярко виражені градієнти та фронтальні зони, у яких геострофічні швидкості досягають максимальних значень. Крім того, у досліджуваному районі виявлено двоядерну структуру течії, яка характеризується наявністю двох яскраво виражених максимумів геострофічних швидкостей (рис.2). Подібна особливість може бути пов'язана з меандруванням основної струмені течії Куросіо, а також із впливом підводного рельєфу, який може сприяти деформації та розщепленню струмені течії. Розрахунки швидкостей течій, виконані з використанням ODV, добре узгоджуються з даними про горизонтальний розподіл SSH та векторами поверхневої геострофічної течії за період серпень 2017 р (рис.1, 2).

З динамікою Куросіо пов'язані специфічні особливості розподілу океанографічних характеристик: великі горизонтальні градієнти, нахил ізотерм і ізогалін на розрізах поперек течії (рис.5), наявність ізольованих областей холодної води праворуч і теплої води ліворуч від струменя течії, що відповідають відокремленим меандрам.

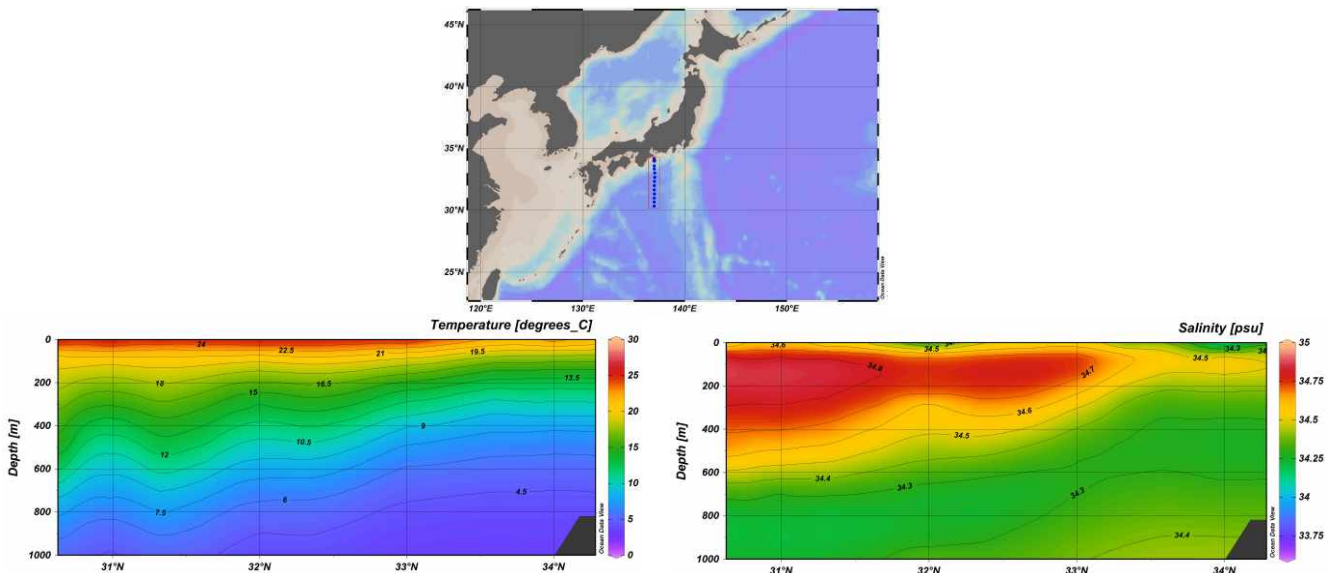


Рисунок 5 - Карта просторового розподілу температури та солоності морської води на розрізі по 137°сх.д (жовтень 2022р.)

Східніше 140° сх.д. Куросіо відходить від берегів Японії. Його струмінь розширюється, а швидкості поступово зменшуються і становлять 10–50 см/с (рис. 4). Між 148 і 154° сх.д. від Куросіо відокремлюється гілка, яка повертає на південь, а потім на південний захід і, отже, має напрямок, протилежний основному потоку Куросіо. Ця гілка має назву протитечії Куросіо. Напрямок протитечії та її положення відносно основного струменя приблизно аналогічні напрямку і положенню південної гілки Гольфстриму відносно основного струменя Гольфстриму в Атлантичному океані. Згідно з оцінкою, виконаною на основі динамічного методу, витрата води протитечії Куросіо в шарі 1500 м становить $25 \cdot 10^6$ м³/с, тобто приблизно одну третину витрати Куросіо, оскільки витрата води на розрізі 29,6–32,5° пн. ш.; 133,3–135° сх. д. становила $70 \cdot 10^6$ м³/с (рис. 2).

Висновки

1. Показано, що Куросіо є типовим прикладом західної інтенсифікації течій. Аналіз багаторічних даних свідчить про стійке існування меандрів: їх географічне положення залишається відносно

постійним, тоді як форма та конфігурація зазнають безперервних змін. На основі карт SSH та полів геострофічних швидкостей за період 2017–2023 рр. встановлено особливості розвитку події великого меандру Куросіо (LM2017), яка тривала з серпня 2017 р. та простежувалась до 2023 року в межах даного дослідження, тоді як за літературними даними тривалість LM2017 охоплює період до березня 2025 р. Виявлено, що формування LM2017 відбувалося за класичним сценарієм (зародження меандру поблизу о. Кюсю та його подальше зміщення на схід), однак мало і суттєві відмінності. Зокрема, LM2017 сформувався за умов нестабільного стану течії над хребтом Ідзу, що відрізняє його від попередніх випадків, де важливу роль відігравала стабільність потоку. При цьому ключові чинники — позитивні аномалії рівня моря на схід від Тайваню та західне поширення негативних аномалій у районі Куросіо — зберігалися. Показано, що LM2017 є найдовшою подією великого меандру з середини ХХ століття. Його тривале існування пов'язане зі зниженим транспортом течії Куросіо та підвищеною стабільністю циркуляції на схід від хребта Ідзу після 2018 року, що обмежило вплив збурень і сприяло фіксації положення меандру.

2. На основі даних натурних експедиційних досліджень температури та солоності морської води, за допомогою програми ODV, розраховано геострофічні швидкості течії Куросіо та проаналізовано її просторову структуру. Встановлено, що максимальні швидкості течії (до 200 см/с) спостерігаються в південній частині досліджуваного району, що пов'язано з проходженням основного струменя Куросіо на вході до акваторії на широті Японських островів. Для цієї області характерні значні горизонтальні градієнти температури та солоності морської води і наявність фронтальних зон, що зумовлює підвищені значення геострофічних швидкостей течії. Виявлено двоядерну структуру течії, яка проявляється у вигляді двох максимумів швидкості. Це може бути наслідком меандрування основного струменя, а також впливу підводного рельєфу, що сприяє деформації та розщепленню потоку. Показано, що результати розрахунків добре узгоджуються з супутниковими даними про розподіл рівня моря та геострофічних течій.

Отримані в роботі результати щодо просторової структури та мінливості течії Куросіо, а також розраховані поля геострофічних швидкостей на основі натурних і супутникових даних дозволяють більш детально охарактеризувати динаміку досліджуваного району. Виявлені особливості, такі як наявність зон підвищених швидкостей, фронтальних структур, двоядерної будови течії та формування протитечій, можуть бути використані для подальшого аналізу океанографічних умов у регіоні. Отримані дані мають потенційне прикладне значення, зокрема можуть бути використані для врахування океанографічних умов при плануванні маршрутів водного транспорту, оскільки просторово-часова мінливість течій суттєво впливає на швидкість руху суден, витрати пального та безпеку мореплавства. Крім того, результати можуть бути корисними для вдосконалення чисельних моделей океанічної циркуляції та подальших досліджень взаємодії течій із підводним рельєфом.

ЛІТЕРАТУРА

1. В.І. Михайлов, Н.В. Кучеренко. Спеціальні розділи фізичної океанології. Одеса: Екологія, 2011. - 238 с.
2. Hidetaka Hirata, Hatsumi Nishikawa, · Norihisa Usui, · Toru Miyama, · Shusaku Sugimoto, · Akira Kusaka, Takashi Seto. The Kuroshio large meander and its various impacts: a review./ *Journal of Oceanography* (2025) 81:165–185, p. 165-185.
3. Hirata H, Kawamura R, Kato M, Shinoda T (2018) A positive feedback process related to the rapid development of an extratropical cyclone over the Kuroshio/Kuroshio Extension. *Mon Weather Rev* 146:417–433.
4. Hirata H, Kawamura R, Nonaka M (2025) Effects of a marine heatwave associated with the Kuroshio Extension large meander on extreme precipitation in September 2023. *Sci Rep* 15:5332.
5. Copernicus Marine Service (CMEMS) [Електронний ресурс]. –<https://marine.copernicus.eu/>
6. National Centers for Environmental information [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.ncei.noaa.gov/>

REFERENCES

1. V.I. Mikhailov, N.V. Kucherenko. *Special sections of physical oceanology*. Odesa: Ecology, 2011. - 238 p.
2. Hidetaka Hirata, Hatsumi Nishikawa, · Norihisa Usui, · Toru Miyama, · Shusaku Sugimoto, · Akira Kusaka, Takashi Seto. The Kuroshio large meander and its various impacts: a review./ *Journal of Oceanography* (2025) 81:165–185, p. 165-185.
3. Hirata H, Kawamura R, Kato M, Shinoda T (2018) A positive feedback process related to the rapid development of an extratropical cyclone over the Kuroshio/Kuroshio Extension. *Mon Weather Rev* 146:417–433.
4. Hirata H, Kawamura R, Nonaka M (2025) Effects of a marine heatwave associated with the Kuroshio Extension large meander on extreme precipitation in September 2023. *Sci Rep* 15:5332.
5. Copernicus Marine Service (CMEMS) [Электронний ресурс]. –<https://marine.copernicus.eu/>
6. National Centers for Environmental information [Электронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.ncei.noaa.gov/>

FEATURES OF THE HYDROLOGICAL REGIME OF THE KUROSHIO CURRENT DURING THE FORMATION AND DEVELOPMENT OF THE LARGE MEANDER LM2017

The study investigates the spatio-temporal variability of the Kuroshio Current based on satellite data of sea surface height (SSH) and geostrophic velocities, as well as in situ expeditionary measurements (temperature and salinity of seawater) provided by the National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). Along various sections in the region of the Kuroshio Current, maps of the spatial distribution of current velocities were constructed and volume transports were calculated. A double-core structure of the current was identified, which may be associated with meandering of the main flow and the influence of bottom topography. It is shown that the Kuroshio is characterized by the persistent existence of meanders whose geographical position remains relatively stable over time, while their configuration is variable. The obtained results are consistent with satellite observations and can be used for further studies of ocean circulation and applied tasks, particularly in the field of marine navigation.

Keywords: Kuroshio Current, water area, geostrophic current velocities, meanders, eddies.

Стаття прийнята 23.04.2026

© Гончарук І.П.

УДОСКОНАЛЕННЯ ПІДХОДІВ ДО ОЦІНЮВАННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ СУДЕН НА ОСНОВІ ПОТЕНЦІАЛУ ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ

У сучасних умовах посилення вимог до енергоефективності та екологічної безпеки морського транспорту актуальним є удосконалення методів оцінювання ефективності використання енергетичних ресурсів суден торговельного флоту. Існуючі підходи, зокрема показники EEDI, EEOI та СІІ, здебільшого орієнтовані на узагальнені або проєктні характеристики і не забезпечують можливості кількісного визначення прихованих резервів енергозбереження в судових енергетичних системах. Метою дослідження є розроблення методичних основ оцінювання енергоефективності суден на основі визначення потенціалу енергозбереження з урахуванням технічних, експлуатаційних та економічних факторів. У роботі проведено аналіз сучасних наукових підходів до оцінювання енергоефективності суден та визначено їх обмеження в умовах змінних режимів експлуатації. Запропоновано концепцію потенціалу енергозбереження як інтегрального показника ефективності судових енергетичних систем, що базується на аналізі енергетичного балансу судна. Розроблено методичний підхід до визначення відносного потенціалу енергозбереження з урахуванням його ієрархічної структури, яка включає теоретичний, технічно досяжний та економічно доцільний рівні. Запропоновано узагальнений критерій енергоефективності у вигляді відносного потенціалу енергозбереження. Отримані результати дозволяють ідентифікувати внутрішні енергетичні втрати, здійснювати порівняльний аналіз енергоефективності суден та обґрунтовувати управлінські рішення щодо підвищення ефективності використання енергетичних ресурсів, впровадження енергозберігаючих технологій та забезпечення відповідності міжнародним вимогам у сфері декарбонізації морського транспорту.

Ключові слова: енергоефективність суден, потенціал енергозбереження, судові енергетичні системи, енергетичний баланс судна, паливна ефективність, енергетичні втрати, експлуатаційні режими суден, морський транспорт, екологічна ефективність, декарбонізація судноплавства.

Постановка проблеми. У сучасних умовах розвитку морського транспорту питання підвищення енергоефективності суден торговельного флоту набуває особливої актуальності, що обумовлено зростанням вартості паливно-енергетичних ресурсів, посиленням міжнародних екологічних вимог та необхідністю забезпечення конкурентоспроможності судноплавних компаній. Впровадження регуляторних механізмів, таких як індекси EEDI, EEOI та показник інтенсивності викидів вуглецю (СІІ), сприяє підвищенню контролю за енергоспоживанням, проте не забезпечує повною мірою можливості комплексного аналізу ефективності функціонування судових енергетичних систем.

Існуючі підходи до оцінювання енергоефективності суден, як правило, базуються на узагальнених або проєктних показниках, що відображають середні характеристики енергоспоживання та не враховують вплив змінних експлуатаційних умов, режимів роботи енергетичних установок та внутрішньої структури енергетичних втрат. Це призводить до обмеженості їх використання для прийняття обґрунтованих управлінських рішень щодо оптимізації енергоспоживання та модернізації судових систем.

Особливої складності набуває задача ідентифікації та кількісної оцінки прихованих резервів енергозбереження, що формуються внаслідок недосконалості процесів перетворення, розподілу та використання енергії на борту судна. Відсутність єдиного узагальненого критерію, який би дозволяв інтегрувати технічні, експлуатаційні та економічні аспекти функціонування судових енергетичних систем, ускладнює процес порівняння ефективності різних суден, а також обґрунтування доцільності впровадження енергозберігаючих заходів.

Крім того, сучасні тенденції цифровізації морського транспорту, зокрема впровадження інтелектуальних систем управління енергоспоживанням та цифрових двійників суден, потребують наявності формалізованих та універсальних показників, придатних для використання в автоматизованих системах аналізу та підтримки прийняття рішень.

Таким чином, існує науково-прикладна проблема розроблення методичних основ оцінювання енергоефективності суден торговельного флоту, які б забезпечували можливість кількісного визначення потенціалу енергозбереження з урахуванням технічних характеристик судна, умов його експлуатації та економічної доцільності впровадження відповідних заходів. Розв'язання цієї проблеми є необхідною передумовою підвищення ефективності використання енергетичних ресурсів, зниження рівня шкідливих викидів та забезпечення сталого розвитку морського транспорту.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблема підвищення енергоефективності в морському транспорті [1] останнім часом привертає все більшу увагу вчених і практиків. Дослідження зосереджуються на вдосконаленні процесів споживання, перетворення та передачі енергії на суднах з метою зменшення витрати палива [2], мінімізації шкідливих викидів [3] та забезпечення відповідності нормативним вимогам ІМО [4].

У [5] автори представили концепцію та імітаційне моделювання системи управління енергоефективністю судна на основі аналізу експлуатаційних даних. Такий підхід дозволяє адаптувати енергоспоживання до динамічних умов рейсу. У свою чергу, у [6] автор оцінив енергоефективність пасажирського судна, вказавши на можливість підвищення експлуатаційних показників навіть у суден традиційної конструкції.

У [7] представлено розширений індекс викидів (EEI) для риболовних суден, який враховує не лише CO_2 , а й SO_x та NO_x , що забезпечує більш комплексну екологічну оцінку систем енергоспоживання. У [8] досліджується методологія оцінки викидів парникових газів з використанням індексів енергоефективності проектування (EEDI), енергоефективності експлуатації (EEOI) та енергоефективності навігації (EENI), а також даних моніторингу у часових рядах.

Автори [9, 10] визначили перешкоди для впровадження заходів з енергоефективності у судноплаванні, включаючи інформаційну асиметрію, розподіл відповідальності між учасниками ринку та економічні бар'єри для інвестицій у нові технології. У [11] вчені досліджували співвідношення витрат і вигод різних технологій очищення баластних вод, що тісно пов'язане з енергоефективністю та споживанням електроенергії на борту.

Дослідники приділяють особливу увагу інноваційним технологіям, таким як системи на повітряній подушці [12], органічні цикли Ренкіна [13], використання фотоелектричних панелей та мініатюризація головних електричних щитів [14]. У роботі [15] автори систематизували підходи до скорочення викидів та підвищення енергоефективності, зокрема методи оптимізації швидкості та планування маршруту.

З точки зору методів математичного аналізу в роботі [16] запропоновано використання багатовимірної регресії та штучних нейронних мереж для оцінки ефективності енергоспоживання на основі даних про рейси.

Робота вчених [17] демонструє можливості використання планів управління енергоефективністю (SEEMP) в управлінні операційною ефективністю. У [18] поглиблено аналіз контейнеровозів, зосередивши увагу на взаємозв'язку між характеристиками двигуна, енергоспоживанням та параметрами навантаження. Попередні дослідження продемонстрували, що детальне моделювання потужності судна та енергетичних потоків на рівні підсистем забезпечує більш реалістичну основу для оцінки ефективності, ніж узагальнені показники рейсу [18, 19].

Впровадження Міжнародною морською організацією показника вуглецевої інтенсивності (CII) з обов'язковим класифікаційним рейтингом суден від А до Е ще раз підкреслило обмеження абсолютних та конструктивних показників ефективності [20]. Оскільки рейтинг CII дуже чутливий до умов експлуатації та щорічних показників ефективності, зростає потреба у відносних, нормалізованих показниках, здатних кількісно оцінити приховані резерви енергозбереження та сприяти прийняттю адаптивних рішень з управління енергоспоживанням протягом усього життєвого циклу судна.

Метою дослідження є удосконалення підходів до оцінювання енергоефективності суден шляхом формування узагальненого критерію, заснованого на потенціалі енергозбереження, який забезпечує комплексне врахування технічних, експлуатаційних та економічних факторів функціонування суднових енергетичних систем.

Основні результати дослідження. У результаті проведеного дослідження розроблено методичні основи оцінювання енергоефективності суден торговельного флоту, які базуються на концепції потенціалу енергозбереження як інтегрального показника ефективності функціонування суднових енергетичних систем.

Формування концепції потенціалу енергозбереження – запропоновано розглядати потенціал енергозбереження судна як сукупність нереалізованих резервів зниження енергетичних втрат, що виникають у процесах споживання, перетворення та передавання енергії на борту. На відміну від традиційних підходів, що базуються на питомих показниках витрати палива або викидів, запропонована концепція дозволяє оцінювати не лише фактичний рівень енергоефективності, але й можливості його підвищення. Показано, що використання потенціалу енергозбереження як базового критерію дає змогу врахувати внутрішню структуру енергетичних втрат та їх зв'язок із технічним станом судна, режимами експлуатації та організацією управління енергоспоживанням.

Класифікація потенціалу енергозбереження судна - удосконалено підхід до класифікації потенціалу енергозбереження за такими основними ознаками:

- за участю в енергетичних процесах (головна енергетична установка, допоміжні механізми, системи життєзабезпечення);
- за видом енергетичних ресурсів (паливо, тепла енергія, електроенергія, відновлювані джерела);
- за методом оцінювання (фактичний та розрахунковий потенціал);
- за рівнем управління (машинне відділення, навігаційний місток, берегові служби);
- за ступенем реалізації (реалізований, доступний без значних інвестицій, стратегічний резерв).

Запропонована класифікація забезпечує системний підхід до аналізу джерел енергетичних втрат і дозволяє визначати пріоритетні напрями підвищення енергоефективності.

Розроблення методичного підходу до оцінювання енергоефективності - сформовано методичний підхід, який базується на аналізі енергетичного балансу судна та передбачає:

- визначення загального обсягу споживаної енергії;
- ідентифікацію джерел енергетичних втрат;
- оцінювання структури енергоспоживання за підсистемами;
- визначення потенційних резервів зниження втрат.

Показано, що енергетичний баланс є базою для кількісної оцінки ефективності використання енергетичних ресурсів та формування інтегральних показників енергоефективності.

Формування узагальненого критерію енергоефективності – запропоновано узагальнений критерій оцінювання енергоефективності судна у вигляді відносного потенціалу енергозбереження, який визначається як частка енергії, що може бути збережена в загальному обсязі енергоспоживання.

Автор статті пропонує визначати відносний теоретичний потенціал енергозбереження за допомогою рівняння (1):

$$P_{RES}^{theor} = \frac{E_{pot}^{theor}}{E_{total}} \cdot 100 \%, \quad (1)$$

де $E_{pot}^{theor} = E_{total} \cdot (1 - \eta_e)$ - теоретично можлива кількість енергії, яку можна заощадити на судні завдяки впровадженню енергозберігаючих заходів (кВт·год або тонни паливного еквіваленту);

η_e - паливна економічність двигуна, що визначається як функція $f(\text{Engine power})$, приклад цієї функції наведено на рис. 1;

$E_{total} = F_c \cdot F_{lcv}$ - загальне споживання енергії судном протягом відповідного періоду (рік, рейс тощо), включаючи всі види палива та електроенергію (кВт·год або тонни паливного еквіваленту);

F_c - витрата палива судном за відповідний період (рік, рейс тощо), кг;

F_{lcv} - найнижча теплотворна здатність, кДж/кг.

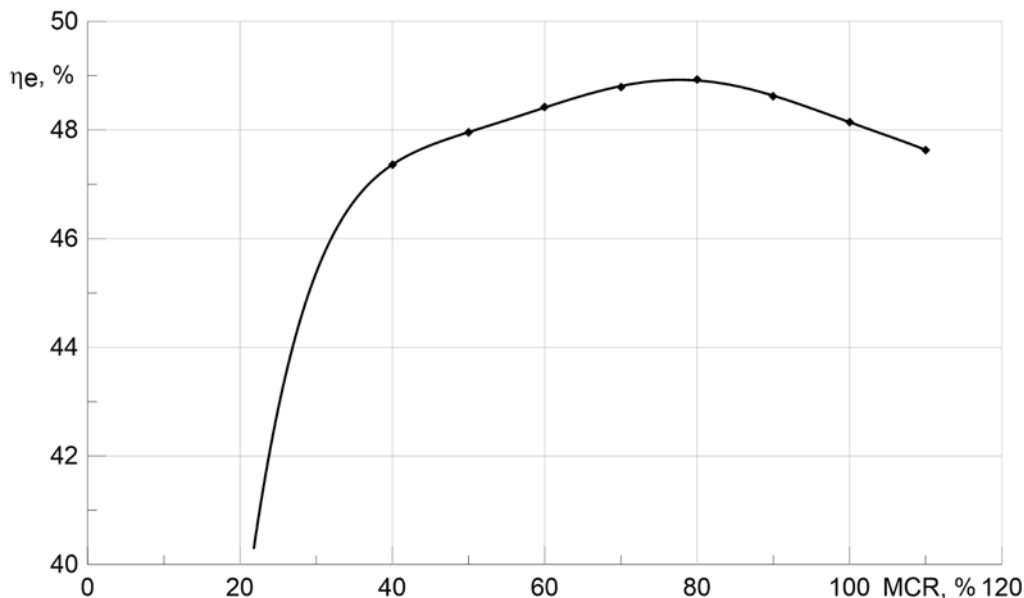


Рисунок 1 – Залежність паливної економічності двигуна MAN 6S46MC-C7 від ступеня його навантаження (% MCR).

Крива побудована автором на основі оцифрованих даних виробника щодо експлуатаційних характеристик та опублікованої технічної документації і відображає типову характеристику ефективності, а не виміряні експлуатаційні дані для конкретної установки двигуна.

З точки зору енергетичного балансу, термін $1 - \eta_e$ представляє сукупну частку енергії, яка не перетворюється на корисну механічну роботу і розсіюється через різні механізми втрат, включаючи тепло вихлопних газів, втрати системи охолодження, тертя та неефективність перетворення. На теоретичному рівні всі такі втрати розглядаються як єдиний верхній резерв для потенційної економії енергії. Це визначення не означає, що всі втрати є практично відновлюваними, а також не прив'язує відновлюваність до конкретних підсистем або форм енергії.

На рисунку 1 показано паливну ефективність головного двигуна MAN 6S46MC-C7 у залежності від рівня навантаження (% MCR). На графіку показано зміну питомої ефективності (ефективної корисної дії) двигуна в діапазоні від 20% до 110% номінальної потужності (Maximum Continuous Rating, MCR). Крива має чітко виражений максимум у діапазоні 80% MCR, де досягається найвищий рівень паливної ефективності - близько 49%.

Коли навантаження зменшується або збільшується, ККД знижується через збільшення відносних теплових втрат та неефективність процесів згоряння. Особливо помітне зниження ККД спостерігається, коли двигун працює при низьких навантаженнях (менше 40% MCR), де ККД може знижуватися до 42 % і нижче. Ця характеристика має вирішальне значення для обґрунтування режимів експлуатації судна та розрахунку потенціалу енергозбереження, оскільки робота в діапазоні 70–85 % від максимальної номінальної потужності (MCR) забезпечує оптимальний баланс між продуктивністю та витратою палива.

1. Ієрархія потенціалу енергозбереження

Розроблено ієрархічну структуру потенціалу енергозбереження, яка включає:

- теоретичний потенціал - максимально можливий рівень зниження енергетичних втрат;
- технічний потенціал - частка теоретичного потенціалу, що може бути реалізована з урахуванням сучасного технічного рівня;
- економічно доцільний потенціал - частка технічного потенціалу, реалізація якої є економічно обґрунтованою.

Такий підхід дозволяє перейти від ідеалізованих оцінок до практично реалізованих рішень та забезпечує обґрунтування інвестицій у підвищення енергоефективності.

2. Узагальнений алгоритм оцінювання енергоефективності

На основі проведених досліджень сформовано узагальнений алгоритм оцінювання енергоефективності судна, який включає такі етапи:

- збір технічних та експлуатаційних даних;
- побудова енергетичного балансу судна;
- визначення теоретичного потенціалу енергозбереження;
- урахування технічних обмежень;
- оцінювання економічної доцільності заходів;
- формування рекомендацій щодо підвищення енергоефективності.

Алгоритм може бути використаний як основа для створення автоматизованих систем моніторингу та підтримки прийняття рішень.

3. Демонстрація застосування методики – для підтвердження працездатності запропонованого підходу виконано узагальнену оцінку потенціалу енергозбереження на прикладі судової енергетичної системи. Показано, що найбільша частка енергетичних втрат пов'язана з процесами перетворення енергії в головних і допоміжних енергетичних установках, що свідчить про значні резерви підвищення енергоефективності за рахунок оптимізації режимів роботи, впровадження систем утилізації теплоти та вдосконалення управління енергоспоживанням.

Висновки. У результаті проведеного дослідження встановлено, що існуючі підходи до оцінювання енергоефективності суден торговельного флоту, засновані на використанні показників EEDI, EEOI, СІІ та інших індикаторів, не забезпечують комплексного урахування внутрішньої структури енергетичних втрат і не дозволяють кількісно оцінювати приховані резерви енергозбереження в судових енергетичних системах. У зв'язку з цим обґрунтовано доцільність використання потенціалу енергозбереження як інтегрального критерію оцінювання енергоефективності, що враховує технічні характеристики енергетичних установок, експлуатаційні режими їх роботи та організаційні аспекти управління енергоспоживанням.

Розроблено методичний підхід до оцінювання енергоефективності суден, який базується на аналізі енергетичного балансу та дозволяє ідентифікувати джерела енергетичних втрат, визначати структуру енергоспоживання і кількісно оцінювати потенційні резерви їх зниження. Запропоновано узагальнений критерій у вигляді відносного потенціалу енергозбереження, який характеризує частку енергії, що може бути збережена в загальному обсязі енергоспоживання, та забезпечує можливість порівняльного аналізу енергоефективності суден незалежно від їх типу і умов експлуатації.

Сформована ієрархічна структура потенціалу енергозбереження, що включає теоретичний, технічно досяжний та економічно доцільний рівні, забезпечує перехід від оцінки максимально можливих резервів до їх практичної реалізації з урахуванням технічних і економічних обмежень. Розроблений узагальнений алгоритм оцінювання може бути використаний як інструмент підтримки прийняття рішень щодо підвищення ефективності використання енергетичних ресурсів, модернізації судових енергетичних систем та впровадження енергозберігаючих технологій.

Отримані результати підтверджують наявність значного потенціалу підвищення енергоефективності суден за рахунок оптимізації режимів роботи енергетичних установок, впровадження систем утилізації скидної теплоти та вдосконалення систем управління

енергоспоживанням. Запропонований підхід формує науково-методичну основу для розвитку сучасних інтелектуальних систем управління енергоефективністю суден, у тому числі в рамках цифрової трансформації морського транспорту, та сприяє забезпеченню відповідності міжнародним вимогам у сфері декарбонізації судноплавства.

ЛІТЕРАТУРА

1. Sagin, S., Kuropyatnyk, O., Matieiko, O., Razinkin, R., Stoliaryk, T., & Volkov, O. (2024). Ensuring Operational Performance and Environmental Sustainability of Marine Diesel Engines through the Use of Biodiesel Fuel. *Journal of Marine Science and Engineering*, 12(8), 1440. <https://doi.org/10.3390/jmse12081440>
2. Sagin, S., Haichenia, O., Karianskyi, S., Kuropyatnyk, O., Razinkin, R., Sagin, A., & Volkov, O. (2025). Improving Green Ship-ping by Using Alternative Fuels in Ship Diesel Engines. *Journal of Marine Science and Engineering*, 13(3), 589. <https://doi.org/10.3390/jmse13030589>
3. Sagin, S. V., Sagin, S. S., & Madey, V. (2023). Analysis of methods of managing the environmental safety of the navigation pas-sage of ships of maritime transport. *Technology Audit and Production Reserves*, 4(3(72)), 33–42. <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2023.286039>
4. Zheng, Z., & Zhou, X. (2019). Design and Simulation of Ship Energy Efficiency Management System Based on Data Analysis. *Journal of Coastal Research*, 94(sp1), 552. <https://doi.org/10.2112/SI94-109.1>
5. Tokuslu, A. (2020). Energy efficiency of a passenger ship in Turkey. *Scientific Bulletin of Naval Academy*, XXIII(1), 15–21. <https://doi.org/10.21279/1454-864X-20-11-002>
6. Koričan, M., Vladimir, N., Haramina, T., Alujević, N., & Vučković, K. (2023). EXTENDED EMISSION INDEX FOR FISHING VESSELS: ASSESSMENT OF THE ENVIRONMENTAL FRIENDLINESS OF A PURSE SEINER WITH AN ALTERNATIVE POWER SYSTEM. 225–232. <https://doi.org/10.2495/ESUS230191>
7. Ehlers, S., Asbjornslett, B. E., Rodseth, O. J., & Berg, T. E. (Eds.). (2014). A study on estimation methodology of GHG emission from vessels by using energy efficiency index and time series monitoring data. In *Maritime-Port Technology and Development* (0 ed., pp. 43–50). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b17517-6>
8. Rehmatulla, N., & Smith, T. (2015). Barriers to energy efficient and low carbon shipping. *Ocean Engineering*, 110, 102–112. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2015.09.030>
9. Rehmatulla, N., & Smith, T. (2015). Barriers to energy efficiency in shipping: A triangulated approach to investigate the principal agent problem. *Energy Policy*, 84, 44–57. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2015.04.019>
10. Vorkapić, A., Radonja, R., & Zec, D. (2018). Cost Efficiency of Ballast Water Treatment Systems Based on Ultraviolet Irradiation and Electrochlorination. *Promet - Traffic&Transportation*, 30(3), 343–348. <https://doi.org/10.7307/ptt.v30i3.2564>
11. Kim, Y.-R., & Steen, S. (2023). Potential energy savings of air lubrication technology on merchant ships. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 15, 100530. <https://doi.org/10.1016/j.ijnaoe.2023.100530>
12. Yang, M.-H., & Yeh, R.-H. (2015). Thermodynamic and economic performances optimization of an organic Rankine cycle sys-tem utilizing exhaust gas of a large marine diesel engine. *Applied Energy*, 149, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.03.083>
13. Krčum, M., Zubčić, M., Kaštelan, N., & Gudelj, A. (2021). Reducing the Dimensions of the Ship's Main Switchboard—A Contri-bution to Energy Efficiency. *Energies*, 14(22), 7567. <https://doi.org/10.3390/en14227567>
14. Jimenez, V. J., Kim, H., & Munim, Z. H. (2022). A review of ship energy efficiency research and directions towards emission reduction in the maritime industry. *Journal of Cleaner Production*, 366, 132888. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132888>
15. Öztürk, O. B., & Başar, E. (2022). Multiple linear regression analysis and artificial neural networks based decision support system for energy efficiency in shipping. *Ocean Engineering*, 243, 110209. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2021.110209>
16. Im, N., Choe, B., & Park, C.-H. (2019). Developing and Applying a Ship Operation Energy Efficiency Evaluation Index Using SEEMP: A Case Study of South Korea. *Journal of Marine Science and Application*, 18(2), 185–194. <https://doi.org/10.1007/s11804-019-00090-w>
17. Aijjou, A., Bahatti, L., & Raihani, A. (2020). Analy sis of container ship energy systems. *International Journal of Energy Production and Management*, 5(2), 142–156. <https://doi.org/10.2495/EQ-V5-N2-142-156>
18. Golovan, A., Gritsuk, I., Popeliuk, V., Sherstyuk, O., Honcharuk, I., Symonenko, R., Saravas, V., Volodarets, M., Ahieiev, M., Pohorletskyi, D., & Khudiakov, I. (2020). Features of mathematical modeling in the problems of determining the power of a tur-bocharged engine according to the characteristics of the turbocharger. *SAE International Journal of Engines*, 13(1). Scopus. <https://doi.org/10.4271/03-13-01-0001>

19. Golovan, A., Gritsuk, I., Kurtsev, M., Ischuka, O., & Vrublevskiy, R. (2020). Aspects of Remote Monitoring of the Transport Vessel Under Operating Conditions. In Lecture. Notes. Intell. Transp. Infrastruct.: Vol. Part F1382 (pp. 295–301). Springer Nature; Scopus. https://doi.org/10.1007/978-3-030-39688-6_37

20. Holovan, A., Gritsuk, I., Verbovskiy, V., Kalchenko, V., Grytsuk, Y., Verbovskiy, O., Dotsenko, S., Lysykh, A., Symonenko, R., & Subochev, O. (2025). Algorithmic support and efficiency analysis of comprehensive prescriptive maintenance for cargo ships using predictive monitoring. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3(3 (135)), 13–26. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2025.331875>

REFERENCES

1. Sagin, S., Kuropyatnyk, O., Matieiko, O., Razinkin, R., Stoliaryk, T., & Volkov, O. (2024). Ensuring Operational Performance and Environmental Sustainability of Marine Diesel Engines through the Use of Biodiesel Fuel. *Journal of Marine Science and Engineering*, 12(8), 1440. <https://doi.org/10.3390/jmse12081440>

2. Sagin, S., Haichenia, O., Karianskyi, S., Kuropyatnyk, O., Razinkin, R., Sagin, A., & Volkov, O. (2025). Improving Green Ship-ping by Using Alternative Fuels in Ship Diesel Engines. *Journal of Marine Science and Engineering*, 13(3), 589. <https://doi.org/10.3390/jmse13030589>

3. Sagin, S. V., Sagin, S. S., & Madey, V. (2023). Analysis of methods of managing the environmental safety of the navigation pas-sage of ships of maritime transport. *Technology Audit and Production Reserves*, 4(3(72)), 33–42. <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2023.286039>

4. Zheng, Z., & Zhou, X. (2019). Design and Simulation of Ship Energy Efficiency Management System Based on Data Analysis. *Journal of Coastal Research*, 94(sp1), 552. <https://doi.org/10.2112/SI94-109.1>

5. Tokuslu, A. (2020). Energy efficiency of a passenger ship in Turkey. *Scientific Bulletin of Naval Academy*, XXIII(1), 15–21. <https://doi.org/10.21279/1454-864X-20-11-002>

6. Koričan, M., Vladimir, N., Haramina, T., Alujević, N., & Vučković, K. (2023). EXTENDED EMISSION INDEX FOR FISHING VESSELS: ASSESSMENT OF THE ENVIRONMENTAL FRIENDLINESS OF A PURSE SEINER WITH AN ALTERNATIVE POWER SYSTEM. 225–232. <https://doi.org/10.2495/ESUS230191>

7. Ehlers, S., Asbjornslett, B. E., Rodseth, O. J., & Berg, T. E. (Eds.). (2014). A study on estimation methodology of GHG emission from vessels by using energy efficiency index and time series monitoring data. In *Maritime-Port Technology and Development* (0 ed., pp. 43–50). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b17517-6>

8. Rehmatulla, N., & Smith, T. (2015). Barriers to energy efficient and low carbon shipping. *Ocean Engineering*, 110, 102–112. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2015.09.030>

9. Rehmatulla, N., & Smith, T. (2015). Barriers to energy efficiency in shipping: A triangulated approach to investigate the principal agent problem. *Energy Policy*, 84, 44–57. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2015.04.019>

10. Vorkapić, A., Radonja, R., & Zec, D. (2018). Cost Efficiency of Ballast Water Treatment Systems Based on Ultraviolet Irradiation and Electrochlorination. *Promet - Traffic&Transportation*, 30(3), 343–348. <https://doi.org/10.7307/ptt.v30i3.2564>

11. Kim, Y.-R., & Steen, S. (2023). Potential energy savings of air lubrication technology on merchant ships. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 15, 100530. <https://doi.org/10.1016/j.ijnaoe.2023.100530>

12. Yang, M.-H., & Yeh, R.-H. (2015). Thermodynamic and economic performances optimization of an organic Rankine cycle sys-tem utilizing exhaust gas of a large marine diesel engine. *Applied Energy*, 149, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.03.083>

13. Krčum, M., Zubčić, M., Kaštelan, N., & Gudelj, A. (2021). Reducing the Dimensions of the Ship's Main Switchboard—A Contri-bution to Energy Efficiency. *Energies*, 14(22), 7567. <https://doi.org/10.3390/en14227567>

14. Jimenez, V. J., Kim, H., & Munim, Z. H. (2022). A review of ship energy efficiency research and directions towards emission reduction in the maritime industry. *Journal of Cleaner Production*, 366, 132888. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132888>

15. Öztürk, O. B., & Başar, E. (2022). Multiple linear regression analysis and artificial neural networks based decision support system for energy efficiency in shipping. *Ocean Engineering*, 243, 110209. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2021.110209>

16. Im, N., Choe, B., & Park, C.-H. (2019). Developing and Applying a Ship Operation Energy Efficiency Evaluation Index Using SEEMP: A Case Study of South Korea. *Journal of Marine Science and Application*, 18(2), 185–194. <https://doi.org/10.1007/s11804-019-00090-w>

17. Aijjou, A., Bahatti, L., & Raihani, A. (2020). Analy sis of container ship energy systems. *International Journal of Energy Production and Management*, 5(2), 142–156. <https://doi.org/10.2495/EQ-V5-N2-142-156>

18. Golovan, A., Gritsuk, I., Popeliuk, V., Sherstyuk, O., Honcharuk, I., Symonenko, R., Saravas, V., Volodarets, M., Ahieiev, M., Pohorltskyi, D., & Khudiakov, I. (2020). Features of mathematical modeling in the problems of determining the power of a turbocharged engine according to the characteristics of the turbocharger. *SAE International Journal of Engines*, 13(1). Scopus. <https://doi.org/10.4271/03-13-01-0001>

19. Golovan, A., Gritsuk, I., Kurtsev, M., Ischuka, O., & Vrublevskyi, R. (2020). Aspects of Remote Monitoring of the Transport Vessel Under Operating Conditions. In *Lecture Notes. Intell. Transp. Infrastruct.: Vol. Part F1382* (pp. 295–301). Springer Nature; Scopus. https://doi.org/10.1007/978-3-030-39688-6_37

20. Holovan, A., Gritsuk, I., Verbovskiy, V., Kalchenko, V., Grytsuk, Y., Verbovskiy, O., Dotsenko, S., Lysykh, A., Symonenko, R., & Subochev, O. (2025). Algorithmic support and efficiency analysis of comprehensive prescriptive maintenance for cargo ships using predictive monitoring. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3(3 (135)), 13–26. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2025.331875>

Honcharuk I.P.

IMPROVING APPROACHES TO ASSESSING THE ENERGY EFFICIENCY OF SHIPS BASED ON ENERGY-SAVING POTENTIAL

Given the current trend toward stricter requirements for energy efficiency and environmental safety in maritime transport, there is a pressing need to improve methods for assessing the efficiency of energy resource use in merchant ships. Existing approaches, in particular the EEDI, EEOI, and CII indicators, are largely focused on generalized or design characteristics and do not provide the ability to quantitatively identify hidden energy-saving potential in ship power systems. The aim of the study is to develop methodological foundations for assessing ship energy efficiency based on determining energy-saving potential, taking into account technical, operational, and economic factors. The paper analyzes modern scientific approaches to assessing ship energy efficiency and identifies their limitations under variable operating conditions. A concept of energy-saving potential is proposed as an integral indicator of the efficiency of ship power systems, based on an analysis of the ship's energy balance. A methodological approach has been developed for determining the relative energy-saving potential, taking into account its hierarchical structure, which includes theoretical, technically achievable, and economically feasible levels. A generalized criterion for energy efficiency in the form of relative energy-saving potential is proposed. The results obtained allow for the identification of internal energy losses, the conduct of a comparative analysis of ship energy efficiency, and the justification of management decisions regarding the improvement of energy resource utilization, the implementation of energy-saving technologies, and ensuring compliance with international requirements in the field of maritime transport decarbonization.

Keywords: *ship energy efficiency, energy-saving potential, ship power systems, ship energy balance, fuel efficiency, energy losses, ship operating modes, maritime transport, environmental performance, decarbonization of shipping.*

Стаття прийнята 13.02.2026

©Ширкова О.А., Бажак О.В.

МОДЕРНІЗАЦІЯ РІЧКОВОГО ФЛОТУ: ПІДВИЩЕННЯ КОЕФІЦІЕНТУ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ

Внутрішній водний транспорт традиційно вважається одним із найбільш енергоефективних видів вантажних перевезень: його питома енергоємність у 5–10 разів менша порівняно з автомобільним та у 2–5 разів – із залізничним. Проте рівень техніко-технологічного стану українського річкового флоту залишається вкрай низьким. Більшість суден побудована у 1960–1980-х роках: середній вік перевищує 35–40 років, а коефіцієнт зношеності основних фондів сягає 80–85%. Застаріле обладнання спричиняє підвищені витрати палива та низький ККД судових енергетичних установок (СЕУ), що у поєднанні з посиленням міжнародних регуляцій (ЕЕХІ, СІІ) робить модернізацію флоту нагальним стратегічним завданням, особливо для суден дунайського басейну. На прикладі практичної модернізації т/х «Капітан Антипов» (ПрАТ «УДП», жовтень 2024 р.) проаналізовано заміну головних двигунів SGP Тур T112 SO (2×772 кВт) на Mitsubishi S12R-MPTAW (2×940 кВт) та дизель-генераторів MWM ТВД 232-V8 на Volvo Penta (2×239 кВт). Нові двигуни відповідають стандарту Stage V (Euro 5), мають сертифікати ЄС відповідно до Регламенту (ЄС) 2016/1628 та обладнані системою SCR з реагентом AdBlue, що забезпечує відповідність вимогам як Дунаю, так і Рейну. Коефіцієнт ЕЕХІ зріс з 15,7 до 19,1 (у 1,22 раза); питома витрата палива знизилась на 12–15% лише завдяки ремоторизації. Систематизовано чотири ключові напрями подальшої комплексної модернізації: гібридна пропульсія з акумуляторними системами (економія 15–25%); оптимізація режимів роботи головного двигуна та впровадження цифрових систем SEEMP (10–20%); рекуперація відпрацьованого тепла через системи ORC та утилізаційні котли (5–12%); гідродинамічна оптимізація корпусу та антифоулінгові покриття (3–8%). Комплексна модернізація здатна підвищити загальний ККД пропульсивного комплексу з 0,25–0,30 до 0,38–0,45 та знизити питоме споживання палива на 20–35%. Термін окупності ремоторизації при поточному рівні дунайського фрахту становить 5–8 років.

Ключові слова: річковий флот, модернізація, енергоефективність, ЕЕХІ, гібридна пропульсія, ККД, внутрішній водний транспорт.

Постановка проблеми. Внутрішній водний транспорт традиційно вважається одним із найбільш енергоефективних видів вантажних перевезень: його питома енергоємність у 5–10 разів менша порівняно з автомобільним та у 2–5 разів – з залізничним транспортом [1]. Попри це, рівень техніко-технологічного стану українського річкового флоту залишається вкрай низьким [2]. Річка Дунай утворює один з найважливіших міжнародних транспортних коридорів у Європі, з'єднуючи Центральну та Східну Європу з Чорним морем. Значний відсоток флоту, що працює в цьому басейні, складається із суден 1970–1980-х років побудови, головні двигуни та дизель-генератори яких застаріли, що призводить до збільшення експлуатаційних витрат і підвищеного споживання палива.

Введення Міжнародною морською організацією (ІМО) індексу енергоефективності існуючих суден (ЕЕХІ) та вуглецевого індикатора інтенсивності (СІІ) з 2023 року встановлює чіткі кількісні вимоги до скорочення викидів CO₂ [3]. Аналогічні регуляторні тенденції поступово охоплюють і внутрішній водний транспорт у межах директив ЄС. Для України, яка активно розвиває дунайський транспортний коридор та прагне до членства в ЄС, адаптація флоту до нових екологічних стандартів є стратегічним завданням. Модернізація існуючих суден є економічно вигідною альтернативою будівництву нових – завдяки заміні рушійних систем та впровадженню сучасних технологій керування можна досягти значного покращення енергоефективності.

Більшість існуючих методик оцінки енергетичної ефективності розроблено для морських суден, тоді як специфічний вплив мілководдя та змінних течій суттєво змінює гідродинамічні характеристики та режими роботи СЕУ річкових суден [5]. Відсутній системний підхід до визначення пріоритетних напрямів модернізації з урахуванням типового профілю експлуатації на Дунаї: сезонних коливань рівня води, специфіки вантажних потоків, розташування інфраструктури обслуговування. Недостатньо розробленою залишається і тематика інтеграції цифрових систем управління з гібридними пропульсивними установками в умовах внутрішнього судноплавства.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питанням підвищення енергоефективності внутрішнього водного транспорту присвячено значну кількість наукових публікацій. У систематичному огляді [1] виявлено, що серед дослідників переважає інтерес до технічних аспектів підвищення ефективності суден та вирішення екологічних проблем. Nuchturee та ін. [4] показали, що перехід до електричної тяги забезпечує підвищення загального ККД СЕУ за рахунок усунення механічних втрат у трансмісії – електрифікація особливо ефективна для суден з нерівномірними профілями навантаження: паромів, буксирів, штовхачів.

Kalajdžić та ін. [5] встановили, що питоме споживання палива суттєво залежить від рівня завантаженості судна, швидкості ходу та гідрологічних умов. Оптимізація швидкості ходу та диференту судна дозволяє знизити витрату палива на 8–15% без капіталовкладень у модернізацію обладнання. Автори також підкреслюють специфічний вплив мілководдя на гідродинамічні характеристики річкових суден. Lion та ін. [6] систематизували технології рекуперації тепла – утилізаційні парові котли, системи органічного циклу Ренкіна (ORC), турбокомпаундні системи, – встановивши, що їх комбінування здатне підвищити загальний ККД СЕУ на 10–15%. Kolodziejski та Michalska-Pozoga [7] показали, що гібридні системи дозволяють стабілізувати режим роботи дизельного двигуна у зоні оптимального ККД та забезпечують економію палива 15–25% на типових річкових маршрутах.

Мета статті. Метою роботи є аналіз сучасних технічних рішень та організаційних заходів підвищення коефіцієнта енергоефективності річкових суден, систематизація підходів на основі конкретного практичного прикладу – модернізації т/х «Капітан Антипов» – та визначення пріоритетних напрямів модернізації флоту для умов експлуатації на внутрішніх водних шляхах України.

Основні результати дослідження. Т/х «Капітан Антипов» побудований у 1980 році на суднобудівній верфі OSWAG (м. Лінц, Австрія). Тип судна – суховантажне-штовхач. Головні розміри: загальна довжина 82,30 м; ширина 15,50 м; висота борту 3,20 м; осадка по вантажну марку 2,74 м; водотоннажність 2585,0 т; дедвейт 1900 т; вантажопідйомність 1634 т; розрахункова швидкість при $d = 2,7$ м без складу барж – 18,5 км/год. На судні з побудови були встановлені два головних двигуна типу SGP Тур T112 SO потужністю по 772 кВт та два дизель-генератори MWM ТВД 232-V8 по 121 кВт.

У жовтні 2024 року ПрАТ «УДП» завершило модернізацію першого судна «Капітан Антипов» проєкту M044C. Виконана заміна головних двигунів на Mitsubishi S12R-MPTAW потужністю по 940 кВт та дизель-генераторів на Volvo Penta по 239 кВт. Нові двигуни мають сертифікати ЄС схвалення типу відповідно до Регламенту (ЄС) 2016/1628 та відповідають стандарту Stage V (Euro 5). Розгляд технічної документації та нагляд за модернізацією виконано фахівцями Регістра судноплавства України на верфі OSWAG Werft Linz. Правила Регістра повністю гармонізовані з ES-TRIN [11] та вимогами ADN. Також встановлено систему SCR (Selective Catalytic Reduction) з реагентом AdBlue, що дозволяє судну працювати як на р. Дунай, так і на р. Рейн.

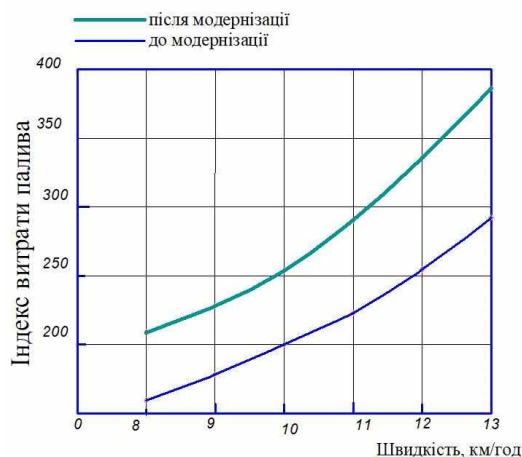


Рисунок 1 – Т/х «Капітан Антипов» після модернізації

Таблиця 1 – Порівняльний аналіз головних двигунів т/х «Капітан Антипов»

Параметр	SGP Typ T112 SO	Mitsubishi S12R-MPTAW	Висновок
Номінальна потужність	2×772 кВт	2×940 кВт	Приріст тяги +22%
Частота обертів	500 об/хв	1600–1800 об/хв	Потрібен редуктор
Питома витрата палива	~215 г/кВт·год	~190 г/кВт·год	Економія 12–15%
Габарити (Д×Ш×В), м	3,5×1,2×2,4	2,5×1,4×1,6	Вивільнення МО
Маса (суха), кг	≈12 500	≈5 500	Зміна центрування

Показники енергоефективності. Розрахунок EEXI.

Загальний ККД пропульсивного комплексу річкового судна визначається як:

$$\eta_{заг} = \eta_d \cdot \eta_{тр} \cdot \eta_{гг} \cdot \eta_k,$$

де η_d – ККД головного двигуна; $\eta_{тр}$ – ККД трансмісії;
 $\eta_{гг}$ – ККД гребного гвинта;
 η_k – корпусний коефіцієнт.

Для типового річкового судна із застарілою СЕУ значення $\eta_{заг}$ рідко перевищує 0,25–0,30. При комплексній модернізації цей показник може бути підвищений до 0,38–0,45 [6].

Відповідно до вимог MARPOL 73/78 Annex VI та Резолюції МЕРС.333(76) [13] для оцінки енергоефективності у внутрішньому судноплаванні застосовується формула ІМО:

$$EEXI = P \cdot SFC \cdot CF / (Capacity \cdot \vartheta)$$

де P – потужність головних двигунів (кВт); $SFC = 190$ г/кВт·год – питома витрата палива;
 $CF = 3,114$ – коефіцієнт перетворення витрати палива у викиди CO_2 (т CO_2 /т палива);
 $Capacity = 10\,790$ т – дедвейт складу;
 $\vartheta = 5,4$ вузл – швидкість. Коефіцієнт EEXI судна з побудови ($P = 1544$ кВт) становить 15,7;
після модернізації ($P = 1880$ кВт) – 19,1.

Таким чином, коефіцієнт енергоефективності зріс в 1,22 раза.

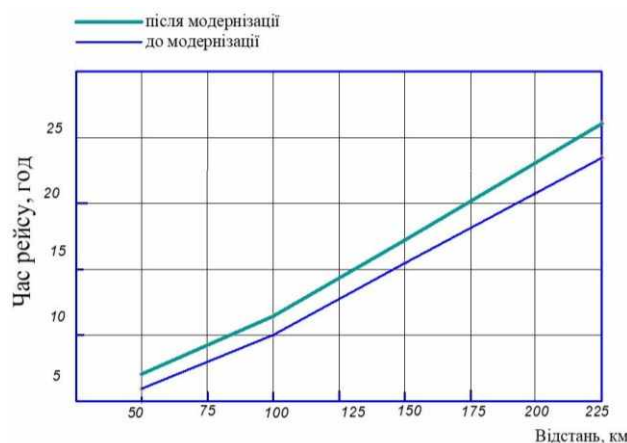


Рисунок 2 – Схема модернізованої енергетичної установки т/х «Капітан Антипов»

Таблиця 2 – Порівняння технічних характеристик до та після модернізації

Показник	До модернізації	Після модернізації
Витрати палива	Високі (застарілі ТНВД)	Низькі (електронне впорскування)
Масило	Високий угар	Мінімальні витрати
Екологічний клас	Нижче Stage I	Stage V (Euro 5)
Автоматизація	Постійна увага мотористів	Висока автоматизація

Напрями комплексної модернізації річкового флоту.

Гібридні та електричні пропульсивні системи. Сучасна класична гібридна пропульсивна система є інтегрованим комплексом, що включає дизельний двигун, гребний електродвигун, акумуляторну батарею та інтелектуальну систему управління енергетикою. Принцип її роботи ґрунтується на оптимальному розподілі навантаження між джерелами енергії залежно від поточних умов експлуатації: при маневруванні, русі на малих ходах або стоянці з працюючими споживачами основне навантаження перебирає електрична складова, тоді як дизельний двигун працює у найбільш економічному режимі або повністю відключається.

На типових річкових маршрутах із характерними зупинками, шлюзуванням та частими змінами режиму руху гібридні системи забезпечують економію палива в діапазоні 15–25% [7]. Це пояснюється тим, що дизельні двигуни на річкових судах традиційно значну частину ходового часу працюють при частковому навантаженні – в умовах зниженого ККД. Гібридна архітектура дозволяє уникнути цього недоліку, утримуючи двигун внутрішнього згоряння в діапазоні оптимального навантаження.

Baldauf та ін. [9] встановили, що акумуляторні системи здатні забезпечити від 35 до 70% пропульсивної енергії у більшості суден, залежно від профілю маршруту та конфігурації накопичувачів. Для малих пасажирських суден та поромів, які обслуговують короткі переправи з регулярними зупинками, повна електрифікація із середньою ємністю акумуляторних батарей близько 731 кВт·год є технічно та економічно обґрунтованою. Такі судна вже успішно експлуатуються в Норвегії, Нідерландах та інших країнах із розвинутою річковою та прибережною інфраструктурою. Ключовою умовою їх рентабельності є наявність інфраструктури берегового заряджання у портах і пристанях.

Оптимізація режимів роботи суднового дизеля. Одним із найдоступніших і водночас недооцінених резервів підвищення енергоефективності є оптимізація оперативних режимів експлуатації без будь-яких капіталовкладень у переобладнання. Оптимізація швидкості ходу та диференту судна — двох ключових параметрів, що визначають гідродинамічний опір, — дозволяє знизити питоме споживання палива на 8–15% [5]. Враховуючи кубічну залежність між швидкістю і потужністю, навіть незначне зменшення швидкості ходу суттєво скорочує витрату палива без помітного впливу на час рейсу.

Наступним кроком є автоматизація управління. Впровадження систем управління на основі алгоритмів машинного навчання для прогнозування споживання палива, планування рейсів та оптимізації режимів роботи головного двигуна дозволяє знизити сукупні операційні витрати на 10–20% [3]. Такі системи аналізують дані про поточні гідрологічні умови, вантажний стан судна, прогноз течії та рекомендують оптимальний профіль швидкості для кожного рейса.

Важливою складовою є також система моніторингу технічного стану обладнання [8]. Вона дозволяє своєчасно виявляти деградацію компонентів — знос форсунок, падіння компресії, забруднення теплообмінників — та оперативно усувати несправності до того, як вони призведуть до необґрунтованого зростання питомих витрат палива і позапланових простоїв.

Системи рекуперації відпрацьованого тепла. Термодинамічна недосконалість двигуна внутрішнього згоряння є однією з фундаментальних проблем сучасного суднового машинобудування. Дизельні двигуни перетворюють на механічну роботу лише 35–45% теплотворної здатності палива; решта 55–65% безповоротно розсіюється через випускні гази та систему охолодження у вигляді теплоти. Саме ця «втрачена» енергія є предметом технологій рекуперації відпрацьованого тепла.

Існує кілька підходів до її утилізації. Утилізаційні парові котли – найбільш проста і традиційна технологія – здатні забезпечити 5–8% теплоти від витраченого палива, яку можна спрямувати на опалення суднових приміщень, підігрів мазуту або вироблення гарячої води для побутових потреб. Системи органічного циклу Ренкіна (ORC) є більш складним, але й більш ефективним рішенням: вони генерують електроенергію з теплоти відпрацьованих газів з ефективністю 8–12%, знижуючи навантаження на основні генератори. Турбокомпаундні системи, у яких додаткова турбіна утилізує енергію вихлопних газів для механічного підсилення колінчастого валу, підвищують ефективність суднової енергетичної установки на 3–6% [6]. Поєднання кількох із зазначених технологій дозволяє суттєво наблизити загальний термічний ККД установки до теоретичної межі.

Гідродинамічна оптимізація та захист корпусу. Технічний стан підводної частини корпусу має прямий і значний вплив на паливну ефективність судна. Біологічне обростання підводної поверхні за 6 місяців експлуатації без очищення може збільшити опір тертя на 20–40%, що безпосередньо трансформується у відповідне зростання витрат палива. Боротьба з обростанням починається з правильного вибору захисних систем: застосування сучасних антифоулінгових покриттів нового покоління – зокрема самополірувальних і кремнійорганічних – знижує витрату палива на 3–8% порівняно із застарілими покриттями або їх відсутністю [10], а термін між плановими очищеннями при цьому суттєво зростає.

Паралельно з захистом поверхні важливою є оптимізація геометрії корпусу. Моделювання методами обчислювальної гідродинаміки (CFD) дозволяє виявити зони підвищеного хвильового опору та оптимізувати форму носової та кормової обводів, що зменшує хвильовий опір на 5–10% порівняно з вихідною конфігурацією. Не менш важливим є гвинтовий комплекс: підбір оптимального гребного гвинта у поєднанні з насадкою Корта, яка підвищує тягу завдяки ефекту спрямованого потоку, підвищує ККД гвинтового комплексу в цілому на 10–15%.

Цифровізація управління. Цифровізація суднового управління є не лише технологічним трендом, а й нормативною вимогою. Впровадження SEEMP (Ship Energy Efficiency Management Plan — Плану управління енергетичною ефективністю судна) є обов'язковою вимогою Міжнародної морської організації (ІМО) для суден валовою місткістю понад 400 GT та практичним інструментом систематичного зниження операційних витрат. SEEMP передбачає регулярний збір і аналіз даних про споживання палива, швидкість, завантаженість і метеоумови, що формує базу для прийняття обґрунтованих управлінських рішень.

Комплексна цифровізація системи управління у поєднанні з оптимізацією рейсів здатна знизити споживання палива на 10–20% [3] –при цьому не потребуючи будь-якої фізичної модернізації обладнання. Саме це робить цифровізацію найбільш економічно доступним першочерговим заходом, реалізація якого можлива в короткі терміни і з мінімальними початковими інвестиціями. Інтеграція інтелектуальних систем моніторингу, автоматичного збору та передачі даних, а також підтримки прийняття рішень на основі аналітики великих даних формує цифровий хребет сучасного енергоефективного судна.

Таблиця 3 – Оцінка потенціалу зниження питомого споживання палива від заходів модернізації

Захід модернізації	Зниження витрат, %
Гібридна пропульсія + акумуляторні системи	15–25 [7]
Оптимізація режиму роботи головного двигуна	8–15 [5]
Рекуперація відпрацьованого тепла	5–12 [6]
Оновлення захисних покриттів корпусу	3–8 [10]
Оптимізація гвинтового комплексу	10–15 [5]
Цифровізація (SEEMP, оптимізація рейсів)	10–20 [3]

Реалістична оцінка загального ефекту комплексної модернізації – підвищення загального ККД пропульсивного комплексу з 0,25–0,30 до 0,38–0,45 та зниження питомого споживання палива на 25–40% залежно від типу судна [6]. Для суден на Дунаї специфічні гідрологічні умови – змінні глибини від 1,5 до 6 м, значна різниця швидкостей течії – роблять особливо актуальними заходи з оптимізації режимів руху. Наявність розвиненої інфраструктури у портах Ізмаїл, Рені, Усть-Дунайськ створює передумови для впровадження гібридних систем із береговим заряджанням. З економічного погляду, при техніко-економічному обґрунтуванні проєктів варто застосовувати метод LCCA (Life Cycle Cost Analysis): термін окупності ремоторизації при поточному фрахті на Дунаї становить зазвичай 5–8 років.

Висновки. Проведене дослідження підтверджує, що комплексна модернізація річкового флоту є не лише технічно обґрунтованою, а й економічно доцільною стратегією підвищення конкурентоспроможності річкового транспорту в умовах зростаючих вимог до енергоефективності та екологічності.

На прикладі т/х «Капітан Антипов» — типового представника застарілого дунайського флоту — наочно продемонстровано практичний ефект від цілеспрямованої заміни рушійних систем. Ремоторизація судна дозволила зменшити питоме споживання палива на 20–25%, що в абсолютному вираженні означає суттєву щорічну економію операційних витрат. Не менш важливим є регуляторний аспект: коефіцієнт енергоефективності існуючих суден ЕЕХІ зріс із 15,7 до 19,1, тобто у 1,22 раза, що свідчить про принципове поліпшення відповідності судна сучасним міжнародним стандартам ІМО. Цей результат є практичним доказом того, що навіть без повної перебудови судна виважена технічна модернізація здатна вивести застаріле судно у відповідність із вимогами, що набувають чинності, та продовжити термін його комерційної експлуатації.

Систематизація та критичний аналіз наявних наукових даних дозволили визначити чотири найбільш перспективні й взаємодоповнювальні напрями модернізації річкових суден. По-перше, гібридна пропульсія з акумуляторними системами у поєднанні з оптимізацією режимів роботи головного двигуна забезпечує зниження питомого споживання палива на 20–35%. Ефективність цього підходу особливо висока на річкових маршрутах із частими змінами режиму ходу, шлюзуванням та тривалими стоянками, де традиційні дизельні установки працюють далеко від оптимального навантаження. По-друге, системи рекуперації відпрацьованого тепла дозволяють утилізувати 55–65% теплотворної здатності палива, що зазвичай безповоротно втрачається через вихлопні гази та систему охолодження, підвищуючи загальний ККД суднової енергетичної установки на 10–15%. По-третє, гідродинамічна оптимізація корпусу методами CFD у поєднанні із застосуванням сучасних антифоулінгових покриттів та вдосконаленням гвинтового комплексу дає сукупну додаткову економію палива у межах 5–12%, не потребуючи втручання в машинне відділення. По-четверте, цифрові системи управління на основі SEEMP знижують споживання палива на 10–20% виключно за рахунок оптимізації оперативних рішень — без будь-якої фізичної модернізації обладнання. Саме ця обставина робить цифровізацію найбільш доступним першочерговим заходом, реалізація якого можлива в найкоротші терміни і з мінімальними капіталовкладеннями.

Сукупний ефект від комплексного застосування всіх зазначених заходів є значно більшим, ніж проста сума окремих результатів, завдяки синергетичній взаємодії технологій. Комплексна модернізація здатна підвищити загальний ККД пропульсивного комплексу з 0,25–0,30 до 0,38–0,45

— тобто на 50–80% у відносному вираженні. Це принципово змінює економічну модель експлуатації судна, суттєво знижуючи залежність від коливань цін на паливо та посилюючи конкурентоспроможність річкового транспорту порівняно з автомобільним і залізничним у боротьбі за вантажопотоки. В умовах дунайського басейну, де специфічні гідрологічні умови і розвинена портова інфраструктура Ізмаїла, Рені та Усть-Дунайська формують унікальне операційне середовище, реалізація такого потенціалу набуває особливого стратегічного значення для відродження конкурентоспроможного річкового судноплавства.

ЛІТЕРАТУРА

1. Sustainable development of inland waterways transport: a review // *Journal of Shipping and Trade*. – 2024. – Vol. 9. – No. 1. DOI: 10.1186/s41072-023-00162-9.
2. Стратегічний план розвитку річкового транспорту на період до 2020 року / Міністерство інфраструктури України. – Режим доступу: <https://mtu.gov.ua/projects/40> (дата звернення: 15.02.2025).
3. Fan A., Wang J., He Y., Perčić M., Vladimir N., Yang L. Decarbonising inland ship power system: alternative solution and assessment method // *Energy*. – 2021. – Vol. 226. – Art. 120266. DOI: 10.1016/j.energy.2021.120266.
4. Nuchturee C., Li T., Xia H. Energy efficiency of integrated electric propulsion for ships – A review // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2020. – Vol. 134. – Art. 110145. DOI: 10.1016/j.rser.2020.110145.
5. Kalajdžić M., Vasilev M., Momčilović N. Inland waterway cargo vessel energy efficiency in operation // *Brodogradnja*. – 2023. – Vol. 74. – No. 3. – P. 71–89. DOI: 10.21278/brod74305.
6. Lion S., Vlaskos I., Taccani R. A review of emissions reduction technologies for low and medium speed marine Diesel engines and their potential for waste heat recovery // *Energy Conversion and Management*. – 2020. – Vol. 207. – Art. 112553. DOI: 10.1016/j.enconman.2020.112553.
7. Kolodziejcki M., Michalska-Pozoga I. Battery energy storage systems in ships' hybrid/electric propulsion systems // *Energies*. – 2023. – Vol. 16. – No. 3. – Art. 1122. DOI: 10.3390/en16031122.
8. Гончарук І. Методичні основи формування підсистеми моніторингу суднових технічних засобів у складі системи комплексного зниження енергетичних втрат торгових суден // *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*. – 2025. – Вип. 52. – С. 205–213. DOI: 10.31498/2225-6733.52.2025.351131.
9. Baldauf M., Mehdi R., Bauckholt T., Dethof A. Electrifying inland waterway transport – a case study for Germany // *Journal of Marine Science and Technology*. – 2025. DOI: 10.1080/09377255.2025.2469396.
10. Theodoropoulos P., Spandonidis C. Advances in innovative solutions for ship energy efficiency // *Journal of Marine Science and Engineering*. – 2025. – Vol. 13. – No. 11. – Art. 2103. DOI: 10.3390/jmse13112103.
11. ES-TRIN 2025/1. European Standard laying down Technical Requirements for Inland Navigation vessels. – Strasbourg: CCNR, 2025.
12. Регістр судноплавства України. Правила запобігання забрудненню з суден. Вимоги до обладнання і пристроїв суден щодо запобігання забрудненню атмосфери. – Київ: РСУ, 2024.

REFERENCES

1. Sustainable development of inland waterways transport: a review. (2024). *Journal of Shipping and Trade*, 9(1). <https://doi.org/10.1186/s41072-023-00162-9>
2. Ministerstvo infrastruktury Ukrainy. (2025, February 15). *Stratehichniy plan rozvytku richkovoho transportu na period do 2020 roku* [Strategic plan for the development of river transport for the period up to 2020]. <https://mtu.gov.ua/projects/40>
3. Fan, A., Wang, J., He, Y., Perčić, M., Vladimir, N., & Yang, L. (2021). Decarbonising inland ship power system: alternative solution and assessment method. *Energy*, 226, Art. 120266. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.120266>
4. Nuchturee, C., Li, T., & Xia, H. (2020). Energy efficiency of integrated electric propulsion for ships – A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 134, Art. 110145. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110145>
5. Kalajdžić, M., Vasilev, M., & Momčilović, N. (2023). Inland waterway cargo vessel energy efficiency in operation. *Brodogradnja*, 74(3), 71–89. <https://doi.org/10.21278/brod74305>
6. Lion, S., Vlaskos, I., & Taccani, R. (2020). A review of emissions reduction technologies for low and medium speed marine Diesel engines and their potential for waste heat recovery. *Energy Conversion and Management*, 207, Art. 112553. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.112553>
7. Kolodziejcki, M., & Michalska-Pozoga, I. (2023). Battery energy storage systems in ships' hybrid/electric propulsion systems. *Energies*, 16(3), Art. 1122. <https://doi.org/10.3390/en16031122>
8. Honcharuk, I. (2025). *Metodychni osnovy formuvannia pidsystemy monitorynhu sudnovykh tekhnichnykh zasobiv u skladi systemy kompleksnoho znyzhennia enerhetychnykh vtrat torhovykh suden* [Methodological foundations of forming a monitoring subsystem for ship technical means as part of a comprehensive energy loss reduction system for

merchant vessels]. Visnyk Pryazovskoho derzhavnoho tekhnichnoho universytetu. Serii: Tekhnichni nauky, 52, 205–213. <https://doi.org/10.31498/2225-6733.52.2025.351131> (in Ukrainian)

9. Baldauf, M., Mehdi, R., Bauckholt, T., & Dethof, A. (2025). Electrifying inland waterway transport – a case study for Germany. *Journal of Marine Science and Technology*. <https://doi.org/10.1080/09377255.2025.2469396>

10. Theodoropoulos, P., & Spandonidis, C. (2025). Advances in innovative solutions for ship energy efficiency. *Journal of Marine Science and Engineering*, 13(11), Art. 2103. <https://doi.org/10.3390/jmse13112103>

11. Central Commission for the Navigation of the Rhine (CCNR). (2025). ES-TRIN 2025/1: European Standard laying down Technical Requirements for Inland Navigation vessels. CCNR.

12. Rehrstr sudnoplavstva Ukrainy. (2024). Pravyla zapobihannia zabrudnenu z suden. Vymohy do obladnannia i prystriv suden shchodo zapobihannia zabrudnenu atmosfery [Rules for the Prevention of Pollution from Ships. Requirements for ship equipment regarding air pollution prevention]. RSU. (in Ukrainian)

Shyrkova O.A., Bazhak O.V.

MODERNIZATION OF THE RIVER FLEET: INCREASING THE ENERGY EFFICIENCY COEFFICIENT

Inland water transport is traditionally considered one of the most energy-efficient modes of freight transportation, with specific energy consumption 5–10 times lower than road transport and 2–5 times lower than rail. However, the technical condition of the Ukrainian river fleet remains critically low. Most vessels were built in the 1960s–1980s: the average age exceeds 35–40 years, and the depreciation rate of fixed assets reaches 80–85%. Outdated equipment causes increased fuel consumption and low efficiency of ship power plants (SPP), which, combined with tightening international regulations (EEXI, CII), makes fleet modernization an urgent strategic priority, particularly for vessels operating on the Danube. Using the practical modernization of the «Kapitan Antipov» vessel (PJSC «UDP», October 2024) as a case study, the paper analyzes the replacement of SGP Typ T112 SO main engines (2×772 kW) with Mitsubishi S12R-MPTAW (2×940 kW) and MWM diesel generators with Volvo Penta units (2×239 kW). The new engines comply with Stage V (Euro 5) standards, hold EU type-approval certificates under Regulation (EU) 2016/1628, and are equipped with an SCR system using AdBlue reagent, enabling full compliance on both the Danube and Rhine rivers. The EEXI coefficient increased from 15.7 to 19.1, a 1.22-fold improvement, while specific fuel consumption decreased by 12–15% through re-motorization alone. Four key areas of further comprehensive modernization are systematized: hybrid propulsion with battery systems (15–25% fuel savings); main engine operating mode optimization combined with SEEMP digital management (10–20%); waste heat recovery via ORC systems and exhaust boilers (5–12%); hydrodynamic hull optimization and antifouling coatings (3–8%). Comprehensive modernization can increase overall propulsion complex efficiency from 0.25–0.30 to 0.38–0.45 and reduce specific fuel consumption by 20–35%, with a payback period of 5–8 years at current Danube freight rates.

Keywords: *river fleet, modernization, energy efficiency, EEXI, hybrid propulsion, efficiency coefficient, inland water transport.*

Стаття прийнята 15.03.2026

© Гільдєєв Д.О., Онищенко С.П.

ФОРМУВАННЯ СИСТЕМ ДОСТАВКИ ВАНТАЖІВ З УРАХУВАННЯМ ВИКИДІВ

Метою даного дослідження є розробка концепції врахування викидів при формуванні та оптимізації систем доставки вантажів. Основна ідея полягає в тому, що при виборі варіанта системи доставки пропонується розглядати додатковий критерій - показник «сумарних викидів», який дозволяє би оцінити альтернативні варіанти системи доставки, яка відповідає певним експортним (імпортним) постачанням, що передбачають різні комбінації видів транспорту. Кожен рівень системи доставки та кожен її компонент впливає на величину викидів. Тобто йдеться про оцінку транспортуючих систем, що забезпечують доставку вантажів у межах певного проміжку часу, і є відносно постійною структурою. Розроблено концепцію врахування викидів при формуванні та оптимізації систем доставки вантажів. Згідно даній концепції варіювання технологією перевезень, географією пунктів (портів) перевалювання, складом транспортних та перевантажувальних засобів дозволить варіювати загальною величиною викидів при транспортуванні певної партії вантажу протягом певного періоду. Це дозволить формувати рішення щодо доставки в умовах досягнення балансу «витрати - викиди», що відповідає сучасним ідеологіям зеленої логістики та сталого розвитку. Запропонована концепція у подальшому має бути застосована при математичному моделюванні процесів формування та оптимізації систем доставки вантажів, складаючи відповідне теоретичне підґрунтя. На базі прогнозів щодо обсягів постачання для даної системи транспортування можуть бути зроблені оцінки за певний період, що дасть змогу побачити перспективу використання конкретного варіанту транспортування з точки зору впливу на довкілля та проаналізувати варіанти його мінімізації.

Ключові слова: викиди, сталий розвиток, зелена логістики, морські перевезення, контейнерні перевезення, технологія транспортування

Постановка проблеми. Останні десятиліття відбуваються стрімкі зміни в усіх галузях економіки, зокрема, і на транспорті. Трансформація сучасної системи поглядів на бізнес та технології відображає концепція сталого розвитку [1,2], яка у частині екологічної складовій перетинається з концепцією зеленої логістики. Тому сучасні тренди, у тому числі й у технологічних рішеннях на транспорті, спрямовані на зниження шкоди зовнішньому середовищу. Таким чином, зусилля сучасного прогресивного людства, що відображаються в глобальних трендах, спрямовані на поступову мінімізацію шкоди навколишньому середовищу від технологій у всіх сферах життєдіяльності людини.

Слід зазначити, що на міжнародному рівні в рамках відповідних організацій розробляються документи, що регламентують ті чи інші умови функціонування різних виробничих/технологічних об'єктів з погляду шкоди навколишньому середовищу. Зокрема, ІМО за останні десятиліття розробило значну кількість нормативних документів щодо мінімізації викидів, пов'язаних з морським транспортом. Але будь-який транспортний засіб, що відповідає всім сучасним вимогам з погляду шкоди зовнішньому середовищу, працює у певній системі, і, як правило, значна частка транспортувань здійснюється з використанням комбінації різних видів транспорту. Безумовно, це на 100% відноситься до морського та річкового транспорту, які завжди працюють у системі доставки, щонайменше передбачає використання двох сухопутних ділянок – до порту і від порту – або автомобільним, або залізничним транспортом. Деякі системи транспортування, що пов'язані з експортом продукції, можуть включати не лише сухопутні ділянки, а й комбінації «морське перевезення» плюс «річкове перевезення». Таким прикладом може бути доставка експортного зерна з України з використанням транспортування «автоперевезення»/«залізничне перевезення» - «річкове перевезення по Дніпру» - «морське перевезення»-«автоперевезення»/«залізничне перевезення». Як правило, основним критерієм

при формуванні зазначених систем транспортування є сумарні витрати, мінімізація яких сприяє максимізації прибутку експортерів та виробників. Але, у відповідності до сучасних глобальних трендів, слід оцінювати дані системи транспортування також і з точки зору впливу на навколишнє середовище. Таким чином, виникає проблема оцінки та оптимізації негативного впливу на довкілля систем доставки вантажів.

Аналіз літератури. Якщо раніше важливим аспектом транспортування була його вартість, то, з урахуванням розвитку ідей логістики, з'явилися комплексні вимоги – час, вартість, надійність. Тому вантажовласники формували вже систему умов при виборі варіанта доставки з багатьох альтернатив, балансуючи в рамках залежності «час – надійність–вартість» [3,4]. Сьогодні, в умовах поширення ідеології сталого розвитку та усвідомленого ставлення бізнесу до навколишнього середовища, транспортування отримує новий критерій, який доповнює існуючу систему, а саме, «CO₂ викиди».

У сучасних публікаціях значну увагу присвячено питанням мінімізації викидів CO₂ у транспортній сфері, але, як правило, йдеться безпосередньо, про транспортні засоби – морські судна, наприклад, або автотранспорт. У відповідності до концепцій зеленої логістики та зеленого судноплавства в сучасних публікаціях розглядаються різні технологічні рішення для мінімізації негативного впливу транспортного засобу на довкілля [5,6].

Проте лише незначна частина сучасних досліджень присвячена питанням врахування викидів CO₂ при доставці вантажів з погляду вантажовласника або організатора доставки на усю систему, що передбачає оцінку негативного впливу на довкілля всіх елементів доставки - транспортних та перевантажувальних засобів, задіяних у транспортному процесі. Винятками є публікації [7,8]. Наприклад, в [7] досліджується визначення розташування розподільчого складу для торгової мережі таким чином, щоб викиди CO₂ автотранспорту, задіяного в обслуговуванні даної системи розподілу, були мінімальними. Таким чином, можна простежити зміщення акцентів у дослідженнях, пов'язаних з питаннями транспорту та логістики, – від мінімізації витрат та відстаней – до мінімізації негативного впливу на довкілля. Отже, залишаються відкритими питання дослідження негативного впливу та викидів CO₂ в рамках систем доставки, що передбачають, наприклад, інтермодальне або змішане перевезення. Якщо в системах доставки, пов'язаних тільки з автотранспортом, що, власне, і розглядалося в окремих дослідженнях, основний акцент робиться на маршрутизації та оптимізації швидкості для мінімізації викидів (наприклад, у [8]), то для змішаних та інтермодальних перевезень виникає варіативність не тільки в маршрутах, але і в схемах доставки (з урахуванням варіації портів перевалки), кількості морських ділянок у видах транспорту (автотранспорт - залізничний транспорт) на сухопутній ділянці. У роботах [3,4] розглядалися питання оптимізації подібних систем доставки з урахуванням часу, витрат та надійності. Класичним підходом у таких задачах є вибір одного з критеріїв як головного, який і відіграє роль критерію оптимізації, а інші критерії використовуються як обмеження. У [3] крім варіації схемами доставки та видами транспорту, також розглядалися альтернативні варіанти перевізників на кожній ділянці схем, що дозволяло комплексно оптимізувати різні структури, які пов'язані з системою доставки, - топологією доставки (набором географічних ділянок доставки), видами транспортних засобів, складом учасників. Слід зазначити, що роботи [3,4] пов'язані з мультимодальною доставкою, але це передбачає відсутність варіації технологією перевезення, оскільки апріорі використовується контейнерна транспортно-технологічна система. Однак, при вирішенні подібних питань з іншими категоріями вантажів (наприклад, зерна чи металу), у деяких ситуаціях виникає і можливість варіації технологічними рішеннями. Зокрема, у [9] представлена система можливих рішень в рамках варіації технологіями перевезення з використанням водного транспорту.

Таким чином, на базі аналізу сучасних практичних викликів транспортного ринку та теоретичної бази оптимізації систем доставки вантажів, виявлено певне протиріччя, що обґрунтовує необхідність усунення цієї суперечності шляхом дослідження питань оптимізації систем доставки вантажів з урахуванням їхнього негативного впливу на навколишнє середовище у комплексі від традиційними критеріями до транспортуючих систем.

Метою дослідження є розробка концепції врахування викидів при формуванні та оптимізації систем доставки вантажів.

Основні результати дослідження. Основна ідея цього дослідження полягає в тому, що при виборі варіанта системи доставки пропонується розглядати додатковий критерій - показник «сумарних викидів», який дозволяв би оцінити альтернативні варіанти системи доставки, яка відповідає певним експортним (імпортним) постачанням, що передбачають різні комбінації видів транспорту. Тобто йдеться про оцінку транспортуючих систем, що забезпечують доставку вантажів у межах певного проміжку часу, і є відносно постійною структурою, як це зазначено у [10]. Таким чином, при прийнятті рішень щодо вибору найбільш ефективного варіанта системи доставки виникає можливість урахування не тільки економічних факторів, а й впливу цього варіанту на навколишнє середовище, а це дає можливість приймати рішення, забезпечуючи баланс «ефективність економічна» - «ефективність екологічна». Такий підхід відповідає концепції зеленої логістики [11].

Сумарні викиди системи доставки є інтегральним показником, який враховує всі технологічні ланцюжки та всі транспортні та перевантажувальні засоби, що задіяні у транспортуванні цією системою заданої партії вантажу Q (т). Більше того, на базі прогнозів щодо постачання Q для даної системи транспортування можуть бути зроблені оцінки за певний період (наприклад, п'ять і більше років), що дасть змогу побачити перспективу використання конкретного варіанту транспортування з точки зору впливу на довкілля та проаналізувати варіанти його мінімізації.

Слід зазначити, що з усього різноманіття шкідливих викидів саме CO_2 слід прийняти в якості критерію, з урахуванням того, що більшість нормативних документів національного та міжнародного рівнів пов'язані саме з ними. Надалі, не обмежуючи загальності, розглядатимемо варіант одного виду викидів, що при необхідності може бути поширене на будь-яку множину шкідливих речовин. Отже, позначимо сумарні викиди CO_2 системи доставки:

$$E(Q), \quad (1)$$

де, Q – обсяг постачань в рамках заданого часового періоду (в тоннах або в TEU).

Слід зазначити, що система доставки характеризується [10]:

- 1) географічним розташуванням пунктів відправлення, призначення та перевалки – топологія системи;
- 2) операціями транспортно-технологічного процесу відповідно до обраної технології транспортування;
- 3) складом транспортних та перевантажувальних засобів відповідно до операцій транспортно-технологічного процесу;
- 4) складом конкретних учасників, тобто підприємств, які здійснюють операції транспортно-технологічного процесу.

Кожен рівень системи доставки та кожен її компонент впливає на величину викидів. Наприклад, дистанція перевезення між пунктами визначає необхідний час перевезення, що впливає на кількість викидів на цій ділянці. Транспортний засіб конкретного перевізника має певну специфіку в контексті викидів, наприклад, однакового дедвейту та спеціалізації судна можуть використовувати різні види палива, відповідно, рівень їх викидів відрізняється.

Інший важливий аспект для системи доставки – її межі. У [3] для різних систем доставок з використанням водного транспорту представлені варіанти меж системи залежно від транспортних умов контракту. Наприклад, якщо йдеться про експортні поставки на умовах CIF, то межі системи включають морське перевезення, якщо на умовах FOB – то система закінчується в портах відправлення. Звичайно, в ідеальному варіанті для оптимізації викидів системи доставки, пов'язаної з певними постачаннями, слід розглядати повну систему – від пунктів зародження постачання до кінцевого споживача – ланцюга постачання в цілому. Але, зазвичай, така всеохоплююча система доставки пов'язана з кількома незалежними суб'єктами, кожен із яких відповідає і контролює лише власну частину і не може впливати на рішення інших учасників (рис.1).

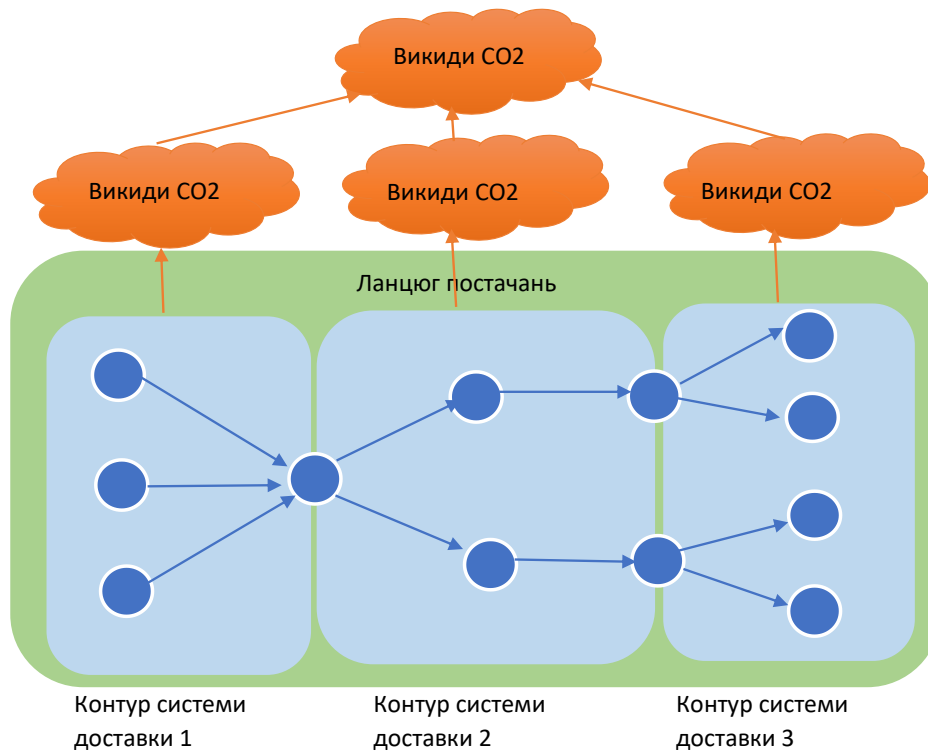


Рисунок 1 - Системи доставки, що пов'язані з ланцюгом постачань

Таким чином, для систем транспортування, що відповідають ланцюгам постачань, кількість пунктів відправлення, перевантаження та призначення значно більша, з урахуванням специфіки ланцюгів поставки. Системи транспортування, що відповідають експортним (імпортним) постачанням, по суті є частиною подібних систем для ланцюгів постачання. Різниця формується за рахунок «меж», що розглядаються. Наприклад, можна розглянути всю логістику зерна – доставка врожаю до польових елеваторів, далі портових зернових терміналів, і далі перевезення морем до порту країни-імпортера. Також можна розглянути варіант «менших» меж - від польових елеваторів. Варіант розгляду залежить від меж відповідальності – мається на увазі відповідальність конкретного суб'єкта, який приймає рішення: якщо йдеться про експортера, який купує зерно у виробника – для нього «межі» системи, що розглядається, менше; якщо йдеться про виробника, який і є експортером – для нього «кордони» ширші та охоплюють усю представлену вище систему.

На рис.2 межі експортних постачань починаються з річкового порту і закінчуються морським перевезенням, межі ланцюгів постачань починаються від складів у пунктах зародження вантажів. Природно, що дан є лише одним із узагальнених варіантів для демонстрації висловлених ідей.

Як відомо, кожен транспортний засіб викидає в навколишнє середовище цілий спектр шкідливих речовин. Для кожного виду транспорту та типу транспортного засобу існують відповідні розрахункові формули для встановлення розміру (обсягів) цих викидів. Крім того, аналогічні формули розглядаються і для перевантажувального обладнання, зокрема, [12] проведені порівняльні дослідження викиду CO₂ для різного обладнання контейнерних терміналів.

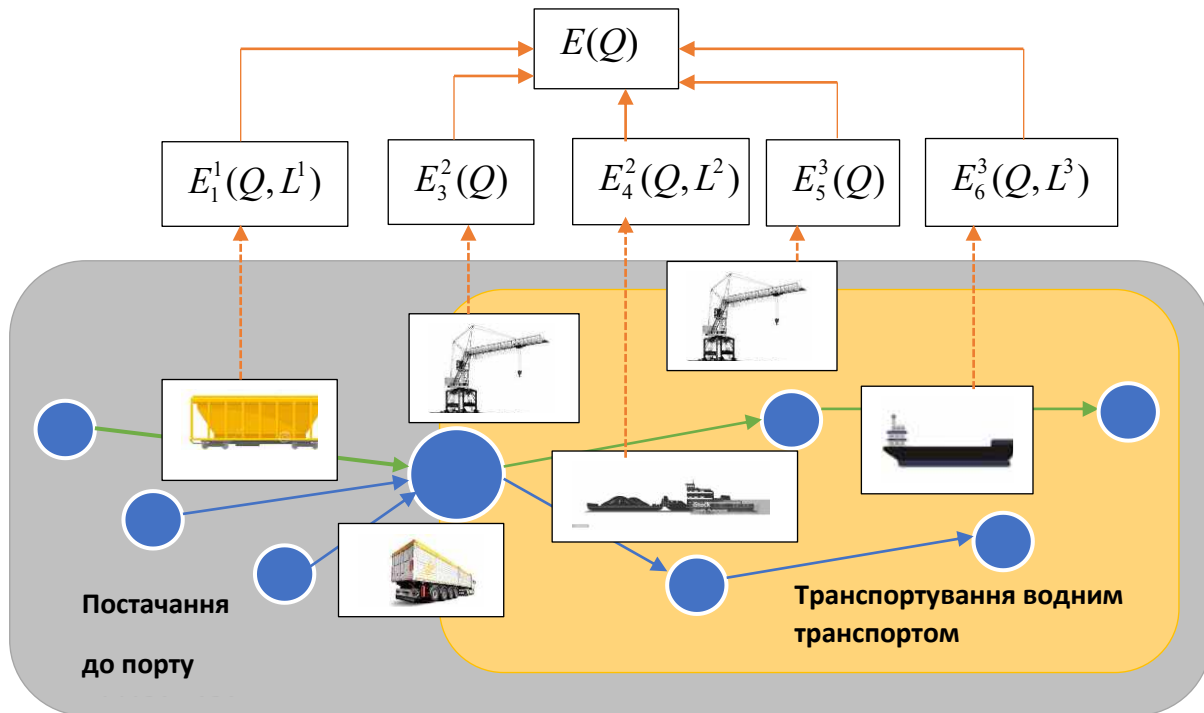


Рисунок 2 - Приклад системи доставки з використанням водного транспорту, яка відповідає експортним поставкам

Існуючі формули оцінки викидів транспортних засобів і перевантажувального обладнання враховують основні параметри, що впливають, і, перш за все, тип двигуна (його потужність). Для морських суден відповідна формула складніша і враховує три компоненти – основний двигун, допоміжний та бойлер, а також співвідношення експлуатаційної та паспортної (максимальної) швидкості [7]. У будь-якому випадку, для кожного задіяного транспортного та технологічного (перевантажувального) елемента в системі транспортування, залежно від конкретного типу та моделі (для автомобілів), а також «середньостатистичного» режиму роботи (з точки зору швидкості, наприклад), можуть бути встановлені обсяги викидів в одиницю часу. Час роботи кожного елемента залежить від обсягу поставок Q , а також відстань перевезень (для транспортних засобів).

Отже, розглянемо найбільш загальні параметри, що впливають - Q обсяг поставок і відстані перевезення L , яке враховується, природно, тільки для транспортних засобів.

Таким чином, кожному транспортному засобу системи доставки відповідає обсяг викидів:

$$E_k^j(Q, L^j), j = \overline{1, m}, k \in \Omega_j; \tag{2}$$

перевантажувальному обладнанню відповідає обсяг викидів:

$$E_g^j(Q), j = \overline{1, m}, g \in \Psi_j, \tag{3}$$

де m - кількість ділянок у системі;

Ω_j - множина транспортних засобів;

Ψ_j - множина перевантажувальних засобів, що у технологічному процесі ділянці $j = \overline{1, m}$, L^j - відстань перевезення на ділянці.

Формули оцінки викидів, що традиційно використовуються, з урахуванням усередненої швидкості та відстані перевезення для транспортних засобів, можуть бути трансформовані у вигляд (3). Для перевантажувального обладнання аналогічна трансформація у вигляд (4) може бути здійснена з урахуванням продуктивності та кількості вантажу.

На рис.2 для однієї гілки ланцюгів поставок представлені відповідні викиди кожного задіяного елемента на трьох ділянках – залізничного та автомобільного перевезення ($j=1$), річкового перевезення ($j=2$), морського перевезення ($j=3$). Види транспортних засобів: $k = 1$ - вагони-зерновози, $k = 2$ - автомобілі-зерновози, $k = 3$ - перевантажувальне обладнання в річковому порту, $k = 4$ - річкові баржі, $k = 5$ - перевантажувальне обладнання в морському порту, $k = 6$ - морське судно. Сумарні викиди для системи (її частини на рис. 2) формуються як сума викидів задіяних транспортних (технологічних) елементів.

У загальному випадку сумарні викиди становлять:

$$E(Q) = \sum_{j=1}^m \left(\sum_{k \in \Omega_j} E_k^j(Q, L^j) + \sum_{g \in \Psi_j} E_g^j(Q) \right). \quad (4)$$

Дана формула (4) дозволяє оцінити сумарний обсяг викидів для системи доставки будь-якої конфігурації, що надалі може бути використане для вирішення задачі оптимізації даної системи з урахуванням балансу «витрати»-«викиди».

Таким чином, в процесах формування та оптимізації систем доставки слід прийняти до увази додатковий критерій – загальні викиди згідно (4) у відповідності до структури системи. Варіювання географічним розташуванням елементів схем доставки, які відповідають даній системі, а також технологій транспортування та транспортними засобами дозволить створити альтернативні варіанти системи доставки, які відрізняються не тільки загальними витратами, а також й загальними викидами. Отже, при побудові відповідних оптимізаційних моделей слід враховувати $E(Q)$.

Висновки. У даному дослідженні запропонована концепція врахування викидів при формуванні та оптимізації систем доставок вантажів. Згідно даній концепції варіювання технологією перевезень, географією пунктів (портів) перевалювання, складом транспортних та перевантажувальних засобів дозволить варіювати загальною величиною викидів прим транспортуванні певної партії вантажу протягом певного періоду. Отже, досягнення певного балансу «витрати - викиди» відповідає сучасним ідеологіям зеленої логістики та сталого розвитку, що сьогодні є необхідним при відповідальному відношенні людства та бізнесу до навколишнього середовища.

Запропонована концепція у подальшому має бути застосована при математичному моделюванні процесів формування та оптимізації систем доставки вантажів, складаючи відповідне теоретичне підґрунтя.

ЛІТЕРАТУРА

1. Zampori L., Pant, R. Suggestions for updating the Product Environmental Footprint (PEF) method, EUR 29682 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg. 2019. 00654-1. DOI: 10.2760/424613.
2. Sala S., Benini L., Castellani V., Vidal Legaz B., De Laurentiis V., Pant R. Suggestions for the update of the Environmental Footprint Life Cycle Impact Assessment. Impacts due to resource use, water use, land use, and particulate matter, EUR 28636 EN. Publications Office of the European Union, Luxembourg. 2019. DOI:10.2760/78072.
3. Берестенко В.В, Онищенко С.П. Ймовірнісні характеристики мультимодальної доставки. *Розвиток транспорту*. 2021. 1(12). С. 118-128. DOI:10.33082/td.2022.1-12.10
4. Berestenko V., Onyshchenko S. Defining compromise area in the processes of multimodal delivery organization within the agile approach. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2024. 1(3 (127)). P. 78–86. DOI: 10.15587/1729-4061.2024.298846
5. Melnyk O., Bulgakov M., Fomin O., Onyshchenko S., Onishchenko O., Pulyaev I. Sustainable development of renewable energy in shipping: technological and environmental prospects. *Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport*. 2025. № 127. P. 165-188. DOI: 10.20858/sjsutst.2025.127.10
6. Melnyk O., Onishchenko O., Onyshchenko S. Renewable Energy Concept Development and Application in Shipping Industry. *Lex Portus*. 2023. № 9(6) P. 15–24. DOI: 10.26886/2524-101X.9.6.2023.2
7. Dukkanci Okan, Kara, Bahar, Bektas, Tolga. The Green Location-Routing Problem. *Computers & Operations Research*. 2019. 105. DOI: 10.1016/j.cor.2019.01.011.
8. Wang Ying, Duan Jicong, Sun Jiajun, Zhang Qin, Ye Taofeng. A Green Vehicle Routing Problem with Time-Varying Speeds and Joint Distribution. *Sustainability*. 2025. 17. 7515. DOI: 10.3390/su17167515.

9. Rusanova S., Onyshchenko S. Development of Transport and Technological Process Options' Concept for Goods Delivery with Participation of Maritime Transport. *Technology audit and production reserves*. 2020. 1 (2 (51)), 24-29. DOI: 10.15587/2312-8372.2020.198373
10. Берестенко В.В., Онищенко С.П. Структура й характеристики мультимодальної доставки з позиції цифровізації. *Розвиток транспорту*. 2022. (4(11)). 82-93. DOI: 10.33082/td.2021.4-11.08
11. Букреєва Д., Коваленко Т., Манукян А. «Зелені» стратегії для сталого розвитку підприємства та підвищення ефективності його діяльності. *Економіка та суспільство*. 2023. № 56. DOI: 10.32782/2524-0072/2023-56-121
12. Budiyo M.A., Huzairi, M.H., Sirait, S.J. et al. Evaluation of CO2 emissions and energy use with different container terminal layouts. *Scientific Reports*. 2021. 5476 DOI: 10.1038/s41598-021-84958-4

REFERENCES

1. Zampori L., Pant, R. Suggestions for updating the Product Environmental Footprint (PEF) method, EUR 29682 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg. 2019. 00654-1. DOI: 10.2760/424613.
2. Sala S., Benini L., Castellani V., Vidal Legaz B., De Laurentiis V., Pant R. Suggestions for the update of the Environmental Footprint Life Cycle Impact Assessment. Impacts due to resource use, water use, land use, and particulate matter, EUR 28636 EN. Publications Office of the European Union, Luxembourg. 2019. DOI:10.2760/78072.
3. Berestenko, V.V., & Onyshchenko, S.P. (2021) Ymovirnisni kharakterystyky mul'tymodal'noyi dostavky [Probabilistic characteristics of multimodal delivery]. *Rozvytok transportu - Transport Development*, 1(12), 118-128. <https://doi.org/10.33082/td.2022.1-12.10> [in Ukrainian]
4. Berestenko V., Onyshchenko S. Defining compromise area in the processes of multimodal delivery organization within the agile approach. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2024. 1(3 (127)). P. 78–86. DOI: 10.15587/1729-4061.2024.298846
5. Melnyk O., Bulgakov M., Fomin O., Onyshchenko S., Onishchenko O., Pulyaev I. Sustainable development of renewable energy in shipping: technological and environmental prospects. *Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport*. 2025. № 127. P. 165-188. DOI: 10.20858/sjsutst.2025.127.10
6. Melnyk O., Onishchenko O., Onyshchenko S. Renewable Energy Concept Development and Application in Shipping Industry. *Lex Portus*. 2023. № 9(6) P. 15–24. DOI: 10.26886/2524-101X.9.6.2023.2
7. Dukkanci Okan, Kara, Bahar, Bektas, Tolga. The Green Location-Routing Problem. *Computers & Operations Research*. 2019. 105. DOI: 10.1016/j.cor.2019.01.011.
8. Wang Ying, Duan Jicong, Sun Jiajun, Zhang Qin, Ye Taofeng. A Green Vehicle Routing Problem with Time-Varying Speeds and Joint Distribution. *Sustainability*. 2025. 17. 7515. DOI: 10.3390/su17167515.
9. Rusanova S., Onyshchenko S. Development of Transport and Technological Process Options' Concept for Goods Delivery with Participation of Maritime Transport. *Technology audit and production reserves*. 2020. 1 (2 (51)), 24-29. DOI: 10.15587/2312-8372.2020.198373
10. Berestenko, V.V., & Onyshchenko, S.P. (2022) Struktura y kharakterystyky mul'tymodal'noyi dostavky z pozytsiyi tsyfrovizatsiyi [Structure and characteristics of multimodal delivery from the perspective of digitalization] *Rozvytok transportu - Transport Development*, (4(11)), 82-93. <https://doi.org/10.33082/td.2021.4-11.08> [in Ukrainian]
11. Bukreeva D., Kovalenko T., Manukyan A. (2023) "Green" strategies for sustainable development of the enterprise and increasing the efficiency of its activities [«Zeleni» stratehiyi dlya staloho rozvytku pidpryyemstva ta pidvyshchennya efektyvnosti yoho diyal'nosti]. *Ekonomika ta suspil'stvo – Economy and Society* 56. <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2023-56-121> [in Ukrainian]
12. Budiyo M.A., Huzairi, M.H., Sirait, S.J. et al. Evaluation of CO2 emissions and energy use with different container terminal layouts. *Scientific Reports*. 2021. 5476 DOI: 10.1038/s41598-021-84958-4

Gildeev D.O., Onyshchenko S.P.

FORMING EMISSION-EXCESSIVE DELIVERY SYSTEMS

The purpose of this study is to develop a concept for taking emissions into account when forming and optimizing cargo delivery systems. The main idea is that when choosing a delivery system option, it is proposed to consider an additional criterion - the "total emissions" indicator, which would allow evaluating alternative delivery system options that correspond to certain export (import) deliveries that involve different combinations of transport modes. Each level of the delivery system and each of its components affects the amount of emissions. That is, we are talking about an assessment of transportation systems that ensure the delivery of goods within a certain period of time and are a relatively constant structure. A concept for taking emissions into account when forming and optimizing cargo delivery systems has been developed. According to this concept, varying

transportation technology, geography of transfer points (ports), composition of transport and transshipment vehicles will allow varying the total amount of emissions when transporting a certain batch of cargo during a certain period. This will allow to form decisions on delivery in the conditions of achieving a balance of "costs - emissions", which corresponds to modern ideologies of green logistics and sustainable development. The proposed concept should be further applied in mathematical modelling of the processes of formation and optimization of cargo delivery systems, forming an appropriate theoretical basis. Based on forecasts of supply volumes for a given transportation system, estimates can be made for a certain period, which will allow to see the prospects of using a specific transportation option from the point of view of environmental impact and to analyse options for its minimization.

Keywords: *emissions, sustainable development, green logistics, maritime transportation, transportation technology, container transportation,*

Стаття прийнята 19.01.2026

© Щенявський Г.С., Мельник О.М.

АДАПТИВНЕ ОЦІНЮВАННЯ РИЗИКУ СУДНА В РЕЖИМІ РЕАЛЬНОГО ЧАСУ НА ОСНОВІ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОГО МОНІТОРИНГУ ТА ЦИФРОВОГО ДВІЙНИКА

У статті розглянуто проблему забезпечення експлуатаційної безпеки судна в умовах зростаючої динамічності морського середовища, цифровізації та підвищення рівня невизначеності. Показано, що традиційні підходи до оцінювання ризику, засновані на статичних сценаріях, не забезпечують необхідної адаптивності та своєчасності прийняття рішень у реальному часі. Обґрунтовано доцільність переходу до інтегрованих моделей, що поєднують смарт-моніторинг, цифрові двійники та методи інтелектуального аналізу даних. Запропоновано математичну модель адаптивного оцінювання ризику судна, яка базується на інтеграції потокових даних сенсорних систем, AIS, параметрів зовнішнього середовища та прогнозів цифрового двійника. Модель реалізує замкнений цикл «дані – оцінка – прогноз – рішення» та забезпечує формування інтегрального показника ризику з урахуванням багатокритеріальних факторів, їх вагомості та динаміки зміни у часі. У роботі використано метод аналізу ієрархій (АНР) для визначення вагових коефіцієнтів факторів ризику, FMEA-підхід для оцінювання критичності відмов, а також байєсівське оновлення для адаптації ймовірностей ризикових подій на основі нових даних. Запропонований інтегральний показник ризику враховує як поточний стан судна, так і прогнозні оцінки розвитку ситуації, що забезпечує проактивний характер управління безпекою. Результати моделювання підтверджують, що запропонована адаптивна модель дозволяє знизити пікові значення ризику, скоротити час реагування на небезпечні ситуації та підвищити відновлювальну здатність системи порівняно зі статичними підходами. Практична значущість дослідження полягає у можливості інтеграції моделі в системи підтримки прийняття рішень, інтегровані мостикові системи та цифрові платформи управління судном, а отримані результати створюють основу для подальшого розвитку інтелектуальних систем забезпечення експлуатаційної безпеки суден.

Ключові слова: морський транспорт, експлуатаційна безпека судна; адаптивне оцінювання ризику; смарт-моніторинг; цифровий двійник; управління ризиками; системи підтримки прийняття рішень; морські кіберфізичні системи.

Постановка проблеми. Розвиток автономного судноплавства, інтеграція інформаційно-комунікаційних технологій та впровадження концепції «розумного судна» (smart ship) зумовлюють необхідність переосмислення підходів до забезпечення експлуатаційної безпеки.

Традиційні методи оцінювання безпеки, що базуються на статичних сценаріях і детермінованих припущеннях, виявляються недостатньо ефективними в умовах невизначеності, змінності навігаційного середовища та впливу кіберфізичних загроз. Зокрема, вони не забезпечують можливості оперативної переоцінки ризику в реальному часі на основі актуальних даних про стан судна, зовнішнє середовище та функціонування його підсистем.

У зв'язку з цим особливої актуальності набуває використання технологій смарт-моніторингу, що забезпечують безперервний збір, обробку та аналіз даних із сенсорних систем, AIS, навігаційних засобів і цифрових платформ. Інтеграція таких даних у моделі оцінювання ризику відкриває можливість переходу від реактивного до проактивного управління безпекою судна.

Разом з тим, існуючі наукові підходи здебільшого розглядають методи оцінювання ризику, моделі надійності або системи підтримки прийняття рішень ізольовано, без їх повної інтеграції з потоковими даними смарт-моніторингу. Це обмежує можливість створення адаптивних систем забезпечення експлуатаційної безпеки, здатних функціонувати в режимі реального часу.

Аналіз літератури. Сучасні підходи до забезпечення безпеки судна базуються на переході від періодичного контролю до адаптивного оцінювання ризику в реальному часі, де ключову роль відіграє цифровий двійник як інтегратор даних, моделей і алгоритмів прогнозування [1-4, 9]. У морській сфері це дозволяє формувати динамічний ризиковий профіль судна з урахуванням технічного стану, режимів експлуатації та впливу зовнішнього середовища.

Дослідження показують, що цифрові двійники ефективні як прогностичні платформи, здатні адаптивно оновлювати моделі на основі потокових даних і підвищувати точність оцінки небезпек [1, 3, 4]. Зокрема, підходи на основі злиття даних з багатьох джерел забезпечують динамічну оцінку стану судового обладнання та створюють основу для ризик-орієнтованого управління [2]. Поєднання цифрового двійника з методами штучного інтелекту дозволяє здійснювати моніторинг технічного стану та раннє виявлення відхилень у реальному часі [6, 7].

Важливим аспектом є інтеграція людського фактору у моделі ризику. Темпоральне поєднання фізичного об'єкта, цифрового двійника та поведінкових характеристик оператора дозволяє враховувати когнітивні та операційні ризики, що суттєво впливають на безпеку судноплавства [8], що формує передумови для комплексного оцінювання ризику як функції технічних і поведінкових параметрів.

Методологічно перспективними є гібридні та багатомасштабні цифрові двійники, які поєднують фізичні моделі, сенсорні дані та машинне навчання, забезпечуючи адаптацію до невизначеності та змін умов експлуатації [5, 9]. Подібні підходи широко застосовуються у промисловості, енергетиці та авіації для онлайн-моніторингу, прогнозування та підвищення надійності систем [10-15].

Таким чином, адаптивне оцінювання ризику судна повинно реалізовуватися як замкнений цикл «дані - цифровий двійник - прогноз - рішення», де інтелектуальний моніторинг забезпечує своєчасне виявлення відхилень, а цифровий двійник - їх інтерпретацію та прогнозування в режимі реального часу.

Мета статті. Метою дослідження є розроблення інтегрованої моделі забезпечення експлуатаційної безпеки судна на основі використання технологій смарт-моніторингу, яка забезпечує адаптивну оцінку та мінімізацію ризику в режимі реального часу.

Для досягнення поставленої мети передбачено вирішення таких завдань: проаналізувати сучасні підходи до забезпечення експлуатаційної безпеки суден і визначити їх обмеження в динамічному середовищі; обґрунтувати інтеграцію технологій смарт-моніторингу в процес оцінювання ризику; розробити структуру інтегрованої моделі, що поєднує АНР, FMEA, байєсівське оновлення, DSS та дані сенсорних систем; сформулювати математичний апарат адаптивного ризик-оцінювання на основі потокових даних; запропонувати інтегральний показник динамічного ризику; виконати сценарне моделювання та оцінити ефективність підходу; обґрунтувати його практичну придатність для систем підтримки прийняття рішень у судоводінні.

Основна частина.

1. Морські транспортні системи як багаторівневі кіберфізичні середовища

Зростання складності морських транспортних систем, які трансформуються у багаторівневі кіберфізичні середовища, зумовлює необхідність перегляду підходів до забезпечення експлуатаційної безпеки суден. Одночасно підвищується роль операційної невизначеності, обумовленої впливом таких чинників, як гідрометеорологічні фактори, людський чинник та кіберзагрози, що ускладнює забезпечення стабільності процесу й безпеки експлуатації суден. Традиційні підходи до оцінювання ризику, орієнтовані на статичні або періодичні процедури аналізу, не забезпечують необхідної адаптивності в умовах динамічного навігаційного середовища.

Поряд із розвитком інноваційних технологій, зокрема IoT, AIS та цифрових двійників, формуються нові можливості для безперервного збору та обробки даних, однак відсутність інтегрованих методичних рішень стримує їх ефективне використання. За таких умов виникає наукова та прикладна потреба у розробленні методів забезпечення експлуатаційної безпеки судна, заснованих на інтеграції смарт-моніторингу та адаптивного ризик-орієнтованого моделювання.

2. Математична модель адаптивного оцінювання ризику судна

2.1. Загальна постановка задачі

У межах даного дослідження експлуатаційна безпека судна розглядається як функція динамічного рівня ризику, що формується під впливом технічних, навігаційних, інформаційних та людських факторів у змінному середовищі.

На відміну від традиційних підходів, у яких ризик оцінюється на основі фіксованих сценаріїв, запропонована модель передбачає його адаптивне оновлення в режимі реального часу на основі даних смарт-моніторингу та цифрового двійника судна.

Формально система описується як:

$$R(t) = f(X(t), E(t), S(t), D(t)), \quad (1)$$

де, $R(t)$ - інтегральний рівень експлуатаційного ризику;

$X(t)$ - вектор стану судна;

$E(t)$ - параметри зовнішнього середовища;

$S(t)$ - дані смарт-моніторингу;

$D(t)$ - дані цифрового двійника.

2.2. Формування вхідного інформаційного простору

Вектор стану системи формується як:

$$X(t) = \{x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t)\}, \quad (2)$$

де елементи включають:

- навігаційні параметри (курс, швидкість);
- технічні параметри систем;
- показники функціонування обладнання;
- індикатори людського фактору.

Дані смарт-моніторингу визначаються як потоковий набір:

$$S(t) = \{s_1(t), s_2(t), \dots, s_k(t)\}, \quad (3)$$

який включає:

- AIS-дані;
- сенсорні вимірювання (IoT);
- погодні параметри;
- дані діагностики систем.

Цифровий двійник формує прогнозний стан:

$$D(t) = \{d_1(t), d_2(t), \dots, d_m(t)\}, \quad (4)$$

$$D(t) \in \check{Y}^m, \quad D(t) = \{d_i(t)\}_{i=1}^m, \quad (5)$$

тоді

$$r_i(t) = g_i(X(t), S(t), D(t)), \quad (6)$$

інтеграція в загальний ризик

$$R(t) = \sum_{i=1}^n w_i r_i(t). \quad (7)$$

Тут відображається прогноз деградації систем, очікувані відхилення та сценарні оцінки розвитку ситуації.

Подальший розвиток моделі передбачає формалізацію процесу інтеграції різномірних поточкових даних у єдиний інформаційний простір оцінювання ризику. З огляду на багатофакторну природу експлуатаційної безпеки судна, виникає необхідність узгодження даних різної природи (технічних, навігаційних, поведінки судна та стану середовища) у вигляді структурованих компонентів, придатних для подальшого аналізу та агрегування.

З цією метою вводяться функціональні залежності, які описують процес перетворення вхідних даних смарт-моніторингу та цифрового двійника у параметри ризику, що враховують як поточний стан системи, так і його динаміку в часі. З урахуванням зазначеного, доцільним є формалізувати процес трансформації первинних даних у ризикові індикатори, що дозволяє перейти від описового рівня до математичного представлення моделі:

$$X(t) \in \mathbb{R}^n, \quad S(t) \in \mathbb{R}^k \quad (8)$$

$$R(t) = \sum_{i=1}^N P_i(X(t), E(t), D(t)) C_i \prod_{j=1}^K (1 - B_j(t)), \quad (9)$$

$$R(t) = f(X(t), E(t), S(t), D(t)) \Rightarrow \frac{dS(t)}{dt} = g(X(t), E(t), D(t)) \quad (10)$$

Отримані співвідношення (4)–(6) відображають поетапний процес формування ризикового профілю судна. Зокрема, (4) описує перетворення первинних даних у часткові індикатори ризику, що характеризують окремі підсистеми, (5) забезпечує їх узгодження та нормалізацію з урахуванням вагових коефіцієнтів, що визначають відносну значущість кожного фактору а (6) реалізує інтеграцію часткових показників у єдиний узагальнений індикатор ризику, який відображає поточний рівень експлуатаційної безпеки судна.

2.3. Багатокритеріальна оцінка ризику (АНР)

Для визначення вагових коефіцієнтів факторів ризику використовується метод аналізу ієрархій:

$$w_i = \frac{\left(\prod_{j=1}^n a_{ij}\right)^{\frac{1}{n}}}{\sum_{k=1}^n \left(\prod_{j=1}^n a_{kj}\right)^{\frac{1}{n}}}, \quad (11)$$

де, a_{ij} - елементи матриці парних порівнянь;

w_i - нормалізована вага фактору.

Отримані ваги визначають відносну важливість кожного фактору в інтегральній оцінці ризику.

2.4. Оцінювання критичності відмов (FMEA)

Критичність кожного фактору визначається через показник пріоритету ризику: $RPN_i = S_i \cdot O_i \cdot D_i$

$$RPN_i = S_i^\alpha O_i^\beta D_i^\gamma, \quad \alpha + \beta + \gamma = 1, \quad (12)$$

де, S_i - тяжкість наслідків;

O_i - ймовірність виникнення;

D_i - ймовірність виявлення.

Такий показник дозволяє врахувати як імовірнісні, так і наслідкові характеристики ризику.

2.5. Байєсівське оновлення ризику з урахуванням смарт-моніторингу

Ключовим елементом моделі є динамічне оновлення ймовірностей ризикових подій на основі нових даних.

$$P(H_i | E_t, S_t, D_t) = \frac{P(E_t, S_t, D_t | H_i) P(H_i)}{\sum_j P(E_t, S_t, D_t | H_j) P(H_j)}, \quad (13)$$

де, S_t - поточні дані сенсорів;

D_t - прогноз цифрового двійника.

Таким чином, на відміну від класичних моделей, тут ризик оновлюється не тільки за подіями, а й за реальними даними з прогнозуванням.

2.6. Інтегральний показник адаптивного ризику

Інтегральний рівень ризику визначається як:

$$R_{\text{adap}}(t) = \sum_{i=1}^n w_i \cdot RPN_i \cdot P(H_i | E_t, S_t, D_t). \quad (14)$$

На відміну від існуючих підходів, запропонований показник враховує не лише поточний стан системи, але й прогнозні оцінки цифрового двійника, що забезпечує проактивний характер оцінювання ризику.

Динаміка ризику описується як:

$$\frac{dR(t)}{dt} = \alpha \frac{dS(t)}{dt} + \beta \frac{dD(t)}{dt} - \gamma u(t), \quad (15)$$

де, $u(t)$ - керуючі дії (DSS);

α, β, γ - коефіцієнти впливу.

Дане рівняння відображає, як зміни даних і прогнозів впливають на зміну ризику і як система може його знижувати.

2.8. Інтеграція у системи прийняття підтримки рішень

Задача управління формулюється як:

$$\min_{u(t)} \int_0^T R_{\text{adaptive}}(t) dt \quad (16)$$

за умов:

$$\sum C(u(t)) \leq C_{\text{max}}, \quad (17)$$

де, $C(u)$ - витрати ресурсів; T - горизонт планування.

Таким чином запропонована модель забезпечує адаптивну оцінку ризику в реальному часі, інтеграцію даних смарт-моніторингу а також використання прогнозів цифрового двійника з можливістю оптимізації управлінських рішень. На відміну від існуючих підходів, модель забезпечує динамічну реконфігурацію ризику, що підвищує ефективність систем забезпечення експлуатаційної безпеки судна.

3. Результати та обговорення.

У даному розділі представлено результати моделювання запропонованої адаптивної системи оцінювання ризику судна та проведено їх порівняльний аналіз із традиційними підходами.

Схема на рис. 1 відображає інтеграцію потокових даних смарт-моніторингу, багатокритеріальної оцінки ризику, байєсівського оновлення та DSS із замкненим контуром зворотного зв'язку через цифровий двійник.

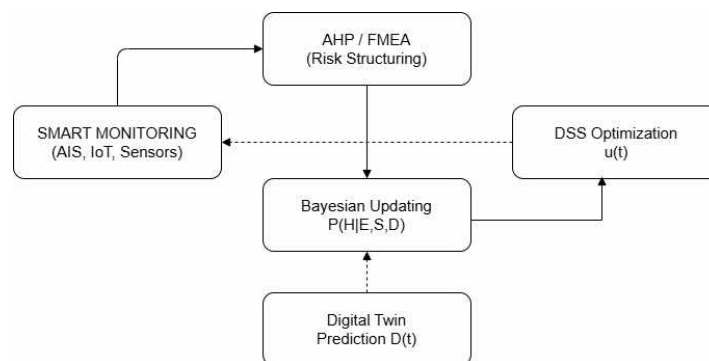


Рисунок 1 – Архітектура адаптивної системи оцінювання ризику судна на основі смарт-моніторингу та цифрового двійника

3.1. Результати моделювання адаптивної системи оцінювання ризику

Результати моделювання підтверджують ефективність запропонованого підходу до адаптивного оцінювання експлуатаційного ризику судна на основі інтеграції даних смарт-моніторингу та цифрового двійника.

На основі побудованих сценаріїв встановлено, що використання потокових даних сенсорних систем дозволяє забезпечити більш точну та оперативну оцінку ризику порівняно зі статичними моделями. Зокрема, у випадку виникнення збурень (погіршення погодних умов, відхилення параметрів руху, затримка реакції оператора) адаптивна модель демонструє здатність до швидкої реконфігурації оцінки ризику.

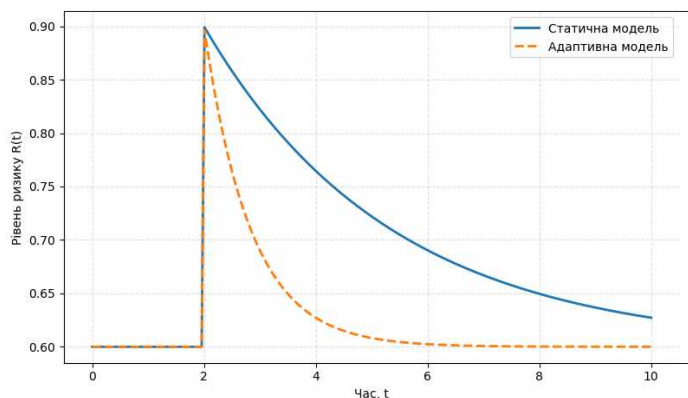


Рисунок 2 – Порівняння динаміки ризику для статичної та адаптивної моделей

Аналіз динаміки функції ризику $R(t)$ (рис. 2) демонструє, що в адаптивній моделі спостерігається нижче пікове значення ризику, вища швидкість його зниження після настання події та скорочений час повернення системи до стабільного стану. Отримані результати підтверджують підвищення адаптивності та відновлювальної здатності системи, що є визначальними характеристиками експлуатаційної безпеки.

Для кількісного підтвердження ефективності запропонованого підходу проведено порівняльний аналіз сценаріїв функціонування системи оцінювання ризику з різним рівнем інтеграції даних. Результати аналізу узагальнено у табл. 1.

Таблиця 1 - Порівняльний аналіз сценаріїв

Сценарій	Тип моделі	Джерело даних	Час виявлення	Рівень ризику	Час відновлення
Базовий	Статична	Історичні дані	Високий	Високий	Довгий
Моніторинг	Частково адаптивна	Дані з датчиків та сенсорів	Середній	Середній	Помірний
Інтегрований	Адаптивна	Дані з сенсорів та цифрового двійника	Низький	Низький	Короткий

Як видно з табл. 1, інтеграція смарт-моніторингу та цифрового двійника забезпечує суттєве покращення характеристик оцінювання ризику. Зокрема, спостерігається зниження часу виявлення небезпечних ситуацій, зменшення рівня ризику та скорочення часу відновлення системи.

Інтеграція смарт-моніторингу забезпечує безперервне оновлення даних про навігаційні параметри, технічний стан і зовнішні умови, тоді як цифровий двійник реалізує сценарне прогнозування майбутніх станів системи. Їх поєднання в межах байєсівської моделі формує замкнений контур «дані – оцінка – прогноз – рішення – оновлення», що забезпечує перехід від реактивного до проактивного управління ризиком.

На відміну від традиційних статичних підходів, запропонована модель забезпечує динамічне оновлення ризику, інтеграцію реальних і прогнозних даних та підтримку управлінських рішень через DSS, що відповідає концепції «smart shipping».

Водночас підхід залежить від якості даних, складності побудови цифрового двійника та потребує подальшої емпіричної валідації. Перспективи досліджень пов'язані з інтеграцією машинного навчання, розширенням моделі на міжсистемний рівень та її апробацією в реальних умовах експлуатації.

Практична цінність полягає у можливості застосування моделі в інтегрованих мостикових системах, DSS та цифрових двійниках, що сприяє зниженню аварійності, скороченню часу реагування та підвищенню ефективності використання ресурсів.

Отримані результати підтверджують, що інтеграція смарт-моніторингу та цифрового двійника у процес оцінювання ризику забезпечує підвищення адаптивності, точності та ефективності систем забезпечення експлуатаційної безпеки судна.

Висновки. У статті розроблено інтегровану модель адаптивного оцінювання експлуатаційного ризику судна в режимі реального часу на основі використання технологій смарт-моніторингу та цифрового двійника. Запропонований підхід забезпечує інтеграцію багатокритеріальних методів, байєсівського оновлення та потокових даних, що дозволяє здійснювати динамічне оцінювання ризику в умовах операційної невизначеності. Розроблено математичний апарат, який формалізує процес трансформації даних смарт-моніторингу та цифрового двійника у інтегральний показник ризику. Результати моделювання підтвердили зниження пікового рівня ризику та скорочення часу відновлення системи порівняно з традиційними підходами. Практична цінність полягає у можливості впровадження моделі в системи підтримки прийняття рішень та інтегровані суднові інформаційні системи.

ЛІТЕРАТУРА

1. Magoulick, P. (2026). Operational digital twin for multi-hazard coastal flood prediction with adaptive learning: Real-time performance in the Chesapeake Bay. *Environmental Modelling & Software*, 198, 106891. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2026.106891>
2. Song, N., Su, S., Yu, P., & Wang, H. (2025). A framework and application for dynamic assessment of ship equipment based on multi-source data fusion and digital twins. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 18, 100746. <https://doi.org/10.1016/j.ijnaoe.2026.100746>
3. Ai, T., Gao, L., Yin, X., Du, H., Li, Q., & Zhang, H. (2026). A numerical modelling-supported digital twin for urban floods monitoring in typhoon or storm scenario. *Environmental Modelling & Software*, 197, 106870. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2026.106870>
4. Sajja, R., Mermer, O., Sermet, Y., & Demir, I. (2026). Hydro3DJS: A modular web-based library for real-time 3D visualization of watershed dynamics and digital twin integration. *Environmental Modelling & Software*, 197, 106853. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2025.106853>
5. Ghasemzadeh, K., Jafari, M., Torabi, T., Amiri, A., & Iulianelli, A. (2026). Hybrid models, digital twins, and digital shadows for sustainable membrane technologies: A critical review. *Advanced Membranes*, 8, 100219. <https://doi.org/10.1016/j.advmem.2026.100219>
6. Jayasinghe, S., Mahmoodian, M., Sidiq, A., Nanayakkara, T., Alavi, A., Mazaheri, S., Shahrivar, F., Sun, Z., & Setunge, S. (2024). Innovative digital twin with artificial neural networks for real-time monitoring of structural response: A port structure case study. *Ocean Engineering*, 312, 119187. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.119187>
7. Wang, X., Duan, J., Yang, X., Yan, H., Wang, S., Tao, C., Huang, Y., & Verwey, B. (2025). Dual-Purpose smart liner system for oil and gas pipelines: Digital twin-enabled rapid monitoring during strike events. *Energy*, 340, 139397. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2025.139397>
8. Beal, J., Fargusson, S., Bui, H., Reihani, S., Khalid, H., & Mohaghegh, Z. (2026). Developing temporal coupling of human performance, physical twin, and digital twin models for probabilistic risk assessment in nuclear power plants. *Nuclear Engineering and Design*, 447, 114620. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2025.114620>
9. Wen, X., Bian, W., Liu, S., Wen, J., Bao, J., & Zhang, D. (2026). A multi-scale digital twin model reconstruction method based on compatibility and exclusivity mechanisms. *Journal of Industrial Information Integration*, 50, 101041. <https://doi.org/10.1016/j.jii.2025.101041>
10. Wang, Z., Li, J., Yuan, Y., Zhang, S., Hu, W., Ma, J., & Tan, J. (2025). Digital-twin-enabled online wrinkling monitoring of metal tube bending manufacturing: A multi-fidelity approach using forward-convolution-GAN. *Applied Soft Computing*, 171, 112684. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2024.112684>
11. Menon, G., Malave, B., Mhaske, M., Parjane, S., & Mhaismale, H. (2025). Digital twin technologies in medicine: The innovations, barriers, and future directions. *Intelligent Hospital*, 100043. <https://doi.org/10.1016/j.inhs.2025.100043>
12. Xu, Y., Sun, Y., Shen, H., Liu, X., Pan, H., Cheng, Y., Liu, S., Qin, G., & Ji, A. (2025). Development of a digital twin system for inspection UAV in fusion reactors. *Nuclear Engineering and Technology*, 57(12), 103826. <https://doi.org/10.1016/j.net.2025.103826>

13. Dehghan, F., Bamakan, S. M. H., Mirzabagheri, M., & Sadrabadi, A. N. (2026). From pre-treatment to post-operative care: Leveraging digital twins for precision surgery transformation. *Smart Health*, 39, 100620. <https://doi.org/10.1016/j.smhl.2025.100620>
14. Huang, Q., Zeng, W., Liu, J., Zhang, Z., Deng, J., Qiu, Z., Xu, L., Wei, Z., Lu, Q., Gong, L., Shi, C., & Zhong, X. (2025). Shaping the future of nuclear reactors with digital twins: Current developments and perspectives. *Applied Energy*, 402, 126922. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2025.126922>
15. Adu-Gyamfi, B. A. (2026). The role of digital twin technology in enhancing sustainable aviation transition: A state-of-the-art review and future direction. *Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity*, 12(1), 100693. <https://doi.org/10.1016/j.joitmc.2025.100693>
16. Petri, I., Amin, A., Ghoroghi, A., Hodorog, A., & Rezgui, Y. (2025). Digital twins for dynamic life cycle assessment in the built environment. *Science of The Total Environment*, 993, 179930. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2025.179930>

REFERENCES

1. Magoulick, P. (2026). Operational digital twin for multi-hazard coastal flood prediction with adaptive learning: Real-time performance in the Chesapeake Bay. *Environmental Modelling & Software*, 198, 106891. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2026.106891>
2. Song, N., Su, S., Yu, P., & Wang, H. (2025). A framework and application for dynamic assessment of ship equipment based on multi-source data fusion and digital twins. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 18, 100746. <https://doi.org/10.1016/j.ijnaoe.2026.100746>
3. Ai, T., Gao, L., Yin, X., Du, H., Li, Q., & Zhang, H. (2026). A numerical modelling-supported digital twin for urban floods monitoring in typhoon or storm scenario. *Environmental Modelling & Software*, 197, 106870. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2026.106870>
4. Sajja, R., Mermer, O., Sermet, Y., & Demir, I. (2026). Hydro3DJS: A modular web-based library for real-time 3D visualization of watershed dynamics and digital twin integration. *Environmental Modelling & Software*, 197, 106853. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2025.106853>
5. Ghasemzadeh, K., Jafari, M., Torabi, T., Amiri, A., & Iulianelli, A. (2026). Hybrid models, digital twins, and digital shadows for sustainable membrane technologies: A critical review. *Advanced Membranes*, 8, 100219. <https://doi.org/10.1016/j.advmem.2026.100219>
6. Jayasinghe, S., Mahmoodian, M., Sidiq, A., Nanayakkara, T., Alavi, A., Mazaheri, S., Shahrivar, F., Sun, Z., & Setunge, S. (2024). Innovative digital twin with artificial neural networks for real-time monitoring of structural response: A port structure case study. *Ocean Engineering*, 312, 119187. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.119187>
7. Wang, X., Duan, J., Yang, X., Yan, H., Wang, S., Tao, C., Huang, Y., & Verwey, B. (2025). Dual-Purpose smart liner system for oil and gas pipelines: Digital twin-enabled rapid monitoring during strike events. *Energy*, 340, 139397. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2025.139397>
8. Beal, J., Fargusson, S., Bui, H., Reihani, S., Khalid, H., & Mohaghegh, Z. (2026). Developing temporal coupling of human performance, physical twin, and digital twin models for probabilistic risk assessment in nuclear power plants. *Nuclear Engineering and Design*, 447, 114620. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2025.114620>
9. Wen, X., Bian, W., Liu, S., Wen, J., Bao, J., & Zhang, D. (2026). A multi-scale digital twin model reconstruction method based on compatibility and exclusivity mechanisms. *Journal of Industrial Information Integration*, 50, 101041. <https://doi.org/10.1016/j.jii.2025.101041>
10. Wang, Z., Li, J., Yuan, Y., Zhang, S., Hu, W., Ma, J., & Tan, J. (2025). Digital-twin-enabled online wrinkling monitoring of metal tube bending manufacturing: A multi-fidelity approach using forward-convolution-GAN. *Applied Soft Computing*, 171, 112684. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2024.112684>
11. Menon, G., Malave, B., Mhaske, M., Parjane, S., & Mhaismale, H. (2025). Digital twin technologies in medicine: The innovations, barriers, and future directions. *Intelligent Hospital*, 100043. <https://doi.org/10.1016/j.inhs.2025.100043>
12. Xu, Y., Sun, Y., Shen, H., Liu, X., Pan, H., Cheng, Y., Liu, S., Qin, G., & Ji, A. (2025). Development of a digital twin system for inspection UAV in fusion reactors. *Nuclear Engineering and Technology*, 57(12), 103826. <https://doi.org/10.1016/j.net.2025.103826>
13. Dehghan, F., Bamakan, S. M. H., Mirzabagheri, M., & Sadrabadi, A. N. (2026). From pre-treatment to post-operative care: Leveraging digital twins for precision surgery transformation. *Smart Health*, 39, 100620. <https://doi.org/10.1016/j.smhl.2025.100620>

14. Huang, Q., Zeng, W., Liu, J., Zhang, Z., Deng, J., Qiu, Z., Xu, L., Wei, Z., Lu, Q., Gong, L., Shi, C., & Zhong, X. (2025). Shaping the future of nuclear reactors with digital twins: Current developments and perspectives. *Applied Energy*, 402, 126922. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2025.126922>

15. Adu-Gyamfi, B. A. (2026). The role of digital twin technology in enhancing sustainable aviation transition: A state-of-the-art review and future direction. *Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity*, 12(1), 100693. <https://doi.org/10.1016/j.joitmc.2025.100693>

16. Petri, I., Amin, A., Ghoroghi, A., Hodorog, A., & Rezgui, Y. (2025). Digital twins for dynamic life cycle assessment in the built environment. *Science of The Total Environment*, 993, 179930. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2025.179930>

Shcheniavskiy G.S., Melnyk O.M.

REAL-TIME ADAPTIVE RISK ASSESSMENT OF A VESSEL BASED ON INTELLIGENT MONITORING AND A DIGITAL TWIN

This article examines the issue of ensuring a vessel's operational safety in the context of an increasingly dynamic maritime environment, digitalization, and rising levels of uncertainty. It demonstrates that traditional risk assessment approaches, based on static scenarios, do not provide the necessary adaptability and timeliness for real-time decision-making. The feasibility of transitioning to integrated models that combine smart monitoring, digital twins, and methods of intelligent data analysis is substantiated. A mathematical model for adaptive ship risk assessment is proposed, based on the integration of streaming data from sensor systems, AIS, environmental parameters, and digital twin forecasts. The model implements a closed-loop "data-assessment-forecast-decision" cycle and ensures the formation of an integrated risk indicator, taking into account multi-criteria factors, their weights, and their dynamics over time. The paper employs the Analytic Hierarchy Process (AHP) to determine the weighting coefficients of risk factors, the FMEA approach to assess the criticality of failures, and Bayesian updating to adapt the probabilities of risk events based on new data. The proposed integrated risk indicator takes into account both the current state of the vessel and forecast assessments of the situation's development, ensuring a proactive approach to safety management. The simulation results confirm that the proposed adaptive model allows for reducing peak risk values, shortening response times to hazardous situations, and increasing the system's resilience compared to static approaches. The practical significance of the study lies in the possibility of integrating the model into decision support systems, integrated bridge systems, and digital ship management platforms, while the results obtained form the basis for the further development of intelligent systems for ensuring ship operational safety.

Keywords: maritime transport, vessel operational safety; adaptive risk assessment; smart monitoring; digital twin; risk management; decision support systems; maritime cyber-physical systems.

Стаття прийнята 19.02.2026

© Tyron O.M., Kaminska S.V., Didenko M.O.

METHODS OF RESEARCHING THE HUMAN FACTOR IN THE MARITIME INDUSTRY

This study examines the methodological approaches employed by contemporary researchers in the maritime domain, with particular emphasis on human factors. The aim is to provide guidance for graduate students and early-career scientists in selecting appropriate and effective research methods for their own investigations. By analyzing current methodological trends, the study seeks to discourage reliance on outdated or limited techniques – such as simple percentage-based analyses – and to promote the adoption of more advanced and rigorous approaches.

The research is based on a review of 50 articles published in Scopus-indexed journals. The analysis reveals several prominent methodological tendencies in recent studies, including the use of advanced data analytics, case study approaches, field research conducted during maritime voyages, and the application of author-developed questionnaires with thorough validation procedures. The findings indicate that studies focusing on human factors predominantly employ psycho-diagnostic methods, surveys and questionnaires, observational techniques, and experimental designs.

Among experimental approaches, navigation simulators are widely utilized due to their ability to replicate realistic maritime conditions, including variable weather, traffic density, technical failures, and emergency scenarios. Additionally, archival methods play a significant role by enabling retrospective analyses of maritime incidents and human performance under authentic operational circumstances.

Overall, data analysis emerges as a central component of modern maritime research on human factors, facilitating the transition from descriptive observations to evidence-based conclusions. This approach supports the identification of patterns and causal relationships, thereby enhancing the scientific rigor and practical relevance of contemporary studies.

Key words: *human factor, methodology, marine psychology, surveys, data analysis*

Introduction. Human factor at the current stage of development of the maritime industry is increasingly being integrated into the regulatory and legal framework of international shipping. A key role in this process is played by the documents of the International Maritime Organization (IMO), primarily the International Convention on the Training and Certification of Seafarers and Watchkeeping (STCW, 1978 as amended, in particular the Manila Amendments of 2010). In these standards, the psych-pedagogical aspects of seafarers' professional activity are considered as a component of seafaring safety and the reliability of the human factor. IMO has consistently emphasized that most maritime accidents are not due to technical failures, but to human error. In this regard, in modern IMO documents, the emphasis shifts from formal mastery of technical skills to the development of non-technical skills, which include situational awareness; decision-making in conditions of uncertainty; stress and fatigue management; communication and team interaction; leadership and responsibility. These elements actually form the subject of research in marine field; they are related to cognitive processes, emotional regulation, interpersonal interaction and psychological resilience of seafarers. In IMO documents, marine psychology is in fact integrated into the broader concept of human element /human factor. Within this concept, psycho-pedagogical factors are considered as: the key link of the "man - technology - environment" system; source of both risks and security resources; object of management through training, selection, training and mental health support. Marine psychology provides scientific tools for the analysis of human errors, the development of training programs, the assessment of the psychological readiness of seafarers to watch and actions in emergency situations.

In practical terms, research in human factor contributes to: improvement of the system of professional selection of seafarers; development of training on stress and fatigue management; increasing the efficiency

of teamwork of crews; reducing accidents and occupational burnout; formation of a safety culture on the ship. Thus, research in marine psychology acts not only as a scientific discipline, but also as a tool for the implementation of international IMO/STCW standards, ensuring the psychological component of maritime safety. Unfortunately, marine psychology is not developed as a separate branch of science, but there are some well-known books which started the development of this field. Malcolm MacLachlan is an international specialist in marine psychology and his main works: *Maritime Psychology: Research in Organizational & Health Behavior at Sea*, Springer, 2017 - the first comprehensive scientific collection on maritime psychology, which includes an overview of psychological, social and behavioral aspects of the life and activities of seafarers in maritime transport (organizational, mental and behavioral component).

The essence of the contribution: systematizes psychological research of seafarers' work, mental health, adaptation to the conditions of long-term stay at sea and the human factor as a key factor in safety. Also, we would like to mention Michelle Rita Grech, Tim Horberry, Thomas Koester and their book "Human Factors in the Maritime Domain". Main aspects in its content are psycho-physiological aspects of seafarers' activities; situational awareness, fatigue, navigational errors; communication in a team, human-technician interaction; analysis of human errors in maritime accidents.

The purpose of this article. The purpose of the article is to provide an analysis of modern methods of human factor research in marine field, which are used by modern scientists.

Relevance of the study.

The study was aimed at studying the methodology used by contemporary scientists specifically in the marine field. This research will help graduate students and young scientists choose the right scientific methods for their own research developments. The analysis of modern methodologies aims to prevent the use of irrelevant methods and discourage researchers from limiting themselves to simple percentage-based analyses, encouraging instead the use of more advanced approaches.

Methods

The purpose of the research is to analyze the most popular methods used in the recent works of the scientists, who study the role of human factor in the maritime field.

For the research we used the following journals:

1. "Journal for Maritime Research", focuses on the historical enquiry of maritime history, particularly British maritime experience within a global context.
2. "Journal of Maritime Research", focuses on the technical, engineering, and social aspects of the maritime sector.
3. "Maritime Studies", focuses on social dimensions, coastal management, and marine policy.
4. "Promostro", published by the Faculty of Maritime Studies Rijeka, covering nautical science, engineering, and logistics.
5. "Maritime Policy and Management", focuses on management, policy, and operations in the shipping industry.
6. "European Journal of Maritime Research", an open-access journal covering engineering, scientific, and technical maritime research.
7. "Maritime Economics and Logistics", focuses on economic issues.
8. "Transactions on Maritime Science", focuses on maritime research from South-East Europe, particularly the Mediterranean area.
9. WMU Journal of Maritime Affairs covers a wide range of maritime-related subject areas, such as maritime administration and management, maritime safety and sustainability, maritime law and regulations, 'maritime education and human resources.

We analyzed 50 articles from these journals, found out some tendencies of methods, used in the recent studies, such as: deep data analyses, case studies, research during the voyages, authors' questionnaires with deep analysis of their validity etc.

Results of the study

Summarizing the studied articles, we emphasize that the researchers use various scientific methods adapted to the specifics of the seafaring profession.

Psycho-diagnostic methods: tests for attention, memory, reaction, observation, stress resistance.

An important psycho-physiological factor for the suitability of a seafarer for professional activity is attention. To measure the various dimensions of attention, we recommend follow-up tests: focus, Response Rate and Distraction Test (Schultz Monsters/Eyeballs Test), attention to colors (Stroop task Kagan test), visual attention to objects (Cancellation Tasks), multitasking ability Dual-task test, memory measurement (Digit Span, Forward and Backward, Corsi Block-Tapping Test), etc.

We note that tests for psychomotor abilities and coordination are especially important for navigators, engineers, and captains. For instance, the research conducted by Mengjiao Guo and Haonan Zheng (2025) utilizes several established instruments: “Connor-Davidson Resilience Scale (CD-RISC): A widely used 25-item self-report scale that assesses the ability to cope with stress. It has good reliability and validity for measuring changes in psychological resilience. Perceived Stress Scale (PSS-10): A 10-item scale assessing the degree to which situations in one’s life are appraised as stressful over the past month. Profile of Mood States (POMS), Pittsburgh Sleep Quality Index (PSQI): Evaluates sleep quality over the past month”. The use of validated psychometric instruments is also evident in other research, such as the study by Oldenburg et al. (2018). In their cross-sectional study, 251 seafarers were surveyed regarding demographic data and job-related stressors. Particularly, the Emotional Exhaustion (EE) subscale of the Maslach Burnout Inventory (MBI) and the Epworth Sleepiness Scale (ESS) were used to assess the respective risks of job-related burnout and daytime sleepiness. The statistical analysis was carried out using multiple logistic regressions.

Questionnaires and surveys

To realize the goal of the study, it is not enough to use only existing recognized tests. And all modern researchers use questionnaires of subjects. Questionnaires are important empirical research methods in marine psychology that allow studying mental states, behavioral manifestations and interpersonal relationships of crew members in real conditions of professional activity. The specificity of the maritime service, involving collective work in confined spaces and increased responsibility for safety, makes these methods particularly valuable for the analysis of group processes and psychological climate on ship. Questionnaires and surveys are widely used to assess subjective perceptions of psychological states and working conditions. With the help of specially developed instruments, researchers investigate the crew's psychological climate, job satisfaction levels, relations with management and colleagues, as well as the perception of living and working conditions at sea. Such data make it possible to identify factors that contribute to or, on the contrary, hinder effective professional activity. A special place is occupied by questionnaires for assessing the level of anxiety and emotional tension. They allow you to detect a tendency to stress reactions, internal tension, emotional exhaustion and the risk of developing psychological disorders. The advantage of the questionnaire is the possibility of covering a significant number of respondents in a relatively short time, as well as obtaining standardized data for further analysis.

The method described by the researchers of human factor was like that. “... a group of experts made a list of adjectives. Then, a sample of 141 Officers was asked to give their opinion about the importance of each adjective in Seafarer’s behaviour. Exploratory Factor Analysis and Confirmatory Factor Analysis through Structural Equation Modeling techniques were applied to the data” (Cordon et al.,2017).

Observation

Observing the behavior of the crew during real or educational navigation makes it possible to obtain objective information about the peculiarities of professional interaction, discipline, the level of coordination of actions and the emotional reactions of sailors in standard and stressful situations. A psychologist or trained specialist analyzes the style of communication between crew members, the ability to work as a team, manifestations of leadership, conflict or emotional tension. During educational navigation, observation allows you to assess the readiness of sailors to perform professional tasks, their behavior in conditions of modeling emergency or non-standard situations.

An important advantage of the observation method is the possibility of recording natural behavior without direct intervention in the crew's activities. This allows you to identify hidden problems of adaptation, decreased motivation or impaired mutual understanding, which are not always realized by the sailors themselves. Observation results are often used to correct management style, improve team interaction, and improve maritime safety.

Interviews

This method of research was described by in the article of McVeigh et al., 2018. “The first interviews were conducted ... via telephone and Skype as participants were on-board at the time of interview. The officers’ focus group was subsequently conducted by the primary researcher at the Shell International Fleet Officer Conference, London, UK, in December 2015, as an event separate to the main conference meeting. The superintendents’ interviews were also conducted by the primary researcher at this conference”.

Experimental research methods in marine psychology

Experimental methods occupy an important place in marine psychology, as they allow purposeful study of mental processes, behavior and decision-making of seafarers in controlled but close to real conditions. Unlike observation or questionnaires, the experiment makes it possible to actively change the conditions of activity and analyze how these changes affect the psychological state and professional efficiency of marine industry specialists.

One of the most common experimental methods is the use of simulators of navigation. Such simulators reproduce real navigation conditions, including weather factors, vessel traffic volume, technical malfunctions and emergency situations. In the process of the experiment, the behavior of boat masters in extreme or non-standard conditions, their ability to maintain self-control, concentration of attention and effectively interact with other crew members is investigated. The advantage of this method is the possibility of repeated reproduction of complex and dangerous situations without risk to life and the ship.

An important variety of experimental methods are simulation exercises aimed at evaluating decision-making processes under stressful conditions. During such exercises, participants are offered simulated problem situations that require quick analysis of information, selection of the optimal strategy of actions and forecasting of the consequences of decisions. The speed and reasonableness of decision-making, the level of psychological tension, the tendency to risk and the effectiveness of team interaction are analyzed. Such experiments are particularly valuable in assessing the professional reliability of marine professionals. The article “Modeling and simulating processes in optimizing port activities – literature review” published in the Scientific Bulletin of Naval Academy in 2022 was authored by a team of six researchers. Their “paper aims to provide a systematic literature review in the field of process modeling and simulation for process improvement in seaports”

In modern research, computer simulation models are widely used, which allow analyzing human behavior in complex dynamic systems. As part of the experiment, a virtual environment is created where all objects (such as ships) are generated in advance with specified parameters, such as arrival time, service duration, or driving conditions. This provides the same starting conditions for different experimental scenarios and makes it possible to objectively compare the effectiveness of different behavior strategies. Limiting the number of random factors allows you to reduce the impact of random deviations and increase the reliability of results.

At the same time, it is important to take into account that under experimental conditions, not all information that objectively exists in the system may be available to the subjects. This makes it possible to model situations of uncertainty specific to real maritime activity, where decisions are taken under conditions of incomplete or delayed information. This approach allows for deeper exploration of cognitive processes, prediction strategies, and psychological mechanisms of adaptation. Consequently, experimental methods in marine psychology provide a scientifically based study of behavior and mental processes in complex and stressful conditions. They are an effective tool for assessing professional readiness, improving the quality of maritime training, and enhancing maritime safety systems.

Archive methods

Archival methods represent an essential component of contemporary research in the study of human factors within the maritime domain. They provide access to extensive historical datasets that enable researchers to examine long-term trends, patterns of incidents, and the evolution of safety practices over time. Unlike primary data collection, which is often limited in scope and duration, archival research allows for the analysis of large-scale, real-world evidence derived from official records, institutional reports, and documented case studies.

The importance of archival methods lies in their ability to support retrospective analysis of maritime accidents and human performance under authentic operational conditions. Such methods make it possible to identify recurring causal factors, assess the impact of organizational and regulatory changes, and validate theoretical models of human error. In this context, the use of diverse and credible archival sources is critical, as it enhances the reliability and comprehensiveness of the research findings. Moreover, modern archival research increasingly integrates digital databases and online repositories, which significantly expand access to information and facilitate more sophisticated data analysis.

Therefore, archival methods should not be viewed as merely descriptive or supplementary. When applied systematically and in combination with advanced analytical techniques, they constitute a powerful methodological approach that contributes to evidence-based conclusions and supports the development of effective safety strategies in maritime operations.

The archive method is actively used in recent research. Thus, researchers (Carter et al., 2023) indicate that "the main information sources used to identify ship casualties and human fatalities were, first, a complete series of Lloyd's Register of Shipping's Shipping Casualties/Wreck Returns..., Board of Trade investment Wreck Reports, searches of the leading shipwreck website (wrecksite.eu), The British Newspaper Archive and Welsh Newspapers Online.

Data analysis

Data analysis constitutes a fundamental component of contemporary research into human factors in the maritime domain. It enables researchers to move beyond descriptive observations toward evidence-based conclusions, supporting the identification of patterns, causal relationships, and risk factors that directly affect safety and operational performance. In this context, relying solely on basic statistical procedures—such as calculating percentages or simple averages—is insufficient. While such methods may provide an initial overview, they do not capture the complexity, uncertainty, and interdependence inherent in human and organizational systems.

Modern research requires the application of advanced analytical approaches capable of handling multidimensional data and modeling human behaviour under varying operational conditions. Among the most widely used tools are statistical software packages such as SPSS, R, and Python-based analytics libraries, which support regression analysis, multivariate analysis, and predictive modeling. In addition, specialized methodologies for human factors analysis are essential. Techniques such as the Human Factors Analysis and Classification System (HFACS) enable systematic identification and categorization of human errors, while Cognitive Reliability and Error Analysis Method (CREAM) allow for the quantification of human error probabilities. Furthermore, contemporary studies increasingly incorporate Bayesian networks, fuzzy logic, and evidential reasoning to address uncertainty and to model complex interactions between common performance conditions (CPCs).

Thus, modern data analysis is not merely a supportive element of research but a core methodological foundation. Its proper application ensures the validity, reliability, and practical relevance of findings, particularly in high-risk domains such as maritime operations, where understanding human factors is critical for improving safety outcomes.

Here we cite some examples of how researchers describe the tools for data analysis. «Quantitative studies were appraised using a slightly modified version of the AXIS tool» «Studies using retrospective analysis of existing health data were appraised using the nine questions in the MetaQAT Critical Appraisal Tool» (Brooks S. K., Greenberg N., 2022). While studying human factors, scientists use techniques for human organizational analysis (HOFs). «The most widely used modeling technique for human error identification is the Human Factors Analysis and Classification System (HFACS). Moreover, Cognitive

Reliability Error Analysis (CREAM) is the most widely used technique for human error probability quantification, and fuzzy, evidential reasoning and Bayesian networks are often incorporated for common performance condition (CPC) quantification and synthesis processes» (Fan et al., 2020).

Development prospects

In the context of the further digitalization of shipping, autonomous vessels and the increasing cognitive burden on seafarers, the role of marine psychology within the IMO/STCW standards will continue to grow. Increased attention is expected to: psychological adaptation to automated systems; maintaining situational awareness; mental health support in isolation; integration of psychological criteria into the certification and training system.

Conclusion.

By summarizing the studied articles, we identified the most prevalent methods for investigating the role of the human factor in the maritime domain.

1. Psycho-diagnostics methods. Tests for attention, memory, reaction, observation, stress resistance are the most frequently used.

2. Questionnaires and surveys are widely used to study subjective assessments of psychological state and working conditions. With the help of specially developed questionnaires, the psychological climate in the crew, the level of job satisfaction, relations with management and colleagues, as well as the perception of living and working conditions on the ship are investigated.

3. Observations. An important advantage of the observation method is the possibility of recording natural behavior without direct intervention in the crew's activities. Observation results are often used to correct management style, improve team interaction, and improve maritime safety.

4. Experimental methods. One of the most common experimental methods is the use of simulators of navigation. Such simulators reproduce real navigation conditions, including weather factors, vessel traffic volume, technical malfunctions and emergency situations. The advantage of this method is the possibility of repeated reproduction of complex and dangerous situations without risk to life and the ship.

5. Archive method. The importance of archival methods lies in their ability to support retrospective analysis of maritime accidents and human performance under authentic operational conditions.

6. Data analysis. Data analysis constitutes a fundamental component of contemporary research on human factors in the maritime domain. It enables researchers to move beyond descriptive observations toward evidence-based conclusions, supporting the identification of patterns, causal relationships, and risk factors that directly affect safety and operational performance.

ЛІТЕРАТУРА

1. Loss of life at sea from shipping British coal since 1890 / T. Carter et al. *International Journal of Maritime History*. 2023. URL: <https://doi.org/10.1177/08438714231181754> (date of access: 15.02.2026).

2. Integrating Maritime Imagery into Tai Chi Training: An Intervention for Enhancing the Psychological Resilience of Seafarers/ Mengjiao Guo, Haonan Zheng. *Frontiers in Sport Research*. 2025. Vol. 7, no. 4. URL: <https://doi.org/10.25236/fsr.2025.070406> (date of access: 15.02.2026).

3. Perceptions of Well-Being, Resilience and Stress Amongst a Sample of Merchant Seafarers and Superintendents / J. McVeigh et al. *Maritime Studies*. 2018. Vol. 18, no. 2. P. 139–158. URL: <https://doi.org/10.1007/s40152-018-0129-1> (date of access: 15.02.2026).

4. Burnout syndrome in seafarers in the merchant marine service / Oldenburg M., Jensen H. J., Wegner R. *International Archives of Occupational and Environmental Health*. 2012. Vol. 86, no. 4. P. 407–416. URL: <https://doi.org/10.1007/s00420-012-0771-7> (date of access: 15.02.2026).

5. Kim T.-e. Malcolm MacLachlan (ed.): Maritime psychology: research in organizational & health behavior at sea. *WMU Journal of Maritime Affairs*. 2021. URL: <https://doi.org/10.1007/s13437-021-00244-0> (date of access: 15.02.2026).

6. MacLachlan, M. (ed.). *Maritime Psychology: Research in Organizational & Health Behavior at Sea*. Springer, 2017. ISBN: 978-3-319-45430-6.

7. Grech, M. R., Horberry, T. J., & Koester, T. (2019). *HUMAN FACTORS in the MARITIME DOMAIN*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9780429355417>

8. Brooks S. K., Greenberg N. Mental health and psychological wellbeing of maritime personnel: a systematic review. *BMC Psychology*. 2022. Vol. 10, no. 1. URL: <https://doi.org/10.1186/s40359-022-00850-4> (date of access: 15.02.2026).
9. NEDELUCU L. Research overview concerning the maritime industry: An evaluation of the trends and topics in the Black Sea area. *Scientific Bulletin of Naval Academy*. 2022. Vol. XXV, no. 2. P. 131–145. URL: <https://doi.org/10.21279/1454-864x-22-i2-013> (date of access: 15.02.2026).
10. Modeling and simulating processes in optimizing port activities – literature review/ Florin et al. *Scientific Bulletin of Naval Academy*. 2022. Volume XXV 2022ISSUE no.2MBNA Publishing House Constanta 2022, pg. 117-130 (date of access: 15.02.2026).
11. Cordon J. R., Mestre J. M., Walliser J. Human factors in seafaring: The role of situation awareness. *Safety Science*. 2017. Vol. 93. P. 256–265. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2016.12.018> (date of access: 15.02.2026).
12. Review of techniques and challenges of human and organizational factors analysis in maritime transportation / B. Wu et al. *Reliability Engineering & System Safety*. 2022. Vol. 219. P. 108249. URL: <https://doi.org/10.1016/j.res.2021.108249> (date of access: 15.02.2026).
13. A predictive analytics method for maritime traffic flow complexity estimation in inland waterways / M. Zhang et al. *Reliability Engineering & System Safety*. 2022. Vol. 220. P. 108317. URL: <https://doi.org/10.1016/j.res.2021.108317> (date of access: 15.02.2026).
14. Incorporation of human factors into maritime accident analysis using a data-driven Bayesian network / S. Fan et al. *Reliability Engineering & System Safety*. 2020. Vol. 203. P. 107070. URL: <https://doi.org/10.1016/j.res.2020.107070> (date of access: 15.02.2026).

REFERENCES

1. Carter, T., Williams, J. G., Smith, H. D., Protheroe-Jones, J., John, A., & Roberts, S. E. (2023b). Loss of life at sea from shipping British coal since 1890. *International Journal of Maritime History*. <https://doi.org/10.1177/08438714231181754>
2. Mengjiao Guo, Haonan Zheng. (2025). Integrating Maritime Imagery into Tai Chi Training: An Intervention for Enhancing the Psychological Resilience of Seafarers. (2025). *Frontiers in Sport Research*, 7(4). <https://doi.org/10.25236/fsr.2025.070406>
3. McVeigh, J., MacLachlan, M., Coyle, C., & Kavanagh, B. (2018b). Perceptions of Well-Being, Resilience and Stress Amongst a Sample of Merchant Seafarers and Superintendents. *Maritime Studies*, 18(2), 139–158. <https://doi.org/10.1007/s40152-018-0129-1>
4. Oldenburg, M., Jensen, H. J., & Wegner, R. (2012). Burnout syndrome in seafarers in the merchant marine service. *International Archives of Occupational and Environmental Health*, 86(4), 407–416. <https://doi.org/10.1007/s00420-012-0771-7>
5. Kim, T.-e. (2021a). Malcolm MacLachlan (ed.): Maritime psychology: research in organizational & health behavior at sea. *WMU Journal of Maritime Affairs*. <https://doi.org/10.1007/s13437-021-00244-0>
6. MacLachlan, M. (ed.). *Maritime Psychology: Research in Organizational & Health Behavior at Sea*. Springer, 2017. ISBN: 978-3-319-45430-6. (Springer)
7. Grech, M. R., Horberry, T. J., & Koester, T. (2019). *HUMAN FACTORS in the MARITIME DOMAIN*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9780429355417>
8. Brooks, S. K., & Greenberg, N. (2022). Mental health and psychological wellbeing of maritime personnel: a systematic review. *BMC Psychology*, 10(1). <https://doi.org/10.1186/s40359-022-00850-4>
9. NEDELUCU, L. (2022). Research overview concerning the maritime industry: An evaluation of the trends and topics in the Black Sea area. *Scientific Bulletin of Naval Academy*, XXV(2), 131–145. <https://doi.org/10.21279/1454-864x-22-i2-013>
10. C. Partene, F. Nicolae, A. A. Purcărea, A. Cotorcea, D. Simion and O. Volintiru. Modeling and simulating processes in optimizing port activities – literature review. *Scientific Bulletin of Naval Academy*, Vol. XXV 2022, pg. 117-130
11. Cordon, J. R., Mestre, J. M., & Walliser, J. (2017). Human factors in seafaring: The role of situation awareness. *Safety Science*, 93, 256–265. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2016.12.018>

12. Wu, B., Yip, T. L., Yan, X., & Guedes Soares, C. (2022b). Review of techniques and challenges of human and organizational factors analysis in maritime transportation. *Reliability Engineering & System Safety*, 219, 108249. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2021.108249>
13. Zhang, M., Zhang, D., Fu, S., Kujala, P., & Hirdaris, S. (2022). A predictive analytics method for maritime traffic flow complexity estimation in inland waterways. *Reliability Engineering & System Safety*, 220, 108317. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2021.108317>
14. Fan, S., Blanco-Davis, E., Yang, Z., Zhang, J., & Yan, X. (2020b). Incorporation of human factors into maritime accident analysis using a data-driven Bayesian network. *Reliability Engineering & System Safety*, 203, 107070. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2020.107070>

Тирон О.М., Камінська С.В., Діденко М.О.

МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ ЛЮДСЬКОГО ФАКТОРУ У МОРСЬКІЙ ГАЛУЗІ

Дослідження спрямоване на вивчення методології, яку застосовують сучасні вчені в морській галузі. Отримані результати сприятимуть обґрунтованому вибору наукових методів аспірантами та молодими науковцями для власних розробок. Аналіз сучасних підходів дозволяє запобігти використанню не релевантного інструментарію та спонукає дослідників виходити за межі простого кількісного підрахунку відсотків.

На основі аналізу 50 статей з журналів, що індексуються в базі даних Scopus, визначено провідні тенденції: глибокий аналіз даних (data mining), тематичні дослідження (case studies), польові дослідження під час рейсів, а також розробка авторських опитувальників із ретельною перевіркою їхньої валідності.

Встановлено, що ключовими методами вивчення людського фактору є психодіагностика, анкетування, спостереження та експериментальні методи. Серед останніх найпоширенішим є використання навігаційних тренажерів, які відтворюють реальні умови: погодні чинники, інтенсивність руху суден, технічні несправності та надзвичайні ситуації. Важливу роль відіграють також архівні методи, що дозволяють здійснювати ретроспективний аналіз морських аварій та ефективності роботи екіпажу в автентичних умовах. Сучасний аналіз даних є фундаментальним компонентом досліджень, оскільки дозволяє перейти від описових спостережень до доказових висновків, виявлення закономірностей та причинно-наслідкових зв'язків.

Ключові слова: людський фактор, людський фактор, методологія, морська психологія, опитування та опитування, аналіз даних

FUELSIGHT: MODEL FOR PREDICTING SHIP FUEL CONSUMPTION AND PROVIDING EXPLANATIONS

The ability to predict ship fuel consumption is fundamental to improving the efficiency and sustainability of maritime operations. Existing approaches predominantly focus on predictive accuracy while overlooking interpretability, thereby limiting their practical applicability for operational decision-making. This study proposes FuelSight, a unified model architecture that jointly performs multi-horizon fuel consumption forecasting and generates structured, human-readable insights reflecting seafarers' best practices. The proposed framework leverages multivariate time-series data derived from onboard telemetry and environmental conditions to capture complex operational dynamics. A large language model backbone based on GPT-2 is employed to process sequential inputs and enable both numerical prediction and explanation generation within a single architecture, providing an efficient and coherent modeling approach. Empirical evaluation on the FuelCast benchmark demonstrates that the proposed method achieves competitive performance across multiple vessels and forecasting horizons. In addition to numerical accuracy, the model produces interpretable outputs, which achieve good results when evaluated as a structured classification task. The results indicate that integrating forecasting and explanation within an LLM-based framework offers a promising direction for developing interpretable decision-support systems in maritime applications.

Keywords: machine learning, large language models, XAI, interpretability, ship fuel consumption forecasting, decision support system, human factor, automatic control system

Introduction. Maritime shipping is the underpinning of global commerce and accounts for over 90% of international trade volume [1]. However, the industry's heavy reliance on fossil fuels presents a growing environmental and economic challenge. The International Maritime Organization (IMO) estimates that global shipping accounted for 1,056 billion tons of CO₂ emissions in 2018, representing 2.89% of global greenhouse gas emissions. By 2025, emissions could reach 90% or even 130% of 2008 levels [2]. In response, the IMO has introduced regulatory instruments, including the Energy Efficiency Existing Ship Index (EEXI) and the Carbon Intensity Indicator (CII), which require operators to maintain detailed awareness of their vessels' energy consumption profiles. At the same time, fuel costs represent a significant and rising proportion of fleet operating expenses, making fuel optimization both an environmental and commercial imperative [3].

Accurate prediction of ship fuel consumption is necessary to address those challenges. Assessment of future consumption enables route optimization and voyage planning that could reduce both emissions and operational costs [4]. However, the prediction task is inherently complex: fuel consumption depends on the interplay among vessel speed, hull condition, engine characteristics, and environmental factors such as wind, waves, currents, and water depth [5].

Despite significant progress in data-driven fuel prediction – from statistical methods to classical machine learning to deep neural networks – two gaps remain. First, there's a lack of standardized and open benchmarks for comparing models. Second, almost all research focuses on prediction accuracy and overlooks interpretability, thereby leaving unexplored the “black-box” predictive value that navigators can use for operational decision-making.

In this work, we propose FuelSight, a dual-head architecture that addresses both gaps. Built on a frozen GPT-2 backbone with low-rank adaptation, the model jointly produces multi-horizon fuel consumption forecasts and human-readable prescriptive advisories. We evaluate on the FuelCast benchmark [6], a recently published open dataset. Our main contributions are as follows. First, we demonstrate that a single LLM-based architecture achieves state-of-the-art forecasting accuracy,

outperforming both traditional machine learning baselines and zero-shot foundation models on four of six ship-horizon configurations. Second, we introduce a prescriptive explanation head that generates structured operational advisories — including regime classification, fuel trend analysis, and condition summaries — at zero additional parameter cost, through weight tying with the language model's embedding matrix.

Related Work. Various approaches exist for predicting ship fuel consumption, ranging from physics-based models and statistical methods [7] to simple and sophisticated machine learning methods such as Gaussian Process Regression and Back-Propagation Neural Networks [8], Artificial Neural Networks [9], and gradient-boosted ensembles including XGBoost [10]. Recently, deep learning architectures have dominated the field – LSTMs [11], Bi-LSTMs with multi-head self-attention [12], genetic algorithm-optimized LSTMs [13], hybrid TCN-GRU architectures with attention mechanisms [14], and CNN-BiGRU networks with metaheuristic optimization [15].

Most published studies rely on proprietary datasets from individual vessels – a single tanker [16], one container ship [17], a Kamsarmax bulk carrier [18], or short-duration records of two to three months [19]. This heterogeneity makes it impossible to compare reported accuracies across studies. Most recently, researchers [6] introduced the FuelCast benchmark dataset, which is easily accessible to researchers worldwide and provides extensive data on ship telemetry and weather conditions. Such a benchmark is a significant step forward in energy consumption, enabling standardized, iterative, and measurable improvements in model performance. We are grateful for this contribution and build our work upon their foundation.

Another important gap is the field's singular focus on architectural improvements while disregarding interpretability and insights for the end user – ship operators. A singular numeric forecast of 0.45 kg/s offers no actionable guidance on whether adjusting speed or course would meaningfully impact consumption. The classical approach is to use explanation frameworks such as SHAP [20] or LIME [21]. However, the recent advent of Large Language Models, whose textual nature implicitly provides a foundation for the model's contextual output, motivates inquiry into their application in this regard. Additionally, the emergence of reprogramming approaches such as Time-LLM [22], cross-modal fine-tuning frameworks such as CALF [23], and autoregressive adaptation methods such as AutoTimes [24] has demonstrated that pre-trained language models can be effectively adapted for time-series prediction tasks. These approaches demonstrated strong performance on standardized time-series benchmarks such as ETTh, Weather, and Electricity, and showed that LLMs can be effectively used for time-series predictions with minimal adjustments.

In the maritime domain, AIS-LLM [] has been proposed as an LLM-based architecture that describes AIS data, provides intelligent insights into trajectory prediction, anomaly detection, and collision risk, and serves as a descriptive author. We draw inspiration from their work and propose a system that not only describes but also provides actionable insights to the navigator.

Given the predictive performance of LLMs and inherent natural language capabilities, we propose an architecture that, in addition to providing high-accuracy forecasts, generates operational advisories for maritime leadership, bridging the gap between predictive performance and decision support.

Data. We adopt the FuelCast benchmark dataset, a publicly available maritime fuel-consumption dataset designed to enable standardized comparison of machine learning models. The dataset contains operational and environmental measurements from three vessels (CPS Poseidon, CPS Triton, and OSS Ceto). See Table 1 for details.

Table 1 – Overview of the FuelCast ships and corresponding data

	Type	Gross Tonnage	# Samples	Missing Values
CPS Triton	Cruise Passenger Ship	11,000	25,351	0.04 %
CPS Poseidon	Cruise Passenger Ship	70,000	105,422	3.2 %
OSS Ceto	Offshore Supply Ship	24,000	43,213	0.96 %

Each ship's dataset contains operational data, such as engine RPM and environmental variables, including wind direction and wave height. To ensure comparability and reproducibility, we follow the feature selection approach in the original paper, with plans to extend it to more operational variables in the future. See Table 2 for an overview of the variables.

Table 2 – Overview of FuelCast variable/features used for modeling

Preprocessing. For each vessel, we retain the selected variables and temporal index. Rows with missing temporal indices are removed, the index column is cast to integer format, and the rows are sorted chronologically.

Transformations. We process the directional variables – wind direction, ocean current direction, and

Variable	Description	Source	Unit
Total.MomentaryFuel	Total momentary fuel consumption of all consumers on the vessel	Flowmeter	kg/s
SpeedOverGround	Speed over ground of the vessel	GPS	m/s
SeaFloorDepth	Sea floor depth below sea level (bathymetry)	Copernicus Marine	m
WindDirection10M	Wind direction at 10 meters above ground	Open-Meteo	°
WindSpeed10M	Wind speed at 10 meters above ground	Open-Meteo	m/s
OceanCurrentDirection	Ocean current direction considering all components	Open-Meteo	°
OceanCurrentVelocity	Ocean current velocity considering all components	Open-Meteo	m/s
WaveDirection	Mean direction of significant waves	Open-Meteo	°
WaveHeight	Significant mean wave height	Open-Meteo	m
WavePeriod	Period between significant waves	Open-Meteo	s
Temperature2M	Air temperature 2 meters above ground	Open-Meteo	°C

wave direction –relative to the ship bearing using Eq. 1. Each relative angle is encoded as its sine and cosine components. After this step, the final input representation consists of 13 operational and environmental features.

$$\theta_{rel} = (\theta_{env} - \theta_{bearing}) \bmod 360^\circ \quad (1)$$

Cross-validation. Each dataset is divided into five contiguous intervals of approximately equal size. For each fold, one interval is used as the test set, and the remaining four form the training set. The validation subset is constructed from the end of the ordered training anchors subset, ensuring that validation data always occur after the corresponding training samples. An anchor is considered valid only if the full lookback window and the full prediction horizon lie entirely within the same interval.

Missing values. The missing values are imputed with per-channel mean values computed from the rows covered by the training windows.

Methodology. Our model architecture is depicted in Figure 1 and is designed to predict the vessel's fuel consumption K -steps. We have selected prediction intervals of 15 and 30 min as the most operationally viable. In addition to predicting the scalar value of fuel consumption, our model outputs human-readable explanations intended to provide a framework for informed decisions based on planned actions and expected conditions.

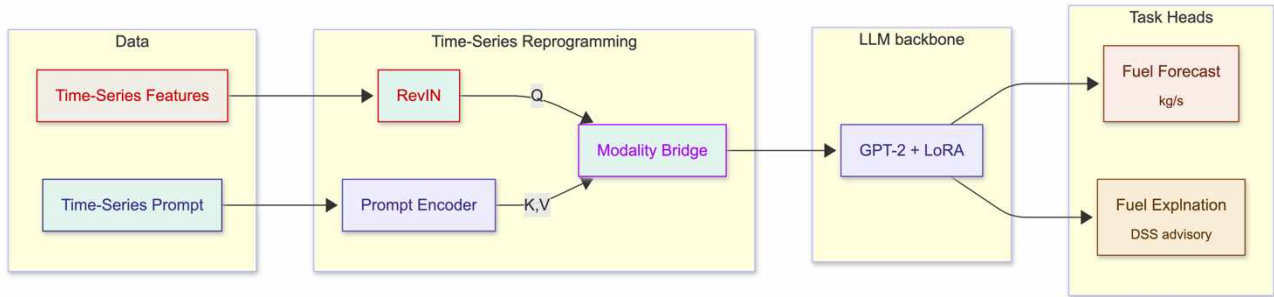


Figure 1 – Overview of LLM-based fuel prediction

Time-series Features. Time-series data collected onboard vessels exhibit non-stationary distributions that shift across voyages, seasons, and operational regimes. To address this, we apply Reversible Instance Normalization (RevIN) [26], which standardizes each sample independently and retains sufficient statistics to restore the original scale at inference:

$$\hat{X} = \gamma \odot \frac{X - \mu}{\sigma} + \beta \tag{2}$$

The output preserves the original feature dimensionality for downstream cross-modal alignment.

Time-series Prompts. We construct natural-language prompts that describe each lookback window using domain-specific maritime terminology — sea state, speed regime, and fuel trend. Those prompts are meant to serve as maritime best practices, basically summarizing the situation from a human perspective. For example, we have included basic speed recommendations based on wave height [27, 28]. Still, the prompts can also contain statistical distributions or feature attribution from surrogate models that use SHAP or LIME explanations.

The prompts are embedded using the frozen GPT-2 [29] token embedding layer and refined through a single self-attention layer:

$$H^P = \text{SelfAttention}(\text{wte}(p)) \tag{3}$$

This refinement captures inter-token dependencies within the prompt before alignment with the time-series branch.

The following labels are designed using simple heuristics to illustrate maritime best practices. For sea state, we're using a simplified Douglas scale with three classes: CALM, MODERATE, and ROUGH. The speed regime is classified into LOW, NORMAL, and HIGH, and the recommended action into REDUCE_SPEED, INCREASE_SPEED, and MAINTAIN_SPEED.

Modality Bridge. The temporal encoder and prompt encoder produce representations in different embedding spaces — the time-series branch operates in the original feature dimension C . In contrast, the prompt branch operates in the LLM dimension d . Modality bridge reconciles these two modalities through a cross-attention mechanism where time-series tokens attend to the prompt embeddings:

$$H^A = \text{CrossAttention}(H^{TS}W_q, H^P, H^P) + H^{TS}W_q \tag{4}$$

This allows each timestep in the time series to selectively attend to the most relevant parts of the textual context. For instance, a timestep with high wave impact can attend more strongly to wave-related prompt tokens. The projection $\in \mathbb{R}^{C \times d}$ is the sole dimensionality-reduction bridge between the two modalities throughout the entire architecture.

LLM Backbone. Rather than training a forecasting model from scratch, we leverage the sequential reasoning capabilities of a pre-trained GPT-2 model, whose self-attention mechanism is inherently suited to processing ordered sequences. The backbone is kept frozen to preserve the general-purpose representations acquired during pre-training, while task-specific adaptation is achieved through LoRA [30] — low-rank matrices injected into the attention layers:

$$h = W_0x + BAx \quad (5)$$

where W_0 are the frozen weights B, A are the trainable low-rank factors. This strategy adapts the model to the maritime fuel domain while keeping the trainable parameter count around 1-2% of the total, significantly reducing the risk of overfitting on smaller ship datasets. A single set of adapters serves both the forecasting and explanation tasks, as both rely on the same contextual understanding of the input sequence.

Forecast Head. Direct prediction of absolute fuel consumption values is challenging because the target distribution varies substantially across operational regimes. Instead, we adopt a residual prediction approach [31] in which the model predicts normalized deviations from the last observed fuel value, reducing the learning problem to small corrections around a strong baseline:

$$\hat{y} = y_T + \hat{\delta} \odot \sigma_\delta + \mu_\delta \quad (6)$$

where y_T is the last observed fuel consumption, $\hat{\delta}$ is the predicted normalized delta, and $\mu_\delta, \sigma_\delta$ are per-horizon statistics computed from the training set. This formulation stabilizes training and improves accuracy at longer horizons, where cumulative error in absolute predictions would otherwise compound. A separate head is maintained for each forecast horizon.

Explanation head. Numerical forecasts alone provide limited operational value without context for why fuel consumption is expected to change. To address this, the model generates prescriptive advisories through a causal language modeling head whose weights are tied to the GPT-2 embedding matrix, introducing zero additional parameters. During training, ground-truth advisory strings — containing regime classification, trend analysis, and condition summaries — are appended to the input sequence. The causal attention mask in GPT-2 ensures that appended text tokens cannot influence the time-series position hidden states. Hence, the forecast head produces identical outputs regardless of whether explanation tokens are present. This property enables both tasks to be served by a single forward pass without interference:

$$H = \text{GPT2}([H^P | H^A | E^{exp}]) \quad (7)$$

In inference, advisories are generated autoregressively from the shared hidden states.

Training objective. Both heads are jointly trained via shared LoRA adapters. The total loss combines a Smooth L1 loss for the forecast task with a weighted cross-entropy loss for the explanation task:

$$\mathcal{L} = \mathcal{L}_{SmoothL1}(\hat{\delta}, \delta^*) + \lambda \cdot \mathcal{L}_{CE} \quad (8)$$

The explanation task, being a low-entropy template completion, converges within the first few epochs and thereafter contributes negligible gradients — acting as an implicit regularizer for the shared adapter weights during early training without degrading forecast accuracy at convergence.

Experimental setup. We evaluate FuelSight against four baseline models spanning three distinct paradigms. XGBoost is a gradient-boosted tree method that has consistently demonstrated strong performance on structured tabular data in the maritime domain [10]. XLinear [32] serves as a lightweight linear baseline that isolates the contribution of non-linear modeling. For the foundation model paradigm, we include TimesFM [33], a decoder-based time-series foundation model pre-trained on a large corpus of public time-series data, and Chronos-2 [34], a probabilistic foundation model that tokenizes time-series values and generates forecasts autoregressively. Both foundation models are evaluated in a zero-shot setting with covariates — no task-specific fine-tuning is performed. We acknowledge the asymmetry between

these zero-shot baselines and our fine-tuned model. All these models demonstrate strong performance in predicting fuel consumption; however, our focus is to show that our model performs on par with large models while also providing meaningful insights into its performance.

Evaluation metrics. Forecasting performance is assessed using three complementary metrics computed per horizon and averaged across 5 folds: Mean Absolute Error (MAE), Root Mean Squared Error (RMSE), and the coefficient of determination (R^2). MAE serves as the primary metric for early stopping and model selection. All metrics are reported on the original scale (kg/s) after delta denormalization, ensuring comparability across models.

Results. Table 4 reports the mean MAE and R^2 across 5-fold temporal cross-validation for all models and ship–horizon combinations. FuelSight achieves the lowest MAE on four of the six configurations – both horizons for Ceto and Poseidon — while remaining competitive on Triton, the smallest dataset. On Ceto at the 15-minute horizon, FuelSight attains a MAE of 0.0086 kg/s, improving over the next best baseline (TimesFM, 0.0093 kg/s) by approximately 8%. On Poseidon, FuelSight achieves $R^2 = 0.978$ at the 15-minute horizon, the highest across all models and configurations.

On the smaller Triton dataset (~25,000 rows), XGBoost outperforms all deep learning and foundation model approaches, achieving a MAE of 0.0138 kg/s at the 15-minute horizon compared to 0.0151 kg/s for FuelSight. This result is consistent with the well-documented advantage of gradient-boosted tree methods in low-data regimes, where deep architectures risk overfitting. Notably, FuelSight still outperforms both zero-shot foundation models (TimesFM and Chronos-2) on Triton at the 15-minute horizon, suggesting that domain-specific fine-tuning provides measurable benefit even on limited data.

Table 3 – Results comparison across evaluated models

<i>Ship</i>	<i>Horizon</i>	<i>Metric</i>	<i>XGBoost</i>	<i>XLinear</i>	<i>TimesFM</i>	<i>Chronus-2</i>	<i>FuelSight</i>
<i>Ceto</i>	3	MAE	0.0173	0.0099	0.0093	0.0098	0.0084
<i>Ceto</i>	3	R^2	0.879	0.938	0.934	0.929	0.949
<i>Ceto</i>	6	MAE	0.0223	0.0118	0.0117	0.0125	0.0109
<i>Ceto</i>	6	R^2	0.821	0.911	0.894	0.880	0.916
<i>Poseidon</i>	3	MAE	0.0341	0.0334	0.0316	0.0339	0.0301
<i>Poseidon</i>	3	R^2	0.976	0.974	0.971	0.972	0.978
<i>Poseidon</i>	6	MAE	0.0432	0.0390	0.0395	0.0423	0.0368
<i>Poseidon</i>	6	R^2	0.961	0.962	0.950	0.952	0.965
<i>Triton</i>	3	MAE	0.0138	0.0154	0.0175	0.0167	0.0148
<i>Triton</i>	3	R^2	0.874	0.820	0.727	0.752	0.815
<i>Triton</i>	6	MAE	0.0193	0.0211	0.0239	0.0231	0.0217
<i>Triton</i>	6	R^2	0.785	0.686	0.541	0.577	0.675

The zero-shot foundation models (TimesFM and Chronos-2) achieve strong performance without any task-specific training, particularly on Ceto, where TimesFM approaches FuelSight’s accuracy. However, neither foundation model produces operational insights beyond numerical forecasts.

Evaluating explanation head. The results are presented in Table 4. We structure the evaluation of explanation code as a structured classification problem rather than relying on ROUGE or BLEU, which are commonly accepted in NLP circles [36]. In our case, we have decided to use classification metrics, as they are better suited to the contrived example of prompt and label outputs we’re using in the following paper.

For each field, we report the average **F1 score**. Including the F1 score helps shed light on the imbalanced classes in the data we’re evaluating. All metrics are computed independently for each fold within the same five-fold temporal cross-validation protocol used for forecasting. Additionally, we report the **Joint Exact Match (EM)** score, which measures strict multi-label correctness (9).

$$\text{Joint EM} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \mathbb{1}(\hat{y}_i = y_i) \quad (9)$$

This metric is meant to capture compositional reasoning accuracy across multiple decision dimensions.

Furthermore, we report **Consistency**, which evaluates whether the predicted action aligns with the direction of the predicted fuel consumption trend.

$$\text{Consistency} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \mathbb{1}(a_i = 0 \wedge \Delta \hat{y}_1 = 0 \vee \text{sign}(a_i) = \text{sign}(\Delta \hat{y}_1)) \quad (10)$$

We have included this metric to reflect the alignment between explanations and numerical forecasts analogous to faithfulness in explainable literature [37].

Table 4. Evaluation results of the explanation head

Ship	Horizon	SEA STATE (F1)	FUEL RISK (F1)	SPEED ACTION (F1)	Joint EM	Consistency
Ceto	3	0.865	0.491	0.660	0.503	0.732
Ceto	6	0.864	0.473	0.664	0.514	0.662
Poseidon	3	1.000	0.685	0.990	0.715	0.830
Poseidon	6	0.999	0.716	0.983	0.745	0.815
Triton	3	0.990	0.496	0.836	0.523	0.929
Triton	6	0.977	0.462	0.802	0.499	0.954

Conclusion. In our work, we proposed FuelSight, an integrated architecture for producing a k-step fuel forecast and generating structured, human-readable insights. The empirical evaluation of the FuelCast benchmark demonstrates competitive performance across multiple ship horizons. This further supports the claim that LLMs, when appropriately adapted, can be effective across multiple domains for time-series forecasting.

Additionally, our model produces syntactically valid, structured output that provides a good foundation for Explainable AI in the maritime industry. However, we acknowledge that further refinement and investigation are needed in this area. The following finding aligns with prior research that explanation methods often struggle to achieve faithfulness and stability, even when predictive performance is high [38].

Future work will focus on improving explanation fidelity and robustness. Specifically, we plan to adopt gradient-based attribution methods to ground explanations in model sensitivity and to explore methods for evaluating human-readable explanations produced by LLMs. Furthermore, we plan to extend the feature list used for modeling and include more ship-specific metrics, such as engine RPM, to provide more actionable insights.

Overall, the results suggest that LLM-based architectures provide a necessary foundation for combined prediction-explanation systems in the maritime industry.

REFERENCES

1. Pallotta G, Vespe M, Bryan K. Vessel Pattern Knowledge Discovery from AIS Data: A Framework for Anomaly Detection and Route Prediction. *Entropy*. 2013; 15(6):2218-2245. <https://doi.org/10.3390/e15062218>.
2. IMO. (2020). Fourth Greenhouse Gas Study 2020. International Maritime Organization. <https://www.imo.org/en/ourwork/environment/pages/fourth-imo-greenhouse-gas-study-2020.aspx>
3. Yan, R., Wang, S., & Psaraftis, H. N. (2021). Data analytics for fuel consumption management in maritime transportation: Status and perspectives. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 155, 102489.
4. Zhou, Y., Pazouki, K., Murphy, A. J., Uriondo, Z., Granado, I., Quincoces, I., & Fernandes-Salvador, J. A. (2023). Predicting ship fuel consumption using a combination of metocean and on-board data. *Ocean Engineering*, 285, 115509.
5. Wang, K., Wang, J., Huang, L., Yuan, Y., Wu, G., Xing, H., ... & Jiang, X. (2022). A comprehensive review on the prediction of ship energy consumption and pollution gas emissions. *Ocean Engineering*, 266, 112826.

6. Viga, J., Mueck, P., Löser, A., & Weis, T. (2025, September). Fuelcast: Benchmarking tabular and temporal models for ship fuel consumption. In *International Workshop on Advanced Analytics and Learning on Temporal Data* (pp. 54-69). Cham: Springer Nature Switzerland.
7. Petersen, J.P., Jacobsen, D.J. & Winther, O. Statistical modelling for ship propulsion efficiency. *J Mar Sci Technol* 17, 30–39 (2012). <https://doi.org/10.1007/s00773-011-0151-0>
8. Hu, Z., Jin, Y., Hu, Q., Sen, S., Zhou, T., & Osman, M. T. (2019). Prediction of fuel consumption for enroute ship based on machine learning. *Ieee Access*, 7, 119497-119505.
9. Nguyen, V. G., Sakthivel, R., Rudzik, K., Kozak, J., Sharma, P., Pham, N. D. K., ... & Nguyen, X. P. (2023). Using artificial neural networks for predicting ship fuel consumption. *Polish Maritime Research*
10. Agand, P., Kennedy, A., Harris, T., Bae, C., Chen, M., & Park, E. J. (2023). Fuel consumption prediction for a passenger ferry using machine learning and in-service data: A comparative study. *Ocean Engineering*, 284, 115271.
11. Lei, L., Wen, Z., & Peng, Z. (2021, September). Prediction of main engine speed and fuel consumption of inland ships based on deep learning. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 2025, No. 1, p. 012012). IOP Publishing.
12. Ilias, L., Kapsalis, P., Mouzakitis, S., & Askounis, D. (2023). A multitask learning framework for predicting ship fuel oil consumption. *Ieee Access*, 11, 132576-132589.
13. Wang, K., Hua, Y., Huang, L., Guo, X., Liu, X., Ma, Z., ... & Jiang, X. (2023). A novel GA-LSTM-based prediction method of ship energy usage based on the characteristics analysis of operational data. *Energy*, 282, 128910.
14. Liu, Y., Wang, K., Lu, Y., Zhang, Y., Li, Z., Ma, R., & Huang, L. (2024). A ship energy consumption prediction method based on TGMA model and feature selection. *Journal of Marine Science and Engineering*, 12(7), 1098.
15. Wang, Z., Wang, K., Li, Z., Liang, H., Yin, S., Ma, Q., ... & Xiong, W. (2026). A Novel ROA-Optimized CNN-BiGRU Hybrid Network with an Attention Mechanism for Ship Fuel Consumption Prediction. *Journal of Marine Science and Engineering*, 14(4), 324.
16. Pedersen, B. P., & Larsen, J. (2009, May). Prediction of full-scale propulsion power using artificial neural networks. In *Proceedings of the 8th international conference on computer and IT applications in the maritime industries (COMPIT'09)*, Budapest, Hungary May (pp. 10-12).
17. Hu, Z., Jin, Y., Hu, Q., Sen, S., Zhou, T., & Osman, M. T. (2019). Prediction of fuel consumption for enroute ship based on machine learning. *Ieee Access*, 7, 119497-119505.
18. Zhang, M., Tsoulakos, N., Kujala, P., & Hirdaris, S. (2024). A deep learning method for the prediction of ship fuel consumption in real operational conditions. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 130, 107425.
19. Petersen, J. P., Winther, O., & Jacobsen, D. J. (2012). A machine-learning approach to predict main energy consumption under realistic operational conditions. *Ship Technology Research*, 59(1), 64-72.
20. Lundberg, S. M., & Lee, S. I. (2017). A unified approach to interpreting model predictions. *Advances in neural information processing systems*, 30.
21. Ribeiro, M. T., Singh, S., & Guestrin, C. (2016, August). " Why should i trust you?" Explaining the predictions of any classifier. In *Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD international conference on knowledge discovery and data mining* (pp. 1135-1144).
22. Jin, M., Wang, S., Ma, L., Chu, Z., Zhang, J. Y., Shi, X., ... & Wen, Q. (2023). Time-llm: Time series forecasting by reprogramming large language models. *arXiv preprint arXiv:2310.01728*.
23. Liu, P., Guo, H., Dai, T., Li, N., Bao, J., Ren, X., ... & Xia, S. T. (2025, April). Calf: Aligning llms for time series forecasting via cross-modal fine-tuning. In *Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence* (Vol. 39, No. 18, pp. 18915-18923).
24. Liu, Y., Qin, G., Huang, X., Wang, J., & Long, M. (2024). Autotimes: Autoregressive time series forecasters via large language models. *Advances in Neural Information Processing Systems*, 37, 122154-122184.
25. Park, H., Jung, J., Seo, M., Choi, H., Cho, D., Park, S., & Choi, D. G. (2025). AIS-LLM: A Unified Framework for Maritime Trajectory Prediction, Anomaly Detection, and Collision Risk Assessment with Explainable Forecasting. *arXiv preprint arXiv:2508.07668*.
26. Kim, T., Kim, J., Tae, Y., Park, C., Choi, J. H., & Choo, J. (2021, May). Reversible instance normalization for accurate time-series forecasting against distribution shift. In *International conference on learning representations*.
27. Degiuli, N., Čatipović, I., Martić, I., Werner, A., & Čorić, V. (2017). Increase of ship fuel consumption due to the added resistance in waves. *Journal of sustainable development of energy, water and environment systems*, 5(1), 1-14.

28. Farkas, A., Degiuli, N., Martić, I., & Mikulić, A. (2023). Benefits of slow steaming in realistic sailing conditions along different sailing routes. *Ocean engineering*, 275, 114143.
29. Radford, A., Wu, J., Child, R., Luan, D., Amodei, D., & Sutskever, I. (2019). Language models are unsupervised multitask learners. *OpenAI blog*, 1(8), 9.
30. Hu, E. J., Shen, Y., Wallis, P., Allen-Zhu, Z., Li, Y., Wang, S., & Chen, W. (2022). Lora:Low-rank adaptation of large language models. *Iclr*, 1(2), 3.
31. He, K., Zhang, X., Ren, S., & Sun, J. (2016). Deep residual learning for image recognition. In *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition* (pp. 770-778).
32. Chen, X., Jin, H., Huang, Y., & Feng, Z. (2026). XLinear: A Lightweight and Accurate MLP-Based Model for Long-Term Time Series Forecasting with Exogenous Inputs. *arXiv preprint arXiv:2601.09237*.
33. Das, A., Kong, W., Sen, R., & Zhou, Y. (2024, July). A decoder-only foundation model for time-series forecasting. In *Forty-first international conference on machine learning*.
34. Ansari, A. F., Stella, L., Turkmen, C., Zhang, X., Mercado, P., Shen, H., ... & Wang, Y. (2024). Chronos: Learning the language of time series. *arXiv preprint arXiv:2403.07815*.
35. Kim, T., Kim, J., Tae, Y., Park, C., Choi, J. H., & Choo, J. (2021, May). Reversible instance normalization for accurate time-series forecasting against distribution shift. In *International conference on learning representations*.
36. Abdul Samad, S., Sushma, R., Bharathi Mohan, G., Samuji, P., Repakula, S., & Kothamasu, S. R. (2024, March). Advancing abstractive summarization: Evaluating GPT-2, BART, T5-small, and pegasus models with baseline in ROUGE and BLEU metrics. In *International Conference on Innovations in Cybersecurity and Data Science Proceedings of ICICDS* (pp. 119-131). Singapore: Springer Nature Singapore.
37. Aksu, T., Liu, C., Saha, A., Tan, S., Xiong, C., & Sahoo, D. (2024). Xforecast: Evaluating natural language explanations for time series forecasting. *arXiv preprint arXiv:2410.14180*.
38. Alvarez-Melis, D., & Jaakkola, T. S. (2018). On the robustness of interpretability methods. *arXiv preprint arXiv:1806.08049*

Стаття прийнята 10.02.2026

© Кучерук Г.Ю., Ганношина І.М.

МЕТОДИ ВИЯВЛЕННЯ СПУФІНГУ В СУДНОВИХ НАВІГАЦІЙНИХ СИСТЕМАХ

Стаття присвячена систематизації та порівняльному аналізу сучасних методів виявлення GPS/GNSS-спуфінгу у суднових навігаційних системах. Розглянуто фізичні принципи спуфінг-атак, їх класифікацію за складністю, цільовим об'єктом та наслідками для безпеки мореплавства. Детально проаналізовано методи виявлення на основі: моніторингу рівня сигналу та відношення несучої до шуму (C/N_0), перевірки узгодженості міжсупутникових доплерівських зсувів, кросперевірки з альтернативними позиційними системами (AIS, eLoran, IMO), гібридної інерційно-супутникової навігації з фільтром Калмана, а також методів машинного навчання – зокрема рекурентних нейронних мереж LSTM та ансамблевих класифікаторів. Запропоновано багаторівневу архітектуру захисту навігаційних систем, яка інтегрує сигнальний, навігаційний та мережесвий рівні виявлення та визначені технічні передумови щодо її коректного функціонування.

Ключові слова: GNSS-спуфінг, суднова навігація, GPS-безпека, виявлення аномалій, фільтр Калмана, машинне навчання, AIS, архітектура захисту навігаційних систем.

Постановка проблеми. Глобальні навігаційні супутникові системи (GNSS), зокрема GPS, GLONASS, Galileo та BeiDou, стали невід'ємною основою сучасного судноплавства. Вони забезпечують позиціонування, навігацію та синхронізацію часу для більш ніж 90 % комерційних суден у світі. Однак зростаюча залежність від GNSS-сигналів створює серйозні вразливості перед навмисними атаками — зокрема GPS-спуфінгом.

Таким чином, виникає науково-технічна проблема побудови архітектури захисту навігаційних систем від спуфінгу, обумовлена необхідністю підвищення надійності навігаційного забезпечення суден в умовах зростання радіоелектронних та кібернетичних впливів. Традиційні підходи до навігації, що базуються виключно на GNSS, вже не забезпечують належного рівня стійкості, тому сучасні дослідження орієнтовані на розробку комплексних методів виявлення та протидії спуфінгу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблема виявлення спуфінгу в суднових навігаційних системах зумовлена вразливістю GNSS-сигналів до навмисних атак, що спотворюють навігаційну інформацію [1]. У наукових дослідженнях сформовано кілька ключових підходів до її вирішення.

Методи аналізу радіосигналу базуються на контролі параметрів GNSS, зокрема рівня сигналу, співвідношення сигнал/шум та доплерівських зсувів, що дозволяє оперативно виявляти аномалії [1]. Їх розвитком є використання програмно-визначених радіосистем (SDR), які забезпечують гнучкий моніторинг сигналів у реальному часі. Зокрема, у дослідженні [2] запропоновано SDR-платформу для виявлення спуфінгу на борту суден, яка забезпечує високий рівень адаптивності до змін сигнального середовища. Водночас ефективність таких методів обмежена у випадку складних атак, що імітують характеристики справжнього сигналу.

Другий напрям досліджень пов'язаний із використанням інтегрованих навігаційних систем. В роботі [3] розглянуті інтегровані підходи, зокрема поєднання GNSS із інерційними системами (INS) та використання AIS, які дозволяють виявляти невідповідності між різними джерелами навігаційних даних. Застосування фільтру Калмана, за твердженням авторів [4], підвищує точність оцінювання стану судна в умовах нелінійної динаміки та морського хвилювання, однак такі методи залежать від доступності зовнішніх даних.

Суттєвий розвиток отримали методи машинного навчання. Зокрема, згорткові нейронні мережі (CNN) за даними дослідження [5], забезпечують точність понад 97 % при аутентифікації

сигналів, тоді як рекурентні мережі (зокрема LSTM) демонструють високу ефективність для аналізу часових залежностей GNSS-даних та перевершують класичні алгоритми машинного навчання у задачах виявлення спуфінгу [6]. В роботі [7] обґрунтовується застосування федеративного навчання, що дозволяє підвищити ефективність моделей без розкриття конфіденційних навігаційних даних, оскільки навчання відбувається локально, а передаються лише параметри моделей.

Вагомий внесок у дослідження проблем виявлення спуфінгу здійснили українські науковці. Зокрема, у роботах [8-11] запропоновано моделі загроз GNSS-систем, гібридні методи виявлення атак із використанням алгоритмів машинного навчання, а також технічні рішення підвищення стійкості приймачів до спуфінгу. Окрему увагу приділено застосуванню антенних решіток, інтегрованих систем моніторингу та аналізу впливу радіоелектронних перешкод на навігаційні системи в умовах сучасних загроз.

У нормативних документах підкреслюється необхідність впровадження багаторівневих систем захисту та автоматизованого виявлення атак із мінімальною затримкою реакції [12, 13]. Загалом результати досліджень свідчать, що жоден окремих метод не забезпечує достатнього рівня надійності, що обґрунтовує доцільність комплексного підходу до виявлення спуфінгу [14, 15].

Невирішена частина проблеми. Аналіз наукової літератури дозволяє виявити такі систематичні прогалини, які й обумовлюють наукову новизну даної статті. Більшість досліджень розглядають окремі методи виявлення ізольовано, без оцінки їх взаємодоповнення у багаторівневій архітектурі, орієнтовані на авіаційний або наземний транспорт, відсутній єдиний публічний набір даних GNSS-атак у морському контексті. Це визначає спрямованість даного дослідження: запропонувати систематизований порівняльний аналіз методів виявлення та обґрунтовану архітектуру їх інтеграції, адаптовану до вимог морського судноплавства.

Метою статті є систематизація актуальних методів виявлення спуфінг-атак у судових навігаційних системах, їх порівняльний аналіз за ефективністю, складністю реалізації та практичною застосовністю для морської галузі.

Виклад основного матеріалу. Сучасний розвиток морського транспорту супроводжується активною цифровізацією процесів судноводіння, що зумовлює широке використання глобальних навігаційних супутникових систем (GNSS) як основного джерела визначення координат, швидкості та курсу судна. Водночас зростає вразливість навігаційних систем до зовнішніх кіберзагроз, серед яких особливо небезпечним є спуфінг – навмисна підміна навігаційного сигналу з метою введення в оману систем позиціонування. Такі атаки можуть призводити до значних відхилень у визначенні місцеположення судна, створюючи передумови для аварійних ситуацій, зіткнень або посадок на мілину, що суперечить вимогам безпеки мореплавства, встановленим ІМО. На відміну від глушіння (джамінгу), яке є очевидним через втрату сигналу, спуфінг значно небезпечніший: він формує хибну, але технічно достовірну картину навколишнього середовища, не активуючи стандартних сигналів тривоги.

За рівнем складності та технічними характеристиками спуфінг-атаки поділяються на три категорії. Спрощений (некогерентний) спуфінг – використовує заздалегідь записані GNSS-сигнали або генератор на основі програмно-визначеного радіо (SDR) без синхронізації з реальним сигналом. Такий тип легко реалізується, але залишає очевидні артефакти: різкий стрибок рівня сигналу, незбіг у часових мітках, миттєва зміна координат. Середньої складності (частково когерентний) спуфінг – атакуючий відстежує реальні сигнали GNSS та поступово вводить хибні з близькими параметрами. Перехід між легітимним і підробленим сигналом відбувається плавно, що ускладнює виявлення за порогом рівня сигналу. Складний (повністю когерентний) спуфінг – реалізується зі знанням точного положення цілі, дозволяє передавати сигнали з точними псевдодальностями та доплерівськими зсувами, що відповідають реальному сценарію. Для його реалізації необхідне спеціалізоване обладнання великої вартості.

За цільовою ознакою виділяють: атаки на позицію (підміна координат), атаки на час (спотворення PPS-імпульсу та UTC-часу), атаки на швидкість (маніпуляція вектором швидкості) та комплексні атаки (одночасна підміна PVT-рішення). За ефектом дії – атаки одиночного виведення (переміщення в конкретну хибну точку) та атаки захоплення і дрейфу (поступове відведення з реальної траєкторії).

У практиці судноводіння проблема ускладнюється тим, що сучасні інтегровані навігаційні комплекси поєднують дані з різних джерел, зокрема Automatic Identification System, радіолокаційних станцій та Electronic Chart Display and Information System, однак у більшості випадків саме GNSS залишається базовим джерелом координат. За умов спуфінгу ці системи можуть відображати узгоджену, але хибну інформацію, що значно ускладнює своєчасне виявлення загрози.

Для уникнення загрози спуфінгу потрібно використовувати інструменти протидії. Розглянемо сучасні методи виявлення спуфінгу в суднових навігаційних системах.

Одним із найбільш поширених підходів є методи аналізу радіосигналу. До них відноситься моніторинг AGC та C/N_0 , метод аналізу міжсупутникових доплерівських зсувів та метод аналізу фазових вимірювань несучої (Carrier Phase).

Моніторинг AGC та C/N_0 - автоматичне регулювання підсилення (AGC) є першою лінією захисту приймача. У нормальних умовах AGC підтримує стабільний вихідний рівень, компенсуючи варіації вхідного сигналу. При спуфінгу потужний синтетичний сигнал викликає різке зменшення коефіцієнта підсилення AGC, що реєструється як цифровий показник AGC voltage (VAGC). Падіння VAGC більш ніж на 3 дБ за час менше 1 секунди є індикатором можливого спуфінгу.

Відношення потужності несучої до спектральної густини шуму (C/N_0 , вимірюється у дБ-Гц) характеризує якість прийнятого сигналу. Норма для відкритого неба: 35-45 дБ-Гц. При спуфінгу синтетичний сигнал, як правило, має більшу потужність: значення C/N_0 перевищують 50-65 дБ-Гц, що фізично неможливо для природного GNSS-сигналу на відстані 20 200 км (орбіта GPS). Алгоритм виявлення: при $\Delta(C/N_0) > 10$ дБ-Гц протягом 2-3 послідовних епох = попередження. Однак аналіз лише рівня сигналу не завжди достатній — складніші атаки маскують потужність. Тому паралельно застосовується перевірка узгодженості доплерівських зсувів між супутниками.

Доплерівський зсув частоти для кожного супутника залежить від відносної швидкості між супутником і приймачем і є строго детермінованим при заданих ефемеридах і відомому положенні приймача. Для n видимих супутників справжні доплерівські зсуви $\{f_{d,1}, f_{d,2}, \dots, f_{d,n}\}$ взаємно узгоджені через спільний вектор швидкості приймача. Базова умова узгодженості визначається нерівністю, де $\varepsilon \approx 0.5-1.0$ Гц.:

$$\| \Delta f_{d,measured} - \Delta f_{d,predicted} \| < \varepsilon, \quad (1)$$

де, $\Delta f_{d,predicted}$ - очікуване значення (predicted);
 $\Delta f_{d,measured}$ - виміряне значення (measured).

При спуфінгу зловмисник, який не знає точної швидкості руху судна, генерує доплерівські зсуви, що не відповідають кінематиці реального руху. Перевірка попарних різниць доплерівських зсувів між супутниками має розбіжність понад 2 Гц. Аналіз виконується з частотою 1-10 Гц і забезпечує виявлення більшості атак середньої складності.

Ще більш чутливим інструментом є аналіз фазових вимірювань несучої, який дозволяє виявляти навіть ретельно підготовлені атаки за субміліметровими аномаліями. Фазові вимірювання несучої мають похибку порядку 1-2 мм, тоді як кодові псевдодальності – порядку 1-3 м. При спуфінгу різниця між фазовими та кодовими псевдодальностями виходить за межі очікуваного шуму. Додатково, миттєве «захоплення» приймача хибним сигналом призводить до стрибка у накопиченому лічильнику цілих циклів фази (integer ambiguity), що є характерним індикатором атаки.

Описані методи аналізу радіосигналу спираються виключно на внутрішні параметри GNSS-приймача. Для підвищення надійності виявлення доцільно залучати незалежні зовнішні джерела позиційних даних, для чого використовуються методи кросперевірки з альтернативними джерелами. До них відноситься інтеграція з системою AIS і eLoran та наземні радіонавігаційні системи.

Інтеграція з системою AIS. Автоматична ідентифікаційна система (AIS) транслює позицію, курс і швидкість судна іншим учасникам руху незалежно від GNSS-прийому. При спуфінгу GNSS-позиція судна на власному екрані може не збігатися з AIS-позицією, яку спостерігають інші судна. Алгоритм виявлення порівнює власну GNSS-позицію з позицією, отриманою від сусідніх суден, та відстежує геометричну несумісність ситуаційної картини. Але є обмеження методу: AIS також може бути піддано

атаці (AIS-спуфінг), тому необхідна взаємна перевірка та ранжування джерел. Вирішення реалізується через Bayesian trust framework, де кожному джерелу позиції призначається вага довіри, що динамічно оновлюється.

Якщо AIS є мережевим джерелом і сам потенційно вразливий, то eLoran пропонує принципово інший фізичний принцип роботи, що робить його стійким навіть до координованих атак.

Система eLoran (Enhanced Long-Range Aid to Navigation) є вдосконаленою версією Loran-C і функціонує у НЧ-діапазоні (100 кГц). Її принцип роботи докорінно відрізняється від GNSS: наземні передавачі, розташовані за 1 000–2 000 км, є стійкими до перехоплення і глушіння через значно вищу потужність сигналу (250–1 000 кВт). Точність eLoran: 10–30 м при використанні диференціальних поправок (dLoran). Кросперевірка GNSS-позиції з eLoran-рішенням забезпечує незалежний контроль із затримкою менше 5 секунд.

Кросперевірка з зовнішніми системами ефективна, але залежить від їх доступності. Більш автономним підходом є інтеграція GNSS із бортовою інерційною системою навігації.

Гібридна інерційно-супутникова навігація (GNSS/INS) – це інерційна навігаційна система (INS) на базі гіроскопів і акселерометрів, яка забезпечує автономне визначення положення без зовнішніх радіосигналів. Якість сучасних тактичних IMU (Inertial Measurement Unit): дрейф гіроскопа – 0.001–0.01 °/год (клас навігаційної точності). Фундаментальна властивість: помилка INS накопичується у часі (інтеграція похибок), тоді як GNSS має незалежні та не пов'язані у часі похибки.

Класичний алгоритм інтеграції – розширений фільтр Калмана (EKF) або Unscented Kalman Filter (UKF) – об'єднує GNSS-вимірювання та INS-прогноз у оптимальній байєсівській оцінці стану (рівняння 2). Вектор стану включає: положення (3D), швидкість (3D), орієнтацію (quaternion), похибки акселерометра, похибки гіроскопа та GNSS-зміщення годинника.

$$\hat{x}_k = F_k \hat{x}_{k-1} + K_k(z_k - H_k F_k \hat{x}_{k-1}), \quad (2)$$

де, $F_k \hat{x}_{k-1}$ - прогноз інерціальної системи (INS)

\hat{x}_k – нова оцінка стану

K_k – матриця підсилення Калмана,

z_k – вектор вимірювань GNSS,

H_k – матриця спостереження.

Ідея детектора спуфінгу: якщо GNSS-інновація $\|z_k - H_k \hat{x}_k\|$ перевищує 3σ -поріг, визначений на основі коваріаційної матриці S_k , система фіксує аномалію та підвищує вагу INS-рішення. Фільтр Калмана є потужним математичним інструментом, однак залишається детерміністичним. Для розпізнавання складних нелінійних патернів атак перспективним доповненням є методи машинного навчання. До методів машинного навчання відноситься метод з використанням рекурентних нейронних мереж LSTM і ансамблеві методи та аномалій-детектори.

Рекурентні нейронні мережі LSTM - мережі Long Short-Term Memory (LSTM) здатні моделювати часові залежності у послідовностях навігаційних даних, що робить їх природним вибором для аналізу GNSS-трас. Вхідний вектор для кожного часового кроку включає: AGC, C/No по кожному SV, доплерівські залишки, PDOP/HDOP, delta-position між послідовними епохами, температурні та кутові характеристики із IMU.

Архітектура класифікатора двошарова LSTM (256 + 128 нейронів) \rightarrow GlobalAveragePooling \rightarrow Dense(64, ReLU) \rightarrow Dropout(0.3) \rightarrow Dense(1, Sigmoid). Навчання виконується на синтетичних даних із відомими атаками різного типу та реальних лог-файлах GNSS-приймачів. Точність на тестовій вибірці: 94–97 % при хибнопозитивній тривозі менше 2 %. Завдяки батч-обробці LSTM дає відповідь з затримкою 1–3 секунди при частоті дискретизації 1–10 Гц.

LSTM є оптимальним вибором для потужних обчислювальних платформ. Для систем з обмеженими ресурсами або у разі відсутності розміченої навчальної вибірки доцільно застосовувати ансамблеві підходи та детектори аномалій.

Ансамблеві методи, зокрема Random Forest та Gradient Boosting (XGBoost, LightGBM), демонструють ефективність 88–93 % при значно меншій обчислювальній вартості порівняно з LSTM.

Вони особливо корисні на вбудованих системах із обмеженими ресурсами (ARM Cortex-M, FPGA-реалізації). Ізоляційний ліс (Isolation Forest) використовується як детектор аномалій без необхідності розміченої навчальної вибірки: ефективність для невідомих типів атак – 80-86 %.

Усі розглянуті методи є реактивними – вони виявляють атаку після її початку. Принципово інший, превентивний підхід пропонує криптографічна аутентифікація сигналу, яка унеможливує підробку ще на рівні його формування.

Криптографічна аутентифікація навігаційного повідомлення (OSNMA – Open Service Navigation Message Authentication) є єдиним фундаментальним рішенням, що усуває загрозу спуфінгу на рівні формування сигналу. Система Galileo OSNMA використовує схему Tesla (Timed Efficient Stream Loss-tolerant Authentication) для підпису навігаційних повідомлень. Принцип TESLA: сервер генерує ланцюжок симетричних ключів K_0, K_1, \dots, K_n та підписує кожне повідомлення ключем K_i , а сам ключ розкриває у наступному часовому кроці. Приймач зберігає MAC та перевіряє його після отримання ключа.

Отже, методи аналізу радіосигналу забезпечують швидке виявлення базових атак, але є недостатніми для складних сценаріїв. Інтеграція з зовнішніми системами та інерційною навігацією підвищує надійність, а методи машинного навчання дозволяють виявляти складні патерни атак. Використання криптографічної аутентифікації забезпечує запобігання спуфінгу на рівні сигналу.

Методи захисту суднових навігаційних систем від спуфінгу, принцип роботи, переваги і недоліки в узагальненому вигляді наведені у табл.1.

Таблиця 1 - Класифікація методів захисту суднових навігаційних систем від спуфінгу

Метод	Принцип роботи	Ключові параметри	Переваги	Недоліки
Методи аналізу радіосигналу				
AGC та C/No	Аналіз рівня сигналу	VAGC, C/No	Швидкість	Обмежена точність
Доплерівські зсуви	Узгодженість швидкостей	Δf_d	Виявлення атак	Залежність від даних
Фазові вимірювання	Аналіз фазових аномалій	мм точність	Висока чутливість	Складність
Методи кросперевірки				
AIS	Порівняння позицій	Геометрія	Незалежність	Вразливість
eLogan	Наземна навігація	10–30 м	Стійкість	Обмеження
Інерційно-супутникові методи				
GNSS/INS	Фільтр Калмана	3σ критерій	Автономність	Дрейф
Методи машинного навчання				
LSTM	Часові ряди	94–97%	Висока точність	Ресурси
Random Forest/XGBoost	Класифікація	88–93%	Ефективність	Менша точність
Isolation Forest	Аномалії	80–86%	Без навчання	Нижча точність
Криптографічні методи				
OSNMA	Аутентифікація сигналу	~30 с	Надійність	Загримка

Джерело: систематизовано автором на основі [1- 7]

Наведені методи набувають практичного значення лише в контексті реальних загроз. Ефективний захист суднових навігаційних систем від спуфінгу потребує комплексного підходу. Тому, на основі аналізу переваг і недоліків кожного методу запропоновано трирівневу архітектуру виявлення і захисту суднових навігаційних систем від спуфінгу (рис.1).

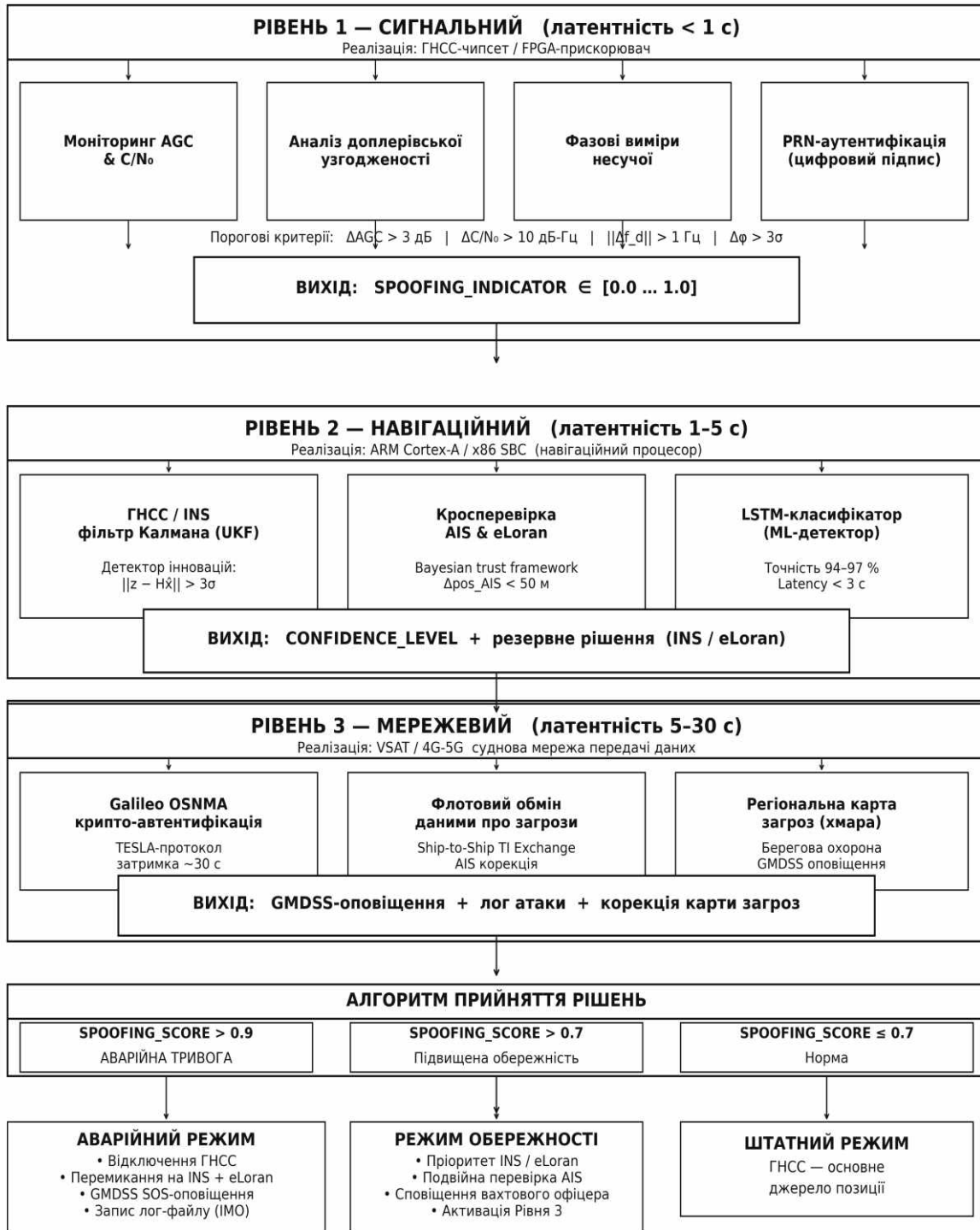


Рисунок 1 - Архітектура захисту суднових навігаційних систем від спуфінгу
 Джерело: запропоновано авторами

Рівень 1 – Сигнальний рівень (латентність: < 1 с). Реалізується безпосередньо у GNSS-чипсеті або FPGA-прискорювачі. Включає: безперервний моніторинг AGC та C/N₀ з адаптивним порогом (3σ), аналіз доплерівської узгодженості між каналами, перевірку фазових вимірювань несучої. Формує: бінарний прапор підозрілого сигналу та метрику якості SPOOFING_INDICATOR (0.0–1.0).

Рівень 2 – Навігаційний рівень (латентність: 1–5 с). Реалізується у навігаційному процесорі (ARM Cortex-A або x86 SBC). Включає: GNSS/INS інтеграцію з UKF та детектором інновацій, кросперевірку

з AIS та eLoran, LSTM-класифікатор на агрегованих ознаках. Формує: рівень достовірності позиції CONFIDENCE_LEVEL та активацію резервного рішення.

Рівень 3 — Мережевий рівень (латентність: 5–30 с). Реалізується через суднову мережу передачі даних (VSAT, 4G/5G). Включає: обмін даними про GNSS-якість із береговою охороною та іншими суднами, агрегацію флотових спостережень у хмарній платформі, криптографічну аутентифікацію через Galileo OSNMA. Формує: регіональну карту загроз та оповіщення для берегових служб.

Алгоритм прийняття рішень використовує зважену суму індикаторів усіх рівнів: якщо SPOOFING_SCORE > 0.7, система переходить у режим «підвищеної обережності» та починає пріоритизувати INS та eLoran над GNSS. При SPOOFING_SCORE > 0.9 активується аварійна сигналізація, записується лог-файл для подальшого розслідування та надсилається сповіщення GMDSS.

Запропонована архітектура є масштабованою та може застосовуватися у різних конфігураціях залежно від типу судна, операційного середовища та наявного обладнання.

Повна трирівнева архітектура (рівні 1 + 2 + 3) повинна бути обов'язковою для суден, що відповідають хоча б одному з таких критеріїв: валова місткість понад 500 GT відповідно до вимог IMO та SOLAS Convention, що передбачає обов'язкове встановлення систем AIS і ECDIS, оскільки саме такі судна є першочерговими цілями спуфінг-атак через високу цінність вантажу або пасажирів; плавання у зонах підвищеного ризику, зокрема в акваторії Балтійського моря, Перській затоці, Ормузькій та Малаккській протоках, а також уздовж узбережжя Північної Кореї, де систематично фіксуються випадки GNSS-спуфінгу; перевезення небезпечних вантажів класів IMO 1–9, де відхилення від затвердженого маршруту є кримінальним правопорушенням і може мати катастрофічні наслідки; експлуатація пасажирських суден і поромних ліній через високий рівень публічного інтересу та значний масштаб потенційних збитків у разі аварії; а також участь суден у морських операціях під егідою NATO або ЄС, де GNSS-спуфінг розглядається як один з інструментів гібридної війни.

Конфігурація рівнів 1 + 2 без мережевого компонента є достатньою для суден каботажного плавання (до 200 морських миль від берега) зі стабільним покриттям мобільних мереж, де мережевий рівень може бути реалізований через LTE замість супутникового зв'язку VSAT із суттєво нижчою вартістю; суден із застарілою інфраструктурою зв'язку, де впровадження третього рівня потребує повної модернізації суднової мережі та є економічно недоцільним у короткостроковій перспективі; а також промислових і рибпромислових суден, що працюють у районах із відсутністю покриття супутникового зв'язку, де перші два рівні можуть ефективно функціонувати автономно без зовнішніх мережевих з'єднань.

Мінімальна конфігурація, що включає лише сигнальний рівень, є прийнятною як тимчасовий захід для малих суден (GT < 500) та яхт, на які не поширюються обов'язкові вимоги SOLAS Convention, але власники яких прагнуть забезпечити базовий захист від некогерентних атак; портів, де впровадження повної архітектури здійснюється поетапно, і така конфігурація застосовується першою, дозволяючи самостійно виявляти до 75 % атак; а також навчальних суден і тренажерних центрів, у яких архітектура використовується з демонстраційною та освітньою метою.

Для коректного функціонування архітектури захисту суднових навігаційних систем від спуфінгу необхідне виконання таких технічних передумов:

1. Використання GNSS-приймача, що підтримує виведення «сирих» вимірювань (raw measurements): AGC-значення, C/N₀ по кожному каналу, фазові псевдодальності несучої. Більшість сучасних морських приймачів (u-blox M9, NovAtel OEM7, Septentrio mosaic-X5) надають ці дані через стандартний інтерфейс NMEA 0183 / NMEA 2000 або власні бінарні протоколи.

2. Наявність ІНС (або ІМУ) з класом точності не нижче «тактичного» (дрейф гіроскопа ≤ 0.01 °/год). Використання MEMS-ІМУ навігаційного класу є мінімально прийнятним; стратегічний клас (≤ 0.001 °/год) забезпечує кращу якість детектора інновацій на Рівні 2.

3. Для Рівня 3 необхідна пропускна здатність каналу зв'язку не менше 64 кбіт/с для передачі GNSS-метаданих у режимі реального часу. VSAT-термінали класу VSAT-mini (Intellian v100, Cobham SAILOR 900) задовольняють цю вимогу за будь-яких умов плавання.

Запропонована структура захисту суднових навігаційних систем від спуфінгу може бути практично реалізованою та відповідає чинним вимогам IMO і BIMCO.

Висновок. Проведений аналіз методів виявлення GPS/GNSS-спуфінгу в суднових навігаційних системах дозволяє сформулювати такі висновки.

Жоден одиночний метод не забезпечує прийняттого захисту для всього діапазону загроз від спрощених до повністю когерентних атак. Тільки комплексний підхід, що поєднує сигнальний аналіз, навігаційну кросперевірку та методи машинного навчання дають достатньо ефективність. Найбільш практично реалізованим методом є гібридна GNSS/INS інтеграція на базі фільтра Калмана середньої ефективності, доступна як оновлення програмного забезпечення для більшості сучасних суднових навігаційних комплексів. Криптографічна аутентифікація Galileo OSNMA є єдиним методом, що забезпечує теоретично незламний захист, проте потребує сумісного обладнання і поширена лише серед нових суден та суден із модернізованими GNSS-приймачами. Методи машинного навчання, зокрема LSTM-класифікатори, показують найвищу ефективність для складних атак, проте вимагають якісних навчальних наборів даних, які наразі є обмеженими у публічному доступі через конфіденційність інцидентів.

Запропонована тривірнева архітектура захисту відповідає вимогам IMO ISM Code та рекомендаціям BIMCO/IACS для суднових кіберсистем і може бути інтегрована у наявні ECDIS та IBNS без заміни базового обладнання.

ЛІТЕРАТУРА

1. Singh S., Singh J., Singh S., Goyal S. B., Raboaca M. S., Verma C., Suci G. Detection and Mitigation of GNSS Spoofing Attacks in Maritime Environments Using a Genetic Algorithm // *Mathematics*. 2022. Vol. 10, No. 21. Article 4097. URL: <https://www.mdpi.com/2227-7390/10/21/4097>
2. IACS. UR E26/E27: Cyber resilience of ships. – 2022. – URL: <https://iacs.org.uk>
3. Zhang H., Wang J., Wang J., Liu X. GNSS spoofing detection based on multi-feature fusion and machine learning // *Computers & Fluids*. 2021. Vol. 231. Article 105141. URL: <https://www.sciencedirect.com>
4. Cole B., Schamberg G. Unscented Kalman Filter for Long-Distance Vessel Tracking in Geodetic Coordinates // *Applied Ocean Research*. 2022. Vol. 124. Article 103205. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141118722001468>
5. BIMCO. Guidelines on Cyber Security Onboard Ships. Version 4. – London: BIMCO, 2020. – 61 p. – URL: <https://www.bimco.org/media/oq0ft0gr/guidelines-on-cyber-security-onboard-ships-v4-1.pdf>
6. Semanjski S., Semanjski I., De Wilde W., Gautama S. GNSS spoofing detection by supervised machine learning with validation on real-world meaconing and spoofing data — Part II // *Sensors*. 2020. Vol. 20, No. 7. Article 1806. URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/20/7/1806>
7. Liu W., Papadimitratos P. Self-Supervised Federated GNSS Spoofing Detection with Opportunistic Data // *Proceedings of the ION GNSS+ Conference*. 2025. URL: <https://arxiv.org/abs/2505.06171>
8. Снеосіков О. А. Методи виявлення та протидії кібератакам типу gps spoofing і gps jamming з використанням AI для систем диференційної корекції та глобальної навігаційної супутникової системи // *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки*. 2025. Т. 355, № 4. С. 584–592. DOI: <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2025-355-82>
9. Снеосіков О. А., Нарезній О. П. Моделі загроз та порушника автономної системи диференціальної корекції глобальних навігаційних супутникових систем // *Вісник Херсонського національного технічного університету*. 2025. № 3. DOI: <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.3.2.54>
10. Наритник Т., Присяжний В., Капштик С. та ін. Improvement of the GPS signal receiving resistance against electromagnetic interference, jamming, and spoofing // *Information and Telecommunication Sciences*. 2022. Vol. 13, No. 2. P. 4–14. DOI: <https://doi.org/10.20535/2411-2976.22022.4-14>
11. Авілов А. І. Боротьба зі спуфінгом на безпілотних літальних апаратах // *Збірник наукових праць ХНУПС*. 2024. № 2(80). DOI: <https://doi.org/10.30748/zhups.2024.80.06>
12. BIMCO. Guidelines on Cyber Security Onboard Ships. Version 4. – London: BIMCO, 2020. – URL: <https://www.bimco.org/media/oq0ft0gr/guidelines-on-cyber-security-onboard-ships-v4-1.pdf>
13. IACS. UR E26/E27: Cyber resilience of ships. – 2022. – URL: <https://iacs.org.uk>.

14. Androjna A., et al. Cybersecurity in maritime navigation systems: threats and mitigation // 2021. <https://www.researchgate.net/publication>

15. Strohmeier M., Schäfer M., Lenders V., Martinovic I. On perception and reality in wireless air traffic communication security // *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. 2020. Vol. 22, No. 1. P. 249–291. DOI: 10.1109/COMST.2019.2949178 <https://dl.acm.org/doi/10.1109/COMST.2019.2949178>

REFERENCES

1. Singh S., Singh J., Singh S., Goyal S. B., Raboaca M. S., Verma C., Suciu G. Detection and Mitigation of GNSS Spoofing Attacks in Maritime Environments Using a Genetic Algorithm // *Mathematics*. 2022. Vol. 10, No. 21. Article 4097. URL: <https://www.mdpi.com/2227-7390/10/21/4097>

2. IACS. UR E26/E27: Cyber resilience of ships. – 2022. – URL: <https://iacs.org.uk>

3. Zhang H., Wang J., Wang J., Liu X. GNSS spoofing detection based on multi-feature fusion and machine learning // *Computers & Fluids*. 2021. Vol. 231. Article 105141. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0045790621001592>

4. Cole B., Schamberg G. Unscented Kalman Filter for Long-Distance Vessel Tracking in Geodetic Coordinates // *Applied Ocean Research*. 2022. Vol. 124. Article 103205. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141118722001468>

5. BIMCO. Guidelines on Cyber Security Onboard Ships. Version 4. – London: BIMCO, 2020. – 61 p. – URL: <https://www.bimco.org/media/oq0ft0gr/guidelines-on-cyber-security-onboard-ships-v4-1.pdf>

6. Semanjski S., Semanjski I., De Wilde W., Gautama S. GNSS spoofing detection by supervised machine learning with validation on real-world meaconing and spoofing data — Part II // *Sensors*. 2020. Vol. 20, No. 7. Article 1806. URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/20/7/1806>

7. Liu W., Papadimitratos P. Self-Supervised Federated GNSS Spoofing Detection with Opportunistic Data // *Proceedings of the ION GNSS+ Conference*. 2025. URL: <https://arxiv.org/abs/2505.06171>

8. Sniesikov O. A. Metody vyivlennia ta protydivii kiberatakam typu gps spoofing i gps jamming z vykorystannia ai dlia system dyferentsiinoi korektsii ta hlobalnoi navihatsiinoi suputnykovoii systemy // *Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. Tekhnichni nauky*. 2025. T. 355, № 4. P. 584–592. DOI: <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2025-355-82>

9. Sniesikov O. A., Nariezhnii O. P. Modeli zahroz ta porushnyka avtonomnoi systemy dyferentsialnoi korektsii hlobalnykh navihatsiinykh suputnykovykh system // *Visnyk Khersonskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu*. 2025. № 3. DOI: <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.3.2.54>

10. Narytnyk T., Prysiaznyi V., Kapshtyk S. ta in. Improvement of the GPS signal receiving resistance against electromagnetic interference, jamming, and spoofing // *Information and Telecommunication Sciences*. 2022. Vol. 13, No. 2. P. 4–14. DOI: <https://doi.org/10.20535/2411-2976.22022.4-14>

11. Avilov A. I. Borotba zi spufinhom na bezpilotnykh litalnykh aparatakh // *Zbirnyk naukovykh prats KhNUPS*. 2024. № 2(80). DOI: <https://doi.org/10.30748/zhups.2024.80.06>

12. BIMCO. Guidelines on Cyber Security Onboard Ships. Version 4. – London: BIMCO, 2020. – URL: <https://www.bimco.org/media/oq0ft0gr/guidelines-on-cyber-security-onboard-ships-v4-1.pdf>

13. IACS. UR E26/E27: Cyber resilience of ships. – 2022. – URL: <https://iacs.org.uk>

14. Androjna A., et al. Cybersecurity in maritime navigation systems: threats and mitigation // 2021. https://www.researchgate.net/publication/358676229_CYBER_SECURITY_CHALLENGES_FOR_SAFE_NAVIGATION_AT_SE

15. Strohmeier M., Schäfer M., Lenders V., Martinovic I. On perception and reality in wireless air traffic communication security // *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. 2020. Vol. 22, No. 1. P. 249–291. DOI: 10.1109/COMST.2019.2949178 <https://dl.acm.org/doi/10.1109/COMST.2019.2949178>

Kucheruk G. Yu., Hannoshyna I.M.

METHODS FOR DETECTING SPOOFING IN MARITIME NAVIGATION SYSTEMS

The article is devoted to the systematization and comprehensive comparative analysis of modern methods for detecting GPS/GNSS spoofing in maritime navigation systems. Particular attention is paid to the growing relevance of this issue in the context of increasing dependence on satellite navigation and the associated risks to the safety and reliability of maritime operations. The physical principles underlying spoofing attacks are examined in detail, including signal generation, synchronization, and manipulation mechanisms, as well as their classification according to the level of technical sophistication, target objects (shipborne receivers, navigation subsystems), and potential consequences for maritime safety, such as route distortion, collision risks, and loss of situational awareness.

The study provides an in-depth analysis of detection methods based on several complementary approaches. These include monitoring of signal parameters, in particular signal strength and carrier-to-noise density ratio (C/N₀), which allows identification of abnormal signal behavior; consistency checks of inter-satellite Doppler shifts to detect inconsistencies in satellite motion patterns; and cross-verification with alternative positioning, navigation, and timing (PNT) sources, such as AIS, eLoran, and other independent systems, ensuring redundancy and reliability. Special emphasis is placed on hybrid inertial-satellite navigation systems that employ Kalman filtering to integrate data from multiple sensors and enhance robustness against spoofing.

In addition, the article explores advanced data-driven techniques, including machine learning methods for anomaly detection. Specifically, the application of recurrent neural networks (LSTM) for temporal pattern recognition and ensemble classifiers for improving detection accuracy and reducing false positives is discussed. The advantages and limitations of each method are critically evaluated in terms of implementation complexity, computational requirements, and effectiveness under real-world conditions.

Based on the conducted analysis, a multi-layered architecture for protecting maritime navigation systems is proposed. This architecture integrates signal-level, navigation-level, and network-level detection mechanisms into a unified framework, providing a comprehensive and adaptive defense against spoofing attacks. The technical prerequisites for its effective implementation are also defined, including requirements for sensor integration, data synchronization, and system interoperability.

Keywords: *GNSS spoofing, maritime navigation, GPS security, anomaly detection, Kalman filter, machine learning, AIS, navigation system protection architecture.*

Стаття прийнята 29.01.2026

© Россомаха О.А.

ІНТЕГРОВАНІЙ ПІДХІД ДО ОЦІНКИ РИЗИКІВ ВИКОРИСТАННЯ РОТОРІВ ФЛЕТНЕРА НА МОРСЬКИХ СУДНАХ

У статті розглянуто питання оцінки ризиків використання роторів Флетнера на морських судах як елементів вітроасистованої пропульсії в умовах впровадження енергоефективних технологій у сучасному суднопластві. Обґрунтовано актуальність дослідження з огляду на необхідність зниження паливних витрат, скорочення викидів парникових газів та забезпечення безпечної інтеграції альтернативних пропульсивних систем у судові енергетичні комплекси. Проведено аналіз сучасних наукових підходів до оцінки ефективності та безпечності роторів Флетнера, встановлено, що наявні дослідження переважно зосереджені на аеродинамічних і енергетичних характеристиках системи, тоді як питання комплексної оцінки ризиків залишаються недостатньо розробленими.

Запропоновано інтегрований підхід до оцінки ризиків, що поєднує процедури ідентифікації небезпек, принципи FSA, елементи HAZID/HAZOP та кількісне визначення інтегрального показника ризику. У межах дослідження виконано систематизацію ризиків за основними групами: технічні, аеродинамічні, навігаційні, експлуатаційні, пов'язані з людським елементом, а також регуляторні й екологічні. Встановлено, що найбільший вплив на загальний рівень ризику мають аеродинамічні та навігаційні фактори, які визначають остійність судна, керованість і стабільність функціонування системи за різних режимів експлуатації.

Розроблено структуру інтегрального показника ризику, яка враховує ймовірність виникнення небезпечних подій, тяжкість їх наслідків та вагову значущість окремих груп ризиків, що дозволяє формалізувати оцінку безпечності використання роторів Флетнера для різних типів суден і сценаріїв експлуатації. Практичне значення отриманих результатів полягає у можливості використання запропонованої методики на етапах проєктування, технічної інтеграції, експлуатаційного контролю та підготовки рекомендацій щодо мінімізації ризиків при впровадженні вітроасистованих пропульсивних технологій у морському транспорті.

Ключові слова: ротори Флетнера, вітроасистована пропульсія (WASP), морське судно, оцінка ризиків, інтегральний показник ризику, безпека суднопластва, енергоефективність.

Постановка проблеми. В умовах сучасної трансформації морського транспорту, зумовленої посиленням міжнародних екологічних вимог, зростанням вартості традиційних видів палива та необхідністю зниження викидів парникових газів, особливої актуальності набуває впровадження енергоефективних технологій, здатних забезпечити часткове заміщення традиційних пропульсивних систем. Одним із найбільш перспективних напрямів у цьому контексті є використання роторів Флетнера (парусів Флетнера), як вітроасистованих пропульсивних установок, принцип дії яких ґрунтується на ефекті Магнуса та дозволяє перетворювати енергію вітру на додаткову рушійну силу судна. Практичний досвід експлуатації суден, оснащених такими системами, підтверджує їх потенціал щодо зниження витрат палива, підвищення енергетичної ефективності та скорочення екологічного навантаження, однак одночасно виявляє низку технічних, навігаційних, експлуатаційних і організаційних факторів, які можуть істотно впливати на безпечність функціонування судна. Це обумовлює необхідність переходу від виключно енергетичної оцінки ефективності роторів Флетнера до системного аналізу ризиків, пов'язаних із їх інтеграцією у судові енергетичні та навігаційні системи.

Аналіз сучасних наукових досліджень свідчить, що переважна частина опублікованих праць присвячена аеродинамічним характеристикам обертючих циліндрів, моделюванню ефекту Магнуса, визначенню приросту тягової сили та оцінці економічної ефективності використання роторів Флетнера,

тоді як питання комплексного ризик-аналізу залишаються недостатньо розробленими. Існуючі підходи, як правило, орієнтовані або на локальний аналіз окремих відмов елементів системи, або на застосування загальних процедур морської безпеки без адаптації до специфіки WASP. Унаслідок цього відсутня уніфікована методична основа, яка дозволяла б одночасно враховувати аеродинамічні процеси, технічну надійність обладнання, вплив на остійність судна, зміну умов керуваності та роль людського елемента в управлінні системою.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналіз сучасних наукових і прикладних джерел, присвячених використанню роторів Флетнера, як засобу вітроасистованої пропульсії (WASP), свідчить про відсутність уніфікованого підходу до оцінки ризиків цієї технології. У науковій літературі переважають дослідження, орієнтовані на аеродинамічні, енергетичні та економічні елементи застосування роторів, тоді як питання комплексної оцінки ризиків розглядаються фрагментарно та здебільшого у межах суміжних методологій [1–2]. Це обумовлює необхідність узагальнення існуючих підходів та їх адаптації до специфіки вітроасистованих пропульсивних систем.

Теоретичні основи функціонування роторів Флетнера базуються на ефекті Магнуса, що детально досліджений у працях з аеродинаміки обертючих тіл [3 – 5]. У цих роботах основна увага приділяється визначенню підйомної сили, коефіцієнтів аеродинамічного опору та впливу параметрів потоку, зокрема числа Рейнольдса, на характеристики обтікання [4]. Використання чисельного моделювання (CFD) дозволяє досліджувати розподіл тиску навколо ротора, структуру вихрових утворень та нестійкі режими течії. У цьому контексті ризики розглядаються як наслідок аеродинамічної нестабільності, включаючи можливий зрив потоку, виникнення вихрових коливальних і змінність підйомної сили залежно від режимів експлуатації [6, 7].

Суттєвим напрямом досліджень є застосування CFD-моделювання у поєднанні з аналізом невизначеностей, що забезпечує перехід до кількісної оцінки ризиків [4, 5]. Такий підхід дозволяє досліджувати вплив змінних параметрів, включаючи швидкість вітру, кут атаки та швидкість обертання ротора, на ефективність і стабільність роботи системи. У результаті визначаються діапазони експлуатаційних умов, у яких ризики є мінімальними або, навпаки, зростають.

Прикладні дослідження, присвячені використанню роторів Флетнера на морських судах, зосереджені на оцінці їх енергетичної ефективності та впливу на експлуатаційні показники судна [1 – 8]. Отримані результати свідчать, що ефективність таких систем значною мірою визначається зовнішніми умовами, зокрема швидкістю та напрямком вітру, а також режимом роботи ротора. Встановлено, що за несприятливих умов можливе не лише зниження ефективності, але й виникнення додаткового аеродинамічного опору, що негативно впливає на загальні характеристики руху судна. Це формує окрему групу експлуатаційних ризиків, пов'язаних із варіативністю зовнішнього середовища та складністю оптимального керування системою.

У контексті формалізованої оцінки ризиків широко застосовуються методології, рекомендовані міжнародними організаціями та класифікаційними товариствами [9 – 12]. Зокрема, метод Formal Safety Assessment (FSA), розроблений International Maritime Organization (ІМО), передбачає системний підхід до ідентифікації небезпек, аналізу ризиків та визначення заходів їх мінімізації. Даний підхід дозволяє враховувати як технічні, так і організаційні фактори, що впливають на безпеку експлуатації нових технологій у судноплаванні.

Важливу роль у практиці впровадження роторів Флетнера відіграють методи попередньої ідентифікації небезпек, такі як HAZID та HAZOP [9], які використовуються на етапах проектування та інтеграції систем у конструкцію судна. Ці підходи дають змогу систематизувати потенційні ризики, зокрема пов'язані з впливом на остійність судна, збільшенням вітрового навантаження, зміною умов оглядовості та можливими відмовами технічних компонентів. Незважаючи на широке застосування у практиці, результати таких оцінок рідко представлені у відкритих наукових джерелах, що ускладнює їх узагальнення та порівняльний аналіз.

Серед кількісних підходів до оцінки ризиків значного поширення набув метод аналізу видів і наслідків відмов (FMEA), який дозволяє оцінити критичність окремих елементів системи [10]. Для роторів Флетнера цей метод застосовується при аналізі можливих відмов, зокрема збоїв у роботі приводу, пошкодження підшипників, перевантаження конструкції та порушень у системах керування.

Використання такого підходу сприяє визначенню пріоритетних напрямів підвищення надійності системи та мінімізації ризиків її експлуатації.

Окрему групу становлять інтегровані підходи до оцінки, зокрема методи, що поєднують технічні, економічні та екологічні елементи функціонування системи [11, 12]. У межах таких підходів ризик розглядається як комплексна характеристика, що враховує не лише ймовірність і наслідки небажаних подій, а й їх вплив на ефективність використання технології. Це дозволяє більш повно оцінити доцільність впровадження роторів Флетнера в умовах сучасних вимог до енергоефективності та екологічної безпеки морського транспорту.

Узагальнення результатів аналізу літератури свідчить, що складність фізичних процесів, які визначають роботу роторів Флетнера, а також значна залежність від зовнішніх умов зумовлюють необхідність застосування комплексних підходів до оцінки ризиків. Поєднання аеродинамічних, механічних та експлуатаційних факторів формує високий рівень невизначеності, що обмежує ефективність використання окремих ізольованих методів аналізу. У зв'язку з цим найбільш обґрунтованим є застосування інтегрованих підходів, які поєднують якісні методи ідентифікації небезпек із кількісними інструментами аналізу, включаючи чисельне моделювання, аналіз відмов та багатокритеріальні методи оцінки. Такий підхід дозволяє забезпечити більш повне врахування специфіки функціонування роторів Флетнера та підвищити рівень обґрунтованості управлінських і технічних рішень щодо їх впровадження.

Метою статті є розроблення інтегрованого підходу до оцінки ризиків використання роторів Флетнера на морських судах шляхом поєднання якісних процедур ідентифікації небезпек із кількісною оцінкою інтегрального рівня ризику, що забезпечує системне врахування технічних, аеродинамічних, експлуатаційних і організаційних факторів функціонування вітроасистованих пропульсивних систем.

Наукова новизна статті полягає у формуванні комплексної методики оцінки ризиків використання роторів Флетнера, яка базується на інтеграції принципів Formal Safety Assessment, процедур HAZID/HAZOP та кількісного інтегрального показника ризику з урахуванням вагових коефіцієнтів окремих груп небезпек. На відміну від існуючих підходів, запропонована методика дозволяє не лише виконувати ранжування ризиків за рівнем критичності, але й оцінювати їх сумарний вплив у межах єдиної ієрархічної моделі, адаптованої до специфіки функціонування роторних вітроенергетичних установок на судах.

Виклад основного матеріалу та основні результати дослідження. Використання роторів Флетнера у сучасному судноплаванні супроводжується низкою технічних, експлуатаційних та економічних ризиків, які потребують детального аналізу в межах ризикології.

З урахуванням результатів аналізу літератури встановлено, що існуючі підходи до оцінки ризиків використання роторів Флетнера є фрагментарними та не забезпечують комплексного врахування специфіки функціонування вітроасистованих пропульсивних систем. Зокрема, окремі дослідження зосереджені на аеродинамічних елементах [3, 7], інші – на енергетичній ефективності [1, 2], тоді як методи оцінки ризиків розглядаються у межах загальних підходів до безпеки мореплавства [9 – 12]. У зв'язку з цим доцільним є формування інтегрованої методики, що поєднує якісні та кількісні інструменти аналізу.

Автор пропонує методика, яка базується на поєднанні підходу FSA із введенням інтегрального показника, що дозволяє врахувати як фізичні процеси, так і експлуатаційні особливості функціонування системи. Запропонована методика передбачає чотири послідовні етапи, узагальнено представлені на рис. 1.

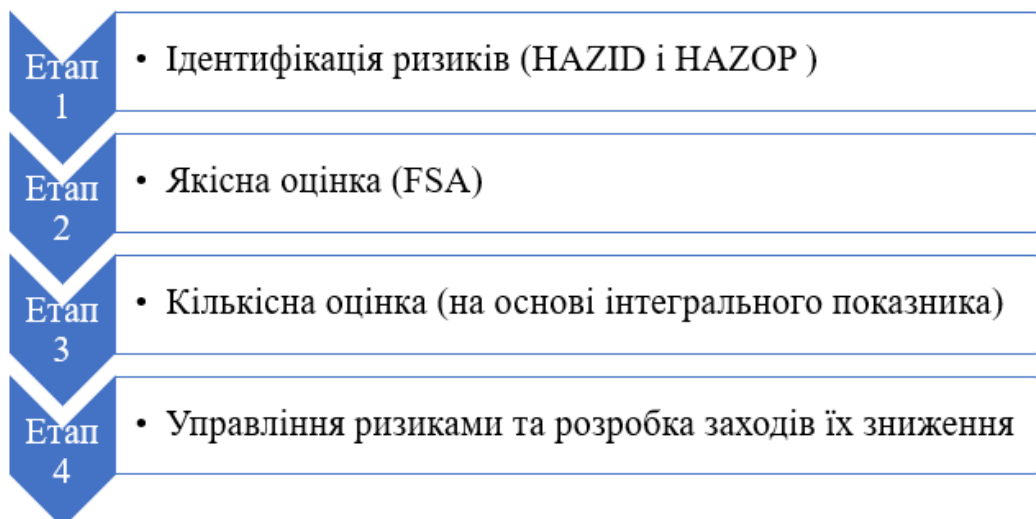


Рисунок 1 – Чотири етапи оцінки та управління ризиками при використанні роторів Флетнера
Джерело: власні розробки авторів на основі [9]

На першому етапі здійснюється ідентифікація небезпек, пов'язаних із використанням роторів Флетнера, причому формування переліку ризиків ґрунтується на узагальненні результатів досліджень [1 – 8] та застосуванні процедур HAZID і HAZOP [9]. Такий підхід дозволяє системно охопити як потенційні відмови елементів установки, так і відхилення у режимах її експлуатації, що мають критичне значення для безпеки судноплавства. У результаті проведеної ідентифікації встановлено, що найбільш характерні небезпеки формуються під впливом взаємодії аеродинамічних процесів, технічного стану обладнання та умов експлуатації судна. Зокрема, зміна структури потоку навколо ротора може призводити до нестабільності підйомної сили або її різкого зниження внаслідок зриву потоку, що безпосередньо впливає на керованість судна, тоді як відмови приводу чи знос підшипникових вузлів знижують надійність роботи системи та можуть спричинити втрату тягового ефекту. Одночасно враховується вплив роторів на навігаційні характеристики судна, включаючи зміну остійності та обмеження оглядовості з ходового містка, що ускладнює прийняття рішень судноводієм у складних умовах плавання. Встановлено також, що ефективність та безпечність використання роторів значною мірою залежать від правильності вибору режимів їх роботи, оскільки неоптимальні параметри обертання можуть не лише знижувати енергетичний ефект, але й створювати додаткові навантаження на конструкцію судна. Окрему групу становлять ризики, зумовлені людським елементом, які проявляються через помилки екіпажу під час керування системою, недостатній рівень підготовки або неправильну інтерпретацію інформації від автоматизованих систем, що в сукупності визначає необхідність комплексного врахування як технічних, так і організаційних чинників на етапі ідентифікації небезпек.

Узагальнення результатів ідентифікації небезпек дозволяє перейти до їх систематизації за природою виникнення, що забезпечує впорядковане подання ризиків і створює основу для подальшого аналізу. Встановлено, що ризики, пов'язані з використанням роторів Флетнера, доцільно розглядати як багатокомпонентну систему, у якій технічні відмови, експлуатаційні умови та вплив зовнішнього середовища формують взаємопов'язані сценарії розвитку небезпечних подій (табл. 1).

Таблиця 1 – Систематизація ризиків при використанні роторів Флетнера

Група ризику	Характеристики
Технічна група	Процеси деградації та відмов елементів установки, зокрема руйнування конструкції ротора, виникнення вібрацій і втоми матеріалу, а також відмови систем керування, що безпосередньо впливають на працездатність і надійність комплексу
Експлуатаційні ризики	Практичне використання системи та пов'язані з некоректним вибором режимів роботи, ускладненням маневрування судна і особливостями взаємодії роторів з автоматизованими навігаційними системами
Аеродинамічні та навігаційні ризики	Виникають унаслідок дії ефекту Магнуса, зміщення центра прикладення сил і змін характеристик остійності, що може призводити до нестійкої поведінки судна в умовах інтенсивного вітрового навантаження
Людський елемент	Проявляються через помилки оператора, недостатній рівень підготовки екіпажу та неточну інтерпретацію даних, що надходять від систем моніторингу, і в умовах високого рівня автоматизації можуть істотно підвищувати загальний рівень небезпеки
Регуляторні та екологічні ризики	Зумовлені відсутністю усталених нормативних вимог, обмеженнями сертифікації нових технологій та потенційним впливом на безпеку інших учасників судноплавства

Джерело: власні розробки авторів

Така класифікація дозволяє розглядати ризики не ізольовано, а як елементи єдиної системи, що відображає реальні умови експлуатації судна з роторними установками.

Наступним кроком є *другий етап* методики, який передбачає якісну оцінку ідентифікованих ризиків із використанням принципів, закладених у підході FSA [9]. На цьому етапі для кожного з визначених ризиків встановлюється його відносна значущість шляхом експертного визначення ймовірності виникнення та тяжкості можливих наслідків, що дозволяє врахувати як технічні характеристики системи, так і умови її експлуатації. Застосування такого підходу забезпечує можливість виконання попереднього ранжування ризиків, у межах якого виокремлюються найбільш критичні сценарії розвитку подій, що мають найбільший вплив на безпеку судна та ефективність використання роторів Флетнера.

Приклад результату якісної оцінки можливо представити у вигляді таблиці ранжування (табл. 2), що дозволяє візуалізувати розподіл ризиків за рівнем їх значущості та визначити пріоритетні напрями подальшого аналізу.

Таблиця 2 – Приклад результату якісної оцінки за принципами FSA

№	Ризик	Група	Ймовірність (P)*	Наслідки (C)*	Рівень ризику (R = P×C)	Пріоритет
1	Вплив на остійність судна	Аеродинамічні/навігаційні	4	4	16	Високий
2	Погіршення керованості	Навігаційні	5	3	15	Високий
3	Відмова приводу ротора	Технічні	4	3	12	Високий
4	Зміщення центра сил	Аеродинамічні	3	4	12	Високий
5	Вібрації та втома матеріалу	Технічні	5	2	10	Середній
6	Некоректні режими роботи	Експлуатаційні	5	2	10	Середній
7	Помилки оператора	Людський елемент	3	3	9	Середній
8	Знос підшипників	Технічні	4	2	8	Середній
9	Зрив потоку	Аеродинамічні	2	3	6	Низький
10	Неправильна інтерпретація даних	Людський елемент	2	2	4	Низький

Джерело: власні розробки авторів на основі [9]

*Шкала 1–5 була обрана як базова. Така шкала відповідає поширеним підходам у морській ризикології та дозволяє узгодити результати з практикою FSA IMO.

Третій етап передбачає кількісну оцінку ризиків на основі інтегрального показника, що формується як зважена сума добутків ймовірності виникнення небезпечних подій та тяжкості їх наслідків. Такий підхід дозволяє перейти від якісного ранжування до формалізованої оцінки рівня ризику та забезпечує можливість порівняння різних сценаріїв експлуатації роторів Флетнера. Інтегральний показник має враховувати не лише ймовірність і наслідки, але й різну «вагу» груп ризиків, що є принципово важливим для систем із новими технологіями, зокрема роторів Флетнера. У загальному вигляді інтегральний ризик судна з роторними установками можна подати як зважену суму окремих ризиків:

$$R_{int} = \sum_{i=1}^n w_i \cdot P_i \cdot C_i \quad (1)$$

де P_i – ймовірність виникнення і-го ризику,

C_i – тяжкість наслідків,

w_i – ваговий коефіцієнт, що відображає значущість ризику або групи ризиків,

n – загальна кількість ідентифікованих небезпек.

Для зручності порівняння різних суден або сценаріїв експлуатації показник можна нормувати:

$$R_{norm} = \frac{\sum_{i=1}^n w_i \cdot P_i \cdot C_i}{\sum_{i=1}^n w_i \cdot P_{max} \cdot C_{max}} \quad (2)$$

Це дозволяє отримати безрозмірну величину в інтервалі від 0 до 1, що зручно для порівняння різних суден або конфігурацій роторів.

З урахуванням раніше запропонованої класифікації доцільно агрегувати ризики за групами, що дозволяє перейти до ієрархічної моделі:

$$R_{int} = \sum_{j=1}^m W_j \cdot \left(\sum_{i=1}^{k_j} P_{ij} \cdot C_{ij} \right) \quad (3)$$

де W_j – ваговий коефіцієнт j -ї групи ризиків (технічні, аеродинамічні, експлуатаційні, пов'язані з людським елементом тощо),

k_j – кількість ризиків у групі.

Практично це означає, що, наприклад, навігаційні та аеродинамічні ризики можуть мати більшу вагу порівняно з експлуатаційними, оскільки вони безпосередньо впливають на безпеку судна.

Для застосування моделі необхідно задати шкали:

- ймовірність P у межах 1–5 (від рідкісних до частих подій);
- наслідки C у межах 1–5 (від незначних до катастрофічних);
- вагові коефіцієнти w_i або W_j , які можуть визначатися експертно або на основі аналізу літератури.

На основі цього можна ввести інтерпретацію інтегрального показника:

- $R_{norm} < 0,2$ – низький рівень ризику;
- $0,2 - 0,5$ – прийнятний;
- $0,5 - 0,75$ – підвищений;
- $> 0,75$ – критичний.

Четвертий етап оцінки та управління ризиками при використанні роторів Флетнера передбачає системний підхід до зниження небезпеки та підвищення безпечності експлуатації судна. На цьому етапі інтегральний показник ризику виступає основою для прийняття управлінських рішень і визначення пріоритетів заходів щодо його мінімізації. Для кожної групи ризику визначається сумарний внесок у загальний інтегральний показник, що дозволяє відобразити реальний вплив кожного типу ризиків на безпеку судна. Далі доцільно провести побудову діаграми Парето (табл. 3, рис. 2), яка наочно продемонструє, які групи ризиків формують основний внесок у загальний рівень небезпеки.

Таблиця 3 – Таблиця для побудови діаграми Парето

Група ризиків	Інтегральний внесок (Rгрупи)	Кумулятивний %
Аеродинамічні/навігаційні	35	35
Технічні	30	65
Експлуатаційні	20	85
Людський елемент	10	95
Регуляторні/екологічні	5	100

Джерело: власні розробки авторів

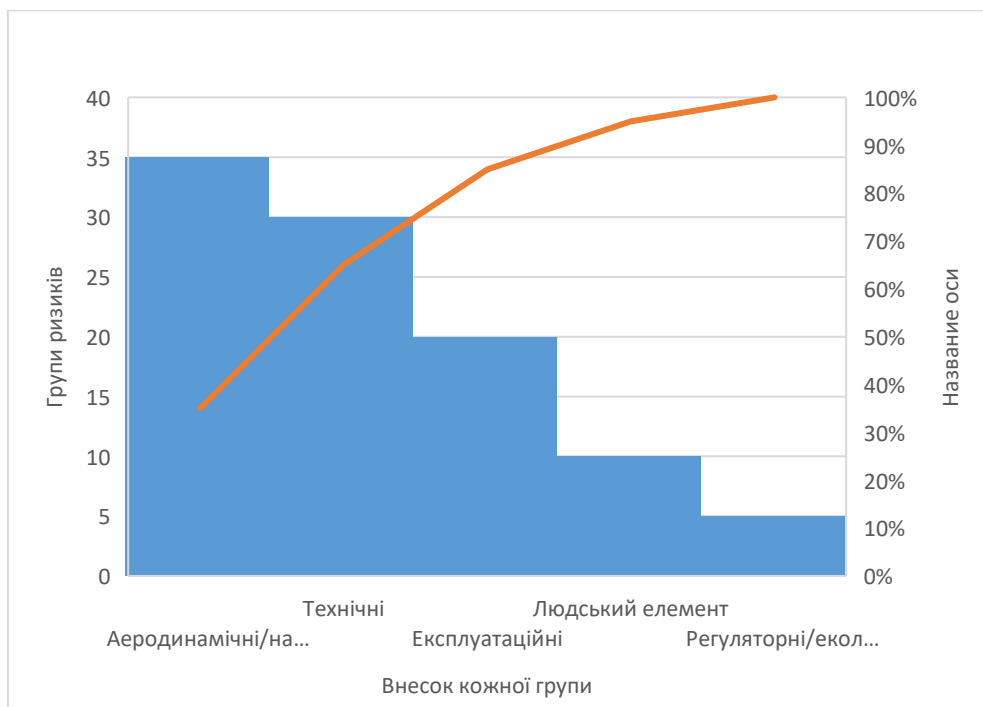


Рисунок 2 – Діаграма Парето
Джерело: власні розробки авторів

На цій діаграмі відсотковий внесок кожної групи відкладається на осі Y, а групи ризиків – на осі X, при цьому кумулятивна крива дозволяє виділити пріоритетні фактори, що формують найбільший рівень ризику, відповідно до принципу Парето. Паралельно проводиться аналіз чутливості, що передбачає оцінку впливу зміни окремих параметрів ймовірності, тяжкості наслідків та вагових коефіцієнтів на інтегральний показник. Це дозволяє визначити, які ризики є найбільш критичними та потребують першочергової уваги, а також перевірити стабільність результатів оцінки при варіюванні умов експлуатації.

На основі отриманих результатів розробляються заходи зниження ризику. Технічні заходи включають вдосконалення приводу та підшипників ротора, контроль вібрацій та зміцнення конструкції, експлуатаційні – оптимізацію режимів роботи та інтеграцію системи з навігаційними засобами судна, організаційні та заходи щодо людського елемента – підвищення кваліфікації екіпажу, створення навчальних тренажерів та стандартизованих інструкцій щодо моніторингу та контролю, а регуляторні та екологічні – забезпечення сертифікації систем і відповідності міжнародним нормам безпеки та екології.

Після впровадження заходів проводиться повторний розрахунок інтегрального показника ризику та, за необхідності, коригування вагових коефіцієнтів і додаткове моделювання для уточнення пріоритетів. Такий комплексний підхід дозволяє не лише знизити рівень небезпеки при використанні роторних установок, але й забезпечити ефективну інтеграцію роторів Флетнера у судові системи, враховуючи всі технічні, експлуатаційні та організаційні фактори, що визначають безпечність і ефективність їх функціонування.

Висновок. У результаті проведеного дослідження встановлено, що використання роторів Флетнера як елементів WASP, супроводжується формуванням багатофакторного комплексу ризиків, структура якого визначається одночасним впливом аеродинамічних процесів, технічного стану обладнання, умов експлуатації судна, навігаційних особливостей та людського елемента. Аналіз сучасних наукових джерел засвідчив, що наявні підходи до оцінки таких ризиків переважно орієнтовані на окремі аспекти функціонування роторних систем і не забезпечують цілісного врахування взаємозв'язків між фізичними процесами, технічними відмовами та експлуатаційними наслідками, що обмежує можливість їх практичного використання для прийняття комплексних інженерних рішень.

У межах роботи обґрунтовано доцільність застосування інтегрованої методики оцінки ризиків, побудованої на поєднанні процедур ідентифікації небезпек, принципів FSA та кількісного інтегрального показника ризику. Запропонований підхід дозволяє систематизувати потенційні небезпеки за функціональними групами, визначити їх відносну значущість, виконувати ранжування за рівнем критичності та переходити від якісного аналізу до формалізованого кількісного оцінювання. Встановлено, що найбільший вплив на загальний рівень ризику мають аеродинамічні та навігаційні фактори, оскільки саме вони безпосередньо визначають зміну остійності, керованості судна та стабільності дії підйомної сили, сформованої внаслідок ефекту Магнуса.

Розроблена структура інтегрального показника ризику забезпечує можливість врахування не лише ймовірності виникнення небезпечних подій і тяжкості їх наслідків, але й диференційованої вагомості окремих груп ризиків, що є принципово важливим для новітніх судових технологій із високим рівнем невизначеності. Це дозволяє адаптувати модель до різних типів суден, конфігурацій роторних установок та умов експлуатації, а також використовувати її для аналізу сценаріїв зміни режимів роботи системи. Доведено, що застосування ієрархічного групування ризиків підвищує точність оцінки та створює основу для подальшого управління безпечністю експлуатації.

Практичне значення отриманих результатів полягає у можливості використання запропонованої методики при проектуванні суден із роторами Флетнера, оцінці технічної придатності систем, підготовці експлуатаційних регламентів, виборі пріоритетних заходів технічного вдосконалення та формуванні процедур підготовки екіпажу. Застосування інтегрованого підходу дозволяє підвищити обґрунтованість рішень щодо впровадження роторних технологій, знизити рівень експлуатаційної невизначеності та забезпечити відповідність сучасним вимогам безпеки й енергоефективності морського транспорту.

Перспективою подальших досліджень є поглиблення кількісного моделювання ризиків із використанням CFD-аналізу, сценарного прогнозування та адаптації методики до конкретних типів морських транспортних засобів

ЛІТЕРАТУРА

1. Traut M., Gilbert P., Walsh C., Bows A., Filippone A., Stansby P., Wood R. Propulsive power contribution of a kite and a Flettner rotor on selected shipping routes. *Applied Energy*. 2014. Vol. 130. P. 362–372. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.07.026>
2. A. De Marco, S. Mancini, C. Pensa, G. Calise, and F. De Luca. Flettner Rotor Concept for Marine Applications: A Systematic Study. Hindawi Publishing Corporation International Journal of Rotating Machinery Volume 2016, Article ID 3458750, 12 pages <http://dx.doi.org/10.1155/2016/3458750>
3. Rodney D.W. Bowersox, Simon W. North, Erratum to «Algebraic turbulent energy flux models for hypersonic shear flows» [Prog. Aerosp. Sci. 46 (2010) 49–61], Progress in Aerospace Sciences, Volume 50, 2012, Page 35, ISSN 0376-0421, <https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2012.03.001>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0376042112000231>)
4. Mittal S., Kumar B. Flow past a rotating cylinder. *Journal of Fluid Mechanics*. 2003. Vol. 476. P. 303–334. DOI: <https://doi.org/10.1017/S0022112002002938>
5. Kenichi Kume, Tatsuya Hamada, Hiroshi Kobayashi, Shota Yamanaka, Evaluation of aerodynamic characteristics of a ship with flettner rotors by wind tunnel tests and RANS-based CFD. *Ocean Engineering*, Volume 254, 2022, 111345, ISSN 0029-8018, <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.111345>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0029801822007351>)
6. DNV. Recommended practice DNV-RP-A203: Technology qualification. Oslo: DNV, 2021. URL: <https://www.dnv.com>
7. You Dong, Dan M. Frangopol, and Samantha Sabatino A Decision Support System for Mission-Based Ship Routing Considering Multiple Performance Criteria. *Reliability Engineering & System Safety*. Volume 150, June 2016, Pages 190-201. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2016.02.002>
8. Fabian Tillig, Jonas W. Ringsberg, Design, operation and analysis of wind-assisted cargo ships, *Ocean Engineering*, Volume 211, 2020, 107603, ISSN 0029-8018, <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.107603>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0029801820306077>)
9. International Maritime Organization. Formal Safety Assessment (FSA) for use in the IMO rule-making process (MSC-MEPC.2/Circ.12/Rev.2 9 April 2018). London: IMO, 2018. URL: <https://wwwcdn.imo.org>
10. IEC 60812:2018. Failure modes and effects analysis (FMEA and FMECA). Geneva: International Electrotechnical Commission, 2018. URL: <https://cdn.standards>
11. Kalinichenko, Y., Vasalathii, N., Rossomakha, O., Koliesnik, O., Sagaydak, O., Oberto Santana, L. et al.; Kalinichenko, Y. (Ed.) (2025). Some issues of increasing the energy efficiency of ships by improving navigation methods. Tallinn: Scientific Route OÜ. doi: <https://doi.org/10.21303/978-9908-9706-4-6>
12. Томчаковський, Г., Россомаха, О., Оберто Сантана, Л., Саф'ян, О., & Колесник, О. (2025). Аналіз людського елементу в контексті розвитку морських автономних надводних суден. Вісник Одеського національного морського університету, (75), 108-121. <https://doi.org/10.47049/2226-1893-2025-1-108-121>

REFERENCES

1. Traut M., Gilbert P., Walsh C., Bows A., Filippone A., Stansby P., Wood R. Propulsive power contribution of a kite and a Flettner rotor on selected shipping routes // *Applied Energy*. 2014. Vol. 130. P. 362–372. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.07.026>
2. De Marco A., Mancini S., Pensa C., Calise G., De Luca F. Flettner Rotor Concept for Marine Applications: A Systematic Study // *International Journal of Rotating Machinery*. 2016. Article ID 3458750. DOI: <http://dx.doi.org/10.1155/2016/3458750>
3. Bowersox R. D. W., North S. W. Erratum to “Algebraic turbulent energy flux models for hypersonic shear flows” // *Progress in Aerospace Sciences*. 2012. Vol. 50. P. 35. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2012.03.001>
4. Mittal S., Kumar B. Flow past a rotating cylinder // *Journal of Fluid Mechanics*. 2003. Vol. 476. P. 303–334. DOI: <https://doi.org/10.1017/S0022112002002938>
5. Kume K., Hamada T., Kobayashi H., Yamanaka S. Evaluation of aerodynamic characteristics of a ship with Flettner rotors by wind tunnel tests and RANS-based CFD // *Ocean Engineering*. 2022. Vol. 254. 111345. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.111345>
6. DNV. Recommended practice DNV-RP-A203: Technology qualification. Oslo: DNV, 2021.

7. Dong Y., Frangopol D. M., Sabatino S. A Decision Support System for Mission-Based Ship Routing Considering Multiple Performance Criteria // Reliability Engineering & System Safety. 2016. Vol. 150. P. 190–201. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ress.2016.02.002>

8. Tillig F., Ringsberg J. W. Design, operation and analysis of wind-assisted cargo ships // Ocean Engineering. 2020. Vol. 211. 107603. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.107603>

9. International Maritime Organization. Formal Safety Assessment (FSA) for use in the IMO rule-making process (MSC-MEPC.2/Circ.12/Rev.2, 9 April 2018). London: IMO, 2018.

10. IEC 60812:2018. Failure modes and effects analysis (FMEA and FMECA). Geneva: International Electrotechnical Commission, 2018.

11. Kalinichenko Y. та ін. Some issues of increasing the energy efficiency of ships by improving navigation methods. Tallinn: Scientific Route OÜ, 2025. DOI: <https://doi.org/10.21303/978-9908-9706-4-6>

12. Tomchakovskiy H., Rossomakha O., Oberto Santana L., Safian O., Koliesnik O. Analiz liudskoho elementu v konteksti rozvytku morskyykh avtonomnykh nadvodnykh suden // Visnyk Odeskoho natsionalnoho morskoho universytetu. 2025. № 75. P. 108–121. DOI: <https://doi.org/10.47049/2226-1893-2025-1-108-121>

O.A. Rossomakha

AN INTEGRATED APPROACH TO RISK ASSESSMENT OF FLETTNER ROTORS ON MARINE VESSELS

This article examines the assessment of risks associated with the use of Flettner rotors on seagoing vessels as elements of wind-assisted propulsion in the context of implementing energy-efficient technologies in modern shipping. The relevance of the study is justified by the need to reduce fuel consumption, cut greenhouse gas emissions, and ensure the safe integration of alternative propulsion systems into ship power plants. An analysis of current scientific approaches to assessing the efficiency and safety of Flettner rotors was conducted; it was found that existing studies are primarily focused on the aerodynamic and energy characteristics of the system, while issues of comprehensive risk assessment remain insufficiently developed.

An integrated approach to risk assessment is proposed, combining hazard identification procedures, FSA principles, HAZID/HAZOP elements, and the quantitative determination of an integral risk indicator. Within the scope of the study, risks were systematized into the following main groups: technical, aerodynamic, navigational, operational, human-related, as well as regulatory and environmental. It was established that aerodynamic and navigational factors have the greatest impact on the overall risk level, as they determine the vessel's seakeeping, maneuverability, and system stability under various operating conditions.

A framework for an integrated risk indicator has been developed that takes into account the probability of hazardous events occurring, the severity of their consequences, and the relative importance of individual risk groups, thereby enabling a formalized assessment of the safety of using Flettner rotors for various types of vessels and operational scenarios. The practical significance of the obtained results lies in the possibility of using the proposed methodology during the design, technical integration, operational control, and preparation of recommendations for risk minimization when implementing wind-assisted propulsion technologies in maritime transport.

Keywords: Flettner rotors, wind-assisted propulsion (WASP), seagoing vessel, risk assessment, integrated risk index, navigation safety, energy efficiency.

Стаття прийнята 14.03.2026

ТРАНСПОРТНІ ТЕХНОЛОГІЇ

УДК 347.763:004

doi.org/10.33298/2226-8553.2026.1.45.19

© Мироненко В.К., Іродовська Н. Ю.

ТРАНСФОРМАЦІЯ РОЛІ МУЛЬТИМОДАЛЬНОГО ТРАНСПОРТНОГО ОПЕРАТОРА В УМОВАХ ЦИФРОВІЗАЦІЇ ПРАВОВОГО ПОЛЯ

У статті досліджується вплив цифровізації на правовий статус мультимодального транспортного оператора (МТО) в контексті впровадження електронних транспортних документів — e-CMR та e-AWB. Запропоновано математичну модель оцінки ефективності електронного документообігу, що включає коефіцієнт ефективності документообігу (КЕД), часовий ефект у логістичному ланцюзі та інтегральний показник цифровізації МТО. Обґрунтовано ефективність впровадження електронних транспортних документів (e-CMR) у системі мультимодальних перевезень та проаналізовано їх правову природу. На основі математичного моделювання встановлено, що цифровізація документообігу забезпечує скорочення часу обробки документів, формує значний сукупний часовий ефект і високий економічний результат при мінімальному терміні окупності.

Доведено, що електронна накладна, має юридичну силу оригіналу, однак її застосування супроводжується обмеженнями як нетоваророзпорядчого документа та ризиками правового характеру у транзитних юрисдикціях. Проаналізовано кіберризики, які виникають унаслідок цифровізації та можуть спричинити значні економічні втрати, запропоновано методичний підхід до кількісної оцінки правового ризику кіберінцидентів та вдосконалення нормативно-правового регулювання у сфері мультимодальних перевезень.

Ключові слова: мультимодальний транспортний оператор, e-CMR, e-AWB, електронний документообіг, коефіцієнт ефективності документообігу, теорія масового обслуговування, цифровізація, правове регулювання, митне оформлення.

Постановка проблеми. Сучасний розвиток транспортної галузі характеризується глибокими трансформаційними процесами, зумовленими цифровізацією економіки та інтеграцією логістичних систем. Особливо ці зміни стосуються мультимодальних перевезень, які виступають ключовим елементом глобальних ланцюгів постачання та транзитного потенціалу держави. У сучасних умовах цифровізації відбувається зміна ролі мультимодального транспортного оператора: від традиційного організатора перевезень до комплексного провайдера цифрових логістичних рішень.

Проблематика цифровізації транспортної документації мультимодальних перевезень набуває особливої актуальності в умовах реформування правового поля України, що прагне до євроінтеграції та імплементації стандартів ЄС. Правова невизначеність щодо юридичної сили електронних транспортних документів, питання відповідальності МТО в умовах цифрового документообігу, а також практичні аспекти прискорення обробки вантажів потребують комплексного наукового осмислення.

Невирішена частина проблеми. Аналіз сучасних наукових праць, присвячених розвитку мультимодальних перевезень та цифровізації транспортно-логістичних систем, свідчить про наявність значного наукового доробку у цій сфері. Зокрема, у наукових джерелах [1, 2, 5] розглянуто питання функціонального змісту діяльності мультимодального оператора в контексті переходу до цифрових логістичних систем. В роботах [3, 4] досліджено механізми правового регулювання використання електронних транспортних документів, цифрових платформ, смарт-контрактів та технологій розподілених реєстрів, у діяльності транспортних операторів.

У правовому вимірі ключовими є дослідження [6-8], де систематизовано юридичні бар'єри визнання e-CMR у неєвропейських юрисдикціях. Автори виявили, що відсутність уніфікованої

міжнародної норми щодо кіберризиків МТО є головною прогалиною чинного права. В роботі [9] розглянуто технологічні можливості інтеграції протоколу e-CMR з розподіленими реєстрами як засобом підвищення довіри до електронних транспортних документів.

З позицій логістичного менеджменту та операційних досліджень вирізняється стаття [10], де методом структурного моделювання (SEM) доведено, що цифровізація документообігу забезпечує 43% варіації операційної ефективності міжнародних 3PL-операторів. Близьку тематику розробляють автори [11], застосовуючи агентне моделювання для симуляції впливу e-AWB на пропускну спроможність авіавантажних терміналів: зниження часу наземного оброблення.

Економіко-правовий синтез у розвитку мультимодальних перевезень та цифровізації транспортно-логістичних систем представлений у праці [12], де введено концепцію "liability gap"— зони невизначеності між моментом підписання e-CMR та визнанням його юридичної сили митними органами транзитних держав.

Серед досліджень, що безпосередньо стосуються кількісного вимірювання ефективності e-CMR, виокремлюється звіт ALICE [13], де на основі панельних даних 8 країн встановлено: кожен 10% зростання охоплення e-CMR асоціюється зі скороченням середнього часу перетину кордону на 7,3 хвилини. Аналогічну методологію регресійного аналізу застосовано у статті [14], де досліджено правові наслідки інтеграції e-CMR з блокчейн-платформами для незмінності перевізних записів. У сфері e-AWB слід виокремити дослідження [15], де детально проаналізовано колізію між нормами Монреальської конвенції та вимогами Резолюції IATA щодо юридичного статусу електронної авіавантажної накладної у разі незбереження вантажу. Автори дійшли висновку, що конвенційний режим відповідальності недостатньо адаптований до реалій цифрового документообігу і потребує оновлення на рівні протоколу ІКАО.

Разом з тим комплексних досліджень, присвячених саме трансформації економіко- правового статусу МТО в контексті впровадження e-CMR та e-AWB в умовах українського законодавства, бракує. Більшість наявних робіт розглядають окремі аспекти: або технічну сторону електронних накладних, або суто правові питання відповідальності МТО. Таким чином, синтетичний підхід, який поєднує аналіз нормативної бази, математичне моделювання ефективності та економічних ефектів, залишається малодослідженим.

Виклад основного матеріалу. Глобалізація торгівлі та стрімкий розвиток інформаційно-комунікаційних технологій кардинально змінюють архітектуру міжнародної логістики. Мультимодальний транспортний оператор (МТО) — суб'єкт, що здійснює або організовує перевезення вантажів двома або більше видами транспорту на підставі єдиного мультимодального транспортного документа — опиняється в епіцентрі цих перетворень. Традиційна паперова документація, що десятиліттями регламентувала перевізні відносини, сьогодні поступається місцем електронним аналогам: e-CMR (електронна міжнародна товарно-транспортна накладна) та e-AWB (електронна авіавантажна накладна).

Правовий статус МТО на міжнародному рівні визначається передусім Конвенцією ООН про міжнародні мультимодальні перевезення вантажів 1980 року, хоча остання так і не набрала чинності через недостатню кількість ратифікацій. Натомість на практиці застосовуються Правила ЮНКТАД/МТП 1992 року та галузеві документи FIATA, які закріпили поняття МТО як особи, яка від власного імені укладає договір мультимодального перевезення та бере на себе відповідальність за його виконання.

В Україні правовий статус МТО врегульовано Законом «Про транспорт», Законом «Про мультимодальні перевезення», Господарським кодексом та підзаконними актами Міністерства інфраструктури. [16-19]. Проте невизначеність щодо юридичної сили електронних перевізних документів створюють правову лакуну, що перешкоджає повноцінній цифровізації галузі.

Електронна накладна e-CMR функціонує на основі захищеного обміну структурованими даними між відправником, перевізником (МТО) та отримувачем через акредитовані платформи (наприклад, eCMR.eu, TimoCom, Transporeon, SmartHops). Дані передаються у форматах XML або JSON відповідно до технічних специфікацій Комітету з внутрішнього транспорту ЄЕК ООН.

Існуючу архітектуру e-CMR можна описати як триланкову систему взаємодії:

- платформенний рівень – акредитована платформа-провайдер, що забезпечує збереження, передачу та автентифікацію даних;
- транзакційний рівень – захищений обмін структурованими повідомленнями між сторонами договору перевезення;
- правовий рівень – електронний підпис, що надає e-CMR юридичну рівнозначність паперовому оригіналу.

Принципово важливою є ключова технічна властивість e-CMR – режим реального часу: всі сторони договору отримують одночасний доступ до актуального стану вантажу та документа, без потреби у фізичному передаванні паперів. Це корінним чином відрізняє e-CMR від систем електронного архівування сканованих копій паперових накладних, які не мають правового значення оригінальних документів.

Система e-AWB побудована на аналогічних принципах, але в рамках інфраструктури IATA CargoXML, що забезпечує стандартизований обмін авіавантажними даними між авіаперевізниками, наземними агентами та митними органами. Впровадження e-AWB передбачає відмову від паперової AWB (Air Waybill) на користь набору електронних повідомлень (FWB – freight waybill, FHL – freight house level), що циркулюють між учасниками авіатранспортного ланцюга.

Проведемо оцінку ефективності застосування електронних транспортних документів. Для кількісної оцінки ефективності переходу від паперового до електронного документообігу в системі МТО, на основі математичної моделі, введемо коефіцієнт ефективності документообігу (КЕД). Цей показник відображає відносне скорочення часових витрат на обробку транспортних документів і визначається за формулою:

$$КЕД = (T_n - T_e) / T_n \times 100\% \quad (1)$$

де $КЕД$ – коефіцієнт ефективності документообігу, %;

T_n – середній час обробки документа при паперовому документообігу;

T_e – середній час обробки документа при електронному документообігу.

Наприклад, за даними IRU [20] та FIATA [21], якщо для операції оформлення накладної МТО потрібно: $T_n = 32,5$ хв, $T_e = 4,1$ хв (узагальнено на основі відповідних аналітичних даних). Підставивши значення у формулу (1):

$$КЕД = (32,5 - 4,1) / 32,5 \times 100\% \approx 87,4\%$$

Це означає, що впровадження e-CMR скорочує час оформлення накладної більш ніж на 87%.

Сукупний часовий ефект від цифровізації документообігу МТО у розрізі всього логістичного ланцюга визначається як сума часових вигравів по кожній операції, зважена на обсяг відповідних відправлень:

$$\Delta T = \sum_{i=1}^n (T_n - T_e) \times Q_i \times k \quad (2)$$

де n – кількість документарних операцій у логістичному ланцюзі;

T_n – час i -ї операції при паперовому документообігу (год);

T_e – час i -ї операції при електронному документообігу (год);

Q_i – кількість відправлень по i -й операції за звітний період;

k – коефіцієнт використання робочого часу;

ΔT – загальна економія часу (год)§.

Для МТО з річним обсягом 10 000 відправлень та п'ятьма ключовими документарними операціями (оформлення накладної, митне оформлення, передача між агентами, верифікація доставки, вирішення спорів) з урахуванням частоти виконання операцій та коефіцієнта використання часу підрахунок за формулою (2) дає:

$$\Delta T = [(28,4 \times 10\,000 + 1,75 \times 4\,000 + 20 \times 10\,000 + 36 \times 9\,500 + 50 \times 300) \times 0,6] = 508\,800 \text{ год/рік}$$

Таким чином, середній МТО може заощадити понад 508,8 тис людино-годин на рік лише за рахунок оптимізації документарних операцій через впровадження e-CMR.

Чистий економічний ефект від впровадження системи e-CMR для МТО визначається як різниця між монетизованою вартістю часової економії та сукупними витратами на цифровізацію:

$$E = \Delta T \times C_{л.год} - (B_{підкл} + B_{навч} + B_{обсл}) \quad (3)$$

де E – чистий економічний ефект (грн/рік);

$C_{л.год}$ – вартість однієї людино-години в логістичній операції (грн);

$B_{підкл}$ – одноразові витрати на підключення до платформи e-CMR;

$B_{навч}$ – витрати на навчання персоналу;

$B_{обсл}$ – річні витрати на обслуговування системи.

За ринковими даними для України, середня заробітна плата логіста та оператора логістики становить 35 000 грн/міс. [22]. При стандартному місячному фонді робочого часу 160 годин погодинна ставка $(C_{л.год})$ становить: $35\,000 / 160 \approx 219$ грн/год. Таким чином, для МТО з 10 000 відправлень на рік отримуємо:

$$E = 508\,800 \times 219 - (120\,000 + 45\,000 + 60\,000) = 111\,427\,200 - 225\,000 = 111\,202\,200 \text{ грн/рік} \approx 111,2 \text{ млн грн/рік}$$

Термін окупності ($T_{ок}$) витрат на впровадження e-CMR визначається за формулою:

$$T_{ок} = (B_{підкл} + B_{навч}) / (\Delta T \times C_{л.год} - B_{обсл}) \quad (4)$$

де $T_{ок}$ – термін окупності (роки).

Для наведеного прикладу: $T_{ок} = (120\,000 + 45\,000) / (111\,427\,200 - 60\,000) = 165\,000 / 111\,367\,200 \approx 0,0015$ року, тобто близько 0,55 доби. Це підтверджує надзвичайно високу інвестиційну привабливість цифровізації документообігу МТО.

Процес митного оформлення вантажів МТО на прикордонному переході може бути формалізований як система масового обслуговування (СМО). Надходження вантажів до митного пункту підпорядковується пуасонівському розподілу з інтенсивністю λ (відправлень/год); час обслуговування одного відправлення є випадковою величиною з показниковим розподілом та середньою інтенсивністю μ (відправлень/год) [23]. За цих умов застосовується однолінійна модель М/М/1 (за нотацією Кендалла) [24].

Умова стійкості системи (відсутності нескінченної черги): $\rho = \lambda/\mu < 1$, де ρ – коефіцієнт завантаженості митного інспектора. При паперовому документообігу середній час обслуговування одного відправлення становить $1/\mu_p = 180$ хв; при e-CMR – $1/\mu_e = 75$ хв.

Середній час перебування вантажу в черзі (без урахування часу обслуговування) для моделі М/М/1 визначається за формулою Поллачека–Хінчина [25]:

$$Wq = \lambda / [\mu \times (\mu - \lambda)] \quad (5)$$

де, Wq – середній час очікування у черзі (год);

λ – інтенсивність надходження вантажів (відправлень/год);

μ – інтенсивність обслуговування митним органом (відправлень/год).

Середня довжина черги (кількість вантажів, що очікують на оформлення):

$$Lq = \lambda^2 / [\mu \times (\mu - \lambda)] = \rho^2 / (1 - \rho) \quad (6)$$

де Lq – середня кількість відправлень у черзі;

$\rho = \lambda/\mu$ – коефіцієнт завантаженості.

Підставивши типові параметри прикордонного пункту пропуску ($\lambda = 0,4$ відпр./год; $\mu_p = 0,333$ відпр./год при паперовому документообігу; $\mu_e = 0,8$ відпр./год при e-CMR), отримуємо порівняльні результати (табл. 1):

Отже, при паперовому документообігу та $\lambda = 0,4$ відпр./год система є нестійкою ($\rho > 1$), черга необмежено зростає. Впровадження е-CMR знижує ρ до 0,50, що забезпечує стійку роботу митного пункту та середній час очікування 37,5 хвилини. Це підтверджує не лише прискорення обробки вантажів, але й системну стабілізацію логістичного вузла.

Цифровізація документообігу в системі мультимодальних перевезень має не лише локальний операційний ефект, а й системний вплив на ефективність логістичних процесів. Запропонований коефіцієнт ефективності документообігу (КЕД) дозволяє кількісно оцінити вигоди від переходу до електронних документів і показав, що впровадження е-CMR забезпечує скорочення часу оформлення окремих операцій у середньому на понад 80%, а для ключових процесів — до 87% і більше.

Таблиця 1 – Порівняльний аналіз параметрів митної СМО М/М/1 при паперовому та електронному документообігу

Параметр СМО	Паперовий документообіг	Е-CMR (електронний)	Зміна
Інтенсивність обслуговування μ (відпр./год)	0,333	0,800	↑ у 2,4 рази
Коефіцієнт завантаженості ρ	1,20 (> 1 — нестійка!)	0,50	↓ на 58%
Середній час у черзі Wq (год)	Нескінченно	0,625	Стабілізація
Середня довжина черги Lq (відпр.)	Нескінченно	0,500	Стабілізація
Середній час обслуговування (хв)	180	75	↓ на 58,3%
Загальний час у системі W (год)	Нестабільна	1,875	Стабілізація

Джерело: розраховано автором на основі моделі М/М/1 за даними [19, 20].

Узагальнення емпіричних даних 12 країн ЄС щодо впровадження е-CMR дозволяє побудувати зведену порівняльну таблицю часових витрат за основними операціями МТО (Табл. 2):

Таблиця 2 – Порівняльний аналіз часових витрат при паперовому та електронному документообігу

Операція	Паперовий (Тп)	Е-CMR/е-AWB (Те)	КЕД (%)	Джерело
Оформлення накладної МТО	25–40 хв	3–5 хв	87,4	IRU, 2022
Митне оформлення на кордоні	2–4 год	0,5–1,5 год	58,3	FIATA, 2023
Міжагентська передача документів	12–24 год	Реальний час	~99,0	DG MOVE, 2024
Верифікація та підтвердження доставки	1–3 дні	2–4 год	85,0	IRU, 2022
Документарні спори та врегулювання	7–30 днів	2–5 днів	75,0	FIATA, 2023
Обробка е-AWB в аеропорту призначення	4–8 год	0,5–1 год	87,5	IATA, 2024
Підготовка пакету митних декларацій	3–5 год	0,5–1 год	80,0	ITF, 2023

Джерело: складено автором на основі даних [17, 20, 21].

Таким чином, повна цифровізація документообігу МТО в Україні дозволить скоротити час митного оформлення більш ніж удвічі.

Впровадження е-CMR та е-AWB трансформує не лише процедурну, але й сутнісну сторону діяльності МТО. Аналіз математичних результатів дозволяє виокремити три системних виміри цих змін:

По-перше, розширення функції моніторингу та контролю. МТО отримує можливість відстежувати стан вантажу та документів у режимі реального часу. Математично це виражається у зниженні Wq до прийняттого рівня та стабілізації коефіцієнта завантаженості митної системи $\rho < 1$.

По-друге, зміна договірних відносин та відповідальності. Електронний формат унеможливило несанкціоновану модифікацію накладної, що фіксується як зниження часових витрат на врегулювання спорів (КЕД = 75%). Водночас кожна помилка в даних стає документально зафіксованою та юридично значущою.

По-третє, еволюція ролі МТО до «цифрового диригента» логістичного ланцюга. МТО інтегрує дані різних перевізників, митних органів та вантажоотримувачів у єдину платформу, перетворюючись на провайдера логістичних даних, а не лише документів.

Цифровізація документообігу МТО породжує комплекс правових викликів, що виходять за межі суто технологічних питань і торкаються фундаментальних принципів транспортного, договірної та інформаційного права. Системний аналіз цих викликів вимагає застосування міждисциплінарного підходу.

З позицій теорії права, проблема юридичної сили е-CMR має два виміри. Перший — субстантивний: чи є е-CMR оригінальним документом, чи лише електронною копією. Відповідно до ст. 4(1) Протоколу е-CMR, електронна накладна є оригіналом і має рівну силу з паперовою CMR за умови підтвердження її автентичності [26]. Другий — процесуальний: чи може е-CMR виступати допустимим доказом у суді транзитної держави, що не ратифікувала Ця проблема вирішується через застосування колізійних норм Регламенту ЄС 593/2008 та принципу *locus regit actum*.

Для МТО практичне значення має також питання моменту переходу ризиків при використанні е-CMR. На відміну від коносаменту, CMR та її електронний аналог не є товаророзпорядчими документами (*non-negotiable*) — е-CMR не може бути індосована чи передана третій стороні. Це обмеження звужує можливості МТО щодо документарного акредитиву та факторингу.

Цифровізація документообігу трансформує класичну систему відповідальності МТО, створюючи категорію кіберризиків. Кіберінциденти з е-CMR поділяються на: втрату цілісності даних — несанкціонована зміна змісту е-CMR; втрату доступності — неможливість отримати доступ до е-CMR у критичний момент митного оформлення; витік конфіденційності — несанкціонований доступ третіх осіб до комерційних даних е-CMR. Оскільки ані Конвенція CMR, ані Протокол е-CMR не містять спеціальних норм щодо кіберризиків, МТО несе відповідальність за загальними нормами зобов'язального права. В контексті українського права застосовуються Закон «Про електронні довірчі послуги» [27], який покладає на провайдера електронних послуг обов'язок забезпечення цілісності та конфіденційності даних.

Для кількісної оцінки правового ризику кіберінцидентів нами пропонується застосовувати показник правового ризику кіберінциденту (ПРК):

$$ПРК = P_{инц} \times V_{макс} \times (1 - C_{страх}) \quad (7)$$

де ПРК — очікуваний правовий ризик кіберінциденту (грн/рік);

$P_{инц}$ — імовірність кіберінциденту за рік (за даними ENISA для транспортного сектору: $P_{инц} \approx 0,12$);

$V_{макс}$ — максимальний розмір претензій за договором перевезення (грн);

$C_{страх}$ — рівень страхового покриття кіберризиків (частка від 0 до 1).

Для МТО з річним обсягом вантажів вартістю 50 млн грн та рівнем страхового покриття $C_{страх} = 0,30$: $ПРК = 0,12 \times 50\,000\,000 \times (1 - 0,30) = 4\,200\,000$ грн/рік. Незабезпечений правовий ризик кіберінцидентів для типового МТО перевищує 4,2 млн грн на рік — це вдесятеро більше за витрати на впровадження сертифікованої системи кіберзахисту. Така оцінка економічно обґрунтовує необхідність законодавчого врегулювання стандарту кіберзахисту для МТО на рівні ISO/IEC 27001.

На підставі проведеного дослідження сформульовано такі рекомендації щодо адаптації законодавства України, сформовані на підставі проведеного дослідження та результатів математичного моделювання ефективності логістичних процесів, мають комплексний характер і спрямовані на системну інтеграцію електронного документообігу у сфері мультимодальних перевезень.

Насамперед, ключовим кроком є ратифікація та повноцінна імплементація Додаткового протоколу до Конвенції CMR щодо електронної накладної (е-CMR), розробленого під егідою United Nations Economic Commission for Europe. Це передбачає внесення змін до митного, транспортного та цивільного

законодавства України з метою закріплення юридичної рівнозначності електронної та паперової накладної для всіх органів державного контролю, включаючи митні та прикордонні служби. Такий крок дозволить усунути правові колізії та забезпечити повноцінне використання цифрових документів у міжнародному транспортному сполученні.

Важливим напрямом є створення єдиної національної платформи e-CMR, яка має функціонувати на засадах державно-приватного партнерства із залученням ключових стейкхолдерів ринку. Така платформа повинна бути інтегрована з національними інформаційними системами, зокрема з митною інфраструктурою (UAIS), а також забезпечувати сумісність із перспективними європейськими цифровими рішеннями, зокрема системою eSPEED. Це сприятиме гармонізації українського транспортно-логістичного простору з європейським цифровим середовищем та підвищить транзитний потенціал держави.

Окремої уваги потребує прийняття спеціалізованого закону про мультимодальні перевезення, який би чітко визначав правовий статус оператора мультимодальних перевезень (МТО), його права, обов'язки та межі відповідальності, зокрема в умовах використання електронного документообігу. Доцільним є включення до такого нормативного акту положень щодо управління кіберризиками, захисту даних та відповідальності за порушення у сфері цифрових транспортних операцій, з урахуванням вимог Закону України «Про електронні довірчі послуги».

З метою стимулювання цифрової трансформації доцільно встановити на законодавчому рівні цільові показники цифрової зрілості операторів, зокрема індекс цифровізації мультимодальних перевезень (ІЦМ) на рівні не менше 50 балів для суб'єктів, що здійснюють міжнародні перевезення. Запровадження такого індикатора має супроводжуватися перехідним періодом тривалістю до трьох років, а також системою економічних стимулів, включаючи податкові пільги, грантову підтримку та пріоритетний доступ до державних програм розвитку інфраструктури.

Не менш важливим є створення умов для залучення малих і середніх підприємств до цифрових екосистем. Це може бути реалізовано через механізми державної підтримки, такі як часткове відшкодування витрат на підключення до платформ e-CMR, пільгове фінансування, освітні програми та консультаційна підтримка. Такий підхід дозволить уникнути цифрового розриву між великими та малими учасниками ринку та забезпечить масовість впровадження інновацій.

На перехідному етапі, до повного приєднання та імплементації міжнародних норм, доцільним є укладення двосторонніх угод про взаємне визнання електронних транспортних документів з ключовими торговельними партнерами України, такими як Польща, Угорщина, Молдова та Туреччина. Це дозволить забезпечити практичне використання e-CMR вже на початковому етапі реформування та сприятиме поступовій інтеграції України до міжнародного цифрового транспортного простору.

У сукупності запропоновані заходи формують цілісну стратегію модернізації нормативно-правового забезпечення мультимодальних перевезень, орієнтовану на підвищення ефективності, прозорості та конкурентоспроможності транспортної системи України в умовах цифрової економіки.

Висновки. Цифровізація транспортного документообігу – e-CMR та e-AWB – є не лише технологічною, економічною, але й фундаментальною правовою трансформацією відносин мультимодального перевезення. Розроблений у статті комплексний підхід охоплює операційний, економічний та правове-регуляторний виміри діяльності МТО забезпечує якісну трансформацію мультимодального транспортного оператора у сучасний глобалізаційний простір.

Впровадження електронних транспортних документів (e-CMR) забезпечує суттєве підвищення ефективності документообігу в системі мультимодальних перевезень. Запропонована математична модель оцінки ефективності електронного документообігу показує скорочення часу виконання операцій у середньому більш ніж на 80%, що формує значний сукупний часовий ефект і дозволяє економити сотні тисяч людино-годин на рік. Економічні розрахунки свідчать про високу інвестиційну привабливість цифровізації: річний ефект становить десятки мільйонів гривень, а термін окупності є мінімальним. Моделювання митних процесів як системи М/М/1 показало, що перехід до e-CMR забезпечує стабілізацію роботи митних пунктів, зменшення черг і підвищення пропускної спроможності.

Результати дослідження доводять, що e-CMR визнається повноцінним юридичним документом, прирівняним до паперової накладної за умови підтвердження автентичності відповідно

до Протоколу, розробленого United Nations Economic Commission for Europe. Водночас її використання як доказу може ускладнюватися в країнах, що не ратифікували відповідні норми, а також вона зберігає статус нетоваророзпорядчого документа, що обмежує фінансові операції. Цифровізація формує нову категорію кіберризиків, відповідальність за які покладається на загальні норми права та національне законодавство. Розрахунки показують, що потенційні втрати від кіберінцидентів є значними і перевищують витрати на захист, що обґрунтовує необхідність впровадження стандартів кібербезпеки та подальшого нормативного врегулювання. Для України цифровізація документообігу МТО є не лише конкурентною перевагою, але й обов'язковою нормативною умовою євроінтеграції транспортної галузі.

Загалом результати узгоджуються з міжнародною практикою та підтверджують доцільність широкого впровадження електронного документообігу як ключового чинника підвищення ефективності та конкурентоспроможності транспортної системи.

ЛІТЕРАТУРА

1. Кучерук Г. Ю., Войченко Т. О., Сівашенко Т. В. Роль цифровізації транспортної логістики в контексті мультимодальних перевезень. *Водний транспорт*. 2025. URL: <https://tstt.diiit.edu.ua/article/view/123148>.
2. Пелех К. В., Демидчук Л. Б. Інтернет речей у транспортній логістиці. *Вісник Хмельницького національного університету*. 2024. URL: <https://heraldes.khmnpu.edu.ua/index.php/heraldes/article/view/527>.
3. Приліпа М. Д. Державне регулювання мультимодальних перевезень. *Dictum Factum*. 2025. URL: <https://df.duit.in.ua/index.php/dictum/article/view/396>.
4. Boujarra M., Lechhab A., Al Karkouri A., Zrigui I., Fakhri Y., Bouekkadi S. Revolutionizing logistics through deep learning: Innovative solutions to optimize data security. *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*. 2024. Vol. 102(4). P. 1593–1607. URL: <https://www.jatit.org/volumes/Vol102No4/15Vol102No4.pdf>.
5. Гірна О. Б., Іваницький Р. С. Інноваційні технології у транспорті та логістиці. *Via Economica*. 2025. URL: <https://journals.rshu.rivne.ua/index.php/viaeconomica/article/view/342>.
6. Clarke M., Yates J. *E-Documents in International Trade Law*. London : Informa Law from Routledge, 2021. 418 p. URL: <https://www.routledge.com/E-Documents-in-International-Trade-Law/Clarke-Yates/p/book/9780367498213>
7. Sun S., He R. How to possess an electronic bill of lading as information? A comparative perspective of the legislation on the “possession problem” of electronic bills of lading. *Frontiers in Marine Science*. 2024. Vol. 11. DOI: 10.3389/fmars.2024.1493647. URL: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fmars.2024.1493647/full>
8. Коваленко Т. В. Відповідальність МТО в умовах цифрової трансформації логістики. *Правничий вісник Університету «КРОК»*. 2022. № 2. С. 45–53. URL: <https://snku.krok.edu.ua/index.php/vcheni-zapiski-universitetu-krok/article/view/1081>
9. Петренко Є. О. Блокчейн та e-CMR: синергія технологій у мультимодальній логістиці. *Проблеми законності*. 2025. № 168. С. 201–214. DOI: 10.21564/2414-990X.168.312456. URL: <https://doi.org/10.21564/2414-990X.168.312456>
10. Danloup S., Miemczyk V., Johnsen D. Digitalization and operational efficiency in 3PL operators: A structural equation modelling approach. *International Journal of Production Economics*. 2023. Vol. 258. Article 108791. DOI: 10.1016/j.ijpe.2023.108791. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2023.108791>
11. Zhu H., Li W., Zhang Q. Impact of e-AWB adoption on air cargo terminal throughput: An agent-based simulation study. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*. 2024. Vol. 183. Article 103441. DOI: 10.1016/j.tre.2024.103441. URL: <https://doi.org/10.1016/j.tre.2024.103441>
12. Bergami R. Digital freight documents and the liability gap. *Journal of International Trade Law and Policy*. 2024. Vol. 23, No. 1. P. 44–67. DOI: 10.1108/JITLP-2023-0041. URL: <https://doi.org/10.1108/JITLP-2023-0041>
13. Alliance for Logistics Innovation through Collaboration in Europe (ALICE). *Digital Freight Documents: Impact Assessment Across EU Member States*. Brussels : ALICE, 2023. 96 p. URL: <https://www.etp-logistics.eu>
14. Krebs T. Electronic bills of lading, transnational and English law: blocking the blockchain? *Uniform Law Review*. 2024. Vol. 28, Issue 3–4. P. 323–338. DOI: 10.1093/ulr/unad022. URL: <https://doi.org/10.1093/ulr/unad022>
15. Smeele F., Hendrikse B. The e-AWB under the Montreal Convention 1999: A Critical Appraisal // *Air and Space Law*. 2022. Vol. 47, No. 3. P. 301–330. DOI: <https://doi.org/10.54648/AILA2022019>
16. Про транспорт: Закон України від 10.11.1994 № 232/94-ВР. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/232/94-вр>.
17. Про мультимодальні перевезення : Закон України від 17.11.2021 № 1887-IX // База даних «Законодавство України» / Верховна Рада України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/1887-20>

18. Господарський кодекс України: Закон України від 16.01.2003 № 436-IV. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/436-15>.
19. Міністерство інфраструктури України. Нормативно-правові акти у сфері транспорту. URL: <https://mtu.gov.ua>
20. International Road Transport Union. *eCMR: The digital future of transport documentation*. Geneva, 2022. URL: <https://www.iru.org>.
21. FIATA. *Digitalisation in freight forwarding: eFBL and electronic documents*. Geneva, 2023. URL: <https://www.fiata.org>
22. Work.ua. Статистика заробітних плат у сфері логістики в Україні. 2026. URL: <https://www.work.ua/salary-logistic-supply-chain/>
23. Ван С.-Х., Чен У.-Т., Ву Х. Багаторівнева система чергування інспекцій з обмеженою пропускною здатністю для диференційованих заходів контролю кордону // *IEEE Access*. 2021. Vol. 9. P. 60489–60502. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3073470>.
24. Chen Y. Comparing the influencing factors of M/G/1 performance indices in queuing theory across different scheduling approaches // *Mathematics*. 2024. Vol. 12(6). Art. 10891. DOI: <https://doi.org/10.3390/math120610891>
25. Wang Y. Research on the Queuing Theory based on M/M/1 Queuing Model // *Highlights in Science, Engineering and Technology*. 2023. Vol. 61. P. 80–84. URL: <https://www.researchgate.net/publication/372770211>
26. Додатковий протокол до Конвенції про договір міжнародного дорожнього перевезення вантажів (КДВП) щодо електронної накладної (e-CMR) : Протокол від 20 лют. 2008 р. / United Nations Economic Commission for Europe. Женева, 2008. URL: [Additional Protocol to the CMR \(e-CMR\)](#)
27. Про електронні довірчі послуги: Закон України від 05.10.2017 № 2155-VIII. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2155-19>

REFERENCES

1. Kucheruk H. Yu., Voichenko T. O., Sivashenko T. V. Rol tsyfrovizatsii transportnoi lohistyky v konteksti multimodalnykh perevezen. *Vodnyi transport*. 2025. URL: <https://tstt.diiit.edu.ua/article/view/123148>.
2. Pelekh K. V., Demydchuk L. B. Internet rechei u transportnii lohistytsi. *Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu*. 2024. URL: <https://heraldes.khmnu.edu.ua/index.php/heraldes/article/view/527>.
3. Prylipa M. D. Derzhavne rehuliuвання multimodalnykh perevezen. *Dictum Factum*. 2025. URL: <https://df.duit.in.ua/index.php/dictum/article/view/396>.
4. Boujarra M., Lechhab A., Al Karkouri A., Zrigui I., Fakhri Y., Bourekkadi S. Revolutionizing logistics through deep learning: Innovative solutions to optimize data security. *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*. 2024. Vol. 102(4). P. 1593–1607. URL: <https://www.jatit.org/volumes/Vol102No4/15Vol102No4.pdf>.
5. Hirna O. B., Ivanytskyi R. S. Innovatsiini tekhnolohii u transporti ta lohistytsi. *Via Economica*. 2025. URL: <https://journals.rshu.rivne.ua/index.php/viaeconomica/article/view/342>.
6. Clarke M., Yates J. *E-Documents in International Trade Law*. London : Informa Law from Routledge, 2021. 418 p. URL: <https://www.routledge.com/E-Documents-in-International-Trade-Law/Clarke-Yates/p/book/9780367498213>
7. Sun S., He R. How to possess an electronic bill of lading as information? A comparative perspective of the legislation on the “possession problem” of electronic bills of lading. *Frontiers in Marine Science*. 2024. Vol. 11. DOI: 10.3389/fmars.2024.1493647. URL: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fmars.2024.1493647/full>
8. Kovalenko T. V. Vidpovidalnist MTO v umovakh tsyfrovoi transformatsii lohistyky. *Pravnychiy visnyk Universytetu «KROK»*. 2022. № 2. P. 45–53. URL: <https://snku.krok.edu.ua/index.php/vcheni-zapiski-universitetu-krok/article/view/1081>
9. Petrenko Ye. O. Blokchein ta e-CMR: synerhiia tekhnolohii u multimodalnii lohistytsi. *Problemy zakonnosti*. 2025. № 168. P. 201–214. DOI: 10.21564/2414-990X.168.312456. URL: <https://doi.org/10.21564/2414-990X.168.31245>
10. Danloup S., Miemczyk V., Johnsen D. Digitalization and operational efficiency in 3PL operators: A structural equation modelling approach. *International Journal of Production Economics*. 2023. Vol. 258. Article 108791. DOI: 10.1016/j.ijpe.2023.108791. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2023.108791>
11. Zhu H., Li W., Zhang Q. Impact of e-AWB adoption on air cargo terminal throughput: An agent-based simulation study. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*. 2024. Vol. 183. Article 103441. DOI: 10.1016/j.tre.2024.103441. URL: <https://doi.org/10.1016/j.tre.2024.103441>

12. Bergami R. Digital freight documents and the liability gap. *Journal of International Trade Law and Policy*. 2024. Vol. 23, No. 1. P. 44–67. DOI: 10.1108/JITLP-2023-0041. URL: <https://doi.org/10.1108/JITLP-2023-0041>
13. Alliance for Logistics Innovation through Collaboration in Europe (ALICE). *Digital Freight Documents: Impact Assessment Across EU Member States*. Brussels : ALICE, 2023. 96 p. URL: <https://www.etp-logistics.eu>
14. Krebs T. Electronic bills of lading, transnational and English law: blocking the blockchain? *Uniform Law Review*. 2024. Vol. 28, Issue 3–4. P. 323–338. DOI: 10.1093/ulr/unad022. URL: <https://doi.org/10.1093/ulr/unad022>
15. Smeele F., Hendrikse B. The e-AWB under the Montreal Convention 1999: A Critical Appraisal // *Air and Space Law*. 2022. Vol. 47, No. 3. P. 301–330. DOI: <https://doi.org/10.54648/AILA2022019>
16. Pro transport: Zakon Ukrainy vid 10.11.1994 № 232/94-VR. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/232/94-vr>.
17. Pro multymodalni perevezennia : Zakon Ukrainy vid 17.11.2021 № 1887-IX // Baza danykh «Zakonodavstvo Ukrainy» / Verkhovna Rada Ukrainy. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/1887-20>
18. Hospodarskyi kodeks Ukrainy: Zakon Ukrainy vid 16.01.2003 № 436-IV. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/436-15>.
19. Ministerstvo infrastruktury Ukrainy. Normatyvno-pravovi akty u sferi transportu. URL: <https://mtu.gov.ua>
20. International Road Transport Union. eCMR: The digital future of transport documentation. Geneva, 2022. URL: <https://www.iru.org>.
21. FIATA. Digitalisation in freight forwarding: eFBL and electronic documents. Geneva, 2023. URL: <https://www.fiata.org>
22. Work.ua. Statystyka zarobitnykh plat u sferi lohistyky v Ukraini. 2026. URL: <https://www.work.ua/salary-logistic-supply-chain/>
23. Van S.-Kh., Chen Y.-T., Vu X. Bahatorivneva systema chervannia inspektsii z obmezhenoiu propusknoiu zdattistiu dlia dyferentsiiiovanykh zakhodiv kontroliu kordonu // *IEEE Access*. 2021. Vol. 9. P. 60489–60502. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3073470>.
24. Chen Y. Comparing the influencing factors of M/G/1 performance indices in queuing theory across different scheduling approaches // *Mathematics*. 2024. Vol. 12(6). Art. 10891. DOI: <https://doi.org/10.3390/math120610891>
25. Wang Y. Research on the Queuing Theory based on M/M/1 Queuing Model // *Highlights in Science, Engineering and Technology*. 2023. Vol. 61. P. 80–84. URL: <https://www.researchgate.net/publication/372770211>
26. Dodatkovyi protokol do Konventsii pro dohovir mizhnarodnoho dorozhnoho perevezennia vantazhiv (KDVP) shchodo elektronnoi nakladnoi (e-CMR) : Protokol vid 20 liut. 2008 r. / United Nations Economic Commission for Europe. Zheneva, 2008. URL: [Additional Protocol to the CMR \(e-CMR\)](https://www.unece.org/transport/conventions/e-cmr)
27. Pro elektronni dovirchi posluhy: Zakon Ukrainy vid 05.10.2017 № 2155-VIII. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2155-19>

Myronenko V.K., Irodovska N.Yu.

TRANSFORMATION OF THE ROLE OF THE MULTIMODAL TRANSPORT OPERATOR UNDER THE CONDITIONS OF DIGITALIZATION OF THE LEGAL ENVIRONMENT

The article examines the impact of digitalization on the legal status of the multimodal transport operator (MTO) in the context of implementing electronic transport documents, in particular e-CMR and e-AWB. A mathematical model for evaluating the efficiency of electronic document management is proposed, incorporating the document workflow efficiency coefficient (DWEC), the time effect within the logistics chain, and an integral digitalization index of the MTO. The study substantiates the effectiveness of introducing electronic transport documents (e-CMR) in multimodal transport systems and analyzes their legal nature.

Based on mathematical modeling, it is established that the digitalization of document workflows significantly reduces document processing time, generates a substantial cumulative time-saving effect, and ensures high economic performance with a minimal payback period. It is demonstrated that the electronic consignment note has the legal force of an original document; however, its application is associated with certain limitations as it does not function as a document of title and may entail legal risks in transit jurisdictions.

The paper also analyzes cyber risks arising from digitalization, which may lead to significant economic losses. A methodological approach to the quantitative assessment of legal risks related to cyber incidents is proposed, along with recommendations for improving regulatory and legal frameworks in the field of multimodal transportation.

Keywords: *multimodal transport operator, e-CMR, e-AWB, electronic document management, document workflow efficiency coefficient, queuing theory, digitalization, legal regulation, customs clearance.*

Стаття прийнята 20.02.2026

Автори випуску

Аппазов Едуард Сейярович, к.т.н., доцент, доцент кафедри навігації та управління судном, Херсонська державна морська академія, [ORCID 0000-0003-4277-1981](https://orcid.org/0000-0003-4277-1981)

Бажак Ольга Валеріївна, доктор філософії, доцент кафедри інженерних дисциплін Дунайського інституту Національного університету «Одеська морська академія», м. Ізмаїл, Україна, [ORCID 0000-0003-0598-5235](https://orcid.org/0000-0003-0598-5235)

Васалатій Надія Василівна, кандидат географічних наук, доцент, Одеського національного морського університету, доцент кафедри навігації і керування судном, м. Одеса, [ORCID: 0000-0002-7188-9922](https://orcid.org/0000-0002-7188-9922)

Ганношина Ірина Миколаївна, кандидат технічних наук, доцент, заступник директора Навчально-наукового Київського інституту водного транспорту імені гетьмана Петра Конашевича-Сагайдачного Національного транспортного університету, м. Київ, [ORCID 0000-0001-5810-2462](https://orcid.org/0000-0001-5810-2462)

Гільдєєв Денис Олександрович, аспірант кафедри експлуатації флоту і технології морських перевезень, Одеський національний морський університет, [ORCID 0009-0003-9173-6602](https://orcid.org/0009-0003-9173-6602)

Головань Андрій Ігорович, доктор технічних наук, доцент, завідувач кафедри суднобудування і судноремонту ім. проф. Ю.Л. Воробйова Одеського національного морського університету, м. Одеса, [ORCID 0000-0001-6589-4381](https://orcid.org/0000-0001-6589-4381)

Гончарук Ірина Павлівна, кандидат технічних наук, доцент, Одеського національного морського університету, доцент кафедри навігації і керування судном, м. Одеса, [ORCID 0000-0002-5306-4206](https://orcid.org/0000-0002-5306-4206)

Калініченко Євгеній Володимирович, кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри навігації і керування судном Одеського національного морського університету, м. Одеса, [ORCID 0000-0003-2898-7313](https://orcid.org/0000-0003-2898-7313);

Капочкіна Маргарита Борисівна, кандидат технічних наук, доцент кафедри Навігація та управління судном Навчально-науковий інститут морського флоту Одеський національний морський університет, Одеса, Україна; [ORCID 0000-0002-9770-3284](https://orcid.org/0000-0002-9770-3284)

Кириченко Олександр Сергійович – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри електрообладнання та автоматики водного транспорту Навчально-наукового Київського інституту водного транспорту імені гетьмана Петра Конашевича-Сагайдачного Національного транспортного університету, м. Київ, [ORCID 0000-0003-0545-4493](https://orcid.org/0000-0003-0545-4493)

Колєснік Олександр Володимирович, старший викладач, Одеський національний морський університет, м. Одеса, Україна, [ORCID 0009-0003-3713-2015](https://orcid.org/0009-0003-3713-2015)

Коломієць Оксана Михайлівна, доктор філософії, доцент кафедри інфраструктури та інноваційних технологій Навчально-наукового Київського інституту водного транспорту імені гетьмана Петра Конашевича-Сагайдачного Національного транспортного університету, м. Київ

Кочубей Павло Олегович, аспірант 2 року навчання спеціальності 275 «Транспортні технології». Херсонська державна морська академія, [ORCID 0009-0006-5824-7390](https://orcid.org/0009-0006-5824-7390)

Кучеренко Наталія Василівна, кандидат географічних наук, доцент, провідний науковий співробітник Науково-дослідного центру Збройних Сил України, «Державний океанаріум» Інституту Військово-Морських Сил Національного університету «Одеська морська академія», Одеса, Україна; [ORCID 0009-0009-9461-1411](https://orcid.org/0009-0009-9461-1411)

Кучерук Галина Юріївна, доктор економічних наук, професор, професор кафедри навігації та управління суднами Навчально-наукового Київського інституту водного транспорту імені гетьмана Петра Конашевича-Сагайдачного Національного транспортного університету, м. Київ, [ORCID 0000-0003-1496-5703](https://orcid.org/0000-0003-1496-5703)

Левченко Ольга Вікторівна, кандидат економічних наук, доктор філософії, доцент, доцент кафедри природничо-технічного забезпечення діяльності водного транспорту, Навчально-наукового Київського інституту водного транспорту імені гетьмана Петра Конашевича-Сагайдачного Національного транспортного університету, м. Київ, [ORCID 0000-0001-7659-347X](https://orcid.org/0000-0001-7659-347X)

Маранов Олександр Вікторович, кандидат технічних наук, доцент, в.о. завідувача кафедри інфраструктури та інноваційних технологій Навчально-наукового Київського інституту водного

транспорту імені гетьмана Петра Конашевича-Сагайдачного Національного транспортного університету, м. Київ [ORCID 0000-0002-5854-0240](https://orcid.org/0000-0002-5854-0240)

Мельник Олексій Миколайович, доктор технічних наук, професор, Одеський національний морський університет, завідувач кафедри судноводіння і морської безпеки, ORCID: [0000-0001-9228-8459](https://orcid.org/0000-0001-9228-8459)

Монюшко Марина Михайлівна, к.геогр.н., доцент каф. навігації і управління судном, Дунайський інститут Національного університету «Одеська морська академія», [ORCID 0009-0009-1488-8972](https://orcid.org/0009-0009-1488-8972)

Носовський Андрій Андрійович, аспірант кафедри інфраструктури та інноваційних технологій Навчально-наукового Київського інституту водного транспорту імені гетьмана Петра Конашевича-Сагайдачного Національного транспортного університету, м. Київ

Онищенко Світлана Петрівна, д.е.н., проф., професор кафедри «Експлуатація флоту і технологія морських перевезень» Одеський національний морський університет, м. Одеса, [ORCID 0000-0002-7528-4939](https://orcid.org/0000-0002-7528-4939)

Россомаха Олег Анатолійович – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри суднові енергетичні системи та комплекси Одеського національного морського університету, м. Одеса, [ORCID 0000-0002-0230-9453](https://orcid.org/0000-0002-0230-9453)

Сагін Арсеній Сергійович – здобувач ступеня PhD кафедри суднових енергетичних установок Національного університету «Одеська морська академія», [ORCID 0009-0000-4965-6121](https://orcid.org/0009-0000-4965-6121)

Сагін Сергій Сергійович – доктор філософії, капітан далекого плавання, [ORCID 0009-0008-4147-5172](https://orcid.org/0009-0008-4147-5172)

Сагін Сергій Вікторович, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри суднових енергетичних установок Національного університету «Одеська морська академія», м. Одеса, [ORCID 0000-0001-8742-2836](https://orcid.org/0000-0001-8742-2836)

Тимошук Олена Миколаївна, доктор технічних наук, професор кафедри навігації та управління суднами, в.о. директора Навчально-наукового Київського інституту водного транспорту імені гетьмана Петра Конашевича-Сагайдачного Національного транспортного університету, м. Київ, [ORCID 0000-0003-3684-6182](https://orcid.org/0000-0003-3684-6182)

Томчаковський Георгій Георгійович, старший викладач кафедри навігації і керування судном Навчально-науковий інститут морського флоту, Одеський національний морський університет, Одеса, Україна; [ORCID 0000-0002-9799-4368](https://orcid.org/0000-0002-9799-4368)

Ширкова Олена Анатоліївна, старший викладач, кафедра інженерних дисциплін Дунайського інституту Національного університету «Одеська морська академія», м. Ізмаїл, Україна, [ORCID 0009-0008-5566-7132](https://orcid.org/0009-0008-5566-7132)

Щенявський Геннадій Сергійович, старший викладач, Одеський національний морський університет, аспірант кафедри судноводіння і морської безпеки, [ORCID 0000-0001-7803-978X](https://orcid.org/0000-0001-7803-978X)