

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 3 (44)

**Київ
2025**

Збірник наукових праць Водний транспорт. Національного транспортного університету. – К.: НТУ, 2025. – Випуск 3 (44). – 300 с. <https://doi.org/10.33298/2226-8553.2025.3.44>

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/Державний університет інфраструктури та технологій

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

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

Головний редактор – доктор технічних наук, професор Тимощук О.М.

Редакційна колегія:

Дубинець О.І. д.т.н., професор (НТУ); Ганношина І.М., к.т.н., доцент, Тихонов І.В., д.т.н., с.н.с., доцент (НТУ); Маранов О.В. к.т.н., доцент (НТУ); Давидов В.С. к.т.н., доцент (НТУ); Мельник О.В. к.т.н., доцент (НТУ); Горобченко О.М., д.т.н., професор (НТУ); Фомін О.В., д.т.н., професор (НТУ); Богом'я В.І., Заслужений винахідник України, д.т.н., професор (Київський університет інтелектуальної власності та права); Сагін С.В., д.т.н., професор (Одеська національна морська академія); Головань А. І., д.т.н., доцент (Одеський національний морський університет); Варбанець Р.А., д.т.н., професор (Одеський національний морський університет); Чимшир В.І., д.т.н., професор (директор Дунайського інституту Національного університету «Одеська морська академія»); Оніщенко О.А., Заслужений діяч науки і техніки України, д.т.н., професор (Одеська національна морська академія); Кравченко Ю.В., д.т.н., професор (Київський національний університет імені Т.Г. Шевченка); Olegas Prentkovskis, prof. Dr. Vilnius Gediminas Technical University (Vilnius, Lithuania), Гасанов Юсиф Надир огли., д.т.н., професор (Азербайджанська Державна Морська Академія), Гасанов Вагіф Хажан огли., д.т.н., професор (Азербайджанська Державна Морська Академія), Садигов Вюгар Боюкага огли., к.т.н., доцент (Азербайджанська Державна Морська Академія)

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

Рекомендовано до друку Вченою радою Національного транспортного університету (протокол № 12 від 27 листопада 2025р.).

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

Панов С.Л., Ляшко О.В., Степук В.А., Пастух О.В.

Аналіз динаміки комбінованої системи автоматичного регулювання частоти обертання дизельного двигуна 5

Сагін С.В., Куропятник О.А.

Визначення експлуатаційних характеристики гібридних систем скрубберного очищення випускних газів суднових дизелів від домішок сірки 14

Носовський А.А., Євтушенко М.Ю.

Вимоги до управління технологічними процесами портової інфраструктури 27

Давидов В.С., Ляшко О.В., Любарець І.О.

Підвищення ефективності та надійності навігаційного забезпечення безпеки плавання великогабаритних морських суден в прибережній зоні за допомогою гідроакустичних систем 34

Тимошук О.М., Левченко О.В.

Аналіз та обґрунтування методів зниження викидів оксидів азоту атмосфери судовими енергетичними установками 40

Головань А.І.

Підводні дрони у системі водного транспорту: сучасний стан, технології та перспективи застосування 47

Россомаха О. А., Пізінцалі Л. В., Россомаха О. І., Александровська Н. І.

Адитивні технології у суднобудуванні та судноремонті: світовий досвід та перспективи впровадження в Україні 56

Муравйов Г. М., Маркітан В. В., Перевертов Д. С.

Імітаційне моделювання отримування повороту автономного судна на обширному мілководді 80

Гончарук І.П., Васалатій Н.В.

Оперативне прогнозування портового хвилювання та рухів пришвартованих суден під впливом довгоперіодних хвиль у портах чорного моря 96

Кириченко О.С.

Вплив надійності термостабілізації волоконно-оптичного гіроскопа на якість керування курсом судна 103

Тимошук О.М., Левченко О.В.

Дослідження методів зниження викидів оксидів сірки в атмосферу 116

Сокол А. О., Сокол І. В., Гусев В. М., Кущенко Ю. О.

Розширення можливостей системи оцінювання компетенцій у сфері судноводіння 123

Кучерук Г.Ю., Ганношина І.М.

Інноваційні технології навігації і системи управління рухом суден 132

Зазірний А.А., Грошев О.В., Вечирко О.М.

Концептуальний підхід щодо вирішення завдання стабілізації судна на траєкторії на основі використання нейронних мереж 139

Долинська Н.Б., Калініченко Є.В.

Метод забезпечення навігаційної безпеки на внутрішніх водних шляхах України на основі інтелектуальних телематичних технологій 153

Бажак О.В., Гаценко Л.В.

Інтелектуальне управління енергоспоживанням гібридних судових установок 160

Куропятник О.А.

Комплексна оцінка ефективності використання систем управління випускними газами суднових дизелів для забезпечення екологічної експлуатації суден морського транспорту	167
---	-----

Кирилах С.В., Капустян О.Є.

Властивості титанових сплавів, отриманих адитивними технологіями, для деталей водного транспорту	179
--	-----

Квасников П. К.

Автоматична ідентифікаційна система для забезпечення безпеки судноплавства: сучасні реалії розвитку та виклики кібербезпеки.....	199
--	-----

Корбан Д. В.

Проектування та аналіз ефективності гідроакустичної системи керування автономними підводними апаратами на мілководді	208
--	-----

Клочков Ю.П., Дембрович О.О., Аксьонов А.В.

Управління судном в умовах кібератак на навігаційні системи	217
---	-----

Василенко В.М., Дембрович О.О., Коломієць Т., Кукалець Л.М.

Вплив ергономічних факторів безпеки судноплавства на управління суднами у складних умовах	224
---	-----

Голіков В.В., Калініченко Є.В., Заєць А.Ю.

Дослідження впливу синхронного та параметричного кочення на морехідні якості контейнеровозів	223
--	-----

Разінкін Р.О.

Забезпечення ресурсозберігаючої експлуатації суднових дизелів шляхом діагностування моторного мастила	241
---	-----

Гейлик А. В., Ляшко О. В., Вяла Ю. Е.

Інтеграція кореляційно-регресійних моделей та оптимізаційних задач у формуванні професійної математичної компетентності майбутніх фахівців транспортної інфраструктури	256
--	-----

Перетяка Н.О.

Метод кейсів для підготовки інженерів водного транспорту	265
--	-----

Heilyk A., Viala Yu.

Systematization and Modernization of Mathematical Methods for Evaluating the Efficiency of Economic Systems	273
---	-----

ТРАНСПОРТНІ ТЕХНОЛОГІЇ**Кучерук Г.Ю., Войченко Т.О., Сівашенко Т.В.**

Роль цифровізації транспортної логістики в контексті мультимодальних перевезень в умовах воєнного стану	280
---	-----

Овчарук В.О., Ющук І.В.

Комп'ютерне моделювання та оптимізація контейнерних перевезень на морських маршрутах на основі мережевої транспортної задачі	285
--	-----

Шарко О.В., Дорошенко А.С.

The Impact of Environmental Fluctuations on the Performance of International Maritime Transportation.....	292
---	-----

Автори випуску	298
----------------------	-----

СУДНОВОДІННЯ ТА ЕНЕРГЕТИКА СУДЕН

УДК 681.5:621.436

doi.org/10.33298/2226-8553.2025.3.44.01

© Панов С.Л., Ляшко О.В., Степух В.А., Пастух О.В.

АНАЛІЗ ДИНАМІКИ КОМБІНОВАНОЇ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ ЧАСТОТИ ОБЕРТАННЯ ДИЗЕЛЬНОГО ДВИГУНА

У статті розглянуто актуальну задачу забезпечення стабільної частоти обертання валу дизельного двигуна в умовах різких змін механічного навантаження, характерних для роботи суднових енергетичних установок. Динамічна взаємодія навантаження з двигуном призводить до короточасних відхилень частоти обертання, що негативно позначається на стійкості роботи силового агрегату, рівномірності подачі палива та механічному навантаженні на вузли газорозподільного механізму (ГРМ) і кривошипно-шатунний механізм (КШМ). Традиційні системи автоматичного регулювання (САР) частоти обертання, засновані на зворотному зв'язку, мають обмежені можливості щодо швидкого компенсування таких збурень, що проявляється у значному провалі частоти та затримці відновлення сталого режиму.

Для підвищення динамічної стійкості розглянуто комбіновану систему регулювання, у якій до основного контуру додано випереджальний сигнал, що враховує характер прикладеного навантаження. На основі операторного опису елементів системи побудовано математичну модель та виконано чисельно-імітаційне моделювання реакції двигуна на зміну навантаження. Аналіз отриманих перехідних процесів дав змогу оцінити ключові динамічні показники: глибину провалу частоти, швидкодію, стійкість та здатність системи до демпфування механічних збурень.

Порівняння традиційної та комбінованої структур САР показало, що використання додаткового випереджального сигналу дозволяє зменшити відхилення частоти майже вдвічі та скоротити час відновлення до усталеного режиму. Отримані результати підтверджують ефективність комбінованого регулювання для підвищення надійності й механічної стійкості дизельних двигунів у перехідних режимах, що є важливим для суднових енергетичних комплексів.

Ключові слова: система автоматичного регулювання, дизельний двигун, частота обертання, комбінована САР, динамічні характеристики, провал частоти, чисельно-імітаційне моделювання.

Постановка проблеми. Дизельні двигуни, що застосовуються у складі суднових та стаціонарних дизель-генераторних установок, працюють в умовах значних та швидкоплинних змін навантаження [1-3]. Раптові стрибки споживаної електричної потужності призводять до миттєвого збільшення крутного моменту на валу та, як наслідок, до тимчасового зниження частоти обертання дизельного двигуна, що підтверджується експлуатаційними дослідженнями на енергетичних системах суден [4]. Глибина та тривалість такого провалу визначають якість електроенергетичних процесів на судні, впливають на роботу споживачів і можуть спричиняти відхилення параметрів електропостачання за межі допустимих норм.

Традиційні системи автоматичного регулювання частоти обертання, що базуються на П- або ПІ-регуляторах з негативним зворотним зв'язком, забезпечують стабілізацію швидкості у сталому режимі, проте їхня здатність швидко компенсувати динамічні збурення є обмеженою. У випадку різкого накиду навантаження регулятор реагує із запізненням, оскільки коригуюча дія формується лише після появи відхилення частоти. Це призводить до суттєвого провалу частоти обертання та збільшення часу встановлення.

Слід зазначити, що підвищені вимоги до стабільності роботи дизель-генераторних установок на судах зумовлені широким спектром технологічних, експлуатаційних та екологічних чинників, що

характеризують сучасні транспортні системи [5-7]. Це підсилює потребу в удосконаленні систем автоматичного регулювання частоти обертання та зменшенні впливу перехідних режимів на роботу силових агрегатів.

Одним із перспективних підходів є використання комбінованих систем автоматичного регулювання (САР), у яких поряд із сигналом зворотного зв'язку застосовується додатковий випереджальний сигнал, пропорційний зміні навантаження. Така структура дозволяє зменшити інерційність регулювання та підвищити стійкість дизель-генераторної установки в перехідних режимах. Проте порівняльні дослідження ефективності комбінованих САР на основі строгих математичних моделей виконані недостатньо, що зумовлює актуальність даної роботи.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Системи автоматичного регулювання частоти обертання дизельних двигунів суднових енергетичних установок залишаються одним із ключових напрямів удосконалення суднової автоматики. У сучасних працях значну увагу приділено оптимізації параметрів електронних регуляторів частоти обертання з урахуванням динаміки навантаження, вимог класифікаційних товариств та особливостей експлуатації суднових дизелів. Зокрема, у роботі [8] запропоновано методику оптимізації налаштувань електронного регулятора частоти обертання на основі математичного та чисельного моделювання. Подібні підходи висвітлені у дослідженнях [9, 10], де проаналізовано чутливість та динаміку суднових регуляторів у різних режимах роботи дизеля.

Значний інтерес становлять роботи, присвячені моделюванню комплексних енергетичних систем суден, включно з взаємодією дизель-генераторів, турбокомпресорних агрегатів та систем автоматичного регулювання. У публікації [11] розглянуто моделювання суднової електроенергетичної установки у перехідних режимах, що підтверджує актуальність імітаційних методів для оцінювання динаміки суднових САР. Розвитку інтелектуальних методів і автоматизованого моделювання присвячено монографію [12], де підкреслено перспективність комп'ютерних засобів аналізу динамічних процесів.

У міжнародних дослідженнях активно розглядаються методи покращення динамічних характеристик дизелів за рахунок застосування робастного, оптимального та комбінованого керування. Так, у роботах [13-16] запропоновано моделі та регулятори, що використовують випереджальні сигнали (feedforward), H_2 -регулятори та методи активної компенсації збурень для підвищення швидкодії та зменшення впливу навантаження.

Водночас питання порівняльного аналізу динамічних властивостей комбінованих систем автоматичного регулювання частоти обертання дизельного двигуна, які включають додатковий сигнал по навантаженню, залишається недостатньо висвітленим, що визначає актуальність даного дослідження.

Метою статті є аналіз динамічних властивостей системи автоматичного регулювання частоти обертання дизельного двигуна та оцінювання ефективності комбінованої структури регулювання на основі математичного та чисельно-імітаційного моделювання перехідних процесів.

Виклад основного матеріалу та основні результати дослідження. Аналіз динамічних властивостей системи автоматичного регулювання (САР) полягав у дослідженні реакції дизельного двигуна на зміни завдання та збурення по навантаженню, визначенні характеру перехідних процесів, оцінюванні характеру перехідних процесів, величини перерегулювання та глибини провалу частоти обертання при раптовому накиді навантаження. Для цього було використано математичний опис елементів САР у вигляді передавальних функцій і побудовано замкнені моделі системи з традиційною та комбінованою структурами регулювання. Ефективність [17] комбінованої структури оцінювалась шляхом порівняння перехідних процесів при однакових збуреннях, визначаючи зменшення початкового провалу частоти, швидкість відновлення усталеного режиму та вплив додаткового сигналу на стабільність системи. Чисельно-імітаційне моделювання виконано із застосуванням сучасних комп'ютерних засобів математичного аналізу та розв'язування динамічних систем, подібно до підходів, наведених у [18-20].

Для аналізу роботи САР частоти обертання розглядається дизельний двигун у режимі малих відхилень від номінального режиму. Об'єктом регулювання є лінійна модель дизельного двигуна. Усі змінні подано у відносних одиницях та відлічуються від усталених значень. Лінеаризована динаміка двигуна у першо-порядковому наближенні описується диференціальним рівнянням:

$$T_0 \frac{dn(t)}{dt} + n(t) = k_N (h(t) - N(t)), \quad (1)$$

де T_0 – еквівалентна постійна часу дизеля, с;

$n(t)$ – відхилення частоти обертання вала, в.о.

k_N – коефіцієнт передачі каналу «подача палива - частота обертання»;

$h(t)$ – відхилення керувальної дії (положення рейки паливного насоса високого тиску), в.о.;

$N(t)$ – відхилення механічного навантаження на вал (момент генератора), в.о.

Після перетворення Лапласа передавальна функція об'єкта:

$$P(s) = \frac{n(s)}{h(s) - N(s)} = \frac{k_N}{T_0 s + 1}. \quad (2)$$

Модель ПІ-регулятора частоти обертання. Помилка регулювання визначається як:

$$e(t) = n_{зд}(t) - n(t) \quad (3)$$

де $n_{зд}(t)$ – задане значення частоти, в.о.

Закон ПІ-регулювання має вигляд:

$$h_p(t) = k_p e(t) + k_i \int_0^t e(\tau) d\tau \quad (4)$$

де k_p – пропорційний коефіцієнт;

$k_i = k_p / T_i$ – інтегральний коефіцієнт, с⁻¹;

T_i – постійна часу інтегрування, с.

Передавальна функція ПІ-регулятора в операторній формі:

$$C(s) = \frac{h_p(s)}{e(s)} = k_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} \right). \quad (5)$$

Канал додаткового випереджального сигналу за навантаженням:

$$W_k(s) = \frac{h_d(s)}{N(s)} = \frac{k_k}{T_k s + 1}, \quad (7)$$

де k_k – коефіцієнт підсилення додаткового випереджального сигналу;

T_k – постійна часу фільтрації сигналу навантаження, с.

Загальна керувальна дія формується як:

$$h(t) = h_p(t) + h_d(t), \quad (8)$$

Передавальні функції замкненої САР:

– канал завдання (для обох систем):

$$G_{\text{ref}}(s) = \frac{n(s)}{n_{зд}(s)} = \frac{P(s)C(s)}{1 + P(s)C(s)}; \quad (9)$$

– канал збурення (традиційна САР):

$$G_Q(s) = \frac{n(s)}{Q(s)} = - \frac{P(s)}{1 + P(s)C(s)}, \quad (10)$$

де $Q(s)$ – зображення навантаження $N(s)$, в.о.;

– канал збурення (комбінована САР):

$$G_{Q,\text{comb}}(s) = \frac{n(s)}{Q(s)} = \frac{P(s)(W_k(s) - 1)}{1 + P(s)C(s)}. \quad (11)$$

Рівняння (1)-(11) формують замкнену математичну модель САР частоти обертання дизельного двигуна, що включає об'єкт регулювання, регулятор та додатковий випереджальний канал.

Чисельно-імітаційне моделювання проводилось при наступних параметрах:

$T_0 = 1.7$ с; $k_N = 0.95$; $k_p = 1.8$; $T_i = 0.75$ с; $k_k = 0.83$; $T_k = 0.27$ с

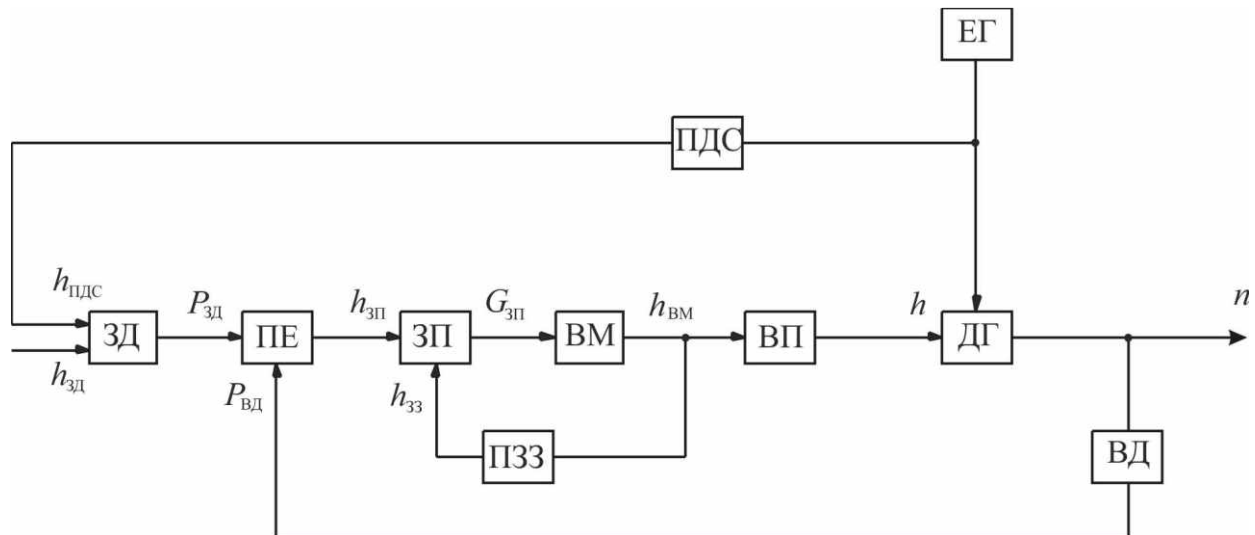


Рисунок 1 – Функціональна схема системи автоматичного регулювання частоти обертання валу дизельного двигуна з додатковим сигналом за навантаженням:

ЗД – пристрій, що задає; ПЕ – порівнювальний елемент; ЗП – золотниковий підсилювач; ВМ – виконавчий механізм; ПЗЗ – пристрій зворотного зв'язку; ВП – важільна передача; ПДС – пристрій додаткового сигналу; ВД – відцентровий датчик; ДГ – дизель-генератор; ЕГ – електрогенератор

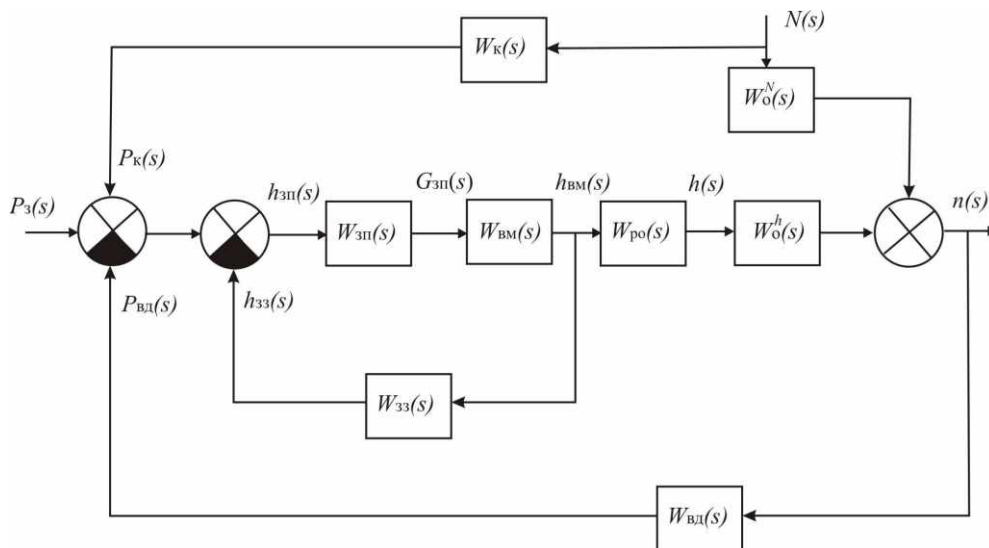


Рисунок 2 – Структурна схема системи автоматичного регулювання частоти обертання валу дизельного двигуна

Функціональну та структурну схеми САР частоти обертання дизель-генератора з додатковим сигналом за навантаженням показано на рис. 1-2.

Графік на рис. 3 демонструє перехідну характеристику традиційної (базової) САР дизельного двигуна при одиничному впливі на завдання. Цей перехідний процес використовується для порівняння динамічних властивостей системи та відображає налаштування ПІ-регулятора.

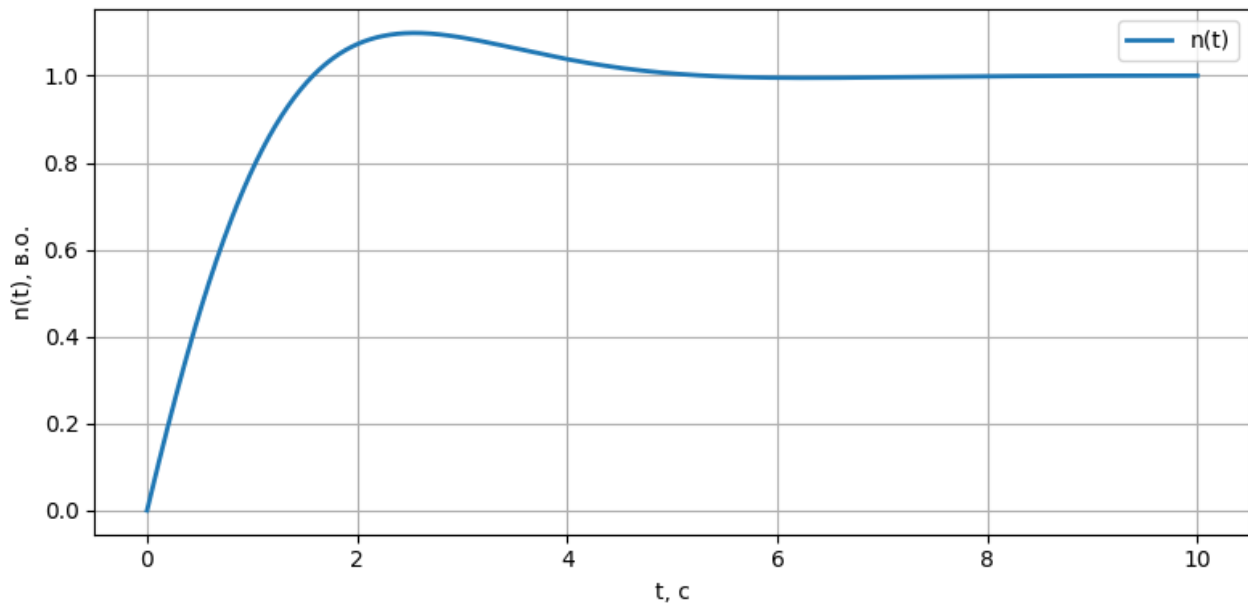


Рисунок 3 – Перехідна характеристика системи автоматичного регулювання обертання валу дизельного двигуна з ПІ-регулятором

На рис. 4 наведено перехідні процеси частоти обертання дизельного двигуна при дії ступінчастого збільшення навантаження, що реалізує збурювальний вплив на систему автоматичного регулювання. Порівнюються два варіанти: традиційна САР (тільки зворотний зв'язок за відхиленням) та комбінована САР із додатковим випереджальним сигналом від навантаження.

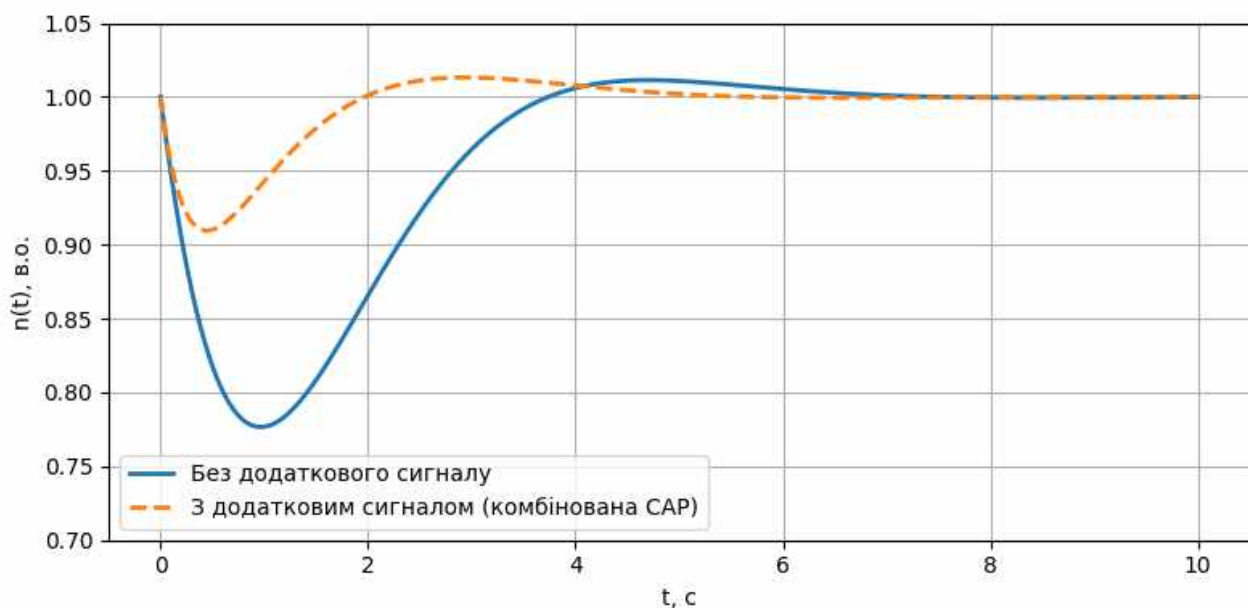


Рисунок 4 – Вплив ступінчастого навантаження на частоту обертання дизельного двигуна

У традиційній системі (суцільна лінія) після прикладання навантаження спостерігається значний динамічний провал частоти обертання до 15-18 % від номінального рівня. Такий характер реакції зумовлений тим, що регулятор формує керувальну дію лише після появи відхилення частоти, що призводить до запізнення компенсації моменту навантаження. Подальший процес відновлення має коливальний характер, а усталення відбувається приблизно через 4-5 с, що свідчить про обмежену швидкодію та недостатнє придушення збурення.

Комбінована САР (пунктирна лінія), навпаки, демонструє значно кращу динаміку. Завдяки додатковому каналу, який подає пропорційний і згладжений сигнал навантаження у виконавчу частину регулятора, первинний провал частоти зменшується до $\approx 7\text{--}10\%$. Система швидше компенсує збурення, причому процес відновлення носить менш коливальний характер, а встановлення відбувається за 2-3 с. Частота обертання повертається до номінального значення зі зменшеною амплітудою відхилень і підвищеною стійкістю.

Таким чином, комбінована структура суттєво підвищує робастність та ефективність регулювання в умовах раптових змін навантаження, що є критичним для дизель-генераторних установок із високими вимогами до стабільності частоти.

Системи автоматичного регулювання частоти обертання дизельних двигунів мають важливе значення для забезпечення надійної роботи суднових силових установок і допоміжних механізмів. Умови експлуатації внутрішнього та морського флоту характеризуються швидкими і нерівномірними змінами навантаження, що виникають під час роботи насосних агрегатів, рульових машин, компресорів та інших суднових систем. Такі збурення без належного регулювання призводять до небажаних відхилень частоти, підвищення механічних навантажень на кривошипно-шатунний та газорозподільний механізми, а також погіршення загальної плавності роботи двигуна.

У цьому контексті порівняння традиційної та комбінованої структур регулювання дає змогу оцінити їх здатність забезпечувати стабільність частоти обертання в характерних для суднових силових установок перехідних режимах. Отримані результати моделювання показують, що комбінована САР підвищує ефективність компенсації навантажувальних збурень, зменшує динамічні впливи на механічні вузли та сприяє більш рівномірній і надійній роботі дизельних агрегатів у складі суднових допоміжних систем.

Висновок. У статті проаналізовано традиційну та комбіновану системи автоматичного регулювання (САР) частоти обертання дизельного двигуна на основі математичного та чисельно-імітаційного моделювання. Отримані перехідні характеристики дозволили оцінити вплив структурних рішень на показники якості регулювання. Для традиційної САР встановлено значний первинний провал частоти обертання при накиді навантаження (до 15-18 % від номіналу) та порівняно тривалий час встановлення (4-5 с). Це підтверджує обмежені можливості компенсування швидкоплинних збурень лише за зворотним зв'язком. Уведення додаткового випереджального сигналу у комбінованій САР забезпечило суттєве покращення динаміки: глибина провалу зменшилася до 7-10 %, а час відновлення – до 2-3 с. Частота обертання стабілізувалася швидше, а чутливість до навантажувальних збурень помітно знизилася. Отже, комбінована структура регулювання демонструє підвищену ефективність порівняно з традиційною САР і може бути рекомендована для застосування в дизель-генераторних установках із підвищеними вимогами до стабільності частоти обертання.

ЛІТЕРАТУРА

1. Ткачук Д. О., Панов С. Л., Гаращенко М. І., Вільдяєва Л. М. Особливості прогнозування стану суднового обладнання в умовах трансокеанських рейсів. *Водний транспорт*. 2018. С. 65-73. DOI: doi.org/10.33298/2226-8553/2018.1.27.11
2. Wharton A. J. Diesel Engines. 3rd ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 1991. 144 p. DOI: https://doi.org/10.1016/C2009-0-24733-7
3. Bosch R. Diesel Engine Management: Systems and Components. Berlin: Springer Vieweg, 2014. 370 p.
4. Мельник О. В. Дослідження експлуатаційної надійності технічних засобів як фактор підвищення безпеки при проведенні суднових операцій. *Водний транспорт*. 2024. Вип. 1(39). С. 186-193. DOI: https://doi.org/10.33298/2226-8553.2024.1.39.19
5. Мельник О. В., Сорока В. В., Гаталяк М. Я. Методи зниження вмісту токсичних компонентів відпрацьованих газів суднових дизелів. *Водний транспорт*. 2020. Вип. 32. С. 64-75.
6. Мельник О. В., Тимошук О. М. Оптимізація заходів безпеки при бункеруванні суден. *Водний транспорт*. 2021. Вип. 2(33). С. 36-43. DOI: https://doi.org/10.33298/2226-8553/2021.2.33.04

7. Мельник О. В., Тимошук О. М. Інформаційно-логістичні системи в сучасних транспортних технологіях. *Інвестиції: практика та досвід*. 2015. Вип. 22. С. 79-83.
8. Будуров М. І. Оптимізація налаштування електронного регулятора частоти обертання суднового дизеля. *Двигуни внутрішнього згоряння*. 2025. № 1. С. 38-50.
9. Gorb S., Levinskyi O., Mykhalkiv V. Sensitivity optimisation of a main marine diesel engine electronic speed governor. *Scientific Horizons*. 2021. Vol. 24. No. 11. P. 9-19.
10. Gorb S., Popovskii A., Budurov M. Adjustment of speed governor for marine diesel generator engine. *International Journal of GEOMATE*. 2023. Vol. 25. No. 109. P. 125-132.
11. Вороненко С. В., Субботін О. В., Лебеденко Ю. О. Моделювання процесів у судновій комплексній електроенергетичній турбокомпресорній установці в перехідних режимах. *Прикладні питання математичного моделювання*. 2020. Т. 3. № 2(1). С. 116-145.
12. Аврунін О. Г., Владов С. І., Петченко М. В., Семенець В. В., Татарінов В. В., Тельнова Г. В., Філатов В. О., Шмельов Ю. М., Шушляпіна Н. О. Інтелектуальні системи автоматизації. Монографія. Кременчук: НОВАБУК. 2021. 322 с.
13. Mancini G., Paviotti M., Ponti F. Dynamic feedforward control of a diesel engine based on optimal transient compensation maps. *Energies*. 2014. Vol. 7. P. 5400-5427.
14. Huang M. Research on H₂ speed governor for diesel engine of marine power station. *Journal of Marine Science and Application*. 2007. Vol. 6. P. 51-57.
15. Weigang P., Changliang X., Yufei W. Design of diesel engine adaptive active disturbance rejection controller. *The Open Automation and Control Systems Journal*. 2015. Vol. 7. P. 1429-1437.
16. Xia M., Zhang H., Li Y. Research on feedforward–feedback speed control of turbocharged diesel engine. *Proceedings of International Conference on Control of Turbocharged Diesel Engines*. 2016. P. 1-6.
17. Кириченко О. С. Підвищення енергоефективності роботи електронасосних агрегатів. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. 2013. Т. 51. № 1024. С. 28-35.
18. Машін В. М., Цацко В. І. Елементи суднової автоматики. Навчальний посібник. Одеса: ОНМУ, 2023. 250 с. DOI: <https://doi.org/10.47049/ONMU-2023-NP12>
19. Кириченко О. С., Білюк І. С., Шарейко Д. Ю., Фоменко А. М., Гаврилов С. О., Бугрім Л. П. Чисельне тривимірне моделювання термоелектричного охолоджувача вимірювального електроустаткування автоматичних систем. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2018. Т. 29 (68). Ч. 1. № 6. С. 58-63.
20. Isermann R. *Engine Modeling and Control: Modeling and Electronic Management of Internal Combustion Engines*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2014. 637 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-642-39934-3>.
21. 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.
22. Сагін С.В., Бондар С.А., Столярик Т.О. Оцінка безвідмовності суднових 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.
23. 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. <https://doi.org/10.20858/sjsutst.2025.127.10>.

REFERENCES

1. Tkachuk D. O., Panov S. L., Harazhenko M. I., Vildiaieva L. M. Osoblyvosti prohnozuvannia stanu sudnovoho obladnannia v umovakh transokeanskykh reisiv. *Vodnyi transport*. 2018. S. 65-73. DOI: doi.org/10.33298/2226-8553/2018.1.27.11
2. Wharton A. J. *Diesel Engines*. 3rd ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 1991. 144 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/C2009-0-24733-7>
3. Bosch R. *Diesel Engine Management: Systems and Components*. Berlin: Springer Vieweg, 2014. 370 p.
4. Melnyk O. V. Doslidzhennia ekspluatatsiinoi nadiinosti tekhnichnykh zasobiv yak faktor pidvyshchennia bezpeky pry provedenni sudnovykh operatsii. *Vodnyi transport*. 2024. Vyp. 1(39). S. 186-193. DOI: <https://doi.org/10.33298/2226-8553.2024.1.39.19>
5. Melnyk O. V., Soroka V. V., Hataliak M. Ya. Metody znyzhennia vmistu toksychnykh komponentiv vidpratsovanykh haziv sudnovykh dyzeliv. *Vodnyi transport*. 2020. Vyp. 32. S. 64-75.

6. Melnyk O. V., Tymoshchuk O. M. Optymizatsiia zakhodiv bezpeky pry bunkeruvanni suden. *Vodnyi transport*. 2021. Vyp. 2(33). S. 36-43. DOI: <https://doi.org/10.33298/2226-8553/2021.2.33.04>
7. Melnyk O. V., Tymoshchuk O. M. Informatsiino-lohistychni systemy v suchasnykh transportnykh tekhnolohiiakh. *Investytsii: praktyka ta dosvid*. 2015. Vyp. 22. S. 79-83.
8. Budurov M. I. Optymizatsiia nalashtuvannia elektronnoho rehuliatora chastoty obertannia sudnovoho dyzelia. *Dvyhuny vnutrishnoho zghoriannia*. 2025. № 1. S. 38-50.
9. Gorb S., Levynskyi O., Mykhalkiv V. Sensitivity optimisation of a main marine diesel engine electronic speed governor. *Scientific Horizons*. 2021. Vol. 24. No. 11. P. 9-19.
10. Gorb S., Popovskii A., Budurov M. Adjustment of speed governor for marine diesel generator engine. *International Journal of GEOMATE*. 2023. Vol. 25. No. 109. P. 125-132.
11. Voronenko S. V., Subbotin O. V., Lebedenko Yu. O. Modeliuvannia protsesiv u sudnovii kompleksnii elektroenerhetychnii turbokompresornii ustanovtsi v perekhidnykh rezhymakh. *Prykladni pytannia matematychnoho modeliuvannia*. 2020. T. 3. № 2(1). S. 116-145.
12. Avrunin O. H., Vladov S. I., Petchenko M. V., Semenets V. V., Tatarinov V. V., Telnova H. V., Filatov V. O., Shmelov Yu. M., Shushliapina N. O. *Intelektualni systemy avtomatyzatsii*. Monohrafiia. Kremenichuk: NOVABUK. 2021. 322 s.
13. Mancini G., Paviotti M., Ponti F. Dynamic feedforward control of a diesel engine based on optimal transient compensation maps. *Energies*. 2014. Vol. 7. P. 5400-5427.
14. Huang M. Research on H₂ speed governor for diesel engine of marine power station. *Journal of Marine Science and Application*. 2007. Vol. 6. P. 51-57.
15. Weigang P., Changliang X., Yufei W. Design of diesel engine adaptive active disturbance rejection controller. *The Open Automation and Control Systems Journal*. 2015. Vol. 7. P. 1429-1437.
16. Xia M., Zhang H., Li Y. Research on feedforward–feedback speed control of turbocharged diesel engine. *Proceedings of International Conference on Control of Turbocharged Diesel Engines*. 2016. P. 1-6.
17. Kyrychenko O. S. Pidvyshchennia enerhoefektyvnosti roboty elektronasosnykh ahrehativ. *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «KhPI»*. 2013. T. 51. № 1024. S. 28-35.
18. Mashin V. M., Tsatsko V. I. *Elementy sudnovoi avtomatyky*. Navchalnyi posibnyk. Odesa: ONMU, 2023. 250 s. DOI: <https://doi.org/10.47049/ONMU-2023-NP12>
19. Кириченко О. С., Білюк І. С., Шарейко Д. Ю., Фоменко А. М., Гаврилов С. О., Бугрім Л. П. Чисельне тривимірне моделювання термоелектричного охолоджувача вимірювального електроустаткування автоматичних систем. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2018. Т. 29 (68). Ч. 1. № 6. С. 58-63.
20. Isermann R. *Engine Modeling and Control: Modeling and Electronic Management of Internal Combustion Engines*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2014. 637 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-642-39934-3>.
21. 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.
22. 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.
23. 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. <https://doi.org/10.20858/sjsutst.2025.127.10>.

S.L. Panov, O.V. Liashko, V.A. Stepukh, O.V. Pastukh

ANALYSIS OF THE DYNAMICS OF A COMBINED AUTOMATIC SPEED CONTROL SYSTEM FOR A DIESEL ENGINE

The article considers the relevant task of ensuring a stable rotational speed of a diesel engine shaft under sharp changes in mechanical load, which are characteristic of ship power plants. The dynamic interaction of the load with the engine leads to short-term deviations of the rotational speed, which negatively affects the stability of the power unit, the uniformity of fuel supply, and the mechanical loading of the valvetrain components and the crank-and-connecting-rod mechanism. Traditional automatic speed control systems based

on feedback have limited capability for quickly compensating such disturbances, which results in a significant speed drop and a delay in restoring the steady-state mode.

To improve dynamic stability, a combined control system is considered, in which a feedforward signal that accounts for the nature of the applied load is added to the main control loop. Based on the operator description of the system elements, a mathematical model was constructed and numerical-simulation modelling of the engine response to the load change was performed. Analysis of the obtained transient processes made it possible to evaluate the key dynamic indicators: the depth of speed drop, the response speed, the stability, and the system's ability to damp mechanical disturbances.

Comparison of the traditional and combined control structures showed that the use of an additional feedforward signal makes it possible to reduce the speed deviation almost by half and to shorten the recovery time to the steady-state mode. The obtained results confirm the effectiveness of combined control for increasing the reliability and mechanical stability of diesel engines in transient operating conditions, which is important for ship power systems.

Keywords: *automatic control system; diesel engine; rotational speed; combined control system; dynamic characteristics; speed drop; numerical-simulation modelling.*

Стаття прийнята 25.10.2025

© Сагін С.В., Куропятник О.А.

ВИЗНАЧЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГІБРИДНИХ СИСТЕМ СКРУБЕРНОГО ОЧИЩЕННЯ ВИПУСКНИХ ГАЗІВ СУДНОВИХ ДИЗЕЛІВ ВІД ДОМІШОК СІРКИ

Наведені результати досліджень щодо визначення експлуатаційних характеристики гібридних систем скрубберного очищення випускних газів суднових дизелів від домішок сірки. Зазначено, що згоряння палива в циліндрі суднового дизеля супроводжується не тільки виділенням теплоти та її трансформацією в крутний момент, але й також утворенням і викидом в атмосферу випускних газів. Однією з найбільш шкідливих складових випускних газів суднових дизелів є оксиди сірки, які утворюються під час згоряння палива через наявність у ньому сірки (у чистому вигляді, або у сполученнях з іншими елементами та речовинами). Відповідно до Annex VI MARPOL вміст сірки в морському паливі не повинен перевищувати 0,1 % під час експлуатації суден у спеціальних екологічних районах – Sulphur Emission Control Areas (SECAs) та бути не більшим за 0,5 % під час експлуатації суден поза цих районів. У випадку, коли випускні гази суднових дизелів додатково очищуються у спеціальних пристроях (найбільш поширеними з яких є скрубери), дозволяється використання палива з вмістом сірки до 3,5 %. Дослідження виконувались на судні класу Bulk Carrier дедвейтом 81780 тонн. До складу суднової енергетичної установки судна входили головний двигун STX-MAN B&W 6S60ME-C та три допоміжні двигуна Yanmar 6EY18ALW2. Випускні гази всіх дизелів (головного та допоміжних) спрямовувались до загального скрубера, у якому відбувалось очищення газів від домішок сірки. Експлуатація скруберної системи виконувалась за відкритим, або за гібридним способом. У першому випадку очищення випускних газів здійснювалось лише з використанням морської води. У другому – до морської води додавався розчин каустичної соди NaOH. Встановлено, що використання гібридного контуру підвищує ефективність роботи скруберної системи очищення випускних газів. Це відображається в покращенні екологічних показників роботи суднових дизелів – зниженні емісії діоксиду вуглецю CO₂, діоксиду сірки SO₂, а також їх відношення SO₂/CO₂. Саме відношення SO₂/CO₂ є показником, яке регламентується вимогами Додатку VI MARPOL у разі використання систем очищення випускних газів від оксидів сірки. Крім того, саме це відношення контролюється під час перевірки екологічності роботи суднової енергетичної установки. Найбільш ефективну дію гібридний контур створює на сірковмісні компоненти палива. Це відображається в суттєвому зниженні викидів оксидів сірки, яке під час експлуатації судна всередині SECAs досягає 15,41...20,01 %; під час експлуатації судна поза SECAs досягає 8,72...13,12 %.

Ключові слова: випускні гази, емісія оксидів сірки, екологічні показники, емісія оксиду вуглецю, емісія оксидів сірки, морське паливо, морський транспорт, скрубер, система очищення випускних газів, судновий дизель

Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями. Перевезення, що забезпечуються морськими суднами, займають домінуючу позицію серед перевезень іншими типами транспортних засобів – автомобільним, залізничним та авіаційним [1-3].

На теперішній час дизелі встановлюються на всіх без винятку морських суднах та виконують функції головних або допоміжних двигунів [4-6]. У першому випадку вони передають свою потужність рушій (гвинту фіксованого кроку або гвинту, крок якого регулюється) та в такий спосіб забезпечують рух судна. У другому – їх механічна енергія перетворюється в електричну та через це забезпечується живлення та подальше функціонування суднових допоміжних механізмів, палубного та навігаційного обладнання, а також освітлення судна [7-9]. У першому випадку дизелі характеризують як головні

двигуни, у другому – як допоміжні двигуни [10-12]. Лише дуже невелика частина морських суден як джерело механічної енергії використовує газові або парові турбіни. На ще меншій частині суден ці теплові двигуни виконують функції головних двигунів [13-15].

Основним джерелом енергії всіх теплових двигунів, що використовуються в суднових енергетичних установках (дизелях, котлах, газових турбінах) є рідке паливо нафтового походження [16-18]. Варіанти використання газового палива в суднових дизелях на теперішній час мають лише поодинокий характер, при цьому майже відсутні варіанти використання газового палива в котлах та газових турбінах [19-21].

Згоряння палива в циліндрі суднового дизеля супроводжується не тільки виділенням теплоти та її трансформацією в крутний момент, але й також утворенням і викидом в атмосферу випускних газів [22, 23]. Випускні гази є багатокомпонентною газовою сумішшю, до складу якої входять токсичні компоненти (передусім оксиди азоту NO_x , оксиди сірки SO_x , монооксид вуглецю CO) [24, 25]. Таким чином, основним негативним фактором, що пов'язаний з використанням палива нафтового походження, є його шкідливий вплив на довкілля. Перш за все це пов'язано з емісією оксидів вуглецю CO та CO_2 , оксидів сірки SO_x , а також оксидів азоту NO_x [26, 27]. У зв'язку з цим саме ці екологічні показники роботи суднових дизелів регламентуються та контролюються з боку міжнародних організацій та класифікаційних товариств [28-30].

Основним міжнародним документом, що обмежує емісію оксидів азоту NO_x та оксидів сірки SO_x з випускними газами, є International Convention for the Prevention of Pollution from Ships – MARPOL 73/78. Відповідно до Annex VI MARPOL концентрація оксидів азоту у випускних газах не повинна перевищувати значень, що визначаються залежно від року побудови судна та частоти обертання дизеля. Також відповідно до Annex VI MARPOL вміст сірки в морському паливі не повинен перевищувати 0,1 % під час експлуатації суден у спеціальних екологічних районах – Sulphur Emission Control Areas (SECAs) та бути не більшим за 0,5 % під час експлуатації суден поза SECAs. У випадку, коли випускні гази суднових дизелів додатково очищуються у спеціальних пристроях (найбільш поширеними з яких є скрубери), дозволяється використання палива з вмістом сірки до 3,5 %. При цьому повинне бути підтверджена еквівалентність коефіцієнту викидів SO_2/CO_2 вмісту сірки в судновому паливі (табл. 1). При цьому у відношенні SO_2/CO_2 емісія діоксиду сірки SO_2 визначається у частках на мільйон – ppm, емісія діоксиду вуглецю CO_2 – визначається у об'ємних відсотках – %v [31-33].

Таблиця 1 – Відповідність вмісту сірки в паливі максимальним значенням коефіцієнту викидів

Вміст сірки в паливі, S, %	Коефіцієнт викидів, SO_2/CO_2 , ppm/%v
0,50	21,7
0,10	4,3

Забезпечення вимог Annex VI MARPOL щодо емісії оксидів сірки з випускними газами суднових дизелів, є актуальним завданням, розв'язанню якого присвячено багато наукових та технологічних досліджень.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Забезпечення вимог Annex VI MARPOL щодо емісії оксидів сірки може бути досягнуте двома шляхами:

перший – використанням палива зі вмістом сірки, що не перебільшує 0,5 % за масою у випадку експлуатації морського судна поза SECAs та складає менш за 0,1 % за масою під час знаходження судна всередині SECAs

другий – використання додаткового очищення випускних газів у спеціальних системах очищення з забезпеченням необхідного значення відношення SO_2/CO_2 .

До першого також відноситься десульфурізація палива – процес, що спрямований на видаленні з палива певної кількості компонентів, що містять сірку. Десульфурізації палива сприяють методи тонкої фільтрації, гідродинамічного очищення, а також кавітаційної та ультразвукової обробки [34-36].

Недоліком тонкої фільтрації, як способу прямого видалення сірки з палива, є менший розмір компонентів, що містять сірку, порівняно з іншими домішками (насамперед з усіма металевими

складовими, а також з органічними сполуками). При цьому через свої великі розміри «не сірчисті» домішки поступово накопичуються в осередках фільтра. У зв'язку з цим використання тонкої фільтрації (як способу десульфуризації палива) сприяє підвищенню гідравлічного опору в паливній системі. Це призводить до необхідності збільшення тиску в паливній магістралі, а також скорочує час між очищенням елементів фільтра від забруднень. Наслідком цього є підвищення енергетичних втрат на процес підготовки палива та збільшення його тривалості [37-39].

У разі використання гідроочищення виконується попереднє додавання до палива дистильованої води. Отримана в такий спосіб суміш палив та води спочатку піддається гідродинамічній обробці, після чого або обстоюється або сепарується. І в першому, і в другому випадку частина сірки, пов'язана з водою, осаджується і зливається. До негативних характеристик даного методу відноситься необхідність збору та подальшої утилізації осаду сірковмісної суміші палива та води. Крім того, як і у разі використання будь-яких сепараційних установок, суттєво підвищується енергоспоживання даних блоків системи очищення [40-42].

Під час тонкої фільтрації та гідродинамічного очищення забезпечується максимальне видалення сірки з палива. Але при цьому (через те, що сірка під час згоряння виділяє теплоту) знижується теплотворна здатність палива. Це призводить до підвищення питомої витрати палива, змушує збільшувати його циклову подачу та тривалість впорскування. Наслідком цього стає підвищення теплової напруженості дизеля. Як спосіб попередження цих негативних явищ використовується кавітаційна обробка палива, за допомогою якої руйнуються міжмолекулярні зв'язки між сіркою S та вуглецем C, а також сіркою S та воднем H. Це сприяє активації вказаних структурних складових палива та призводить до покращення процесу згоряння [43, 44].

Під час кавітаційної обробки за допомогою ультразвуку паливо піддається високим змінним тискам. У разі використання ультразвукової обробки на паливо діють звукові хвилі спеціально визначеної частоти та амплітуди [45, 46].

Найбільш розповсюдженим варіантом спеціальних система очищення випускних газів від компонентів, що містять сірку, є скрубєрні системи. В цих систем випускні газі додатково спрямовуються у скрубєр, в якому в зустрічному напрямку до потоку випускних газів подається морська (забортна) вода до складу якої можуть входити спеціальні реагенти [48-50]. Таки системи можуть експлуатуватися за «відкритим», «закритим» та «гібридним» принципом. У відкритому морська вода після її використання у скрубєрі та, відповідно, очищення випускних газів від оксидів сірки видаляється за борт. У закритому морська вода після використання у скрубєрі залишається у спеціальному танку [51-53]. У гібридному – морська вода спрямовується до очисного танку та після додаткового очищення видаляється за борт. Саме у гібридних системах до морської води додаються спеціальні реагенти (у більшості випадків каустична сода NaOH), це підвищує рівень очищення випускних газів від оксидів сірки, але змушує виконувати додаткове очищення води, яка виходить зі скрубєра. При цьому гібридні системи можуть експлуатуватися також і за відкритим принципом [54-55]. Можливий варіант комплектації гібридної системи скрубєрного очищення випускних газів судових дизелів від оксидів сірки надана на рис. 1. Основні компоненти, що входять до складу системи, позначені на рис. 1, їх функціональне призначення зрозуміло, тому не потребує додаткового пояснення.

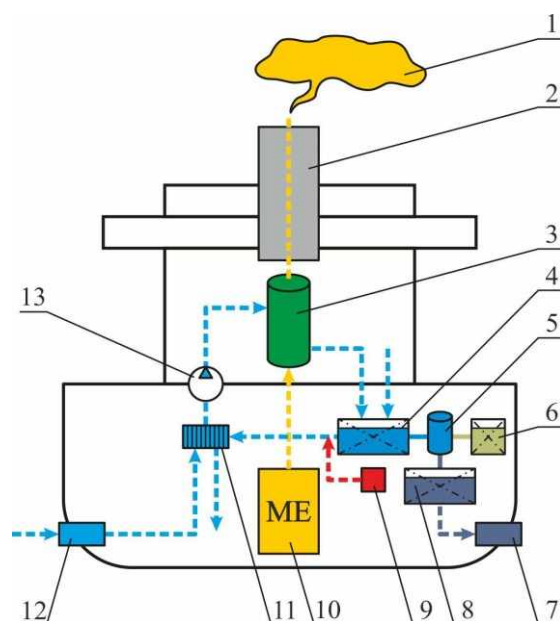


Рисунок 1 – Принципова схема гібридної системи скрубберного очищення випускних газів суднових дизелів від оксидів сірки:

1 – випускні гази; 2 – глушник; 3 – скруббер; 4 – технологічний танк; 5 – очищувач скрубберної води; 6 – танк збору осаду (шламовий танк); 7 – зливна труба;
8 – накопичувальний танк; 9 – танк з лужним розчином (каустичної соди NaOH);
10 – головний двигун ME (Main Engine); 11 – теплообмінний апарат; 12 – бортовий кінгстон; теплообмінний апарат; 13 – циркуляційний насос заборотної води

Формулювання цілей статті. Ціллю статті є визначення експлуатаційних характеристики гібридних систем скрубберного очищення випускних газів суднових дизелів від домішок сірки.

Виклад основного матеріалу. Дослідження виконувались на судні класу Bulk Carrier дедвейтом 81780 тонн. До складу суднової енергетичної установки судна входили головний двигун STX-MAN B&W 6S60ME-C з ефективною потужністю 9950 кВт та три допоміжні дизель-генератори Yanmar 6EY18ALW2 з потужністю 800 кВт кожний. Випускні гази всіх дизелів (головного та допоміжних) спрямовувались до загального скруббера SOx – Exhaust Gas Cleaning System. Скруберне очищення випускних газів дозволяло використовувати під час експлуатації дизелів палива з вмістом сірки до 3,5 %.

Exhaust Gas Cleaning System забезпечувала очищення випускних газів від домішок сірки на різних експлуатаційних режимах роботи суднової енергетичної установки. При цьому за мінімальний приймався режим, що відповідав 25% навантаженню на один з допоміжних дизель-генераторів Yanmar 6EY18ALW2. Як максимальний – режим, на якому головний двигун STX-MAN B&W 6S60ME-C експлуатувався з навантаженням 85 %, три одночасно працюючих дизель-генератори Yanmar 6EY18ALW2 з навантаженням 75 %.

Під час експлуатації суднової енергетичної установки та, відповідно, проведення досліджень, суднові дизелі використовували паливо, основні характеристики якого надані в табл. 2. Під час проведення досліджень суднова енергетична установка експлуатувалась на різних режимах, які наведені в табл. 3.

Таблиця 2 – Основні характеристики палив під час проведення досліджень

Характеристика	RMG450	DMA10
Густина за 15°C, кг/м ³	972,6	832,3
В'язкість за 50,0°C, мм ² /с	234,5	6,12
Вміст сірки, %	3,28	0,093
Температура спалаху, °C	126	83
Теплотворна здатність, кДж/кг	40862	43438

Таблиця 3 – Експлуатаційні режими суднової енергетичної установки

Режим	Варіант роботи суднової енергетичної установки
1	60% навантаження головного двигуна STX-MAN B&W 6S60ME-C + 65% навантаження допоміжного двигуна Yanmar 6EY18ALW2
2	75% навантаження головного двигуна STX-MAN B&W 6S60ME-C + 70% навантаження допоміжного двигуна Yanmar 6EY18ALW2
3	70% навантаження головного двигуна STX-MAN B&W 6S60ME-C + 55% навантаження двох допоміжних двигунів Yanmar 6EY18ALW2
4	75% навантаження головного двигуна STX-MAN B&W 6S60ME-C + 65% навантаження двох допоміжних двигунів Yanmar 6EY18ALW2

На всіх експлуатаційних режимах суднові дизелі (як головний STX-MAN B&W 6S60ME-C, також допоміжні Yanmar 6EY18ALW2) використовували на паливо RMG450 (характеристики якого надані у табл. 2). У деяких морських портах та територіальних водах країн, національні вимоги яких не дозволяли використовувати скрубберне очищення випускних газів від оксидів сірки, експлуатація дизелів виконувалась на паливі DMA (з характеристиками, що відповідають наданим у табл. 2).

Експлуатація Exhaust Gas Cleaning System виконувалось за відкритим, або за гібридним способом. У першому випадку очищення випускних газів здійснювалось лише з використанням морської води, яка після використання у скруббері видалялась за борт. У другому – до морської води додавався розчин каустичної соди NaOH. Це змушувало виконувати очищення води після її використання у скруббері, після чого здійснювалось її видалення за борт.

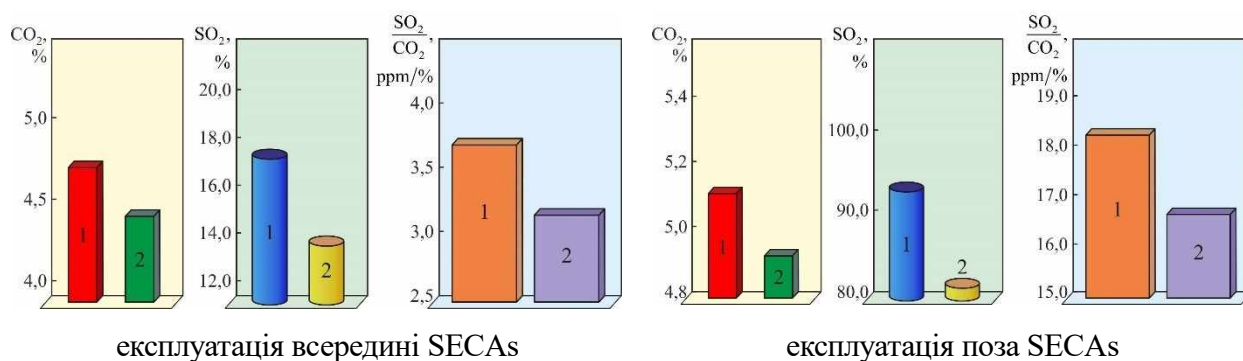
Результати досліджень наведені у табл. 4.

Таблиця 4 – Визначення показників скрубберної системи очищення випускних газів

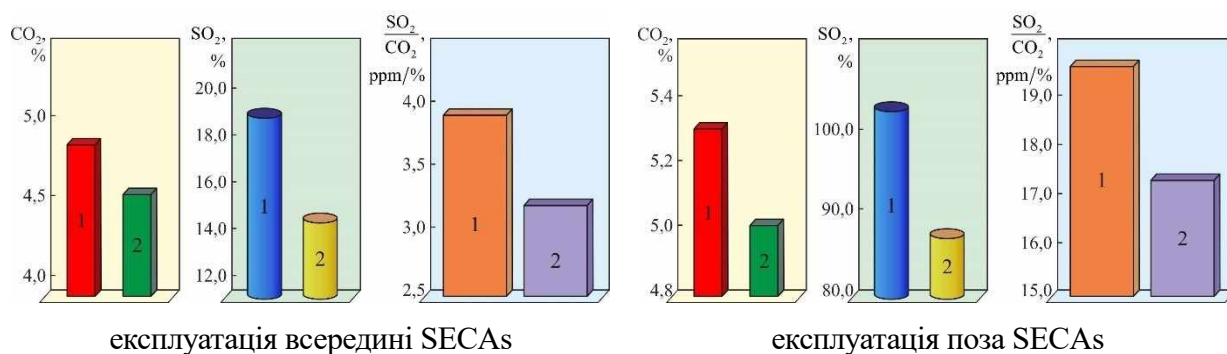
Експлуатаційний режим*	Скрубберне очищення випускних газів			Скрубберне очищення випускних газів з додатковим додаванням NaOH		
	CO ₂ , %	SO ₂ , ppm	SO ₂ /CO ₂ , ppm/%	CO ₂ , %	SO ₂ , ppm	SO ₂ /CO ₂ , ppm/%
Під час знаходження всередині SECAs						
1	4,7	17,3	3,68	4,4	13,7	3,11
2	4,8	18,7	3,90	4,5	14,2	3,16
3	5,0	19,3	3,86	4,6	15,4	3,35
4	5,3	21,6	4,08	5	16,3	3,26
Під час знаходження поза SECAs						
1	5,1	92,7	18,18	4,9	81,3	16,59
2	5,3	103,4	19,51	5,0	86,2	17,24
3	5,3	105,2	19,85	5,1	88,8	17,41
4	5,5	108,6	19,75	5,2	89,2	17,15

Примітка: режими 1, 2, 3, 4 відповідають наведеним в табл. 3

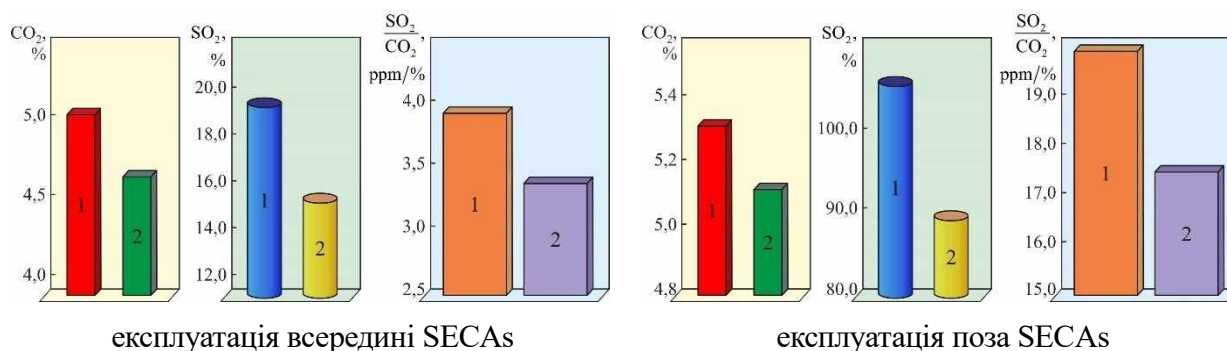
Для кращої візуалізації результати, що наведені в табл. 4, подані у вигляді рис. 2–5.



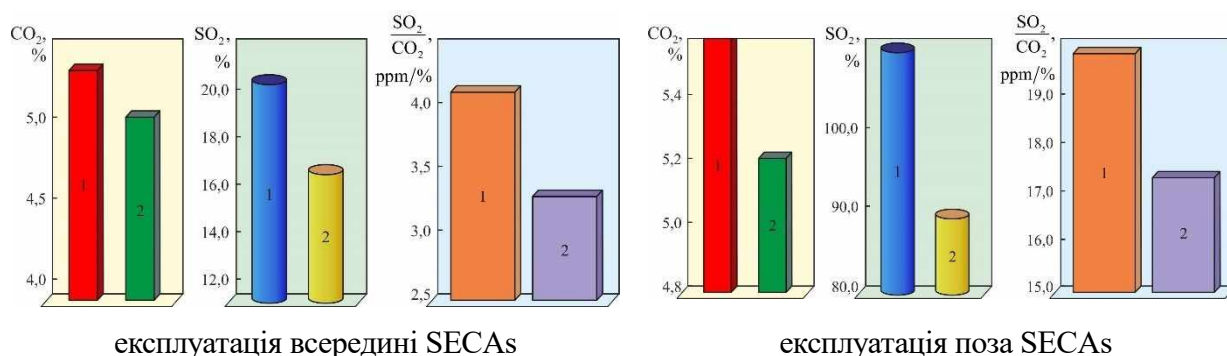
експлуатація всередині SECAs
 експлуатація поза SECAs
 Рисунок 2 – Показники роботи скрубберної систем очищення випускних газів (режим 1): 1 – відкритий спосіб; 2 – гібридний спосіб



експлуатація всередині SECAs
 експлуатація поза SECAs
 Рисунок 3 – Показники роботи скрубберної систем очищення випускних газів (режим 2): 1 – відкритий спосіб; 2 – гібридний спосіб



експлуатація всередині SECAs
 експлуатація поза SECAs
 Рисунок 4 – Показники роботи скрубберної систем очищення випускних газів (режим 3): 1 – відкритий спосіб; 2 – гібридний спосіб



експлуатація всередині SECAs
 експлуатація поза SECAs
 Рисунок 5 – Показники роботи скрубберної систем очищення випускних газів (режим 4): 1 – відкритий спосіб; 2 – гібридний спосіб

Відносне зменшення емісії шкідливих речовин – діоксиду вуглецю ΔCO_2 , діоксиду сірки ΔSO_2 , а також їх відношення $\Delta(\text{SO}_2/\text{CO}_2)$, розраховувалось за виразами:

$$\left. \begin{aligned} \Delta\text{CO}_2 &= \frac{\text{CO}_2^{\text{Scr}} - \text{CO}_2^{\text{NaOH}}}{\text{CO}_2^{\text{Scr}}} \cdot 100\%, \\ \Delta\text{SO}_2 &= \frac{\text{SO}_2^{\text{Scr}} - \text{SO}_2^{\text{NaOH}}}{\text{SO}_2^{\text{Scr}}} \cdot 100\%, \\ \Delta\left(\frac{\text{SO}_2}{\text{CO}_2}\right) &= \frac{\left(\frac{\text{SO}_2}{\text{CO}_2}\right)^{\text{Scr}} - \left(\frac{\text{SO}_2}{\text{CO}_2}\right)^{\text{NaOH}}}{\left(\frac{\text{SO}_2}{\text{CO}_2}\right)^{\text{Scr}}} \cdot 100\%, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

де CO_2^{Scr} , SO_2^{Scr} , $\left(\frac{\text{SO}_2}{\text{CO}_2}\right)^{\text{Scr}}$ – емісія діоксиду вуглецю, діоксиду сірки, а також їх відношення для відповідного режиму роботи системи очищення випускних газів за відкритим контуром;

$\text{CO}_2^{\text{NaOH}}$, $\text{SO}_2^{\text{NaOH}}$, $\left(\frac{\text{SO}_2}{\text{CO}_2}\right)^{\text{NaOH}}$ – значення цих же показників під час використання замкнутого контуру.

З урахуванням чисельних значень, що наведені в табл. 4, за виразами (1) отримані значення, які подані в табл. 5.

Таблиця 5 – Відносне зменшення емісії шкідливих речовин під час використання гібридної системи очищення випускних газів від оксидів сірки

Експлуатаційний режим*	Під час знаходження всередині SECAs			Під час знаходження поза SECAs		
	ΔCO_2 , %	ΔSO_2 , %	$\Delta(\text{SO}_2/\text{CO}_2)$, %	ΔCO_2 , %	ΔSO_2 , %	$\Delta(\text{SO}_2/\text{CO}_2)$, %
1	6,38	20,81	15,41	3,92	12,30	8,72
2	6,25	24,06	19,00	5,66	16,63	11,63
3	8,00	20,21	13,27	3,77	15,58	12,28
4	5,66	24,54	20,01	5,45	17,86	13,12

Примітка: режими 1, 2, 3, 4 відповідають наведеним в табл. 3

Висновки. Наведені результати досліджень дозволяють зробити наступні висновки.

1. Проведені дослідження підтверджують доцільність використання гібридного контуру скрубберної системи як методу, що сприяє вдосконаленню процесу очищення випускних газів судових дизелів від оксидів сірки.

2. Використання гібридного контуру підвищує ефективність роботи скрубберної системи очищення випускних газів. Це (в порівнянні з очищенням за відкритим контуром) відображається у покращенні екологічних показників роботи судових дизелів – зниженні емісії діоксиду вуглецю CO_2 , діоксиду сірки SO_2 , а також відношення SO_2/CO_2 . Саме відношення SO_2/CO_2 є показником, яке регламентується вимогами Додатку VI MARPOL у разі використання систем очищення випускних газів від оксидів сірки. Найбільш ефективну дію гібридний контур створює на сірковмісні компоненти палива. Це відображається в суттєвому зниженні викидів оксидів сірки, яке під час експлуатації судна всередині SECAs досягає 20,81...24,54 %; під час експлуатації судна поза SECAs досягає 12,30...17,86 %.

4. Додатково підкреслимо більшу ефективність використання гібридного контуру під час знаходження суден всередині SECAs, тобто в прибережних акваторіях. Саме ці морські райони піддаються найбільшій негативній впливу з боку засобів транспорту та саме в них діють найбільш суворі екологічні вимоги та норми.

ЛІТЕРАТУРА

1. 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.
2. Petrychenko O., Levinskyi M. Trends and preconditions for widespread adoption of liquefied natural gas in maritime transport // Transport systems and technologies. – 2024. – № 43. – С. 21-36. DOI:10.32703/2617-9059-2024-43-2.
3. 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.
4. Сагін С.В., Заблоцький Ю.В., Сагін А.С. Підвищення економічності роботи суднових середньооборотних дизелів // Водний транспорт. Збірник наукових праць. – 2025. – Вип. 1(42). – С. 166-179. doi.org/10.33298/2226-8553.2025.1.42.20.
5. Сагін С.В., Сагін С.С. Визначення методу управління рухом суден морського транспорту під час забезпечення їх безпечного розходження // Водний транспорт. – 2023. – № 2(38). – С. 187-197. doi.org/10.33298/2226-8553.2023.2.38.19.
6. Gorb S., Popovskii A., Budurov M. Adjustment of speed governor for marine diesel generator engine // International Journal of GEOMATE. – 2023. – Vol. 25. – N 109. – Pp. 125-132. DOI: https://doi.org/10.21660/2023.109.m2312.
7. Марченко О.О., Сагін С.В. Вдосконалення процесу очищення суднових важких палив // Суднові енергетичні установки: науково-технічний збірник. – 2020. – Вип. 41. – Одеса: НУ«ОМА». – С. 10-14. DOI: 10.31653/smf341.2020.10-14.
8. Поповский А.Ю., Сагин С.В. Комплексная оценка эксплуатационных характеристик смазочных углеводородных жидкостей // Автоматизация судовых технических средств : науч.-техн. сборник. – 2014. – Вып. 20. – С. 74-83.
9. 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.
10. Сагін С.В., Куропятник О.А. Аналіз впливу біодизельного палива на екологічні та економічні показники роботи суднових дизелів // Водний транспорт. Збірник наукових праць. – 2025. – Вип. 1(42). – С. 180-194. doi.org/10.33298/2226-8553.2025.1.42.21.
11. Побережний Р.В., Сагін С.В. Забезпечення екологічних показників дизелів суден річкового та морського транспорту // Суднові енергетичні установки: наук. -техн. зб. – 2020. – Вип. 41. – Одеса: НУОМА. – С. 5-9. DOI: 10.31653/smf340.2020.5-9.
12. 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.org/10.33298/2226-8553.2024.1.39.20.
13. Petrychenko O., Levinskyi M., Goolak S., Lukoševičius V. Prospects of Solar Energy in the Context of Greening Maritime Transport // Sustainability. – 2025. – № 17. – P. 2141. https://doi.org/10.3390/su17052141.
14. Сагін С.В., Куропятник О.А. Визначення оптимальних режимів експлуатації суднових двигунів внутрішнього згоряння під час використання біодизельного палива // Суднові енергетичні установки : науково-технічний збірник. – 2024. – Вип. 48. – Одеса : НУ «ОМА». – С. 100-113. doi: 10.31653/smf48.2024.100-113.
15. Sagin S.V., Karianskyi S., Sagin S.S., Volkov O., Zablotzkyi Y., Fomin O., Pīst'ek V., Kučera P. Ensuring the safety of maritime transportation of drilling fluids by platform supply-class vessel // Applied Ocean Research. – 2023. – Vol. 140. – P. 103745. https://doi.org/10.1016/j.apor.2023.103745.
16. Сагин С.В., Куропятник А.А. Оптимизация режимов работы системы перепуска выпускных газов судовых среднеоборотных дизелей // Автоматизация судовых технических средств : науч. -техн. сб. – 2019. – Вып. 25. – Одесса: НУ«ОМА». – С. 79-89.
17. 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
18. Sagin S.V., Kuropyatnyk O.O., Tkachenko I.V 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.

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. Сагін С.В., Куропятник О.А. Визначення оптимальних режимів процесів управління випускними газами судових дизелів // *Водний транспорт: Збірник наукових праць*. – 2024. – Вип. 2(40). – С. 173-185. doi.org/10.33298/2226-8553.2024.2.40.16.
21. Sagin S.V., Kuropyatnyk O.A. Using exhaust gas bypass for achieving the environmental performance of marine diesel engines // *Austrian Journal of Technical and Natural Sciences. Scientific journal*. – 2021. – № 7-8 – P. 36-43. <https://doi.org/10.29013/AJT-21-7.8-36-43>.
22. Сагін С.В. Реология моторных масел при режимах пуска и реверса судовых малооборотных дизелей // *Universum: Технические науки*. – 2018. – Вып. 3(48). – С. 67-71.
23. Сагін С.В., Столярик Т.О. Динаміка судових дизелів під час використанні моторних мастил з різними структурними характеристиками // *Автоматизація судових технічних засобів : наук.-техн. зб.* – 2021. – Вип. 27. – Одеса: НУ«ОМА». – С. 108-119. DOI: 10.31653/1819-3293-2021-1-27-108-119.
24. Sagin S. V., Stoliaryk T. O. Comparative assessment of marine diesel engine oils // *Austrian Journal of Technical and Natural Sciences. Scientific journal*. – 2021. – № 7-8 (July – August). – P. 29-35. <https://doi.org/10.29013/AJT-21-7.8-29-35>.
25. 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.
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. Левінський М.В., Левінський В.М. Вибір параметрів системи стабілізації курсу судна при дії водно-хвильових збурень // *Автоматизація судових технічних засобів : наук.-техн. зб.* – 2020. – Вип. 26. – С.27-40. DOI: 10.31653/1819-3293-2020-1-26-27-40.
28. Даки О.А., Пліта Л.Л., Трофименко І.В., Федунів В.М. Особливості та вимоги щодо навігаційного забезпечення безпеки судноводіння на внутрішніх судноплавних шляхах // *Водний транспорт. Збірник наукових праць*. – 2022. – Вип. 2(36). – С. 184-194. doi.org/10.33298/2226-8553.2022.2.36.15.
29. Руснак Д.Ю., Сагін С.В. Забезпечення екологічних вимог при ультразвуковій десульфурізації вуглеводних палив // *Суднові енергетичні установки : наук.-техн. зб.* – 2020. – Вип. 40. – Одеса : НУ«ОМА». – С. 49-54. DOI: 10.31653/smf340.2020.49-54.
30. 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.
31. 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.
32. 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.
33. Сагін С.В., Мацкевич Д.В. Оптические характеристики граничных смазочных слоев масел, применяемых в циркуляционных системах судовых дизелей // *Судовые энергетические установки: науч.-техн. сб.* – 2011. – № 26. – С.116-125.
34. Сагін С.В., Заблоцький Ю.В., Перунов Р.В. Технология использования и результаты испытаний присадок к топливам для судовых дизелей // *Проблемы техники: наук.-виробн. журнал*. – 2012. – № 3. – Одесса: ОНМУ. – С. 84-103.
35. Сагін С.В., Заблоцький Ю.В. Определение триботехнических характеристик поверхностей по степени упорядоченности пристенных слоев углеводородных жидкостей // *Проблемы техники : наук.-виробн. журнал*. – 2011. – № 3. – Одесса: ОНМУ. – С. 78-88. doi.org/10.33298/2226-8553.2025.1.42.08.
36. Сагін С.В., Поповский Ю.М., Гребенюк М.Н. Влияние ориентационной упорядоченности в граничных смазочных слоях на триботехнические характеристики узлов трения // *Судовые энергетические установки: науч.-техн. сб.* – 1998. – Вып. 1. – Одесса: ОГМА. – С.102-104.
37. Зверьков Д.О., Сагін С.В. Зниження механічних втрат у судових дизелях // *Суднові енергетичні установки: наук.-техн. зб.* – 2020. – Вип. 40. – С. 20-25. DOI : 10.31653/smf341.2020.20-25.

38. Sagin S.V. Decrease in mechanical losses in high-pressure fuel equipment of marine diesel engines // Materials of the International Conference “Scientific research of the SCO countries: synergy and integration” – 2019. – P. 139–145. DOI: 10.34660/INF.2019.15.36258.
39. Levinskyi M. Automatic diagnostic of marine diesel generator lubricating oil condition // Автоматизація суднових технічних засобів: наук.-техн. зб. – 2023. – Вип. 28. – Одеса: НУ «ОМА». – С. 106-120. DOI: 10.31653/1819-3293-2023-1-28-106-120.
40. Gorb S., Levinskyi M., Budurov M. Sensitivity optimisation of a main marine diesel engine electronic speed governor // Scientific Horizons. – 2021. – Vol. 24(11). – P. 9-19. DOI: 10.48077/scihor.24(11).2021.9-19.
41. Сагин С. В. Определение диапазона стратификации вязкости смазочного материала в трибологических системах судовых дизелей // Вісник Одеськ. нац. мор. ун-ту. – 2019. – Вип. 1(58). – С. 89-100.
42. 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.
43. Petrychenko O.O., Levinskyi M.N., Prytula D.A., Vynohradova A.S. Fuel options for the future: a comparative overview of properties and prospects // Transport Systems and Technologies. – 2023. – № 41. – P. 96–106. DOI: https://doi.org/10.32703/2617-9059-2023-41-8.
44. 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.
45. 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.
46. Сагин С.С., Сагин С.В. Забезпечення безпеки маневрування великотоннажних суден в стиснених портових водах // Водний транспорт: Збірник наукових праць. – 2024. – Вип. 3(41). – С. 208-220. doi.org/10.33298/2226-8553.2024.3.41.21.
47. 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.
48. Sagin S., Sagin A., Zablotzkyi Y., Fomin O., Pištěk V., Kučera P. Method for Maintaining Technical Condition of Marine Diesel Engine Bearings // Lubricants. – 2025. – № 13. – P. 146. https://doi.org/10.3390/lubricants13040146.
49. Сагин А.С., Сагин 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.org/10.33298/2226-8553.2024.1.39.21.
50. Сагин С.В., Заблоцкий Ю.В. Влияние анизотропных жидкостей на работу узлов трения судовых дизелей // Проблемы техники : наук.-виобрн. журнал. – 2012. – № 4. – Одесса : ОНМУ. – С. 68-81.
51. Сагин С.В., Бондар С.А., Столярик Т.О. Оцінка безвідмовності суднових 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.
52. Сагин С.В., Сагин 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.
53. Kurdiuk S., Dremliuk V., Melnyk O., Onishchenko O., Fomin O., Pištěk V., & Kučera P. Development of a High-Reliability Hybrid Data Transmission System for Unmanned Surface Vehicles Under Interference Conditions // Drones. – 2025. – № 9 (3). – P. 174. https://doi.org/10.3390/drones9030174.
54. 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. https://doi.org/10.20858/sjsutst.2025.127.10.
55. Sagin S., Kuropyatnyk O., Sagin A., Tkachenko I., Fomin O., Pištěk V., Kučera P. Ensuring the Environmental Friendliness of Drillships during Their Operation in Special Ecological Regions of Northern Europe // Journal of Marine Science and Engineering. – 2022. – Vol. 10(9). – P. 1331. https://doi.org/10.3390/jmse10091331.

REFERENCES

1. 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.

2. Petrychenko O., Levinskyi M. Trends and preconditions for widespread adoption of liquefied natural gas in maritime transport // *Transport systems and technologies*. – 2024. – № 43. – С. 21-36. DOI:10.32703/2617-9059-2024-43-2.
3. 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.
4. 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.
5. 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. – № 2(38). – P. 187–197. doi.org/10.33298/2226-8553.2023.2.38.19.
6. Gorb S., Popovskii A., Budurov M. Adjustment of speed governor for marine diesel generator engine // *International Journal of GEOMATE*. – 2023. – Vol. 25. – № 109. – P. 125-132. DOI: https://doi.org/10.21660/2023.109.m2312.
7. Marchenko O.O., Sagin S.V. Improving the process of cleaning marine heavy fuels // *Ship power plants*. – 2020. – Vol. 41. – P. 10-14. DOI: 10.31653/smf340.2020.10-14.
8. Popovskii A.Y., Sagin S.V. Complex assessment of operational characteristics of lubricating hydrocarbon liquids // *Automation of ship facilities*. – 2014. – №20. – P. 74-83.
9. 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.
10. Sagin S.V., Kuropyatnyk O.A. Analysis of the impact of biodiesel fuel on the environmental and economic performance of marine diesel engines // *Water transport*. – 2025. – Вип. 1(42). – С. 180-194. doi.org/10.33298/2226-8553.2025.1.42.21.
11. Poberezhniy R.V., Sagin S.V. Ensuring the environmental performance of diesel engines in river and sea transport vessels // *Ship power plants*. – 2020. – Vol. 41. – P. 5-9. DOI: 10.31653/smf340.2020.5-9.
12. 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.
13. Petrychenko O., Levinskyi M., Goolak S., Lukoševičius V. Prospects of Solar Energy in the Context of Greening Maritime Transport // *Sustainability*. – 2025. – № 17. – P. 2141. https://doi.org/10.3390/su17052141.
14. Sagin S.V., Kuropyatnyk O.A. Determining the optimal operating modes of marine internal combustion engines when using biodiesel fuel // *Ship power plants*. – 2011. – Vol. 48. – P. 100-113. doi: 10.31653/smf48.2024.100-113.
15. Sagin S.V., Karianskyi S., Sagin S.S., Volkov O., Zablotskyi Y., Fomin O., Pi's't'ek V., Ku'cera P. Ensuring the safety of maritime transportation of drilling fluids by platform supply-class vessel // *Applied Ocean Research*. – 2023. – Vol. 140. – P. 103745. https://doi.org/10.1016/j.apor.2023.103745.
16. Sagin S.V., Kuropyatnyk O.A. Optimization of operating modes of the exhaust gas bypass system of marine medium-speed diesel engines // *Automation of ship facilities*. – 2019. – № 25. – P. 79-89.
17. 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
18. Sagin S.V., Kuropyatnyk O.O., Tkachenko I.V. Ensuring the environmental friendliness of marine diesel engines of specialized ships // *Ship power plants*. – 2022. – № 45. – P. 5–16. doi: 10.31653/smf45.2022.5-16.
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. Sagin S.V., Kuropyatnyk O.A. Determination of optimal modes of exhaust gas control processes for marine diesel engines // *Water transport*. – 2024. – № 1(39). – P. 173–185. doi.org/10.33298/2226-8553.2024.2.40.16.
21. Sagin S.V., Kuropyatnyk O.A. Using exhaust gas bypass for achieving the environmental performance of marine diesel engines // *Austrian Journal of Technical and Natural Sciences. Scientific journal*. – 2021. – № 7-8 – P. 36-43. https://doi.org/10.29013/AJT-21-7.8-36-43.
22. Sagin S.V. Rheology of motor oils in start-up and reverse modes of marine low-speed diesel engines // *Universum: Technical sciences*. – 2018. – № 3(48). – P. 67-71.
23. 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.
24. Sagin S. V., Stoliaryk T. O. Comparative assessment of marine diesel engine oils // *Austrian Journal of Technical and Natural Sciences. Scientific journal*. – 2021. – № 7-8 (July – August). – P. 29-35. https://doi.org/10.29013/AJT-21-7.8-29-35.
25. 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.

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. 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.
28. Daki O.A., Plita L.L., Trofymenko I.V., Fedunov V.M. Feature and requirements for navigational safety of navigation on inland waterways // *Water transport*. – 2022. – № 2(36). – P. 184-194. doi.org/10.33298/2226-8553.2022.2.36.15.
29. Rusnak D.Y., Sagin S.V. Ensuring environmental requirements during ultrasonic desulfurization of hydrocarbon fuels // *Ship power plants*. – 2020. – Vol. 40. – P. 49-54. DOI: 10.31653/smf340.2020.49-54.
30. 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.
31. 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.
32. Levchenko O. Synthesis of vessels' options in dangerous situations taking into account time and resource restrictions in vessel DSS. // *Water transport*. – 2021. – № 3(34). – P. 89-98. doi.org/10.33298/2226-8553/2021.3.34.10.
33. Sagin S.V., Matskevych D.V. Optical characteristics of boundary lubricating layers of oils used in circulation systems of marine diesel engines // *Ship power plants*. – 2011. – Vol. 26. – P. 116-125.
34. Sagin S.V., Zablotsky Yu.V., Perunov R.V. Technology of use and test results of fuel additives for marine diesel engines // *Problems of technical*. – 2012. – Vol. 3. – P. 84-103.
35. Sagin S.V., Zablotskyi Y.V. Determination of tribological characteristics of surfaces by the degree of ordering of wall layers of hydrocarbon liquids // *Problems of technical*. – 2011. – Vol. 3. – P. 78-88.
36. Sagin S.V., Popovskii Y.M., Grebenuk M.N. The influence of orientation ordering in boundary lubricant layers on the tribological characteristics of friction units // *Ship power plants*. – 1998. – Vol. 1. – P. 102-104.
37. Zverkov D.O., Sagin S.V. Reduction of mechanical losses in marine diesel engines // *Ship power plants*. – 2020. – № 41. – P. 20-25. DOI: 10.31653/smf341.2020.20-25.
38. Sagin S.V. Decrease in mechanical losses in high-pressure fuel equipment of marine diesel engines // *Materials of the International Conference "Scientific research of the SCO countries: synergy and integration"* – 2019. – P. 139-145. DOI: 10.34660/INF.2019.15.36258.
39. Levinskyi M. Automatic diagnostic of marine diesel generator lubricating oil condition // *Automation of ship technical facilities*. – 2023. – № 28. – P. 106-120. DOI: 10.31653/1819-3293-2023-1-28-106-120
40. Gorb S., Levinskyi M., Budurov M. Sensitivity optimisation of a main marine diesel engine electronic speed governor // *Scientific Horizons*. – 2021. – Vol. 24(11). – P. 9-19. DOI: 10.48077/scihor.24(11).2021.9-19.
41. Sagin S.V. Determination of the range of lubricant viscosity stratification in tribological systems of marine diesel engines // *Herald of the Odessa National Maritime University*. – 2019. – № 1(58). – P. 89-100.
42. 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.
43. Petrychenko O.O., Levinskyi M.N., Prytula D.A., Vynohradova A.S. Fuel options for the future: a comparative overview of properties and prospects // *Transport Systems and Technologies*. – 2023. – №41. – P.96-106. DOI: https://doi.org/10.32703/2617-9059-2023-41-8.
44. 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.
45. 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.
46. Sagin S.S., Sagin S.V. Ensuring the safe maneuvering of large-tonnage vessels in confined port waters // *Water transport*. – 2024. – № 3(41). – С. 208-220. doi.org/10.33298/2226-8553.2024.3.41.21.
47. 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.
48. 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.
49. 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.
50. Sagin S.V., Zablotsky Yu.V. The influence of anisotropic fluids on the operation of friction units of marine diesel engines // *Problems of technical*. – 2012. – Vol. 4. – P. 68-81.

51. 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.
52. 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. – № 2(38). – C. 187-198. doi.org/10.33298/2226-8553/2023.2.38.20.
53. Kurdiuk S., Drenliuk V., Melnyk O., Onishchenko O., Fomin O., Pištěk V., & Kučera P. Development of a High-Reliability Hybrid Data Transmission System for Unmanned Surface Vehicles Under Interference Conditions // Drones. – 2025. – № 9 (3). – P. 174. https://doi.org/10.3390/drones9030174.
54. 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. https://doi.org/10.20858/sjsutst.2025.127.10.
55. Sagin S., Kuropyatnyk O., Sagin A., Tkachenko I., Fomin O., Pištěk V., Kučera P. Ensuring the Environmental Friendliness of Drillships during Their Operation in Special Ecological Regions of Northern Europe // Journal of Marine Science and Engineering. – 2022. – Vol. 10(9). – P. 1331. https://doi.org/10.3390/jmse10091331.

Sagin S.V., Kuropyatnyk O.A.

DETERMINATION OF OPERATIONAL CHARACTERISTICS OF HYBRID SCRUBBER SYSTEMS FOR CLEANING EXHAUST GASES FROM SULFUR IMPURITIES FROM MARINE DIESEL ENGINES

The results of research on determining the operational characteristics of hybrid scrubber systems for cleaning exhaust gases of marine diesel engines from sulfur impurities are presented. It is noted that the combustion of fuel in the cylinder of a marine diesel engine is accompanied not only by the release of heat and its transformation into torque, but also by the formation and emission into the atmosphere of exhaust gases. One of the most harmful components of marine diesel engine exhaust gases is sulfur oxides, which are formed during the combustion of fuel due to the presence of sulfur in it (in pure form or in combinations with other elements and substances). According to Annex VI MARPOL, the sulfur content in marine fuel should not exceed 0.1 % during the operation of vessels in special environmental areas – Sulphur Emission Control Areas (SECAs) and be no more than 0.5 % during the operation of vessels outside these areas. In the case when the exhaust gases of marine diesel engines are additionally cleaned in special devices (the most common of which are scrubbers), the use of fuel with a sulfur content of up to 3.5 % is allowed. The studies were performed on a Bulk Carrier class vessel with a deadweight of 81,780 tons. The ship's power plant included the main STX-MAN B&W 6S60ME-C engine and three auxiliary Yanmar 6EY18ALW2 engines. The exhaust gases of all diesel engines (main and auxiliary) were directed to a common scrubber, in which the gases were cleaned of sulfur impurities. The scrubber system was operated in an open or hybrid way. In the first case, exhaust gas cleaning was carried out using only seawater. In the second, a solution of caustic soda NaOH was added to the seawater. It was established that the use of a hybrid circuit increases the efficiency of the scrubber system for cleaning exhaust gases. This is reflected in the improvement of the environmental performance of marine diesel engines – a reduction in carbon dioxide CO₂, sulfur dioxide SO₂, as well as their SO₂/CO₂ ratio. The SO₂/CO₂ ratio is the indicator regulated by the requirements of Annex VI MARPOL in the case of using exhaust gas purification systems from sulfur oxides. In addition, this ratio is monitored during the verification of the environmental friendliness of the ship's power plant. The hybrid circuit has the most effective effect on sulfur-containing fuel components. This is reflected in a significant reduction in sulfur oxide emissions, which during the operation of the ship inside SECAs reaches 15.41–20.01 %; during the operation of the ship outside SECAs reaches 8.72–13.12 %.

Keywords: carbon monoxide emissions, environmental indicators, exhaust gas cleaning system, exhaust gases, marine diesel, marine fuel, maritime transport, scrubber, sulfur oxide emissions, sulfur oxide emissions

Стаття прийнята 10.10.2025

© Носовський А.А., Євтушенко М.Ю.

ВИМОГИ ДО УПРАВЛІННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМИ ПРОЦЕСАМИ ПОРТОВОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ

Метою статті є формування вимог до управління технологічними процесами портової інфраструктури. Порти викидають великі об'єми парникових газів та використовують значну кількість енергії для операційної діяльності. Через свої унікальні характеристики проблеми скорочення викидів парникових газів та запобігання глобальному потеплінню не є унікальними для якогось конкретного порту. Крім того, не існує світових стандартів щодо підвищення ефективності портів. Однак розробка вимог до управління технологічними процесами портової інфраструктури вимагає додаткових досліджень. В першу чергу, це стосується врахування особливостей предметної області, а не загальновідомих підходів щодо управління технологічними процесами портової інфраструктури в узагальненому сенсі. Представлений підхід підсумовує основні вимоги, що висувуються до управління технологічними процесами портової інфраструктури, а саме: методи енергозбереження, сучасна IT-інфраструктура та використання новітніх технологій в різних ситуаціях, що враховуватимуть попередній досвід використання вказаних складових. Розкриті новітні розробки в галузі технологій, включаючи цифровізацію, морські енергетичні системи, електрифікацію та застосування систем накопичення енергії. Обґрунтовано, що вказані технологічні основи трансформації портової інфраструктури не тільки доцільні, але й надають економічну вигоду. Але автономне застосування технологій, наприклад, відновлюваних джерел енергії, систем накопичення енергії та електрифікованого портового обладнання, має обмежений ефект. Але невідповідність, що існує між теоретичним потенціалом інтегрованої трансформації портів та реальністю фрагментованих, технологічно специфічних впроваджень розглянутих окремих рішень в операційній діяльності портів, вивчатимуться як комплексне, одночасне розгортання в чотирьох технологічних сферах. Технологічна інтеграція електрифікації, Інтернету речей, 5G та інтеграції відновлюваної енергії свідчить, що поєднання даних технологій дає мультиплікативні, а не адитивні переваги і за рахунок інтелектуальної координації між вказаними технологіями дозволяє оптимізації управління технологічними процесами портової інфраструктури.

Ключові слова: інфраструктура, інформаційні технології, енергоефективність, екологічна ефективність, морський транспорт, операційна діяльність, порт, управління, безпека судноплавства, стиснені води, прийняття рішень, морська справа, управління судном, безпека, безпека на морі, навігація, навігаційна безпека

Постановка проблеми. Морський транспорт має ключову роль у світовій системі вантажних перевезень. Він є основою міжнародної торгівлі, забезпечуючи переміщення товарів на значні відстані з відносно низькою вартістю. Понад 80% світових товарів перевозяться морем, морські перевезення є центром міжнародної торгівлі. Як наслідок, з 2018 року споживання енергії морським судноплавством, включаючи портову діяльність, зросло на 10-15% [1].

У цьому контексті зростання портіві термінали як складова портової інфраструктури є критичними вузлами, в яких сходяться морські та наземні компоненти ланцюга поставок, створюючи складний інтермодальний інтерфейс. Технологічні процеси в межах цих вузлів безпосередньо впливають на ефективність, надійність та стійкість усієї транспортної мережі.

Перевантаження, затримки та неефективність технологічних процесів у відповідних транспортних вузлах можуть мати каскадний вплив на весь ланцюг поставок, що призводить до збільшення витрат, зниження якості послуг та додаткового екологічного навантаження на середовище

поблизу порту [2, 3]. Зокрема, на портових терміналах час обороту суден (тобто час, який судно проводить у порту для вантажно-розвантажувальних операцій) став ключовим показником ефективності терміналів. Тривалий час обороту не лише обмежує пропускну здатність порту, але й впливає на графіки судноплавства, знижує продуктивність флоту та сприяє збільшенню викиду відпрацьованих газів як від суден, так і від обладнання порту.

Таким чином, удосконалення роботи портової інфраструктури є актуальним науковим завданням, що веде до підвищення економічності та екологічності морських перевезень та удосконалення ланцюгів поставок.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У спеціалізованій літературі для опису еволюції портів та портової інфраструктури використовується п'ять основних етапів [4]. Умовне їх розділення наведено на рис. 1.

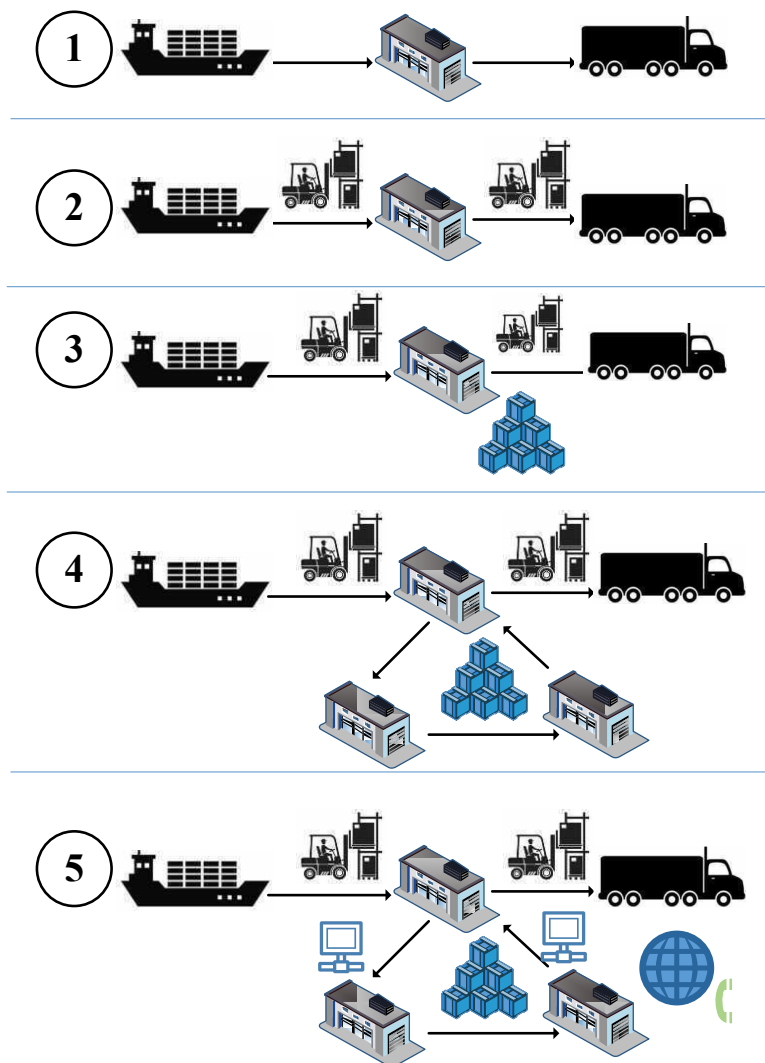


Рисунок 1 – Етапи розвитку портів в частині портової інфраструктури

Згідно з першим етапом, порти є лише вузловими об'єктами, що з'єднують наземні та морські перевезення та надають фундаментальні послуги.

На другому етапі з метою зменшення залежності від фізичної праці, порти почали використовувати просту інфраструктуру та обладнання.

На третьому етапі порти стали центрами обробки вантажів, включаючи розподільні центри, склади та упаковку.

На четвертому етапі з'явилися порти, які функціонують під єдиним управлінням, незважаючи на фізичну відмінність.

Сучасні порти, орієнтовані на клієнтів, представлені п'ятою та поточною фазою. Завдяки таким досягненням, як Інтернет речей (IoT), радіочастотна ідентифікація (RFID), хмарні обчислення, робототехніка, поточна портова інфраструктура є надзвичайно технологічно складною.

У наукових джерелах [5, 6, 7] можна зустріти дослідження енергоефективності та екологічності портів, включаючи розумну електрифікацію, енергоефективність, сталий розвиток та управління енергією в морських портах. Однак, деякі ключові елементи не розглядаються паралельно, включаючи енергетичні та екологічні проблеми, технологічні підходи, операційні стратегії у взаємозв'язку до інфраструктури сучасних портів та впровадження інноваційних технологій.

Крім того, на початку XXI століття було розроблено ряд стратегій для підвищення ефективності портової інфраструктури:

- 1) оптимізації часу обороту суден [8];
- 2) розподілу причалів за допомогою алгоритмів штучного інтелекту [9];
- 3) підвищення ефективності управління складськими майданчиками та агрегації діяльності в різних часових та просторових масштабах [10].

Незважаючи на ці досягнення, існує необхідність побудови інтегрованих моделей, здатних цілісно охопити цілі термінальні системи, особливо в умовах невизначеності для прийняття рішення щодо їх ефективного впровадження.

Метою статті є формування вимог до управління технологічними процесами портової інфраструктури.

Викладення основного матеріалу дослідження.

Проведений аналіз літературних джерел та умов функціонування портів дозволив виокремити ряд напрямків удосконалення технологічних процесів, які вимагають розробки відповідних вимог.

Слід зауважити, що в межах даного дослідження необхідна інтеграція п'яти складових (рис. 2)

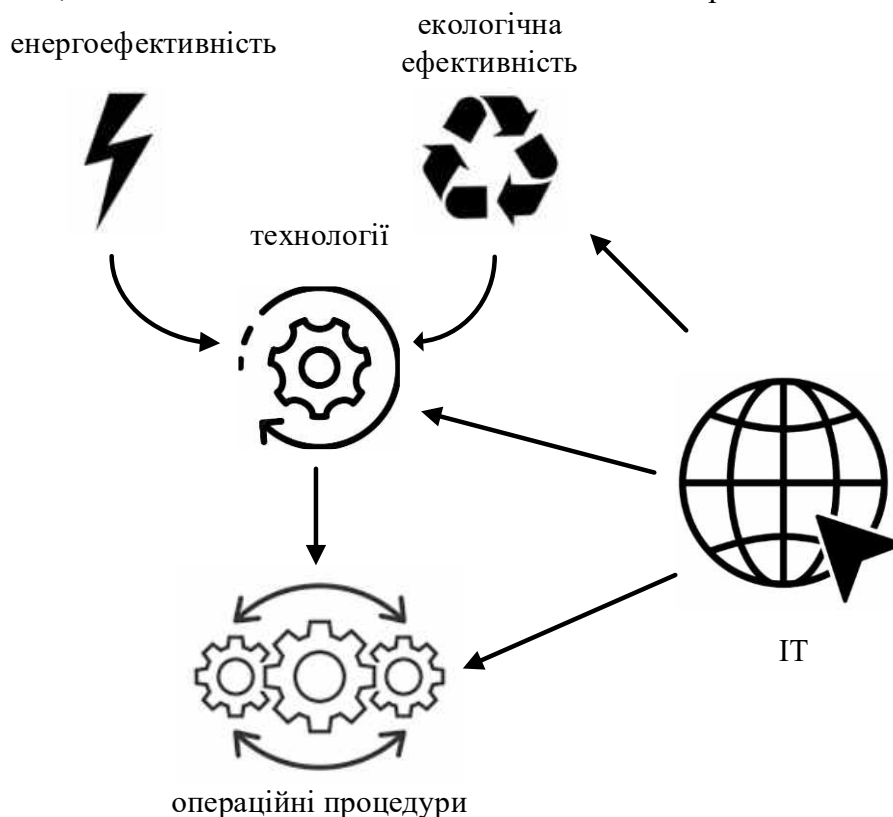


Рисунок 1 – Інтеграція п'яти складових у вимогах до портової інфраструктури

Енергоефективність.

Портова інфраструктура значною мірою залежить від джерел енергії. Основними джерелами енергії є електроенергія та дизельне паливо. Необхідно ефективно керувати своїми енергетичними потребами. Електрифікація портової інфраструктури призводить до зростання рівня автоматизації, підвищення енергоефективності та зменшення викидів парникових газів [11]. З іншого боку, електрифікація портової інфраструктури вимагає збільшення споживання енергії для компенсації енергетичного розриву, що створюється двигунами, які працюють на дизельному паливі. Більший попит на електроенергію може бути не задоволений локальними мережами та вимагає модернізації електричних підстанцій. Споживання потребує ефективного управління енергією та гнучкої енергетичної інфраструктури.

Складові енергоефективності портової інфраструктури представимо у вигляді кортежу:

$$EE = \{NE, NC, Cn, A\} \quad (1)$$

де NE — надійність енергопостачання; NC — стабільність та якість енергомережі; Cn — контроль втрат енергії; A — системи управління енергозбереженням.

Шляхами досягнення енергоефективності (1) є впровадження відновлювальних джерел енергії, інтеграція нових комунікаційних технологій застосування децентралізованих інтегрованих мереж.

Екологічна ефективність.

Важливі екологічні проблеми, з якими мають вирішувати порти, включають сміття, забруднення повітря, шумове забруднення, перевантаження суден та викиди відпрацьованих газів [12]. Морський сектор генерує 2,2%, 15% та 6% виробництва CO_2 , NO_x та SO_x відповідно у світі [13]. Впровадження екологічних заходів та управління портовою діяльністю мають вирішальне значення для вирішення проблеми глобальної зміни клімату та підвищення сприйняття «зеленості» портів. Постійний шум, який виробляється допоміжними двигунами, що працюють на дизельному паливі, вважається шкідливим для здоров'я людей. Вважається, що основним джерелом шуму в портах є допоміжні двигуни, які використовуються для забезпечення енергією пришвартованих суден. Для зменшення шуму можна запровадити адаптивні заходи, зокрема заборонивши суднам використовувати допоміжні двигуни для вироблення енергії під час швартування. Затори на судноплавстві й перевитрата енергії є проблемою, вирішення якої лежить у площині розроблення нових операційних процедур роботи портової інфраструктури.

Операційні процедури портової інфраструктури.

Три основні сектори контейнерних портів – зона складування, причал та берегова зона – є предметом уваги цього дослідження стосовно енергоощадних операцій [14]. Оптимізація енергії на стороні зони складування зосереджена на плануванні та штабелюванні контейнерних перевезень, зокрема на вирішенні проблем з обладнанням для обробки та розподілу місць на станції. У дослідженнях вивчалось споживання енергії та планування роботи портової інфраструктури за допомогою моделей, розроблених для стабілізації їх споживання енергії разом з контролем якості. Моделюючи як дискретні події, так і динамічну поведінку, гібридні методи автоматизації дозволяють знижувати швидкість, споживаючи менше енергії, та працювати протягом тривалішого часу. Наприклад, для завантаження 90 контейнерів може знадобитися близько 65 кВт·год [15].

Двоциклові операції, в яких машини виконують як завантаження, так і розвантаження без переміщення вантажів без порожнього вантажу, забезпечують більшу економію енергії, ніж одноциклові підходи, згідно з енергоефективним плануванням. Додаткові дослідження балансують споживання енергії з робочим часом, враховуючи енергетичні проблеми при розгортанні кранів та управлінні причалами. Енергоефективність також підвищується завдяки використанню водних роботизованих апаратів для міжтермінальних вантажних перевезень. Оптимізатори кранів, оптимізатори дворів та планувальники вантажівок є прикладами передових програм, які використовуються в модернізованих портах для зменшення забруднення та споживання енергії, одночасно збільшуючи виробництво та зменшуючи втрати часу.

ІТ та автоматизація процесів.

Інтеграція цифрових інновацій у «розумні» порти має вирішальне значення для вирішення таких труднощів, як затори в порту та проблеми з орієнтацією, спричинені зростанням кількості морських суден, вантажівок та інших видів інфраструктури в морських портах. Цифрові рішення можуть бути використані для моніторингу та збору інформації з метою підвищення ефективності морських портів, як з екологічної, так і з операційної точки зору. Автономні автомобілі все частіше інтегруються в існуючі системи з використанням цифрових технологій. Це обладнання включає інтелектуальні автономні транспортні засоби та контролери якості. Бездротові датчики та обробка великих даних можуть мінімізувати викиди забруднюючих речовин, експлуатаційні витрати та збої системи, а також можуть покращити безпеку даних, ефективність складів та інтелектуальний контроль енергії. Крім того, цифрові технології, такі як Інтернет речей, можуть бути використані для моніторингу логістики та споживання палива в «розумних» портах. Транспортні компанії та портові споруди можуть використовувати цифровий інформаційний зв'язок для сприяння ефективній комунікації.

Висновки. Комплексний підхід має суттєвий прогрес у трансформації морської портової інфраструктури у кількох технологічних сферах. Так, автономні транспортні засоби на акумуляторних батареях демонструють кращу ефективність використання електроенергії. Впровадження автоматизації операційних процедур зменшує час на одну операцію на 15-20%, а витрату енергії до 10%. Ці досягнення є конкретним доказом того, що технологічні основи трансформації портової інфраструктури не тільки доцільні, але й дедалі більш економічно вигідні.

Доведені синергетичні можливості, що виникають внаслідок поєднання електрифікації, Інтернету речей, 5G та інтеграції відновлюваної енергії. Системи управління енергією на основі мереж за рахунок інтелектуальної координації між відновлюваними джерелами енергії, системами накопичення енергії та електрифікованим портовим обладнанням дозволяє оптимізацію, яку неможливо досягти за допомогою автономних технологій.

Існує невідповідність між теоретичним потенціалом інтегрованої трансформації портів та реальністю фрагментованих, технологічно специфічних впроваджень. Хоча електрифікація, Інтернет речей, 5G та відновлювані джерела енергії широко вивчаються як окремі рішення, розглянуті дослідження демонструють обмежені докази комплексного, одночасного розгортання в цих чотирьох технологічних сферах. Синергетичні переваги одночасного розгортання залишаються значною мірою теоретичними, з обмеженими емпіричними доказами, що демонструють, як ці технології взаємодіють в операційній діяльності.

ЛІТЕРАТУРА

1. UNTACD. Огляд морського транспорту 2024 [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://unctad.org/publication/review-maritime-transport-2024> (дата звернення: 27 листопада 2025 року).
2. Gu, Y.; Fu, X.; Liu, Z.; Xu, X.; Chen, A. Performance of transportation network under perturbations: Reliability, vulnerability, and resilience. *Transp. Res. Part E Logis. Transp. Rev.* 2020, 133, 101809.
3. Postorino, M.N.; Mantecchini, L.; Malandri, C.; Paganelli, F. A methodological framework to evaluate the impact of disruptions on airport turnaround operations: A case study. *Case Stud. Transp. Pol.* 2020, 8, 429–439.
4. Loukili, A.; Elhaq, S.L. A model integrating a smart approach to support the national port strategy for a horizon of 2030. In Proceedings of the 2018 International Colloquium on Logistics and Supply Chain Management (LOGISTIQUA), Tangier, Morocco, 26–27 April 2018; IEEE: New York, NY, USA, 2018; pp. 81–86.
5. Psaraftis, H.N.; Kontovas, C.A. Speed models for energy-efficient maritime transportation: A taxonomy and survey. *Transp. Res. Part C Emerg.* 2013, 26, 331–351.
6. Nunes, R.A.O.; Alvim-Ferraz, M.C.M.; Martins, F.G.; Sousa, S.I.V. Assessment of shipping emissions on four ports of Portugal. *Environ. Pollut.* 2017, 231, 1370–1379.
7. Lu, Y.; Fang, S.; Chen, G.; Niu, T.; Liao, R. Cyber-physical integration for future green seaports: Challenges, state of the art and future prospects. *IEEE Trans. Ind. Cyber-Phys. Syst.* 2023, 1, 21–43.
8. Alamoush, A.S.; Ballini, F.; Ölçer, A.I. Ports' technical and operational measures to reduce greenhouse gas emission and improve energy efficiency: A review. *Mar. Pollut. Bull.* 2020, 160, 111508.
9. Loukili, A.; Elhaq, S.L. A model integrating a smart approach to support the national port strategy for a horizon of 2030. In Proceedings of the 2018 International Colloquium on Logistics and Supply Chain Management (LOGISTIQUA), Tangier, Morocco, 26–27 April 2018; IEEE: New York, NY, USA, 2018; pp. 81–86.

10. Belmoukari, B.; Audy, J.F.; Forget, P. Smart port: A systematic literature review. *Eur. Transp. Res. Rev.* 2023, *15*, 4.
11. Styhre, L.; Winnes, H.; Black, J.; Lee, J.; Le-Griffin, H. Greenhouse gas emissions from ships in ports—Case studies in four continents. *Transp. Res. Part D Transp. Environ.* 2017, *54*, 212–224.
12. Alamoush, A.S.; Olcer, A.I.; Ballini, F. Ports' role in shipping decarbonization: A common port incentive scheme for shipping greenhouse gas emission reduction. *Clean. Logist. Supply Chain* 2022, *3*, 100021.
13. Issa, M.; Ilinca, A.; Ibrahim, H.; Rizk, P. Maritime autonomous surface ships: Problems and challenges facing the regulatory process. *Sustainability* 2022, *14*, 15630.
14. Lee, D.H.; Cao, Z.; Meng, Q. Scheduling of two-transtainer systems for loading outbound containers in port container terminals with simulated annealing algorithm. *Int. J. Prod. Econ.* 2007, *107*, 115–124.
15. He, J.; Huang, Y.; Yan, W. Yard crane scheduling in a container terminal for the trade-off between efficiency and energy consumption. *Adv. Eng. Inform.* 2015, *29*, 59–75.

REFERENCES

1. UNTACD. Maritime Transport Review 2024 [Electronic resource]. Access mode: <https://unctad.org/publication/review-maritime-transport-2024> (date of access: November 27, 2025).
2. Gu, Y.; Fu, X.; Liu, Z.; Xu, X.; Chen, A. Performance of transportation network under perturbations: Reliability, vulnerability, and resilience. *Transp. Res. Part E Logis. Transp. Rev.* 2020, *133*, 101809.
3. Postorino, M.N.; Mantecchini, L.; Malandri, C.; Paganelli, F. A methodological framework to evaluate the impact of disruptions on airport turnaround operations: A case study. *Case Stud. Transp. Pol.* 2020, *8*, 429–439.
4. Loukili, A.; Elhaq, S.L. A model integrating a smart approach to support the national port strategy for a horizon of 2030. In Proceedings of the 2018 International Colloquium on Logistics and Supply Chain Management (LOGISTIQUA), Tangier, Morocco, 26–27 April 2018; IEEE: New York, NY, USA, 2018; pp. 81–86.
5. Psaraftis, H.N.; Kontovas, C.A. Speed models for energy-efficient maritime transportation: A taxonomy and survey. *Transp. Res. Part C Emerg.* 2013, *26*, 331–351.
6. Nunes, R.A.O.; Alvim-Ferraz, M.C.M.; Martins, F.G.; Sousa, S.I.V. Assessment of shipping emissions on four ports of Portugal. *Environ. Pollut.* 2017, *231*, 1370–1379.
7. Lu, Y.; Fang, S.; Chen, G.; Niu, T.; Liao, R. Cyber-physical integration for future green seaports: Challenges, state of the art and future prospects. *IEEE Trans. Ind. Cyber-Phys. Syst.* 2023, *1*, 21–43.
8. Alamoush, A.S.; Ballini, F.; Ölçer, A.I. Ports' technical and operational measures to reduce greenhouse gas emission and improve energy efficiency: A review. *Mar. Pollut. Bull.* 2020, *160*, 111508.
9. Loukili, A.; Elhaq, S.L. A model integrating a smart approach to support the national port strategy for a horizon of 2030. In Proceedings of the 2018 International Colloquium on Logistics and Supply Chain Management (LOGISTIQUA), Tangier, Morocco, 26–27 April 2018; IEEE: New York, NY, USA, 2018; pp. 81–86.
10. Belmoukari, B.; Audy, J.F.; Forget, P. Smart port: A systematic literature review. *Eur. Transp. Res. Rev.* 2023, *15*, 4.
11. Styhre, L.; Winnes, H.; Black, J.; Lee, J.; Le-Griffin, H. Greenhouse gas emissions from ships in ports—Case studies in four continents. *Transp. Res. Part D Transp. Environ.* 2017, *54*, 212–224.
12. Alamoush, A.S.; Olcer, A.I.; Ballini, F. Ports' role in shipping decarbonization: A common port incentive scheme for shipping greenhouse gas emission reduction. *Clean. Logist. Supply Chain* 2022, *3*, 100021.
13. Issa, M.; Ilinca, A.; Ibrahim, H.; Rizk, P. Maritime autonomous surface ships: Problems and challenges facing the regulatory process. *Sustainability* 2022, *14*, 15630.
14. Lee, D.H.; Cao, Z.; Meng, Q. Scheduling of two-transtainer systems for loading outbound containers in port container terminals with simulated annealing algorithm. *Int. J. Prod. Econ.* 2007, *107*, 115–124.
15. He, J.; Huang, Y.; Yan, W. Yard crane scheduling in a container terminal for the trade-off between efficiency and energy consumption. *Adv. Eng. Inform.* 2015, *29*, 59–75.

Nosovsky AA., Yevtushenko M. Yu.

REQUIREMENTS FOR THE MANAGEMENT OF TECHNOLOGICAL PROCESSES OF PORT INFRASTRUCTURE

The purpose of the article is to formulate requirements for the management of technological processes of port infrastructure. Ports emit large volumes of greenhouse gases and use a significant amount of energy for operational activities. Due to their unique characteristics, the problems of reducing greenhouse gas emissions and preventing global warming are not unique to any particular port. In addition, there are no global standards for increasing the efficiency of ports. However, the development of requirements for the management of technological processes of port infrastructure requires additional research. First of all, this concerns taking into account the specifics of the subject area, and not well-known approaches to the management of technological processes of port infrastructure in a generalized sense. The presented approach summarizes the main requirements for the management of technological processes of port infrastructure, namely: energy saving methods, modern IT infrastructure and the use of new technologies in various situations, which will take into account the previous experience of using the specified components. The latest developments in the field of technologies are disclosed, including digitalization, marine energy systems, electrification and the use of energy storage systems. It is substantiated that the specified technological foundations of the transformation of port infrastructure are not only appropriate, but also provide economic benefits. However, the autonomous application of technologies, for example, renewable energy sources, energy storage systems and electrified port equipment, has a limited effect. However, the discrepancy that exists between the theoretical potential of integrated port transformation and the reality of fragmented, technologically specific implementations of the considered individual solutions in port operations will be studied as a complex, simultaneous deployment in four technological areas. The technological integration of electrification, the Internet of Things, 5G and the integration of renewable energy shows that the combination of these technologies provides multiplicative, rather than additive, benefits and, through intelligent coordination between these technologies, allows for the optimization of the management of technological processes of port infrastructure.

Keywords: infrastructure, information technologies, energy efficiency, environmental efficiency, maritime transport, operational activity, port, management, safety of navigation, restricted waters, decision making, maritime affairs, ship handling, safety, maritime safety, navigation, navigational safety

Стаття прийнята 20.10.2025

© Давидов В.С., Ляшко О.В., Любарець І.О.

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ТА НАДІЙНОСТІ НАВІГАЦІЙНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ БЕЗПЕКИ ПЛАВАННЯ ВЕЛИКОГАБАРИТНИХ МОРСЬКИХ СУДЕН В ПРИБЕРЕЖНІЙ ЗОНІ ЗА ДОПОМОГОЮ ГІДРОАКУСТИЧНИХ СИСТЕМ

У статті запропоновано абсолютно новий, раніше не застосовуваний на судах торгового та пасажирського флоту метод визначення місцезнаходження судна в прибережній зоні плавання із використанням підводних навігаційних гідроакустичних систем. Аналіз стану систем забезпечення безпеки судноплавства великогабаритних і великотоннажних суден у прибережних зонах плавання з підводними малоформатними навігаційними небезпеками у вигляді рифів або крутих підняттях морського дна свідчить про те, що вони не повною мірою забезпечують безпеку мореплавства. Практика контролю за положенням суден відносно підводних навігаційних небезпек, яка склалася з 2003 року після введення в експлуатацію ГНСС GPS і ГЛОНАСС, здійснюється лише шляхом візуального представлення їх на електронній карті відносно високоточного положення судна. Це не дозволяє в автоматичному режимі контролювати відстань до підводних навігаційних небезпек і вчасно отримувати попереджувальні сигнали. Основним фактором безпеки під час плавання суден у прибережній зоні з наявністю підводних рифів або інших різких підйомів рельєфу дна є точне визначення відстані та напрямку до них за допомогою високоточних інструментальних методів.

Ключові слова: судноводіння, безпека на морі, навігація безпека судноплавства, навігація та управління, складні умови, великогабаритні судна, підвищення ефективності судноводіння, підводна навігаційна система, маяк-відповідач, гідроакустична станція, морський транспорт.

Постановка проблеми. Аналіз навігаційної аварійності загалом свідчить, що друге місце за кількістю аварійних морських подій займають посадки суден на мілину, які, як правило, є наслідком значних похибок у визначенні місцезнаходження судна на траєкторії руху, особливо на циркуляції, а також нездатності учасників судноводіння забезпечити навігаційну безпеку в складних гідрографічних і гідрометеорологічних умовах. Райони прибережного плавання, обмежені умови гаваней і портів, що характеризуються відносно малими глибинами та високою інтенсивністю судноплавства, є місцем переважної кількості тяжких аварій. Найбільшу загрозу вони становлять для великотоннажних вантажних і пасажирських суден. Згідно з дослідженнями Європейського агентства з безпеки на морі (2021 р.), аварійність цих типів суден за останні сім років не зменшилася і залишається практично на тому ж рівні [1].

Впровадження на морських судах електронних картографічних навігаційних систем (ЕКНІС) і приймачів глобальних навігаційних супутникових систем (ГНСС), що значно автоматизували високоточний контроль місцезнаходження суден у режимі реального часу, не призвело до істотного зниження аварійності, зокрема пов'язаної з посадками на мілину. Використання функцій «завдання безпеки», «виявлення поточної небезпечної ізобати та небезпечних об'єктів», а також «автоматичного захоплення і супроводу цілей із накладенням зображення радіолокаційної станції (РЛС) на електронну карту (ЕК)» у сучасних ЕКНІС, що застосовуються при проведенні суден у прибережній зоні, каналах, акваторіях портів і гаваней, не вирішує в повній мірі завдання безпечного плавання великогабаритних суден у складних умовах.

Єдиним технічним засобом освітлення підводної обстановки на судах досі залишаються навігаційні ехолоти. Сучасні ехолоти дозволяють спостерігати за динамікою змін глибин безпосередньо під кілем судна, фіксувати перетинання характерних обмежувальних ізобат, автоматично подавати сигнали небезпеки при виході судна на критичні глибини. Проте вони не дозволяють своєчасно виявляти наближення судна до підводних рифів чи інших ізольованих підводних об'єктів, які не мають значного

підводного підйому навколо себе. Це зумовлено особливостями діаграми спрямованості гідроакустичних сигналів, що випромінюються антеною ехолота, яка практично перпендикулярна морському дну за рівного кіля судна. Відсутність на судах технічних систем, що дозволяють вимірювати навігаційні параметри у вигляді пеленгів і відстаней до підводних небезпек, призводить до посадок суден на рифи та мілини, а в окремих випадках — до їх загибелі.

Яскравими прикладами загибелі суден через зіткнення з ізольованими рифами, положення яких було позначене на електронних і паперових морських картах, є катастрофи пасажирського лайнера «Costa Concordia» 13 січня 2012 року біля берегів Італії та контейнеровоза «Рена» 5 жовтня 2011 року, що сів на риф Астролябія в прибережній зоні Нової Зеландії, спричинивши найбільшу екологічну катастрофу в історії країни [2,3]. Ці два судна, а також десятки тисяч інших, що нині експлуатуються, були оснащені сучасними навігаційними системами (ЕКНІС, ЗАРП, GPS (DGPS), AIS та ін..) та мали визначене місцеположення з точністю диференціального режиму DGPS ± 5 м при $P=63\%$. Проте це не запобігло зіткненню з рифами та загибелі суден.



Рисунок 1 - Наслідки зіткнення з підводними рифами теплоходів «Коста Конкордія» і «Рена»

Мета роботи. Метою роботи є привернення уваги морської спільноти, дослідницьких організацій та суднобудівників до необхідності забезпечення безпеки мореплавства в прибережній зоні шляхом використання нових методів визначення місцеположення суден, заснованих на застосуванні підводних навігаційних систем (ПНС), які не залежать від складних гідрометеорологічних умов, що ускладнюють або повністю виключають візуальну та радіолокаційну видимість берегових орієнтирів, а також від факторів, що обмежують використання глобальних навігаційних супутникових систем (ГНСС) через потужні магнітні бурі або створення штучних перешкод. Окрім цього, ціллю роботи ще є обґрунтування принципу роботи ПНС для контролю місцеположення судна на заданій траєкторії руху шляхом спільного використання суднової гідроакустичної станції (ГАС) та підводних маяків-відповідачів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У зв'язку з недостатньою дослідженістю цього питання щодо конкретного використання підводних навігаційних систем на основі підводних маяків-відповідачів і суднових гідроакустичних станцій у судноводінні, воно практично не знайшло свого відображення в доступній літературі. Висловлені авторами міркування з цієї теми є новаторськими для суден торговельного флоту й здебільшого ґрунтуються на особистому практичному досвіді. Найбільш широко в літературі висвітлено гідроакустичні методи позиціювання підводних телекерованих апаратів за допомогою підводних маяків-відповідачів під час розробки нафтових і газових родовищ на континентальному шельфі, експлуатації підводних трубопроводів і прокладання підводних кабелів [4,5,6].

Виклад основного матеріалу. Повний перехід на автоматичне обсерваційне обчислення координат місцезнаходження судна на електронній карті за даними ГНСС призвів до поступового виведення з експлуатації радіонавігаційних систем усіх типів, зокрема й систем ближнього радіусу дії, таких як DECCA, які забезпечували безпеку мореплавства в прибережній зоні та на підходах до неї. Відповідно до

вимог ІМО, викладених у міжнародній конвенції SOLAS-74, для надійного забезпечення безпеки мореплавства місцезнаходження судна необхідно визначати щонайменше двома різнорідними методами. Однак усі наявні візуальні та радіолокаційні методи визначення місця судна не завжди дозволяють виконати цю вимогу. Визначення місцезнаходження судна за видимими береговими та небесними орієнтирами залежить від погодних умов, стану моря, опадів, дальності видимості маяків і навігаційних знаків. Радіолокаційні методи визначення місця судна також залежать від рівня хвилювання моря, наявності опадів, піщаних бур, а також здатності берегової лінії відбивати радіохвилі. Усі ці фактори зрештою знижують точність вимірювання навігаційних параметрів і відповідно, точність визначення координат, що може не відповідати умовам плавання. Більш ніж 20-річний досвід використання ГНСС в судноводінні виявив залежність можливості визначення місцезнаходження суден за допомогою навігаційних космічних апаратів від стану іоносфери під час сильних магнітних бур, а також чутливість до радіоелектронних перешкод або повного придушення сигналу внаслідок застосування засобів радіоелектронної боротьби у період збройних конфліктів і війн.

Аналіз стану та довгострокові прогнози міжнародних, зокрема наукових та гідрометеорологічних організацій свідчать про подальше погіршення погодних умов, зростання сонячної активності та їхній негативний вплив на експлуатацію морського та річкового транспорту загалом [7,8]. ООН у матеріалах Конференції з торгівлі та розвитку «Огляд морського транспорту 2022» (UNCTAD/RMT/2022) закликає «посилити заходи щодо нарощування потенціалу та збільшити прийнятне фінансування інфраструктури з метою забезпечення адаптації морських портів та інших ключових об'єктів транспортної інфраструктури в країнах, що розвиваються, до змін клімату та підвищення їхньої надійності» [7]. У доповіді Європейської економічної комісії ООН «Наслідки зміни клімату для міжнародних транспортних мереж та їхня адаптація» (Нью-Йорк і Женева, 2013 р.) наголошується на необхідності підвищення стійкості транспортних систем до впливу кліматичних факторів: «дослідження, представлене в доповіді, вказує на те, що випереджувальний підхід до адаптації транспорту до зміни клімату передбачає свідоме рішення виділяти кошти на розробку та впровадження відповідних адаптаційних планів, стратегій і заходів. Це буде складно не лише через витрати, пов'язані з цими заходами, а й тому, що такі заходи не є універсальними й складно відтворюваними за будь-яких умов» [8]. Ці серйозні попередження ООН щодо клімату потребують нових підходів до навігаційного забезпечення безпеки мореплавства в складних кліматичних умовах, а також створення принципово нових методів визначення місця судна.

Початок ХХІ століття ознаменувався активним будівництвом великогабаритних суден, водотоннажністю у сотні тисяч тонн, довжиною до 400 м, шириною до 65 м та осадкою до 23 м, які мають інші, по своєму особливі, маневрові характеристики та параметри керованості, в порівнянні із суднами традиційних розмірів. Одночасно з цим зростає й висота надводного борту, що досягає десятків метрів, що призвело до значного збільшення парусності, особливо для контейнеровозів і пасажирських суперлайнерів. Основні характеристики найбільших суден наведено в табл. 1.

За сукупного впливу всіх вищезгаданих несприятливих для визначення місцезнаходження судна факторів, під час плавання в прибережній зоні, судно може опинитися в умовах коли уточнення його поточних координат і контроль за місцезнаходженням на розрахунковій траєкторії руху буде неможливим.

Таблиця 1. Порівняльна таблиця розмірів та маневрових характеристик різних типів великогабаритних суден

Характеристики суден	Контейнеровози типу «MSC Oscar»	Пасажирські судна типу «Oasis of the Seas»	Автомобілевози типу «Hoegh Target»	Балкери типу «Pacifik Vision»
Габарити : LxBxH (м)	395,4x59x73	360x47x72	199,9x36,5x80	362x65x30
Площа парусності, (кв.м)	22 000	22 400	13 833	8 000
Час/вибіг з ППХ на ПЗХ, (хв/м)	12,1 / 3400	5 / 1300	8,9 / 2800	17 / 4100
Час/вибіг з ППХ на стоп, (хв/м)	24,5 / 9260	22,4 / 8400	20,7 / 7600	29 / 10300
Осадка, (м)	16	9,3	10,3	23

Відповідно до вимог ІМО, викладених у міжнародній конвенції SOLAS-74 та інших керівних документах щодо планування рейсу судна, для надійного забезпечення безпеки мореплавства місцезнаходження судна необхідно визначати щонайменше двома різнорідними методами. Однак стало очевидним, що ця вимога ІМО не завжди виконується. До моменту входження судна в радіолокаційну або візуальну зону видимості навігаційних орієнтирів фактично єдиним способом визначення місця залишається використання ГНСС. Це зумовлює нагальну необхідність технічної розробки та впровадження у практику судноводіння більш технологічних та економічно менш затратних засобів навігаційного забезпечення на базі підводних гідроакустичних систем з елементами штучного інтелекту. Передусім це необхідно для великогабаритних і великотоннажних суден з великою осадкою та парусністю, значними гальмівними характеристиками та параметрами маневрування. З метою усунення впливу складних гідрометеорологічних умов на ефективність та надійність навігації великогабаритних суден пропонується використання гідроакустичних методів, заснованих на поширенні гідроакустичних імпульсів у морському середовищі [6, 9]. Подібні методи широко застосовуються в підводній робототехніці [4, 5] та підводній навігації у військово-морських флотах окремих країн світу. Для підводного судноплавства вже створені та використовуються підводні навігаційні системи (ПНС), що складаються з глибоководних підводних гідроакустичних маяків-відповідачів (МВ), координати розміщення яких визначаються з високою точністю (до 1-3 метрів), та корабельної гідроакустичної станції (ГАС). Один із авторів статті має багаторічний досвід експлуатації такої системи. Пропонується використання подібного підходу в практиці судноводіння вантажного та пасажирського флоту з урахуванням особливостей їхньої експлуатації.

Принцип визначення місцезнаходження судна на траєкторії руху з використанням гідроакустичного методу вимірювання дистанцій і пеленгів полягає в наступному. На судні за допомогою суднової ПНС, що включає пульт управління та антену ГАС, формується кодований сигнал запиту, який через активний тракт суднового гідролокатора випромінюється в напрямку маяка-відповідача (МВ). За запитом кодованого сигналу з судна МВ переходить із режиму очікування в робочий і, після розпізнавання кодованого сигналу за принципом збігу кодів, формує та випромінює через певний часовий інтервал (τ_z) сигнал гідроакустичної відповіді. Повторно випромінений сигнал приймається пасивним трактом суднового гідролокатора. За часом проходження сигналу, з урахуванням фактичної швидкості звуку у воді, розраховується похилена відстань. Для переведення похилої відстані в горизонтальну відстань необхідно врахувати глибину встановлення МВ, осадку судна та глибину моря.

На основі похилої дальності та глибини встановлення визначається горизонтальна дальність до МВ (перша лінія положення) за формулами 1.1-1.3:

$$D_n = C_{zv} \cdot \Delta \tau \quad 1.1$$

$$\Delta \tau = 0,5(\tau_p + \tau_v) - \tau_z \quad 1.2$$

$$D_g = \sqrt{D_n^2 - H_{mv}^2} \quad 1.3$$

де, D_n – нахилена відстань;

C_{zv} – швидкість звуку в воді;

$\Delta \tau$ – час відповідний відстані від судна до МВ;

τ_p – час проходження сигналу запиту від судна до МВ;

τ_v – час проходження сигналу відповіді від МВ до судна;

τ_z – час затримки сигналу в трактах ПНС;

H_{mv} – глибина установки МВ;

D_g – горизонтальна відстань між судном та МВ.

Другою лінією положення є гідроакустичний пеленг (Пга) на МВ. За цими двома полярними координатами (Пга, Дг) практично в режимі реального часу здійснюється позиціонування судна на траєкторії руху. У найбільш небезпечних для плавання великогабаритних суден районах доцільним буде встановлення декількох МВ, що дозволить підвищити точність визначення місцеположення суден на запланованій траєкторії руху.

Спрощена структурна схема роботи підводної навігаційної системи (ПНС) показана на рис.2.

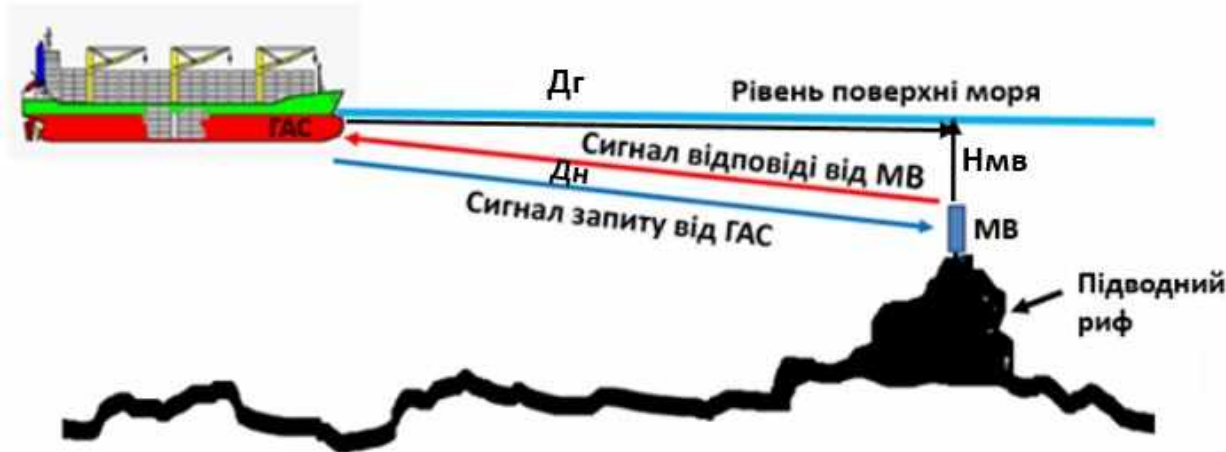


Рисунок 2. Спрощена структурна схема підводної навігаційної системи

Таким чином, можна буде не лише визначати поточне місцеположення судна за пеленгами і відстанями до МВ, але, що ще важливіше, контролювати відстань до навігаційних перешкод. Коли опція ПНС буде інтегрована в ЕКДІС, стане можливим візуальне спостереження за траєкторією судна відносно підводних навігаційних небезпек на електронній карті, що дозволить своєчасно ухвалювати рішення про безпечне відхилення від них. Протягом століть людство створює берегові маяки для впізнання берегової лінії під час заходу суден у прибережну зону та визначення положення судна за видимими орієнтирами, але з невідомих причин відмовляється від широкого використання сучасних автоматизованих ПНС зі штучним інтелектом для цих цілей.

Висновки. Розташування підводних МВ далеко від берега на кордоні заходу суден у прибережну зону плавання значно підвищило б безпеку судноплавства та збільшило б час для прийняття компетентних рішень щодо запобігання аварійним ситуаціям. Використання підводних МВ не залежить від гідрометеорологічних умов і параметрів видимості. Завдяки простій конструкції ПНС є більш надійною у порівнянні з ГНСС, менш чутливою до різного роду перешкод і набагато дешевшою в експлуатації. Розгортання мережі ПНС з встановленням підводних МВ на входах до каналів і фарватерів, а також на осях глибоководних маршрутів для суден із великою осадкою створить більш сприятливі умови для безпечного судноплавства. Це особливо важливо в складних гідрометеорологічних умовах або в ситуаціях, коли неможливо використовувати ГНСС.

ЛІТЕРАТУРА

1. European Maritime Safety Agency, Annual overview of marine casualties and incidents 2021, 2022, Praça Europa 4, Lisbon Portugal Ares(2022).- P.1-14.
2. Italian Marine Casualties Investigative Body, COSTA CONCORDIA, Marine casualty on January 13, 2012, Report on the safety technical investigation;
3. Transport Accident Investigation Commission, Marine inquiry 11-204, Container ship MV Rena grounding, on Astrolabe Reef, 5 October 2011.
4. World Offshore Oil & Gas Production and Spend Forecast 2009-2013 (Douglas-Westwood and Energyfiles). [Електронний ресурс] режим доступу до ресурсу: <https://www.hydro-international.com/content/news/global-offshore-spending-forecast-2004-2013?output=pdf>.
5. Голод О.С. Перспективы и концепции разработки автономных необитаемых аппаратов./ Голод О.С., Гончар А.И., Шлычек Л.И. Гідроакустичний журнал (Проблеми, методи та засоби досліджень Світового океану, 2007.- №4.-102с..

6. Остроухов А.А., Комляков В.А., Монахов А.І. та ін. Гідроакустичні системи з маяками-відповідачами. Серія: Загальнотехнічна. – 1991. – Випуск 34.
7. UNCTAD,. Review of Maritime Transport, UNCTAD/RMT/2022 and Corr.1.
8. United Nations economic commission for Europe, Climate Change Impacts and Adaptation for Transport Networks and Nodes, 2013, New York, Geneva
9. Давидов В.С., Демічев В.В., Мусорін О.О. Способ контролю местоположения ТПА на траектории движения с помощью судовой гидроакустической навигационной системы. Київ : ДП «УкрНДНЦ» Стандартизація, сертифікація, якість. Вип.№1(104), 2017, С.10-17.

REFERENCES

1. European Maritime Safety Agency, Annual overview of marine casualties and incidents 2021, 2022, Praça Europa 4, Lisbon Portugal Ares(2022).- P.1-14.
2. Italian Marine Casualties Investigative Body, COSTA CONCORDIA, Marine casualty on January 13, 2012, Report on the safety technical investigation;
3. Transport Accident Investigation Commission, Marine inquiry 11-204, Container ship MV Rena grounding, on Astrolabe Reef, 5 October 2011.
4. World Offshore Oil & Gas Production and Spend Forecast 2009-2013 (Douglas-Westwood and Energyfiles). [Electronic resource] access: <https://www.hydro-international.com/content/news/global-offshore-spending-forecast-2004-2013?output=pdf>.
5. Holod O.S. "Prospects and Concepts for the Development of Autonomous Unmanned Vehicles." / Holod O.S., Honchar A.I., Shlychek L.I. Hydroacoustic Journal (Problems, Methods, and Tools of World Ocean Research), 2007. - No. 4. - 102 pages.
6. Ostroukhov A.A., Komlyakov V.A., Monakhov A.I., et al. "Hydroacoustic Systems with Reply Beacons." Series: General Engineering. – 1991. – Issue 34.
7. UNCTAD,. Review of Maritime Transport, UNCTAD/RMT/2022 and Corr.1.
8. United Nations economic commission for Europe, Climate Change Impacts and Adaptation for Transport Networks and Nodes, 2013, New York, Geneva
9. Davydov V.S., Demichev V.V., Musorin O.O. "Method of Monitoring the Location of ROV on the Trajectory of Movement Using Shipborne Hydroacoustic Navigation System." Kyiv: SE "UkrNDNC" Standardization, Certification, Quality. Issue No.1(104), 2017, pp. 10-17.

Davydov V.S., Liashko O.V., Liubarets I.O.

Enhancing the efficiency and reliability of navigational support for the safety of navigation of large seagoing vessels in coastal waters using hydroacoustic systems

The article proposes a fundamentally new method, previously not applied on merchant and passenger vessels, for determining a vessel's position in coastal navigation areas using underwater navigational hydroacoustic systems. An analysis of the current state of safety assurance systems for the navigation of large-size and high-tonnage vessels in coastal waters containing small-scale underwater navigational hazards, such as reefs or steep seabed elevations, indicates that these systems do not fully ensure navigational safety. Since 2003, following the commissioning of GNSS GPS and GLONASS, the practice of monitoring vessel positions relative to underwater navigational hazards has been based solely on their visual representation on electronic charts with respect to the vessel's high-precision position. This approach does not allow for automatic monitoring of the distance to underwater navigational hazards or for the timely generation of warning signals. The primary safety factor for vessel navigation in coastal waters with the presence of underwater reefs or other abrupt seabed relief features is the accurate determination of the distance and bearing to such hazards using high-precision instrumental methods.

Keywords: *navigational safety, navigation and control, challenging conditions, large-size vessels, enhancement of ship handling efficiency, underwater navigation system, beacon-transponder, hydroacoustic station.*

Стаття прийнята 05.09.2025

© Тимошук О.М., Левченко О.В.

АНАЛІЗ ТА ОБҐРУНТУВАННЯ МЕТОДІВ ЗНИЖЕННЯ ВИКИДІВ ОКСИДІВ АЗОТУ В АТМОСФЕРУ СУДНОВИМИ ЕНЕРГЕТИЧНИМИ УСТАНОВКАМИ

У статті розглянуто проблему утворення та викидів оксидів азоту (NO_x), що виникають у процесі роботи суднових енергетичних установок. Показано, що NO_x є одним з найбільш небезпечних компонентів відпрацьованих газів, оскільки вони беруть участь у формуванні фотохімічного смогу, кислотних дощів та вторинних аерозолів, а також негативно впливають на здоров'я людини. Проаналізовано основні механізми утворення оксидів азоту у суднових дизельних двигунах, зокрема термічний механізм, що домінує за високих температур згоряння. Узагальнено міжнародні екологічні вимоги та розглянуто сучасні методи зниження викидів NO_x , включаючи оптимізацію процесу згоряння, рециркуляцію відпрацьованих газів та селективне каталітичне відновлення.

Ключові слова: екологічна безпека, екологічні показники, емісія оксидів азоту, морський транспорт, рециркуляція випускних газів, селективне каталітичне відновлювання, судновий дизель, суднові енергетичні установки

Вступ. Морський транспорт є важливою складовою світової транспортної системи, проте водночас він залишається одним з джерел забруднення атмосферного повітря. У процесі експлуатації суднових енергетичних установок у довкілля надходять значні обсяги відпрацьованих газів, серед яких оксиди азоту посідають одне з провідних місць за ступенем негативного впливу. Посилення міжнародних екологічних вимог обумовлює необхідність детального аналізу причин утворення NO_x та розроблення ефективних шляхів їх зменшення.

Постановка проблеми. Інтенсивний розвиток морського транспорту супроводжується зростанням обсягів викидів забруднювальних речовин в атмосферу, серед яких оксиди азоту (NO_x) займають одне з провідних місць за рівнем екологічної небезпеки. Основними джерелами викидів NO_x у судноплавстві є суднові дизельні двигуни, в яких оксиди азоту утворюються внаслідок високотемпературного згоряння палива та взаємодії молекулярного азоту повітря з киснем.

Оксиди азоту є хімічно активними сполуками, що беруть участь у формуванні фотохімічного смогу, кислотних опадів та тропосферного озону, а також сприяють утворенню вторинних твердих частинок. Наявність підвищених концентрацій NO_x у повітрі негативно впливає на стан навколишнього середовища та здоров'я людини, зокрема на органи дихання і серцево-судинну систему. Особливо гостро ця проблема проявляється в припортових зонах та районах інтенсивного судноплавства.

Посилення міжнародних екологічних вимог, зокрема впровадження норм Додатку VI Конвенції MARPOL 73/78 та стандартів Tier I, II, III, суттєво обмежує допустимі рівні викидів оксидів азоту судновими енергетичними установками. Водночас експлуатаційні та конструктивні особливості суднових дизельних двигунів ускладнюють забезпечення відповідності цим вимогам без впровадження спеціальних технічних і технологічних рішень.

Таким чином, виникає науково-технічна проблема забезпечення ефективного зниження викидів оксидів азоту в атмосферу за збереження експлуатаційної надійності, паливної економічності та екологічної безпеки суднових енергетичних установок. Це зумовлює необхідність комплексного аналізу механізмів утворення NO_x та обґрунтування сучасних методів їх зниження, що відповідають чинним і перспективним міжнародним екологічним вимогам.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблема екологічності суднових енергетичних установок широко висвітлюється в наукових працях вітчизняних і зарубіжних дослідників. Існуючі публікації охоплюють питання вдосконалення конструкції суднових двигунів з метою зниження шкідливих викидів, а також розроблення додаткових технічних елементів, що можуть бути інтегровані без суттєвих змін конструкції судна. Окрему увагу приділено застосуванню альтернативних видів палива та паливних домішок для підвищення екологічних показників суднових енергетичних установок. Результати досліджень двигунів внутрішнього згоряння інших типів також розглядаються як основа для адаптації до умов суднової експлуатації [1-2, 5-18].

Мета дослідження. Метою дослідження є аналіз механізмів утворення оксидів азоту (NOx) у суднових енергетичних установках та обґрунтування ефективних технічних і технологічних методів зниження їх викидів в атмосферу з урахуванням вимог Додатку VI Конвенції MARPOL 73/78, експлуатаційних особливостей суднових дизельних двигунів і забезпечення екологічної безпеки судноплавства.

Виклад основного матеріалу. На всіх етапах життєвого циклу суден – під час експлуатації, виготовлення, технічного обслуговування та ремонту – у навколишнє середовище надходять шкідливі викиди, що призводять до забруднення атмосферного повітря. Одним із найбільш екологічно небезпечних компонентів відпрацьованих газів суднових енергетичних установок є оксиди азоту (NOx), які утворюються в процесі роботи дизельних двигунів внутрішнього згоряння [1,2].

Оксиди азоту належать до пріоритетних забруднювачів атмосфери через їх високу хімічну активність та здатність брати участь у вторинних фотохімічних процесах. У процесі згоряння палива за високих температур молекулярний азот повітря (N₂) взаємодіє з киснем з утворенням оксиду азоту (NO). У подальшому оксид азоту окиснюється до діоксиду азоту (NO₂). Сполуки NO та NO₂ у сукупності прийнято позначати як оксиди азоту (NOx).

Оксид азоту (NO) за типових концентрацій у навколишньому середовищі не вважається безпосередньо небезпечним для здоров'я людини, однак діоксид азоту (NO₂) є високотоксичним газом. Він чинить подразнювальну дію на органи дихання, сприяє розвитку респіраторних та серцево-судинних захворювань і є одним із ключових чинників погіршення якості атмосферного повітря. Крім того, оксиди азоту беруть участь у процесах утворення фотохімічного смогу, кислотних дощів, тропосферного озону та вторинних твердих частинок, що значно посилює їх негативний вплив на екосистеми та здоров'я населення.

З огляду на екологічну небезпеку викидів NOx виникає необхідність формування та впровадження міжнародних програм захисту навколишнього середовища у глобальному масштабі. На сьогоднішній день єдиною міжнародною організацією, рішення якої мають обов'язкову юридичну силу для всієї судноплавної галузі, є Міжнародна морська організація (ІМО) [3]. ІМО була створена Організацією Об'єднаних Націй з метою забезпечення безпеки судноплавства та запобігання забрудненню морського і повітряного середовища суднами.

У межах своєї діяльності ІМО розробила низку нормативних документів, спрямованих на обмеження шкідливих викидів із суден, зокрема відпрацьованих газів суднових енергетичних установок. Основним міжнародним документом у цій сфері є Міжнародна конвенція щодо запобігання забрудненню з суден (MARPOL 73/78). У 1997 році до Конвенції було прийнято Протокол, який включає Додаток VI «Правила запобігання забрудненню повітря суднами». Додаток VI MARPOL, що набрав чинності у 2005 році, встановлює гранично допустимі рівні викидів оксидів азоту для суднових дизельних двигунів [4].

Норми викидів NOx відповідно до Додатку VI MARPOL встановлюються залежно від номінальної частоти обертання двигуна та поділяються на рівні Tier I, Tier II та Tier III. Стандарти Tier I та Tier II мають глобальний характер, тоді як вимоги рівня Tier III застосовуються до суден, що експлуатуються в зонах контролю викидів NOx (NOx Emission Control Areas, NECAs). Зазначені нормативні обмеження обумовлюють необхідність застосування ефективних технічних та технологічних методів зниження викидів оксидів азоту в суднових енергетичних установках [4].

У табл. 1. наведено граничні норми викидів NO_x для суднових двигунів.

Таблиця 1 - Граничні норми викидів NO_x для суднових двигунів (Додаток VI МАРПОЛ)

Рівень (Tier)	Дата побудови судна (на або після)	$n < 130$ об/хв	$130 \leq n < 2000$ об/хв	$n \geq 2000$ об/хв	Район дії
Tier I	1 січня 2000 р.	17,0	$45,0 \cdot n^{-0,2}$	9,8	Глобально
Tier II	1 січня 2011 р.	14,4	$44,0 \cdot n^{-0,23}$	7,7	Глобально
Tier III	1 січня 2016 р.*	3,4	$9,0 \cdot n^{-0,2}$	2,0	Зони NECA

Додаток VI МАРПОЛ запроваджує обмеження кількості шкідливих викидів NO_x, виділених із ВГ СЕУ. Обмеження шкідливих викидів NO_x прогресивно знижується. Норми викидів NO_x Tier III на 80% менше ніж норми викидів NO_x Tier I. Для забезпечення контролю викидів NO_x суднові двигуни повинні бути дообладнані (модернізовані) системами, які знижують рівень NO_x нижче відповідної норми Tier. Існує декілька методів зниження рівня шкідливих викидів NO_x СЕУ.

Присутність NO_x у викидах ВГ морського двигуна обумовлена високою температурою горіння, яка реагує з азотом у повітрі, що подається для згорання палива. Зниження температури в циліндрі під час процесу згорання, а отже зниження утворення NO_x може бути отримано за рахунок модифікації компонентів двигуна.

Наприклад, використання паливного інжектора, який унеможливує потрапляння палива в циліндр після горіння, забезпечує зниження температури циліндра та утворення NO_x. Крім того, зниження швидкості ходу поршня та раннє закриття впускних клапанів перед нижньою мертвою точкою (НМТ) призводить до розширення та охолодження повітря, що подається в циліндр, і внаслідок цього знижується утворення NO_x у викидах ВГ. Такий метод знижує викиди NO_x до 40%. Модернізуючи компоненти двигунів, провідні фірми виробники (MAN Diesel & Turbo, Wärtsilä та інші) виготовляють суднові двигуни, які відповідають вимогам міри Tier II [6].

Синхронізація та тиск упорскування палива впливають на утворення шкідливих викидів у циліндрі та на витрату палива двигуна. Синхронізація впорскування визначає, коли та який об'єм палива впорскується у циліндр двигуна. Для зниження викидів NO_x послідовність упорскування палива ділиться на три окремі фази: попереднє впорскування, основне впорскування та кінцеве впорскування. Така система впорскування називається дробовим упорскуванням.

Фаза попереднього впорскування починає попереднє згорання палива у циліндрі, що забезпечує контрольоване згорання палива у фазі основного упорскування. Цей процес зменшує пікову температуру в циліндрі, і отже, зменшує утворення викидів NO_x. Фаза основного впорскування палива призначена для отримання заданої потужності двигуна. Фаза кінцевого впорскування палива призначена для покращення змішування палива з повітрям під час пізньої фази основного згорання, що зменшує кількість твердих частинок та сажі у вихлопних газах.

На рис. 1. представлено характеристику дробового впорскування базового двигуна [7]. Залежно від режиму експлуатації двигуна, синхронізація фази дробового упорскування регулюється. Електронна система керування працює незалежно від частоти обертання колінчастого валу (КВ) двигуна, що забезпечує синхронізацію. дробового упорскування палива.

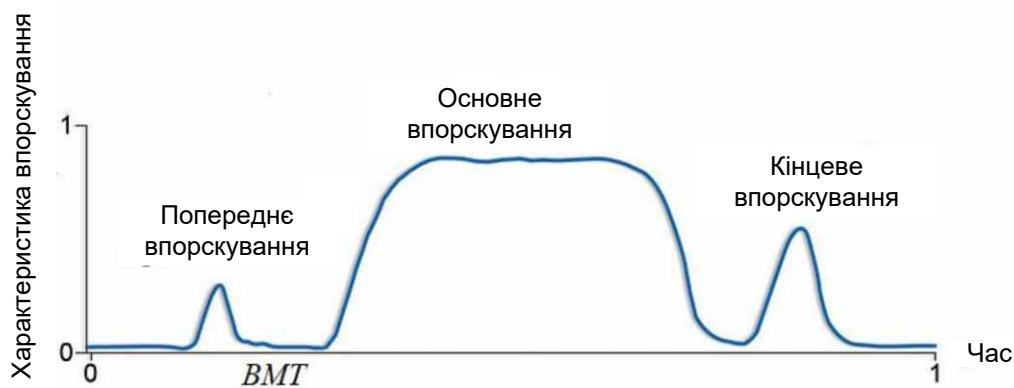


Рисунок 1. – Характеристика дробового впорскування базового двигуна
Джерело [7]

Тиск упорскування палива впливає на наявність твердих частинок у ВГ. Чим вище тиск упорскування палива, тим більше палива розпорошується під час упорскування і поєднується з киснем в циліндрі. Це призводить до практично повного згоряння палива, що забезпечує одержання високого перетворення енергії. При цьому утворюється тільки мінімальна кількість твердих частинок та сажі у ВГ. Тиск упорскування палива у сучасних двигунах досягає до 2 200 бар. Крім зниження утворення шкідливих викидів, точний контроль синхронізації дробового впорскування палива під високим тиском може ефективно знизити витрати палива.

Використання водної емульсії та водного інжектора призводять до зниження температури циліндра. При використанні водної емульсії певна кількість води змішується з паливом у спеціальному обладнанні, призначеному для отримання якісної водопаливної емульсії. При застосуванні водного інжектора в головці циліндра встановлений окремий інжектор, через який певна кількість прісної води під тиском подається до циліндра. Цим знижується температура циліндра й утворення NO_x на 20...45%. Крім цього позитивного ефекту, такий метод забезпечує зниження питомої витрати палива для двигуна. Застосування цього методу на судах забезпечує вимоги Tier III.

Використання газового палива як моторного газу є одним із методів зниження забруднення випускних газів суднових двигунів азотистими сполуками. Застосування газового палива дозволяє суттєво скоротити кількість шкідливих викидів у порівнянні з паливом на основі нафти. Газові двигуни, що працюють з 1% запального дизельного палива, забезпечують вимоги Tier III щодо обмеження NO_x . Однак дана технологія вдосконалення газових дизелів знаходиться лише на стадії випробування.

Газові двигуни, які вже знаходяться в експлуатації, витрачають 3...5% запального дизельного палива та забезпечують лише вимоги Tier II.

Застосування вологого повітря для окислення палива у циліндрі дозволяє знизити викиди NO_x . Водяна пара змішується з повітрям, що подається в циліндр. Повітря, що проходить через компресор, має високу температуру та направляється до спеціальної комірки. Використовуючи насичену пару, що отримується від процесу дистиляції морської води, пара зволожує повітря. При цьому вологість повітря керується шляхом підтримки його температури від 60 до 70 $^{\circ}\text{C}$. Вміст водяної пари у повітрі знижує його пікову температуру, оскільки вода має більш високу теплоємність, ніж повітря. У результаті застосування вологого повітря знижується температура горіння в циліндрі, і отже, знижується утворення викидів оксидів азоту NO_x . Цей метод дозволяє знизити викиди NO_x до 70%.

У деяких випадках система рециркуляції вихлопних газів (EGR) застосовується для зниження викидів NO_x з двигунів. У системі EGR, частина вихлопного газу повторно, після процесу охолодження та очищення, циркулює до приймача надлишкового повітря для того, щоб змішувати ці гази з надлишковим повітрям, яке використовується для окислення палива.

Принципову схему роботи системи рециркуляції вихлопних газів (EGR) показано на рис. 2: 1 – турбокомпресор; 2 – охолоджувач надлишкового повітря; 3 – охолоджувач рециркулюючих ВГ; 4 – очищувач рециркулюючих ВГ.

Близько 50% зниження NO_x можна отримати шляхом використання EGR [20]. Однак,

максимально допустима кількість рециркулюючих вихлопних газів складається не більше 10% від сумарної витрати надлишкового повітря. При вищих відсотках вмісту вихлопних газів у надмірному повітрі, питома витрата палива двигуна та відходи інших викидів зростають.

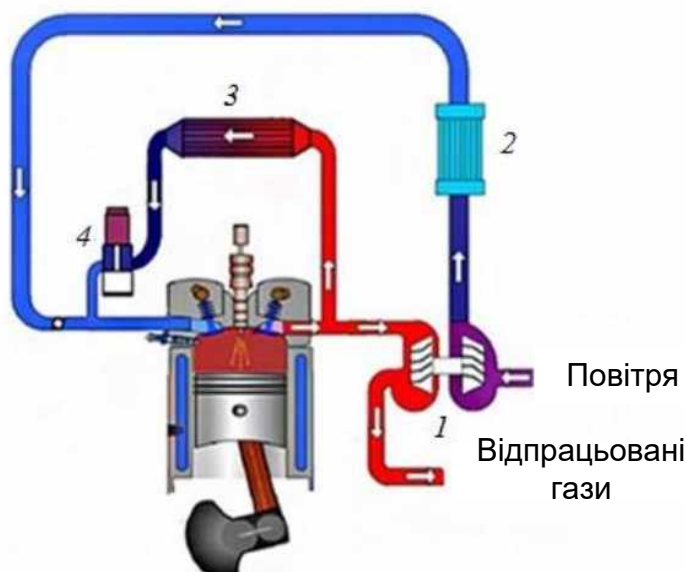


Рисунок 2 – Принципова схема роботи EGR
Джерело [8]

Найефективнішим методом скорочення викидів NO_x із суден є технологія селективного каталітичного відновлення NO_x аміаком (SCR). При застосуванні SCR зниження викидів NO_x може досягати 95%, що достатньо для задоволення найсуворіших екологічних вимог IMO Tier III [3]. Технологія SCR NO_x , незважаючи її високу будівельну вартість та високі експлуатаційні витрати, стає широко застосованим методом на судах для особливого зниження викидів NO_x .

Схема роботи SCR наведена на рис. 3. У цій системі відновник вводиться у ВГ перед тим, як гази входять до каталітичного реактора, де відбувається їх очищення від оксидів азоту. За відновник застосовуються аміак, аміачна вода або карбамід. Однак перед подачею ці відновники мають бути конвертовані до аміаку – NH_3 . Аміак з повітрям від компресора під тиском розпорошуються всередині газопроводу та аміак реагує переважно з NO_x вихлопних газів. Витрата аміаку становить залежно від потужності двигуна 8...9 г/кВт×год.

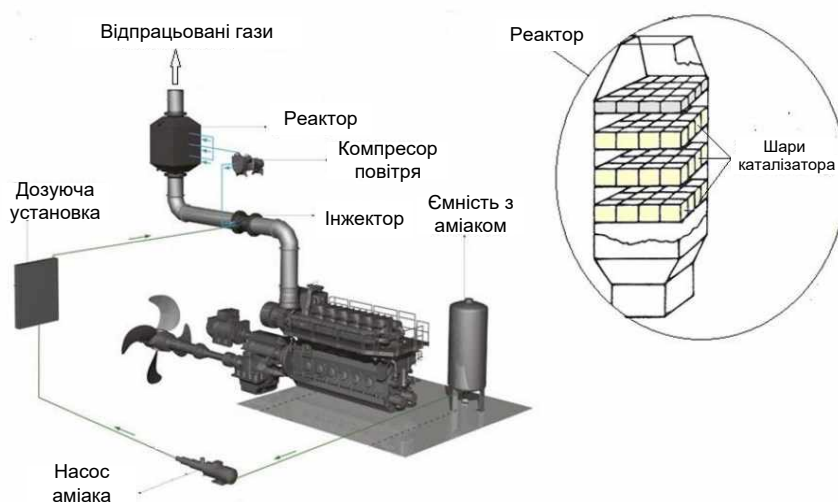


Рисунок 3 – Компонувальна схема системи SCR
Джерело [9]

Суміші ВГ з аміаком направляються в каталітичний реактор, який складається зі спеціального шару каталізатора, що стимулює реакцію між аміаком – NH_3 та NO_x ВГ. За каталізатор використовуються чотири типи найбільш активних каталізаторів: платинові, активні при температурі 150...200 °С; модифіковані на основі платини з температурою застосування 250...350 °С; оксидні титано-ванадієві, що використовуються при температурі 300...450 °С; цеолітні (на основі морденіту), активні при температурі 350...500 °С. Термін служби каталізаторів становить від 2 до 5 років. Для періодичного очищення каталізаторів застосовується повітря від компресора. Стиснуте повітря проходить між шарами каталізаторів та відокремлює сажу з поверхні каталізаторів.

Об'єм каталізатора становить близько 1 м³ на 1 МВт потужності двигуна. Конструкція реактора дозволяє забезпечити по перерізу реакційного простору сталість температури, оптимальні мольні співвідношення NH_3/NO_x та необхідний час хімічних реакцій. Хімічна реакція між аміаком – NH_3 та NO_x ВГ зменшує вміст NO_x до нешкідливого продукту N_2 .

У даному підрозділі роботи наведено методи, які широко застосовуються для зниження забруднення суднових ВГ азотистими сполуками. Залежно від прийнятої норми ІМО Tiers на судах застосовується будь-який із цих вищевказаних методів. На даний момент судові двигуни, дизельні та газові, можуть відповідати вимогам ІМО Tier II щодо зниження викидів NO_x , призначених для суден, що працюють у відкритому морі. Для виконання вимоги ІМО Tier III, призначеної для суден, що працюють у спеціальних зонах контролю викидів NO_x , необхідно застосовувати комбіновані методи, такі як використання системи дробового впорскування в двигуні із застосуванням системи EGR, або метод використання технології селективного каталітичного відновлення (SCR).

Висновки. У результаті дослідження встановлено, що оксиди азоту (NO_x) є одним із найбільш екологічно небезпечних компонентів відпрацьованих газів суднових енергетичних установок, утворення яких обумовлене високотемпературним згорянням палива. Посилення вимог Додатку VI Конвенції MARPOL 73/78, зокрема стандартів Tier II та Tier III, потребує впровадження ефективних технічних рішень для зниження викидів NO_x . Показано, що оптимізація процесу згоряння, дробове впорскування палива та застосування водяних технологій дозволяють суттєво скоротити утворення оксидів азоту. Найбільш ефективними методами зменшення викидів NO_x є системи рециркуляції вихлопних газів (EGR) та селективного каталітичного відновлення (SCR), які забезпечують відповідність вимогам рівня Tier III. Отримані результати можуть бути використані при модернізації суднових енергетичних установок і проєктуванні суден з підвищеними показниками екологічної безпеки.

ЛІТЕРАТУРА

1. Радченко, Р.Н. Тепловые нагрузки теплоиспользующей системы охлаждения наддувочного воздуха главного судового дизеля на рейсовой линии / Р.Н. Радченко, Н.С. Богданов // 36. наук. праць НУК. – 2015. – Вип. № 6 (462). – С. 77–83.
2. Зверьков Д.О., Сагін С.В. Зниження механічних втрат у судових дизелях // Суднові енергетичні установки: наук.-техн. зб. – 2020. – Вип. 40. – С. 20-25. DOI : 10.31653/smf341.2020.20-25.
3. International Maritime Organization. *International Maritime Organization*. URL: <https://www.imo.org/> (date of access: 30.11.2025).
4. Міжнародна конвенція щодо запобігання забрудненню з суден (MARPOL 73/78). Додаток VI. Правила запобігання забрудненню повітря з суден. – London : International Maritime Organization, 2017. – 86 с.
5. Zverkov D.O., Sagin S.V. Reduction of mechanical losses in marine diesel engines // Ship power plants. – 2020. – № 41. – Р. 20–25. DOI: 10.31653/smf341.2020.20-25.
6. 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)). – Р. 37–43. doi: <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2023.290198>.
7. Солодовников В. Г. Застосування двоступеневої обробки палива для поліпшення робочих параметрів і експлуатаційних характеристик судового дизеля. *Суднові енергетичні установки* : наук.-техн. зб. 2014. № 34. Одеса : ОНМА. С. 130–137.
8. IJATES. URL: https://ijates.com/images/short_pdf/1464436108_161ijates.pdf (дата звернення: 25.11.2025).
9. Marine Engineering. *Marine Engineering*. URL: <https://www.meoexamz.co.in/2020/?m=1> (дата звернення: 25.11.2025).

10. 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>
11. Kuropyatnyk O.A. Selection of optimal operating modes of exhaust gas recirculation system for marine low-speed diesel engines / O.A. Kuropyatnyk // *Materials of the International Conference “Process Management and Scientific Developments”* (Birmingham, United Kingdom, January 16, 2020. Part 4). – P. 203-211. DOI: 10.34660/INF.2020.4.52992.
12. Побережний Р.В., Сагін С.В. Забезпечення екологічних показників дизелів суден річкового та морського транспорту // *Суднові енергетичні установки: наук. -техн. зб.* – 2020. – Вип. 41. – Одеса: НУОМА. – С. 5-9. DOI: 10.31653/smf340.2020.5-9.
13. Levchenko, O. V. (2014). *Sutnist i zmist orhanizatsiino-ekonomichnoho mekhanizmu upravlinnia lohistychnym potentsialom pidpriemstv zaliznychnoho transportu* [The essence and content of the organizational and economic mechanism for managing the logistics potential of railway transport enterprises]. *Zbirnyk naukovykh prats Derzhavnoho ekonomiko-tekhnologichnoho universytetu transportu. Seriya: Ekonomika i upravlinnia*, (29), 148–155.
13. Poberezhniy R.V., Sagin S.V. Ensuring the environmental performance of diesel engines in river and sea transport vessels // *Ship power plants*. – 2020. – Vol. 41. – P. 5-9. DOI: 10.31653/smf340.2020.5-9.
14. Sagin S.V., Kuropyatnyk O.A. Using exhaust gas bypass for achieving the environmental performance of marine diesel engines // *Austrian Journal of Technical and Natural Sciences. Scientific journal*. – 2021. – № 7-8 – P. 36-43. <https://doi.org/10.29013/AJT-21-7.8-36-43>.
15. 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.
16. Sagin S.V., Zablotskyi Y.V. Sagin A.S. Increasing the efficiency of ship's medium-speed diesel engines // *Water transport*. – 2025. – № 1(42). – С. 166-179. doi.org/10.33298/2226-8553.2025.1.42.20.
17. Сагін С.В., Заблоцький Ю.В. Діагностування технічного стану суднових енергетичних установок засобів водного транспорту // *Водний транспорт*. – 2023. – № 2(38). – С. 164-175. doi.org/10.33298/2226-8553.2023.2.38.18.
18. 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 // 2023. – № 2(38). – С. 164-175. doi.org/10.33298/2226-8553.2023.2.38.18.
19. Levchenko, O. V. (2014). *Sutnist i zmist orhanizatsiino-ekonomichnoho mekhanizmu upravlinnia lohistychnym potentsialom pidpriemstv zaliznychnoho transportu* [The essence and content of the organizational and economic mechanism for managing the logistics potential of railway transport enterprises]. *Zbirnyk naukovykh prats Derzhavnoho ekonomiko-tekhnologichnoho universytetu transportu. Seriya: Ekonomika i upravlinnia*, (29), 148–155.

Стаття прийнята 01.09.2025

© Головань А.І.

ПІДВОДНІ ДРОНИ У СИСТЕМІ ВОДНОГО ТРАНСПОРТУ: СУЧАСНИЙ СТАН, ТЕХНОЛОГІЇ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ЗАСТОСУВАННЯ

Статтю присвячено комплексному огляду сучасного стану, технологічних рішень та перспектив застосування підводних дронів у системі водного транспорту. Актуальність дослідження зумовлена зростанням вимог до безпеки судноплавства, надійності експлуатації суден і портової інфраструктури, а також необхідністю підвищення ефективності підводного моніторингу в умовах інтенсивного розвитку морського та річкового транспорту. Значна частина критично важливих об'єктів водного транспорту перебуває у підводному середовищі, що ускладнює їх регулярний контроль традиційними методами та підвищує потребу у використанні сучасних безпілотних технологій. У роботі проаналізовано основні напрями наукових досліджень, присвячених підводним дронам, зокрема підходи до їх класифікації, конструктивні та технологічні особливості, розвиток навігаційних систем і систем позиціонування, мультисенсорних комплексів, засобів зв'язку та алгоритмів автономного керування. Особливу увагу приділено застосуванню методів штучного інтелекту, машинного зору та злиття даних для підвищення точності інспекції, автоматизованого виявлення дефектів і підтримки прийняття рішень. На основі узагальнення актуальних наукових джерел систематизовано відповідність ключових технологій підводних дронів та сфер їх практичного використання у системі водного транспорту. Показано, що підводні дрони можуть ефективно застосовуватися для інспекції корпусів суден, гребних і кермових комплексів, контролю портової та гідротехнічної інфраструктури, моніторингу фарватерів і донних перешкод, а також для забезпечення навігаційної безпеки в обмежених акваторіях. Разом із тим встановлено, що більшість існуючих науково-технічних рішень розробляється в контексті загальної підводної робототехніки та не завжди враховує специфічні експлуатаційні умови водного транспорту, зокрема мілководдя, змінну гідрологію, високу цільність інфраструктурних об'єктів і вимоги до безперервності транспортних процесів. Виявлено ключові обмеження, пов'язані з навігаційною надійністю, автономністю роботи та інтеграцією підводних дронів із системами управління водним транспортом. Обґрунтовано доцільність переходу від ізольованого використання підводних дронів як інспекційних засобів до їх системної інтеграції з цифровими інструментами моніторингу, управління та підтримки прийняття рішень, зокрема в рамках концепцій цифрових двійників суден, портів і внутрішніх водних шляхів. Визначено перспективні напрями подальших досліджень, орієнтовані на розвиток гібридних ROV/AUV платформ, підвищення автономності та надійності роботи, а також адаптацію підводних дронів до потреб сучасного водного транспорту.

Ключові слова: підводні дрони; водний транспорт; автономні підводні апарати; дистанційно керовані апарати; навігаційна безпека; підводний моніторинг; портова інфраструктура; цифровізація водного транспорту.

Постановка проблеми. Сучасний розвиток водного транспорту супроводжується зростанням вимог до рівня безпеки судноплавства, надійності експлуатації суден і портової інфраструктури, а також до оперативності отримання та обробки технічної інформації. Значна частина критично важливих елементів системи водного транспорту – корпуси суден, гребні та кермові комплекси, гідротехнічні споруди, донні ділянки фарватерів – перебуває у підводному середовищі, що суттєво ускладнює їх регулярний контроль та оцінювання технічного стану.

Традиційні методи підводного обстеження, засновані на залученні водолазних команд або буксированих систем, характеризуються високою вартістю, значними часовими витратами та підвищеними ризиками для персоналу. Крім того, такі підходи не забезпечують необхідної частоти моніторингу й оперативності реагування, що є критичним в умовах інтенсивної експлуатації флоту, розвитку портової інфраструктури та зростання навігаційного навантаження на внутрішніх водних шляхах.

Застосування підводних дронів розглядається як перспективна альтернатива традиційним методам підводних робіт, здатна забезпечити підвищення безпеки, ефективності та цифровізації процесів у водному транспорті. Однак, попри значну кількість наукових досліджень у галузі підводної робототехніки, існуючі технологічні рішення здебільшого розробляються поза системним контекстом водного транспорту та не враховують специфічні експлуатаційні умови судноплавства, портових акваторій і внутрішніх водних шляхів.

Особливої актуальності набуває проблема адаптації навігаційних, комунікаційних і автономних функцій підводних дронів до умов обмежених глибин, змінної гідрології, акустичних завад і високої щільності інфраструктурних об'єктів. Відсутність уніфікованих підходів до інтеграції підводних дронів із системами управління водним транспортом, моніторингу флоту та технічного обслуговування знижує ефективність їх практичного впровадження.

Таким чином, наявна суперечність між зростаючою потребою водного транспорту в сучасних засобах підводного моніторингу та фрагментованим характером існуючих науково-технічних рішень зумовлює необхідність комплексного аналізу сучасного стану, технологій і перспектив застосування підводних дронів саме в системі водного транспорту. Усунення цієї суперечності можливе шляхом систематизації наукових підходів, виявлення ключових технологічних обмежень і визначення напрямів подальших досліджень, орієнтованих на транспортні задачі.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Упродовж останнього десятиліття спостерігається суттєве зростання наукового інтересу до підводних дронів як складової сучасних безпілотних морських і річкових систем. У наукових публікаціях підводні дрони розглядаються переважно в контексті підводної робототехніки, океанографічних досліджень, офшорної енергетики та безпекових застосувань, що зумовило активний розвиток їх конструктивних, навігаційних і інформаційних технологій [1-4].

У значній кількості робіт запропоновано різні підходи до класифікації підводних дронів, зокрема виділення дистанційно керованих апаратів (ROV), автономних підводних апаратів (AUV) та гібридних платформ, які поєднують автономні й операторські режими роботи. Такі дослідження [5-7] спрямовані на визначення сфер ефективного застосування кожного типу апаратів і формування базових вимог до їх технічних характеристик залежно від умов експлуатації.

Окрему групу наукових публікацій присвячено розвитку навігаційних і позиціонувальних систем підводних дронів. Розглядаються акустичні методи навігації, інерціальні навігаційні системи, доплерівські вимірювачі швидкості, а також комбіновані підходи на основі злиття даних і алгоритмів SLAM та фільтрації Калмана [8-12]. У цих роботах досягнуто суттєвого прогресу в підвищенні точності позиціонування, однак більшість результатів орієнтована на відкриті або глибоководні акваторії та лише частково враховує специфіку портових і річкових умов.

Важливим напрямом сучасних досліджень є розробка мультисенсорних систем і методів обробки інформації для підводних дронів. У публікаціях широко представлено використання оптичних камер, гідролокаторів, комбінованих сенсорних комплексів, а також методів машинного зору та штучного інтелекту для автоматизованого виявлення дефектів і аномалій підводних об'єктів [13-17]. Такі підходи істотно розширюють функціональні можливості підводних дронів, однак здебільшого розглядаються без інтеграції з системами управління водним транспортом.

У ряді робіт підкреслюється перспективність застосування підводних дронів для інспекції корпусів суден, контролю портової та гідротехнічної інфраструктури, моніторингу фарватерів і забезпечення навігаційної безпеки [18-22]. Разом із тим зазначені дослідження мають фрагментарний характер і, як правило, зосереджені на окремих технологічних або апаратних рішеннях, не розглядаючи підводні дрони як елемент цілісної системи водного транспорту.

Таким чином, аналіз останніх досліджень і публікацій свідчить про наявність значного науково-технічного заділу у сфері підводних дронів, водночас виявляє недостатній рівень систематизації результатів з позицій їх практичного використання у водному транспорті. Це обґрунтовує доцільність узагальненого огляду сучасного стану технологій, визначення їх переваг і обмежень, а також формування напрямів подальших досліджень, орієнтованих на транспортні застосування.

Мета дослідження полягає у комплексному аналізі сучасного стану, технологічних рішень та перспектив застосування підводних дронів у системі водного транспорту, з урахуванням специфіки експлуатаційних умов судноплавства, портових акваторій та внутрішніх водних шляхів, а також визначення ключових напрямів їх інтеграції з цифровими системами моніторингу, управління та підтримки прийняття рішень.

Основні результати дослідження. У результаті проведеного аналізу сучасних наукових досліджень і публікацій встановлено, що підводні дрони посідають дедалі важливіше місце у системі водного транспорту як ефективний інструмент підводного моніторингу, інспекції та забезпечення навігаційної безпеки. Узагальнення наукових підходів дозволило систематизувати ключові технологічні рішення, які визначають функціональні можливості підводних дронів, а також окреслити основні напрями їх практичного застосування у судноплавстві, портових акваторіях і на внутрішніх водних шляхах. У табл. 1 наведено узагальнення відповідності ключових технологій підводних дронів та сфер їх застосування у системі водного транспорту з посиланням на актуальні наукові джерела.

Проведений аналіз наукових джерел, узагальнений у табл. 1, свідчить про стрімкий розвиток підводних дронів як технологічного інструменту для вирішення широкого спектра завдань у системі водного транспорту. При цьому простежується чітка еволюція від окремих експериментальних рішень до комплексних багатофункціональних платформ, інтегрованих у цифрові транспортні та інфраструктурні системи.

Результати огляду показують, що більшість сучасних досліджень зосереджені на окремих технологічних підсистемах підводних дронів – навігації, позиціонуванні, системах зв'язку або автономного керування. Найбільш зрілими напрямками є акустичні та інерціальні навігаційні системи, комбіновані INS/DVL підходи, а також мультисенсорні комплекси для інспекцій та моніторингу. Ці технології вже демонструють практичну придатність для портових акваторій, інспекції корпусів суден і контролю гідротехнічних споруд.

Водночас аналіз таблиці виявляє фрагментованість більшості рішень: значна частина робіт розглядає підводні дрони поза системним контекстом водного транспорту, без урахування експлуатаційних обмежень флоту, портів та внутрішніх водних шляхів. Це обмежує можливість безпосереднього масштабування запропонованих технологій у реальні транспортні процеси.

Навігаційна складова залишається одним із найбільш критичних факторів застосування підводних дронів у водному транспорті. Хоча сучасні дослідження пропонують ефективні алгоритми акустичного позиціонування, SLAM та фільтрації даних, їхня надійність суттєво знижується в умовах мілководдя, портових перешкод, інтенсивного судноплавства та акустичних завад.

Для внутрішніх водних шляхів характерні специфічні умови – обмежені глибини, змінна гідрологія, висока щільність інфраструктури – які не завжди враховуються в існуючих моделях. Це свідчить про необхідність адаптації навігаційних алгоритмів саме під умови річкового та портового середовища, а не їх прямого перенесення з океанографічних або військових застосувань.

Таблиця 1. Відповідність наукових джерел, технологічних рішень та сфер застосування підводних дронів у системі водного транспорту

Джерело	Ключова технологія / підхід	Транспортне застосування
[1]	Класифікація UUV, цифрові комунікації	Систематизація підводних дронів для суден і портової інфраструктури
[2]	Автономне керування, гібридний зв'язок	Масштабовані інспекції у портах та на внутрішніх водних шляхах
[3]	Алгоритми автономної навігації, swarm cooperation	Підвищення безпеки судноплавства в обмежених акваторіях
[4]	Класифікація ROV/AUV/HUV, AI-інтеграція	Інтеграція підводних дронів у комплексні транспортні системи
[5]	Комунікації та енергоживлення UUV	Довготривалий технічний моніторинг гідротехнічних споруд
[6]	Акустична, INS, DVL навігація	Навігаційна підтримка на внутрішніх водних шляхах
[7]	Акустичне позиціонування, DVL	Точне позиціонування для портових інспекцій
[8]	Мультисенсорні системи	Моніторинг дна та підводної інфраструктури
[9]	Радіомаяки, shallow-water monitoring	Контроль мілководних фарватерів
[10]	UAV-UUV інтегровані системи	Комплексний огляд портових акваторій
[11]	Deep Learning, Visual SLAM	Автоматичне виявлення дефектів корпусів суден
[12]	Векторна тяга, multi-joint propulsion	Маневрування біля суден і гідроспоруд
[13]	Модульні XLUUV	Модульні платформи для технічного моніторингу
[14]	Біоміметичні AUV, AI-керування	Енергоефективні інспекції у транспортних системах
[15]	Hybrid UUV, obstacle detection	Патрулювання та безпека портових зон
[16]	Сонар + INS навігація	Інспекція підводних комунікацій і трубопроводів
[17]	ROV для підводних інспекцій	Огляд корпусів суден без залучення водолазів
[18]	Акустичний SLAM	Навігація у GNSS-denied портових середовищах
[19]	MEMS-сонар, модульна архітектура	Моніторинг технічного стану портових споруд
[20]	Інтегровані ROV/AUV рішення	Підтримка підводних операцій водного транспорту
[21]	Автономні підводні апарати (AUV) з елементами штучного інтелекту, системами виявлення загроз і алгоритмами навігаційної безпеки	Забезпечення безпеки портових акваторій, моніторинг підводної обстановки та захист критичної інфраструктури водного транспорту
[22]	Інспекційні ROV з оптичними камерами та системами сонарів для дистанційного огляду підводних конструкцій	Огляд корпусів суден, гребних і кермових комплексів без залучення водолазів у процесах технічного обслуговування флоту

Важливим трендом, що простежується у розглянутих роботах, є поступовий перехід від використання підводних дронів виключно як інспекційних засобів до їх інтеграції у системи підтримки прийняття рішень. Використання методів штучного інтелекту, машинного зору та автоматичного виявлення дефектів відкриває можливості для формування цифрових моделей стану суден, портових споруд і фарватерів.

Однак більшість досліджень зосереджені на алгоритмах обробки даних, тоді як інтеграція результатів роботи дронів у системи управління водним транспортом (VTS, fleet monitoring, maintenance planning) залишається недостатньо опрацьованою. Це створює науково-практичний розрив між збором даних і їх використанням у реальних експлуатаційних рішеннях.

Аналіз також показує, що автономність підводних дронів у транспортних застосуваннях часто обмежується не лише енергетичними ресурсами, а й вимогами до безпеки та надійності. У портових і суднових умовах перевага все ще часто надається ROV або гібридним рішенням, які забезпечують контроль оператора та передбачуваність поведінки апарата.

Це вказує на доцільність розвитку гібридних ROV/AUV платформ, спеціально орієнтованих на завдання водного транспорту, де автономність поєднується з можливістю дистанційного втручання та інтеграції з береговими системами управління.

Узагальнення результатів, наведених у таблиці, дозволяє виділити низку ключових наукових прогалин:

- відсутність єдиних підходів до адаптації підводних дронів для внутрішніх водних шляхів;
- обмежена кількість досліджень, що розглядають підводні дрони як елемент цілісної транспортної системи;
- недостатня увага до нормативних, експлуатаційних і організаційних аспектів впровадження;
- слабка інтеграція з концепціями цифрових двійників суден і портової інфраструктури.

Подальші дослідження доцільно спрямувати на розробку системно орієнтованих рішень, у яких підводні дрони розглядатимуться не як ізольовані роботизовані пристрої, а як активний елемент цифрової екосистеми водного транспорту.

Прогалини в дослідженнях та майбутні напрямки. Проведений огляд і узагальнення результатів сучасних досліджень дозволяють виокремити низку наукових прогалин, які стримують широке та системне впровадження підводних дронів у водному транспорті, а також визначити перспективні напрями подальших досліджень.

Основні наукові прогалини. По-перше, у більшості наукових робіт підводні дрони розглядаються як ізольовані роботизовані платформи, без урахування їх функціонування у складі цілісної системи водного транспорту. Недостатньо досліджено питання інтеграції підводних дронів із системами управління судноплаством, портовою інфраструктурою та технічним обслуговуванням флоту, що обмежує практичну цінність отриманих результатів.

По-друге, існує дефіцит досліджень, орієнтованих на внутрішні водні шляхи та портові акваторії. Значна частина навігаційних і комунікаційних рішень розроблена для відкритих або глибоководних середовищ і не повною мірою враховує мілководдя, змінну гідрологію, акустичні завади та високу щільність інфраструктурних об'єктів, характерні для транспортних умов.

По-третє, незважаючи на активне використання методів штучного інтелекту та машинного зору, залишається недостатньо опрацьованим питання достовірності, інтерпретованості та стандартизації результатів, отриманих за допомогою підводних дронів. У більшості робіт відсутній зв'язок між алгоритмами автоматичного аналізу даних і конкретними експлуатаційними рішеннями у водному транспорті.

По-четверте, недостатню увагу приділено експлуатаційним і нормативним аспектам використання підводних дронів, зокрема питанням безпеки, відповідальності, сертифікації та регламентування робіт у портових і судноплавних зонах.

Перспективні напрями подальших досліджень. Перспективним напрямом є розробка системно орієнтованих концепцій застосування підводних дронів, у яких вони розглядаються як елемент

цифрової екосистеми водного транспорту, інтегрований з інформаційними системами моніторингу, управління та підтримки прийняття рішень.

Подальші дослідження доцільно спрямувати на створення гібридних ROV/AUV платформ, адаптованих до транспортних завдань, які поєднують автономність із можливістю дистанційного керування та контролю з боку операторів і берегових служб.

Важливим напрямом є розвиток адаптивних навігаційних і комунікаційних алгоритмів, спеціально орієнтованих на умови портових акваторій та внутрішніх водних шляхів, з урахуванням змінних гідрометеорологічних факторів і обмежень інфраструктури.

Окремої уваги потребують дослідження, пов'язані з інтеграцією підводних дронів у концепції цифрових двійників суден, портів і гідротехнічних споруд, що відкриває можливості для переходу від реактивного контролю до предиктивного та прескриптивного технічного обслуговування.

Загалом подолання виявлених наукових прогалин і реалізація окреслених напрямів подальших досліджень створюють передумови для формування нового рівня безпеки, ефективності та стійкості системи водного транспорту з використанням підводних дронів.

Висновки. У статті виконано комплексний огляд сучасних досліджень, присвячених застосуванню підводних дронів у системі водного транспорту, з акцентом на їхній технологічний розвиток, функціональні можливості та перспективи впровадження у транспортну практику. Проведений аналіз свідчить, що підводні дрони поступово трансформуються з вузькоспеціалізованих інспекційних засобів у багатофункціональні елементи цифрових транспортних систем.

Узагальнення наукових джерел показало, що найбільш розвиненими напрямками є навігаційні системи та системи позиціонування, мультисенсорні комплекси моніторингу, а також алгоритми автономного керування з використанням методів штучного інтелекту. Ці технології вже демонструють практичну придатність для інспекції корпусів суден, контролю портової та гідротехнічної інфраструктури, а також забезпечення навігаційної безпеки в обмежених акваторіях.

Водночас встановлено, що значна частина існуючих рішень залишається фрагментованою та недостатньо адаптованою до специфічних умов водного транспорту, зокрема внутрішніх водних шляхів. Навігаційні, комунікаційні та експлуатаційні обмеження в мілководних і портових середовищах потребують розробки спеціалізованих підходів, орієнтованих на транспортні завдання, а не прямого перенесення технологій з океанографічних або військових застосувань.

Важливим висновком є необхідність переходу від ізольованого використання підводних дронів до їх системної інтеграції з цифровими інструментами управління водним транспортом, зокрема системами моніторингу флоту, управління портовою інфраструктурою та планування технічного обслуговування. Такий підхід дозволяє розглядати підводні дрони як джерело даних для підтримки прийняття рішень, а не лише як засіб збору інформації.

Перспективи подальших досліджень пов'язані з розвитком гібридних ROV/AUV платформ, підвищенням автономності та надійності роботи в складних експлуатаційних умовах, а також інтеграцією підводних дронів у концепції цифрових двійників суден і портів. Реалізація цих напрямів створює передумови для підвищення безпеки, ефективності та стійкості водного транспорту, зокрема в умовах цифрової трансформації галузі.

ЛІТЕРАТУРА

1. Wang, J., Zhou, K., Xing, W., Li, H., & Yang, Z. (2023). Applications, Evolutions, and Challenges of Drones in Maritime Transport. *Journal of Marine Science and Engineering*, 11(11), 2056. <https://doi.org/10.3390/jmse11112056>
2. Jayashankari, J., Sahu, S., Arunkumar, B., Yadav, K., Gokilavani, M., & Vijayaprabhu, A. (2024). A Development of Aquatic Landscape Type of Drones for the Implementation for Future Technology. *2024 4th International Conference on Advance Computing and Innovative Technologies in Engineering (ICACITE)*, 292–297. <https://doi.org/10.1109/ICACITE60783.2024.10617310>
3. Orłowski, M. (2022). Directions of Development of the Autonomous Unmanned Underwater Vehicles. A Review. *Maritime Technical Journal*, 224(1), 68–79. <https://doi.org/10.2478/sjpna-2022-0005>

4. Xu, J., Irigoien, X., & Alouini, M.-S. (2024). *State-of-the-Art Underwater Vehicles and Technologies Enabling Smart Ocean: Survey and Classifications* (Version 1). arXiv. <https://doi.org/10.48550/ARXIV.2412.18667>
5. Wibisono, A., Piran, Md. J., Song, H.-K., & Lee, B. M. (2023). A Survey on Unmanned Underwater Vehicles: Challenges, Enabling Technologies, and Future Research Directions. *Sensors*, 23(17), 7321. <https://doi.org/10.3390/s23177321>
6. Zaiets, A., & Kalinichenko, Y. (2023). АНАЛІЗ СУЧАСНИХ МЕТОДІВ ТА ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ НАВІГАЦІЇ ПІДВОДНИХ АПАРАТІВ. *Системи Управління, Навігації Та Зв'язку. Збірник Наукових Праць*, 4(74), 5–11. <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2023.4.005>
7. Alexandris, C., Papageorgas, P., & Piromalis, D. (2024). Positioning Systems for Unmanned Underwater Vehicles: A Comprehensive Review. *Applied Sciences*, 14(21), 9671. <https://doi.org/10.3390/app14219671>
8. Lambertini, A., Menghini, M., Cimini, J., Odetti, A., Bruzzone, G., Bibuli, M., Mandanici, E., Vittuari, L., Castaldi, P., Caccia, M., & De Marchi, L. (2022). Underwater Drone Architecture for Marine Digital Twin: Lessons Learned from SUSHI DROP Project. *Sensors*, 22(3), 744. <https://doi.org/10.3390/s22030744>
9. Blintsov, V., Maidaniuk, P., & Sirivchuk, A. (2019). IMPROVEMENT OF TECHNICAL SUPPLY OF PROJECTS OF ROBOTIZED MONITORING OF UNDERWATER CONDITIONS IN SHALLOW WATER AREAS. *EUREKA: Physics and Engineering*, 3, 41–49. <https://doi.org/10.21303/2461-4262.2019.00893>
10. Nishitani, A., Kawada, R., & Kojima, J. (2022). Development of combined aerial and underwater drone system. *OCEANS 2022, Hampton Roads*, 1–5. <https://doi.org/10.1109/OCEANS47191.2022.9977370>
11. Merveille, F. F. R., Jia, B., & Xu, Z. (2024). *Advancements in Underwater Navigation: Integrating Deep Learning and Sensor Technologies for Unmanned Underwater Vehicles*. Engineering. <https://doi.org/10.20944/preprints202404.0548.v1>
12. HAN, T., HU, Z., CUI, Q., QING, X., & XU, B. (2023). *Scheme Design and Key Technology Application of Multi-joint Unmanned Underwater Vehicle*. <https://doi.org/10.13889/j.issn.2096-5427.2023.06.004>
13. ZHANG, X., & HUA, J. (n.d.). *Study on the Development and Application of Foreign Extra-Large Unmanned Underwater Vehicles*. <https://doi.org/10.19693/j.issn.1673-3185.03493>
14. Hasan, K., Ahmad, S., Liaf, A. F., Karimi, M., Ahmed, T., Shawon, M. A., & Mekhilef, S. (2024). Oceanic Challenges to Technological Solutions: A Review of Autonomous Underwater Vehicle Path Technologies in Biomimicry, Control, Navigation, and Sensing. *IEEE Access*, 12, 46202–46231. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3380458>
15. Kiselev, L. V., Kostenko, V. V., & Medvedev, A. V. (2022). Motion Control Model and HUV Dynamics for Patrolling Sea Areas with Complex Bottom Topography. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 988(2), 022080. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/988/2/022080>
16. Jacobi, M., & Karimanzira, D. (2013). Underwater pipeline and cable inspection using autonomous underwater vehicles. *2013 MTS/IEEE OCEANS - Bergen*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/OCEANS-Bergen.2013.6608089>
17. António Neves Lousada, S., Freitas Camacho, R., & Suárez Palacios, J. (2021). Underwater Technical Inspections Using ROV Applied to Maritime and Coastal Engineering: The Study Case of Canary Islands. In S. António Neves Lousada (Ed.), *Underwater Work*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.95599>
18. Miller, A., Miller, B., & Miller, G. (2021). Navigation of Underwater Drones and Integration of Acoustic Sensing with Onboard Inertial Navigation System. *Drones*, 5(3), 83. <https://doi.org/10.3390/drones5030083>
19. Akinina, T., Symonenkov, V., Symonenkova, I., & Trushkov, G. (2022). IMPROVING THE EFFICIENCY OF APPLICATION UNCAVATED UNDERWATER DEVICES FOR THE NEEDS OF THE NAVAL FORCES OF THE ARMED FORCES OF UKRAINE. *Collection of scientific works of Odesa Military Academy*, 16, 126–134. <https://doi.org/10.37129/2313-7509.2021.16.126-134>
20. Ioannou, G., Forti, N., Millefiori, L. M., Carniel, S., Renga, A., Tomasicchio, G., Binda, S., & Braca, P. (2024). Underwater Inspection and Monitoring: Technologies for Autonomous Operations. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 39(5), 4–16. <https://doi.org/10.1109/MAES.2024.3366144>
21. McNelly, B. P., Whitcomb, L. L., Brusseau, J. P., & Carr, S. S. (2022). Evaluating Integration of Autonomous Underwater Vehicles into Port Protection. *OCEANS 2022, Hampton Roads*, 1–8. <https://doi.org/10.1109/OCEANS47191.2022.9977239>
22. Lorenčić, V. (2022). Seabed Surveillance and Underwater Structures Inspection with Remotely Operated Vehicle – Power Ray. *Transactions on Maritime Science*, 11(1), 110–118. <https://doi.org/10.7225/toms.v11.n01.w07>

REFERENCES

1. Wang, J., Zhou, K., Xing, W., Li, H., & Yang, Z. (2023). Applications, Evolutions, and Challenges of Drones in Maritime Transport. *Journal of Marine Science and Engineering*, 11(11), 2056. <https://doi.org/10.3390/jmse11112056>
2. Jayashankari, J., Sahu, S., Arunkumar, B., Yadav, K., Gokilavani, M., & Vijayaprabhu, A. (2024). A Development of Aquatic Landscape Type of Drones for the Implementation for Future Technology. 2024 4th International Conference on Advance Computing and Innovative Technologies in Engineering (ICACITE), 292–297. <https://doi.org/10.1109/ICACITE60783.2024.10617310>
3. Orłowski, M. (2022). Directions of Development of the Autonomous Unmanned Underwater Vehicles. A Review. *Maritime Technical Journal*, 224(1), 68–79. <https://doi.org/10.2478/sjpna-2022-0005>
4. Xu, J., Irigoien, X., & Alouini, M.-S. (2024). State-of-the-Art Underwater Vehicles and Technologies Enabling Smart Ocean: Survey and Classifications (Version 1). *arXiv*. <https://doi.org/10.48550/ARXIV.2412.18667>
5. Wibisono, A., Piran, Md. J., Song, H.-K., & Lee, B. M. (2023). A Survey on Unmanned Underwater Vehicles: Challenges, Enabling Technologies, and Future Research Directions. *Sensors*, 23(17), 7321. <https://doi.org/10.3390/s23177321>
6. Zaiets, A., & Kalinichenko, Y. (2023). Analysis of contemporary methods and prospects for the development of underwater vehicle navigation. Control, Navigation and Communication Systems. *Academic Journal*, 4(74), 5–11. <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2023.4.005>
7. Alexandris, C., Papageorgas, P., & Piromalis, D. (2024). Positioning Systems for Unmanned Underwater Vehicles: A Comprehensive Review. *Applied Sciences*, 14(21), 9671. <https://doi.org/10.3390/app14219671>
8. Lambertini, A., Menghini, M., Cimini, J., Odetti, A., Bruzzzone, G., Bibuli, M., Mandanici, E., Vittuari, L., Castaldi, P., Caccia, M., & De Marchi, L. (2022). Underwater Drone Architecture for Marine Digital Twin: Lessons Learned from SUSHI DROP Project. *Sensors*, 22(3), 744. <https://doi.org/10.3390/s22030744>
9. Blintsov, V., Maidaniuk, P., & Sirivchuk, A. (2019). IMPROVEMENT OF TECHNICAL SUPPLY OF PROJECTS OF ROBOTIZED MONITORING OF UNDERWATER CONDITIONS IN SHALLOW WATER AREAS. *EUREKA: Physics and Engineering*, 3, 41–49. <https://doi.org/10.21303/2461-4262.2019.00893>
10. Nishitani, A., Kawada, R., & Kojima, J. (2022). Development of combined aerial and underwater drone system. *OCEANS 2022, Hampton Roads*, 1–5. <https://doi.org/10.1109/OCEANS47191.2022.9977370>
11. Merveille, F. F. R., Jia, B., & Xu, Z. (2024). Advancements in Underwater Navigation: Integrating Deep Learning and Sensor Technologies for Unmanned Underwater Vehicles. *Engineering*. <https://doi.org/10.20944/preprints202404.0548.v1>
12. HAN, T., HU, Z., CUI, Q., QING, X., & XU, B. (2023). Scheme Design and Key Technology Application of Multi-joint Unmanned Underwater Vehicle. <https://doi.org/10.13889/j.issn.2096-5427.2023.06.004>
13. ZHANG, X., & HUA, J. (n.d.). Study on the Development and Application of Foreign Extra-Large Unmanned Underwater Vehicles. <https://doi.org/10.19693/j.issn.1673-3185.03493>
14. Hasan, K., Ahmad, S., Liaf, A. F., Karimi, M., Ahmed, T., Shawon, M. A., & Mekhilef, S. (2024). Oceanic Challenges to Technological Solutions: A Review of Autonomous Underwater Vehicle Path Technologies in Biomimicry, Control, Navigation, and Sensing. *IEEE Access*, 12, 46202–46231. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3380458>
15. Kiselev, L. V., Kostenko, V. V., & Medvedev, A. V. (2022). Motion Control Model and HUV Dynamics for Patrolling Sea Areas with Complex Bottom Topography. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 988(2), 022080. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/988/2/022080>
16. Jacobi, M., & Karimanzira, D. (2013). Underwater pipeline and cable inspection using autonomous underwater vehicles. 2013 MTS/IEEE OCEANS - Bergen, 1–6. <https://doi.org/10.1109/OCEANS-Bergen.2013.6608089>
17. António Neves Lousada, S., Freitas Camacho, R., & Suárez Palacios, J. (2021). Underwater Technical Inspections Using ROV Applied to Maritime and Coastal Engineering: The Study Case of Canary Islands. In S. António Neves Lousada (Ed.), *Underwater Work*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.95599>
18. Miller, A., Miller, B., & Miller, G. (2021). Navigation of Underwater Drones and Integration of Acoustic Sensing with Onboard Inertial Navigation System. *Drones*, 5(3), 83. <https://doi.org/10.3390/drones5030083>
19. Akinina, T., Symonenkov, V., Symonenkova, I., & Trushkov, G. (2022). IMPROVING THE EFFICIENCY OF APPLICATION UNCAVATED UNDERWATER DEVICES FOR THE NEEDS OF THE NAVAL FORCES OF THE ARMED FORCES OF UKRAINE. *Collection of scientific works of Odesa Military Academy*, 16, 126–134. <https://doi.org/10.37129/2313-7509.2021.16.126-134>
20. Ioannou, G., Forti, N., Millefiori, L. M., Carniel, S., Renga, A., Tomasicchio, G., Binda, S., & Braca, P. (2024). Underwater Inspection and Monitoring: Technologies for Autonomous Operations. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 39(5), 4–16. <https://doi.org/10.1109/MAES.2024.3366144>

21. McNelly, B. P., Whitcomb, L. L., Brusseau, J. P., & Carr, S. S. (2022). Evaluating Integration of Autonomous Underwater Vehicles into Port Protection. OCEANS 2022, Hampton Roads, 1–8. <https://doi.org/10.1109/OCEANS47191.2022.9977239>
22. Lorenčič, V. (2022). Seabed Surveillance and Underwater Structures Inspection with Remotely Operated Vehicle – Power Ray. Transactions on Maritime Science, 11(1), 110–118. <https://doi.org/10.7225/toms.v11.n01.w07>

Golovan A.I.

UNDERWATER DRONES IN THE WATER TRANSPORT SYSTEM: CURRENT STATUS, TECHNOLOGIES, AND PROSPECTS FOR APPLICATION

The article is devoted to a comprehensive review of the current state, technological solutions, and prospects for the use of underwater drones in the water transport system. The relevance of the study is due to the growing requirements for navigation safety, reliability of ships and port infrastructure, as well as the need to improve the efficiency of underwater monitoring in the context of intensive development of sea and river transport. A significant part of critically important water transport facilities are located in the underwater environment, which complicates their regular monitoring using traditional methods and increases the need for modern unmanned technologies. The paper analyzes the main areas of scientific research devoted to underwater drones, in particular approaches to classification, design and technological features, the development of navigation and positioning systems, multisensory complexes, communication means, and autonomous control algorithms. Attention is paid to the use of artificial intelligence, machine vision, and data fusion methods to improve inspection accuracy, automated defect detection, and decision support. Based on a review of current scientific sources, the correspondence between key underwater drone technologies and their practical applications in the water transport system has been systematized. It is shown that underwater drones can be effectively used for inspecting ship hulls, propulsion and steering systems, monitoring port and hydraulic infrastructure, monitoring fairways and bottom obstacles, as well as ensuring navigational safety in restricted water areas. At the same time, it has been established that most existing scientific and technical solutions are developed in the context of general underwater robotics and do not always consider the specific operating conditions of water transport, in particular shallow waters, variable hydrology, high density of infrastructure objects, and requirements for the continuity of transport processes. Key limitations related to navigational reliability, autonomy, and the integration of underwater drones with water transport management systems have been identified. The feasibility of transitioning from the isolated use of underwater drones as inspection tools to their systematic integration with digital monitoring, control, and decision-making support tools, particularly within the framework of digital twin concepts for ships, ports, and inland waterways, has been substantiated. Promising areas for further research have been identified, focused on the development of hybrid ROV/AUV platforms, increasing autonomy and reliability, and adapting underwater drones to the needs of modern water transport.

Keywords: underwater drones; waterborne transport; autonomous underwater vehicles; remotely operated vehicles; navigation safety; underwater monitoring; port infrastructure; digitalization of water transport

Стаття прийнята 10.09.2025

© Россомаха О. А., Пізінцалі Л. В., Россомаха О. І., Александровська Н. І.

АДИТИВНІ ТЕХНОЛОГІЇ У СУДНОБУДУВАННІ ТА СУДНОРЕМОНТІ: СВІТОВИЙ ДОСВІД ТА ПЕРСПЕКТИВИ ВПРОВАДЖЕННЯ В УКРАЇНІ

У статті розглянуто сучасний стан і перспективи розвитку адитивних технологій в світі та в Україні. Проведено аналіз ринку адитивних технологій та 3D-друку в суднобудівництві, показано, що розмір світового ринку 3D-друку проявляє сталі тенденції до зростання більш ніж на 14 % у 2020–2027 рр. Визначено основні напрями розвитку адитивних технологій у суднобудівництві. Найбільш суттєвою перешкодою на шляху до повноцінного впровадження 3D-друку у суднобудівництві є відсутність нормативної бази її використання. Проведено аналіз сучасних матеріалів та технологій для друку суден та деталей суден в різних країнах світу. Показано, що для виконання таких проектів потрібно залучення як державної підтримки, так і приватних інвесторів, а також фінансування досліджень із розроблення та впровадження нових матеріалів та адитивних технологій.

Ключові слова: адитивні технології, 3D-друк, 3D-принтер, суднобудівництво, сучасні матеріали.

Вступ. Сучасні інноваційні адитивні технології (АТ), 3D-технології і пристрої для їхнього застосування у ХХІ ст. розвиваються динамічно та охоплюють усе більше напрямів у галузі суднобудування при створенні суден різноманітного призначення. На сьогодні у суднобудуванні впроваджено низку рішень, починаючи з сертифікованого гребного гвинта, що друкується на 3D-принтері, до регулювання питань використання високих технологій та інтелектуальної власності в морському судноплаванні. Крім того, спостерігається зростаюче впровадження 3D-друку, також відомого як адитивне виробництво, для ремонту і технічного обслуговування суден. Ключові переваги цієї технології включають зниження витрат, прискорення виробництва, гнучкість проектування і доступність деталей. Незважаючи на значний потенціал, існують такі проблеми, як стандартизація, сертифікація, обмеження матеріалів і потреба в кваліфікованому персоналі. Проте, зростаюче число успішних впроваджень і багатообіцяюче майбутнє вказують на те, що ця технологія відіграватиме дедалі важливішу роль у підвищенні ефективності та стійкості морської галузі.

Технології тривимірного друку дають змогу «виросувати» судові деталі будь-якої складності з мінімальними витратами. При цьому практично відсутні відходи виробництва, а обладнання, що використовується для реалізації адитивних технологій, потребує набагато меншої кількості обслуговуючого персоналу порівняно з традиційними методами.

Поряд із перевагами у швидкості та собівартості виготовлення продукції, ці технології вирізняються і екологічними перевагами. Вони, зокрема, зменшують викиди парникових газів і знижують рівень «теплого» забруднення.

Адитивні технології мають значний потенціал у скороченні енергетичних і матеріальних витрат під час будівництва різноманітних типів суден. Автори наголошують, що рівень застосування 3D-друку в суднобудівній галузі є показником не лише індустріальної потужності самої галузі, а й держави в цілому, а також свідченням її інноваційного розвитку.

Технології пошарового синтезу або ж 3D-друк, нині належать до найбільш динамічних напрямів «цифрового» виробництва. Вони здатні здійснити справжній прорив у багатьох сферах життя. За темпами розвитку ринок адитивних технологій значно випереджає інші виробничі галузі.

Разом з тим, в Україні фіксується суттєве відставання від провідних країн, які є лідерами у цій сфері. Дослідження факторів підтверджує, що це відставання поступово збільшується, особливо з огляду на скоординовані дії урядів, промисловості та наукових установ держав-лідерів, спрямовані на інтеграцію адитивного виробництва в промисловість. Реальне впровадження цих технологій неможливе

без інвестицій у фундаментальні та прикладні дослідження. Досвід розвинених країн демонструє, що розв'язання такого завдання потребує активної ролі уряду й системи фінансових стимулів. Розвиток цієї високотехнологічної галузі є основою забезпечення технологічної незалежності та безпеки держави.

Відповідно до стандартів ASTM (American Society for Testing and Materials), рекомендовано використовувати два ключові терміни – Additive Fabrication (AF) і Additive Manufacturing (AM). Також поширеними є синонімічні поняття – additive processes, additive techniques, additive layer manufacturing, layer manufacturing і freeform fabrication, які перекладаються як «адитивні технології». Водночас термін Rapid Prototyping («швидке прототипування») пропонується вилучити, оскільки він більше не відображає сутності сучасних адитивних методів [1].

Актуальність цього аналізу обумовлена необхідністю глибшого наукового осмислення соціально-економічного потенціалу та впливу технології 3D-друку на розвиток суднобудівної та судноремонтної галузі України. Вона також визначається нагальною потребою модернізації вітчизняного суднобудування відповідно до сучасних викликів та вимог, а також гармонізацією національного законодавства з міжнародними стандартами.

Стан вивченості проблеми. Вивченню окремих питань, зокрема, впливу 3D-друку на інноваційний розвиток, інтелектуальну власність, присвячені публікації іноземних вчених. Зокрема, такі проблеми вивчали: С. Бехтольд, А. Гурко, К. Джуелл, Б. Депортер, Д. Мендіс, Д. Колесников, В. Смірнов, С. Толкачєв, Б. Токарев. Є праці вітчизняних науковців: Г. Андрушка, А. Гречко, Д. Дубова, О. Кронді, С. Чернишова, О. Штефана та інших.

На думку авторів, найбільше публікацій присвячено питанням дослідження та впровадження адитивних технологій у будівництві, якими займаються, як українські, так і закордонні науковці, зокрема Р. Бусвел [2], Д. Делгадо, П. Клайтон, В. О'Брієн [3], М. Джинджер, А. Паоліні, С. Колмансбергер, Е. Ранк [4], Ф. Сартіпі [5], О.В. Андрійчук [6], А.А. Петришина [7], О.В. Струтинська [8], Л.О. Згалат-Лозинська, О.Б. Згалат-Лозинський [9], І.О. Шинський [10], В.С. Дорошенко [11].

Однак, автори підкреслюють, що багатогранність і комплексність проблематики потребує подальших науково-технічних і економіко-правових досліджень, особливо у суднобудівній галузі.

Мета статті. Метою даної статті є дослідження особливостей використання та тенденцій розвитку адитивних технологій 3D-друку в суднобудівній галузі, а також оцінка їхнього впливу на економіку та промислові сфери як у світі, так і в Україні. Окрему увагу приділено аналізу матеріалів, що застосовуються під час реалізації адитивних технологій у процесі будівництва суден.

Виклад основного матеріалу. «3D-принтер — це пристрій, який шляхом пошарового нанесення матеріалу формує фізичний об'єкт відповідно до віртуальної тривимірної моделі. Завдяки йому можливо виготовляти практично будь-які предмети» [12].

Створення моделей здійснюється за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення для 3D-моделювання.

Перший 3D-принтер (рис. 1) було продемонстровано у 1984 році. Автором цієї технології став американський інженер і винахідник Чак Халл – засновник компанії «3D Systems», яка нині є одним із світових лідерів у сфері виробництва 3D-принтерів.



Рисунок 1 – Загальний вигляд першого 3D принтера, розробленого Чаком Халлом.
(джерело: [12]).

За дослідженням компанії Sculpteo, в якому взяло участь 1300 осіб з різних країн світу, 51 % опитаних використовує АТ у виробництві, а не лише для прототипування. Найбільш використовуваними

технологіями 3D-друку є: моделювання методом осадження з плавленням (FDM), селективне лазерне спікання (SLS), стереолітографія (SLA) [13].

За прогнозами, до 2025 р. глобальний ринок 3D-друку досягне 32 млрд дол., а до 2030 року – 60 млрд дол.

У 2014–2020 рр. світовий ринок адитивних технологій демонстрував середньорічне зростання на рівні 19,3 %, досягнувши у 2020 році обсягу майже 14 млрд дол. Згідно зі звітом GlobalData, частка 3D-друку нині становить менш ніж 0,1 % від загального світового виробничого ринку, розмір якого оцінюється у 12,7 трлн дол. (рис. 2, 3).

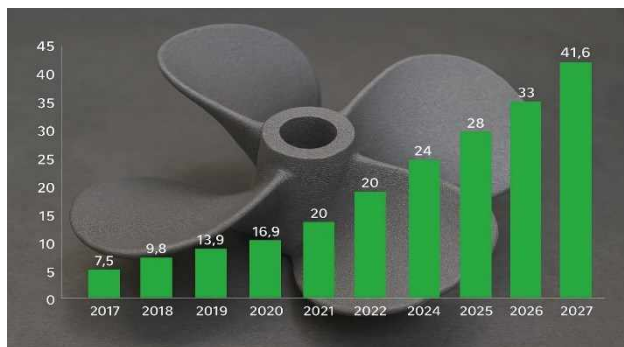
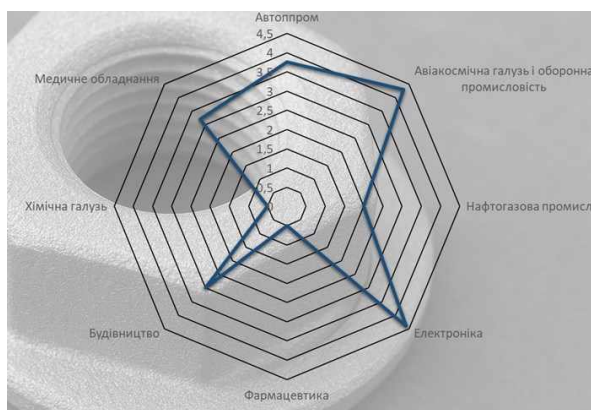
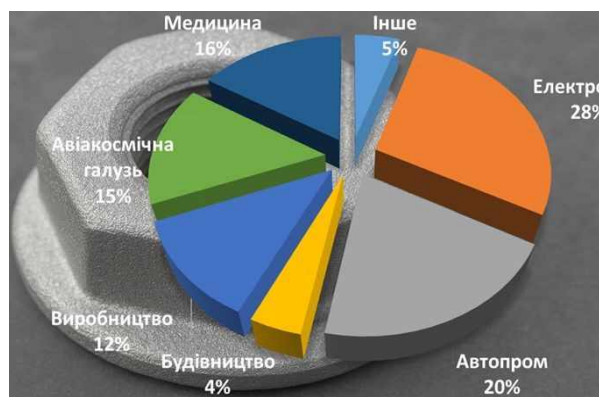


Рисунок 2 – Стан і прогноз (2020 – 2027 рр.) обсягу світового ринку АТ, млрд дол. (джерело: [14])



а



б

Рисунок 3 – Рівень впровадження 3D-друку по галузях до 2025 р. (а) та прогноз галузевої сегментації ринку АТ (частка сегмента до 2025р., % виручки від продажів на світовому ринку адитивних послуг (б))

(джерело: (а) на основі [15],
(б) розроблено авторами на основі інтернет досліджень)

У 2013 році світовий ринок адитивного виробництва оцінювався приблизно у 3,8 млрд доларів США [16]. Лідером у цій галузі були США, за ними розташувалися Японія, Німеччина та Китай, однак із відставанням майже у чотири рази (табл. 1). Як показано в табл. 1, понад 50 % ринкової частки припадало на США та країни Європейського Союзу.

Вже через 10 років, в 2023 році ринок складав вже \$16,14 млрд, при совокупному річному темпі зростання 22,3 %.

А вже, в 2024 році, обсяг ринку адитивного виробництва перевищив позначку \$ 20 мільярдів, що є першим таким досягненням в історії галузі, згідно Wohlers Report.

Очікується, що ринок зростатиме і найближчими роками, досягнувши \$ 41,69 млрд до 2028 року.

Розмір ринку адитивного виробництва у 2024 році оцінювався в 91,84 млрд доларів США, а до 2032 року, за прогнозами, досягне 419,22 млрд доларів США зі середньорічним темпом зростання (CAGR) 20,90 % протягом прогнозованого періоду з 2025 по 2032 рік.

Таблиця 1 – Частка АМ-технологій у провідних країнах світу в 2013 році

Місце	Країна	Частка АМ – обладнання, %
1	США	38
2	Японія	9,7
3	Німеччина	9,4
4	Китай	8,7
5	Велика Британія	4,2
6	Італія	3,8
7	Франція	3,2
8	Республіка Корея	2,3
9	Канада	1,9
10	Тайвань	1,5
11	Туреччина	1,4
12	Туреччина	1,4
13	Іспанія	1,3
14	Швеція	1,2
15	Інші країни	12

Окрім аналізу ринкових сценаріїв, таких як ринкова вартість, темпи зростання, сегментація, географічне охоплення та основні гравці, ринкові звіти, підготовлені Data Bridge Market Research, також включають аналіз імпорту та експорту, огляд виробничих потужностей, аналіз споживання продукції, аналіз цінових тенденцій, сценарій зміни клімату, аналіз ланцюга поставок, аналіз ланцюга створення вартості, огляд сировини/витратних матеріалів, критерії вибору постачальників, аналіз PESTLE, аналіз Портера та нормативно-правову базу [17].

Сегментація світового ринку адитивного виробництва за типом матеріалу (метал, пластик, сплави та кераміка), технологією (стереолітографія (SLA), моделювання плавленого розташування (FDM), лазерне спікання (LS), струменеве друкування сполучними матеріалами, поліструменевий друк, електронно-променеве плавлення (EBM), виробництво ламінованих об'єктів (LOM) та інші), застосуванням (автомобільна промисловість, охорона здоров'я, аерокосмічна промисловість, споживчі товари, промисловість, оборона, архітектура та інші) – тенденції галузі та прогноз до 2032 року.

Видання BENZINGA (США) представило огляд, провідної консалтингової компанії Transparency Market Research [18]: «...у 2022 році обсяг ринку адитивних технологій у вартісному вираженні оцінювався в 466,3 млн доларів США з перспективним зростанням в середньому на 21,5 % в період з 2023 по 2031 рік. За прогнозами, до кінця 2031 року цей об'єм ринку може скласти 2,7 млрд доларів США».

Глобальний ринок адитивного виробництва за регіонами, 2023 – 2030 роки, видання представило у вигляді рис. 4.

Матеріали для 3D-друку становлять один із визначальних чинників, що впливають на якість, міцність і функціональність кінцевих виробів. Сьогодні застосовується широкий спектр матеріалів, кожен з яких характеризується власними властивостями та специфікою використання. Остаточний вибір матеріалу визначається типом друку, особливостями обладнання та завданнями конкретного проекту.

Аналіз джерел [18, 19], дозволив авторам скласти таблицю 2, де вказані основні типи та характеристики пластикових матеріалів для 3D-друку.

У своєму глобальному звіті про ринок металевих порошків для адитивного виробництва Transparency Market Research представила наступних гравців: Sandvik AB – Renishaw PLC – Praxair Technology, Inc. – BÖHLER Edelstahl GmbH & Co KG – Aubert & Duva – ATI – RIO Tinto – Carpenter Technology Corporation – Alcoa Inc. – GKN PLC – Miba AG – Metaldyne Performance Group – Hoganas AB – Hitachi Chemicals Co. Ltd.

Основні висновки зі звіту про світовий ринок металевих порошків для 3D-друку:

- У 2022 році частка Північної Америки у виробництві таких порошків становила 28 %.
- У 2022 році на Азіатсько-Тихоокеанський регіон припадало 42 % ринку у вартісному вираженні.
- У 2022 році найбільший дохід (61 %) приніс продаж металевих порошків на основі нержавіючої сталі.
- У 2022 році на частку Європи припадало 20 % світового ринку [20].



Рисунок 4 – Глобальний ринок адитивного виробництва за регіонами, 2023 – 2030 роки (джерело: [21])

Таблиця 2 – Основні типи та характеристики пластикових матеріалів для 3D-друку

№	Назва матеріала	Характеристики
1	PLA (Полімолочна кислота)	PLA – це один із найпоширеніших матеріалів для 3D-друку. Його виготовляють із відновлюваної сировини, зокрема кукурудзяного крохмалю чи цукрової тростини, що робить його екологічно безпечним. Цей матеріал добре підходить для створення прототипів, декоративних виробів і навчальних моделей. PLA забезпечує високу точність друку і є зручним вибором для початківців.
2	ABS (Акрилонітрил-бутадієнстирол)	ABS є ще одним поширеним матеріалом для 3D-друку, що вирізняється високою міцністю та стійкістю до високих температур. Його застосовують для виготовлення деталей, здатних витримувати значні механічні навантаження. Процес друку з ABS є складнішим, адже він вимагає підвищених температур екструзії (приблизно 210 – 250 °C) і використання нагрітої платформи для уникнення деформацій готової моделі. Цей матеріал знаходить широке застосування в автомобільній промисловості, а також використовується для створення прототипів і функціональних виробів.
3	PETG (Полімер терефталат-гліколь)	PETG – це комбінація кращих властивостей PLA та ABS. Він міцний, гнучкий, стійкий до дії вологи та хімічних речовин. PETG добре підходить для виготовлення функціональних деталей, які будуть використовуватися на відкритому повітрі або постійно піддаватися навантаженню. Це відмінний вибір для створення прозорих деталей, так як матеріал має високий ступінь прозорості.
4	Фотополімери	Фотополімери використовуються в 3D-принтерах, які працюють за технологіями SLA або DLP, де модель створюється шляхом затвердіння рідкої смоли під впливом ультрафіолетового світла. Ці

		матеріали забезпечують високу точність та гладкість поверхні, що робить їх ідеальними для створення моделей із тонкими деталями.
5	TPU (Термопластичний поліуретан)	TPU – це гнучкий матеріал, що дає змогу виготовляти еластичні вироби. Його застосовують для створення предметів, які мають зберігати певний рівень гнучкості, наприклад чохлів для телефонів, взуття чи прокладок.
6	Нейлон	Нейлон є міцним і зносостійким матеріалом, який широко застосовується для виготовлення функціональних механічних деталей, зокрема шестерень та інструментів. Йому властива висока стійкість до тертя та здатність витримувати значні навантаження.

Розроблено авторами на підставі даних [18, 19]

Для виробництва металевих порошків використовують матеріали, що наведені у табл. 3.

Таблиця 3 – Матеріали виробництва металевих порошків

Матеріали	
Нержавіючу сталь	- аустенітні нержавіючі сталі; - дуплексні та спеціальні нержавіючі сталі; - феритні нержавіючі сталі; - мартенситні нержавіючі сталі.
Сплави	- кобальтові сплави; - мідні сплави; - титанові сплави; - нікелеві сплави; - суперсплави.
Інші матеріали	- інструментальні сталі; - швидкорізальні сталі; - низьколеговані сталі.

Металеві порошки, такі як сплави алюмінію та титану, виявилися відповідним варіантом для 3D-друку легких деталей з відмінним співвідношенням міцності та ваги.

Очікується, що зростаюча потреба у легких та складних компонентах стимулюватиме продаж металевих порошків для адитивного виробництва. Одним із прикладів суттєвого прогресу є поява технології розпилення. Розпорошення газом та водою є популярним методом отримання металевих порошків за рахунок швидкого затвердіння розплавленого металу.

Інновації у сфері виробництва та рециклінгу порошків допомагають підвищити ступінь екологічності та рентабельності адитивного виробництва. Ефективні системи відновлення та повторного використання порошку скорочують кількість відходів, вартість матеріалів та обмежують несприятливий вплив на навколишнє середовище.

В якості основної сировини використовується широкий спектр металів у вигляді порошкових гранул правильної сферичної форми. Це дозволяє використовувати майже всі стандартизовані сплави, комбінувати їх і розробляти спеціальні матеріали для конкретних застосувань. Аналіз стандартних металевих порошків, проведено авторами на підставі [19] та представлено в табл. 4.

Щодо технологій 3D друку, то на думку авторів сьогодні існує багато методик та технологій друку, найбільш поширеними з яких є наступні [20] табл. 5:

- Моделювання методом наплавлення (Fused deposition modeling, FDM);
- Лазерна стереолітографія (Laser stereolithography, SLA);
- Селективне лазерне спікання (Selective laser sintering, SLS).

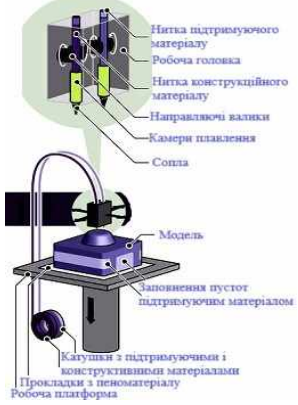
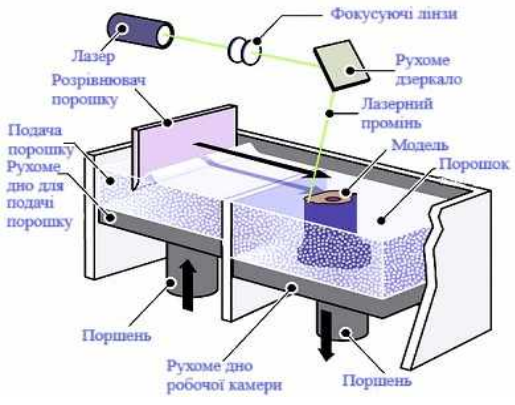
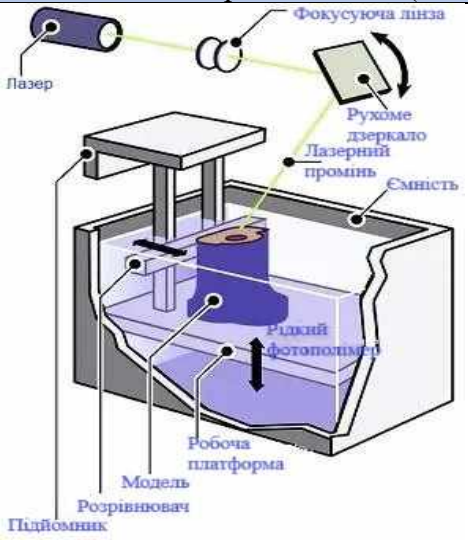
Таблиця 4 – Стандартні металеві порошки

Матеріал	Властивості	Основні сфери виробництва:	Галузі промисловості:
Алюміній AlSi10Mg	Легкий конструкційний сплав меншої щільності, ніж інші матеріали для 3D-друку. Виявляє хороші легуючі властивості, тепло- та електропровідність. Готові вироби, виготовлені на 3D-принтерах Alfa-150D і Alfa-280, демонструють однорідну структуру і практично повну відсутність пористості.	дужки трубопровідна арматура хвилеводів повітроводи теплообмінники аерокосмічний	аерокосмічний авіації автомобільний енергії
Титан Ti6Al4V	Високоміцний біосумісний конструкційний матеріал, що характеризується однорідною щільною структурою, особливо стійкий до корозії, а також, у поєднанні з хорошими механічними властивостями, має малу питому вагу – найпоширеніший матеріал для створення різноманітних виробів медичного призначення, а також виробів для аерокосмічної, авіаційної, машинобудівної, приладобудівної промисловості.	хірургічні інструменти та елементи для фіксації зламаних кісток частини літаків і космічних кораблів частини газотурбінних двигунів компоненти для автотранспорту	аерокосмічний авіації автомобільний енергії ліки стоматологія
Алюміній AlSi10Mg	Легкий конструкційний сплав меншої щільності, ніж інші матеріали для 3D-друку. Виявляє хороші легуючі властивості, тепло- та електропровідність. Готові вироби, виготовлені на 3D-принтерах Alfa-150D і Alfa-280, демонструють однорідну структуру і практично повну відсутність пористості.	дужки трубопровідна арматура хвилеводів повітроводи теплообмінники аерокосмічний	аерокосмічний авіації автомобільний енергії
Титан Ti6Al4V	Високоміцний біосумісний конструкційний матеріал, що характеризується однорідною щільною структурою, особливо стійкий до корозії, а також, у поєднанні з хорошими механічними властивостями, має малу питому вагу – найпоширеніший матеріал для створення різноманітних виробів медичного призначення, а також виробів для аерокосмічної, авіаційної, машинобудівної, приладобудівної.	частини літаків і космічних кораблів частини газотурбінних двигунів компоненти для автотранспорту та автоспорту	аерокосмічний авіації автомобільний енергії ліки
Кобальт-хром CoCrMo	Їдкий біосумісний матеріал. Завдяки високій твердості цей сплав використовується для виготовлення зубних протезів, протезів та імплантатів кульшового або колінного суглобів.	форсунки газових турбін прилади для контролю та вимірювання	аерокосмічний авіації енергії

Марка сталі AISI 316L	Сплав нержавіючої сталі AISI 316L є найпоширенішим матеріалом для 3D-друку, який використовується для виготовлення різноманітних виробів зі складною геометрією, з внутрішніми порожнинами та відповідними каналами охолодження. Застосовується для широкого спектру завдань у різних галузях промисловості, стійкий до корозії, демонструє досить високу міцність і витривалість.	двигун, машини та частини машин частини літаків і космічних кораблів компоненти для автотранспорту прилади для контролю, вимірювання та автоматизації	аерокосмічний авіації автомобільний енергії
Інконель 625	Придатний для дисперсійного зміцнення цей нікель-хромовий сплав з додаванням ніобію, який у поєднанні з молібденом забезпечує підвищену міцність без додаткової термічної обробки. Діапазон робочих температур жароміцного сплаву <i>Inconel 625</i> – від криогенних температур до 980°C. Сплав витримує агресивне корозійне середовище і особливо стійкий до точкової та щілинної корозії. Крім того, він стійкий до газової корозії при високих температурах, демонструє високу технологічність, у тому числі зварюваність.	теплозахисні екрани жаростійке футерування камер згоряння і пальників канали газотурбінних двигунів спеціальне обладнання морських платформ і морських суден	аерокосмічний авіації суднобудування енергії
Інконель 718	Нікель-хромовий сплав із значною кількістю заліза, ніобію та молібдену разом із меншою кількістю алюмінію та титану, придатний для дисперсійного зміцнення. Цей жаростійкий сплав поєднує в собі стійкість до корозії та високу міцність, відмінну зварюваність і стійкість до утворення після зварювальних тріщин. Сплав демонструє відмінну міцність при температурах до 700 °C і в даний час залишається важливим матеріалом для більшості компонентів авіаційних двигунів з робочою температурою нижче 650 °C.	частини двигунів і корпусів літаків/космічних кораблів прилади для контролю, вимірювання та автоматизації компоненти газових турбін насосні колеса для роботи при високих температурах	аерокосмічний авіації автомобільний енергії

Розроблено авторами на підставі [22]

Таблиця 5 – Найпоширеніші технології друку

Технології друку	Суть та властивості
Моделювання методом наплавлення (FDM) 	Найпоширеніша методика 3Д-друку. Проста та відносно дешева. Універсальна та вельми функціональна. Формування об'єкта при моделюванні методом наплавлення відбувається за рахунок пошарового нанесення на робочу платформу розплавленого матеріалу. Як матеріал для цих цілей застосовується пластик у формі нитки різної товщини. Також можуть застосовуватися різноманітні гнучкі матеріали та посиленний/металізований пластик. Складні елементи, що нависають, друкуються з підтримками.
Лазерна стереолітографія (Laser stereolithography, SLA) 	Точність друку набагато вище, ніж може видати 3Д друк FDM, що призвело до її особливої популярності у певних сферах. 3D друк SLA застосовується, зокрема, у ювелірній справі та стоматології завдяки високій деталізації виробів. Суть процесу друку полягає в тому, що ємність заповнюється рідким фотополімером, який шар за шаром опромінюється лазерним променем відповідно до контурів майбутнього об'єкта. Під дією випромінювання фотополімерна смола затвердіває, поступово утворюючи готовий виріб. Існує також різновид цього методу – 3D-друк DLP, де замість лазера використовується спеціальний проектор. Такий підхід забезпечує значно вищу швидкість друку.
Селективне лазерне спікання (SLS) 	Професійна технологія 3D-друку, яка широко застосовується в промисловості. SLS вважається одним із найнадійніших методів 3D-друку, який застосовується як для створення прототипів, так і для виготовлення повнофункціональних виробів. У цьому процесі використовуються спеціальні порошкові матеріали — пластикові або металеві. Лазерний промінь оплавляє порошок по контуру моделі, утворюючи перший шар. Далі поверхня знову засипається порошком, який повторно піддається лазерному опромінненню. Таким чином, об'єкт поступово формується пошарово. Особливістю SLS-друку є відсутність потреби в додаткових опорних структурах для утримання висячих елементів, що дозволяє зменшити витрату матеріалу.

Джерело: розроблено авторами на основі [20,22])

Суднобудівна галузь прагне до підвищення ефективності та зниження витрат за рахунок впровадження АТ. Однак широке застосування 3D-друку обмежується проблемами шорсткості поверхні та точності розмірів, що впливає на механічні властивості та експлуатаційні характеристики деталей.

Шорсткість поверхні визначається параметрами Ra , Rz , $Rmax$, вимірюваними за допомогою профілометрів і 3D-сканерів. Найпоширенішими методами оцінювання є:

- Контактні методи: механічні профілометри, що дають змогу вимірювати нерівності з високою точністю.

- Безконтактні методи: лазерні та оптичні сканери, інтерферометрія.

- Методи комп'ютерного аналізу: 3D-сканування і порівняння з CAD-моделлю.

При проведенні аналізу, автори встановили, що якість поверхні і точність надрукованих деталей залежать від безлічі параметрів, серед яких можна виділити:

1. Технологію друку:

- FDM (Fused Deposition Modeling) – найпоширеніша, але дає високу шорсткість.

- SLA (Stereolithography) – забезпечує гладку поверхню, але потребує фотополімеризації.

- SLS (Selective Laser Sintering) – формує пористу структуру.

- DMLS (Direct Metal Laser Sintering) – використовується для металевих деталей, але потребує постобробки.

2. Параметри друку:

- Висота шару: чим менший шар, тим краща якість.

- Швидкість друку: занадто висока швидкість збільшує ризик дефектів.

- Температурні режими: перегрів або брак енергії можуть призводити до нерівномірного спікання.

Для оцінки точності розмірів застосовуються координатно-вимірювальні машини (СММ) і цифрові вимірювальні системи.

Зарубіжні дослідження показують, що:

- зниження висоти шару до 50 мкм зменшує Ra на 30 – 50 %;

- багатопроменева лазерна обробка (в DMLS) знижує пористість на 20 – 40 %;

- контроль температурного режиму зменшує внутрішні напруження.

Найефективнішими методами зарубіжні дослідження визнають лазерну постобробку й електрохімічне полірування, оскільки вони дають змогу зменшити шорсткість до $Ra < 1$ мкм без значних змін геометрії.

Використання спеціальних покриттів, таких як нікелювання або керамічні покриття, значно покращує зносостійкість і знижує коефіцієнт тертя.

Аналіз досвіду провідних компаній показав, що застосування лазерного полірування в суднобудуванні та авіації знизило шорсткість деталей до $Ra = 0.4$ мкм – (GE Additive (США), а впровадження комбінованої постобробки (лазерна + електрохімічна) дало змогу досягти точності ± 0.05 мм – (Siemens (Німеччина)). Крім того, використання SLM і гальванопокриття збільшило термін служби деталей на 30 % – (Rolls-Royce (Великобританія)).

Міжнародні стандарти (ISO 25178, ASTM F42) [23] регламентують допуски за шорсткістю і точністю. Сучасні зарубіжні дослідження прагнуть до зниження шорсткості до $Ra < 1$ мкм і відхилень розмірів менше 0.1 мм.

Автори вважають доцільним, привести декілька прикладів використання 3D-друку в суднобудуванні [24]:

Перший в світі гребний гвинт, що надрукований на 3-D принтері (рис. 5) з нікель-алюміній-бронзового сплаву за допомогою дугового зварювання. Цей гвинт, надрукованим на 3D-принтері, отримав французький мінний тральщик *Andromède*.



Рисунок 5 – Перший в світі гребний гвинт, що зроблений на 3-D принтері
(джерело: [25])

Про це повідомляє компанія Naval Group [28]: «Це найбільший металевий 3D-друкований рушій, коли-небудь проводився у світі, і перший гвинт, отриманий в результаті цієї технології, був піднятий на борт військового корабля і виготовлений для використання не тільки для ходових випробувань».

НП Newport News Shipbuilding (США): успішно надруковано та встановлено великий клапанний колектор на авіаносці – демонстрація надійності технології для критичних елементів (рис. 6) Складання клапанного колектора, спеціалізована конструкція, що дозволяє розподіляти одне джерело рідини на кілька точок на кораблі, встановлена в насосній кімнаті авіаносця класу Gerald R. Ford Enterprise. Складання має довжину близько 5 футів і важить 1 000 фунтів. Newport News співпрацювала з DM3D Technology для виробництва корпусу колектора [26].

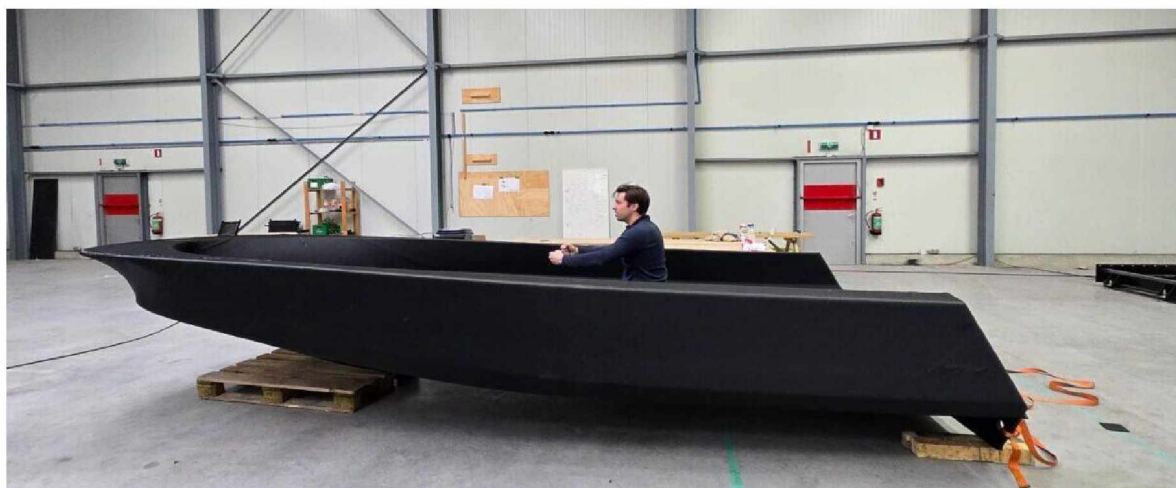
CEAD: 3D-друк цілих корпусів суден з HDPE (рис. 7, 8) [27].

В університеті американського штату Мэн вчені створили патрульний катер довжиною 25 футів і вагою близько 2,3 тони за 72 години (рис. 9). Він отримав назву 3Dirigo і вирушив на випробування в *Alford W2 Ocean Engineering Laboratory*. Принтер же, на якому вийшло надрукувати човен, дає змогу виготовляти об'єкти завдовжки до 30 метрів, завширшки 6,7 і заввишки 3 м зі швидкістю 227 кг матеріалу на годину.

Включення 3D-друку в існуючі виробничі та логістичні процеси (рис. 10). Надрукований стояк повернення масла для танкера TYSLA RoRo (рис. 11). Результат: Зниження ваги на 90 %, виробництво за 15 днів (замість 135!). Оптимізація: 10 деталей об'єднано в 1.



Рисунок 6 – Великий клапанний колектор
(джерело: [26])



*Рисунок 7 – Корпус судна з HDPE
(джерело : [27])*



*Рисунок.8 – 3D-друк цілих корпусів суден з HDPE
(джерело : [28])*

Р



*Рисунок 9 – Патрульний катер
(джерело: [29])*



Рисунок 10 – Включення 3D-друку в існуючі виробничі та логістичні процеси



Рисунок.11 – Стояк повернення масла для танкера TYSLA RoRo
(джерело : [28])

Компанія *Pelagus 3D* успішно поставила виготовлений з використанням адитивних технологій стояк повернення масла для судна *TYSLA RoRo*. У морській та офшорній галузях відбувається зміна парадигми управління запасними частинами завдяки інтеграції адитивного виробництва. Цей проект, створений у результаті співпраці *Pelagus 3D*, *Kawasaki Heavy Industries* і *Wilhelmsen Ship Management*, підкреслює практичні переваги АМ у скороченні часу виконання замовлень і підвищенні продуктивності деталей [28].

Стояк, виготовлений з використанням селективного лазерного спікання (SLS) з нержавіючої сталі, є прикладом підвищення ефективності за рахунок АМ. Вагу деталі знижено на 90 %, що спрощує процеси монтажу і забезпечує безперебійність робіт з технічного обслуговування. Традиційні методи

виготовлення зайняли б 135 днів, тоді як АМ виконала завдання всього за 15 днів, що значно скоротило потенційний час простою судна.

Роль **Kawasaki Heavy Industries** як OEM-виробника була ключовою в оптимізації конструкції компонента, об'єднанні 10 деталей в одну АМ-деталь і підвищенні ефективності потоку. Ця інноваційна конструкція не тільки підвищує зручність роботи та безпеку, а й відповідає цілям сталого розвитку за рахунок мінімізації використання матеріалів.

BMC США(USS Bataan): Уникнення дорогої ремонтної місії завдяки бортовому 3D-принтеру [30, 31].

Підвищення автономності суден.

Якщо ж говорити про інші сфери застосування 3D-технологій у суднобудуванні, то вони цілком застосовані і у виготовленні деталей інтер'єру. Внутрішнє оздоблення яхти часто хочеться зробити неповторним і втілити свої фантазії, і в цьому якраз і допоможе 3D-принтер, здатний з різних матеріалів «виліпити» необхідну річ.

Проведений аналіз дозволив вказати поточні сфери застосування 3D-друку в суднобудуванні та ремонті :

Виробництво компонентів:

3D-друк використовується для виготовлення широкого спектру компонентів, від невеликих складних деталей, таких як клапани та насоси, до великих елементів, таких як гребні гвинти і секції корпусів.

Суднобудівники можуть створювати нестандартні деталі складної геометрії, які важко чи неможливо виготовити традиційними методами.

Приклад: Підрозділ НІ **Newport News Shipbuilding** успішно надрукував на 3D-принтері і встановив великий вузол клапанного колектора на авіаносці, що будується. Його успішна установка свідчить про значний прогрес у визнанні та надійності деталей, надрукованих на 3D-принтері, для відповідальних морських застосувань. Це також вказує на потенційне зрушення у суднобудуванні у бік включення адитивного виробництва для основних структурних елементів.

Компанія **CEAD** займається 3D-друком цілих корпусів суден HDPE, демонструючи потенціал великоформатного адитивного виробництва.

3D-друк дозволяє виконувати запасні частини на вимогу, скорочуючи час простою, особливо у віддалених місцях.

Цифрові файли деталей можуть бути надіслані на принтери на борту судна або до найближчих центрів для швидкого виробництва.

Приклад: BMC США на борту USS Bataan уникла великої ремонтної місії завдяки 3D-принтеру, що підкреслює потенціал підвищення автономності суден та зниження залежності від традиційних ланцюжків поставок для ремонту. Це вказує на можливість виготовлення критично важливих деталей у морі усуває необхідність потенційно тривалих і дорогих заходів у порт, значно підвищуючи експлуатаційну готовність і знижуючи логістичне тягар. Це також вказує на майбутнє, в якому суди можуть бути самодостатніми у вирішенні питань технічного обслуговування [30, 31].

Консорціум порту Роттердам вивчає можливість 3D-друку різних функціональних запасних частин. Це вказує на те, що великі порти визнають стратегічну значущість 3D-друку для підтримки морських операцій.

Створення можливостей 3D-друку в портовій інфраструктурі може значно знизити затримки та витрати, пов'язані з отриманням необхідних деталей для суден, що робить порти більш привабливими та ефективними центрами морської діяльності. Очікується, що більше 50 000 унікальних запасних частин будуть оцифровані для виробництва на вимогу.

Це показує масштабні зусилля створення всеосяжної цифрової бази даних для морських запасних частин.

Отже, оцифрування запасних частин є найважливішим кроком на шляху до повної реалізації потенціалу 3D-друку на вимогу, забезпечуючи швидке та ефективне виробництво за потреби. Це вимагає співробітництва у галузі розробки стандартизованих цифрових моделей і забезпечення сумісності.

На думку авторів, переваги 3D-друку в морській галузі очевидні (рис. 12) [32, 33, 34]:

1. Оптимізація витрат.

Менше витрат на обладнання, матеріали та робочу силу.

Для кожного бізнесу ключовим завданням є зниження витрат. Однією з переваг 3D-друку є те, що експлуатаційні витрати, витрати на робочу силу та матеріали в цілому суттєво нижчі, ніж у випадку з великомасштабним виробництвом.

–Вартість машини

Витрати на експлуатацію обладнання становлять незначну частину загальної вартості виробничого процесу. Хоча енергоспоживання під час виготовлення деталей у промислових умовах може бути досить дорогим, можливість створення складних виробів за один технологічний цикл забезпечує вищу ефективність і суттєву економію часу. Таким чином, витрати на роботу машин компенсуються за рахунок переваг швидкості виробництва.

–Витрати на оплату праці

Однією з переваг 3D-друку є низькі трудові витрати. На відміну від традиційного виробництва, де для роботи на кількох різних машинах потрібні спеціалісти або для повного складання виробу необхідна виробнича лінія, у випадку з 3D-принтером достатньо оператора, який запускає механізм і контролює автоматизований процес друку завантаженої моделі. Відтак витрати на робочу силу є значно меншими порівняно з класичними виробничими підходами..

–Матеріальні витрати

Кількість матеріалів, доступних для 3D-принтерів, постійно зростає, і в останні роки це дало змогу ще ефективніше оптимізувати кінцеву собівартість готової продукції.

–Менше транспортних витрат

Однією з ключових переваг 3D-друку є скорочення відстаней, які необхідно долати продукту. Оскільки принтер здатний виготовити виріб повністю від початку до кінця, дизайн може бути створений в одній країні та переданий електронною поштою в іншу для виробництва. Це усуває потребу у виготовленні фізичних прототипів і їх транспортуванні між заводами для завершення процесу. Завдяки цьому 3D-друк стає глобальною технологією, яку можна реалізовувати в будь-якій точці світу без додаткових логістичних витрат, що, своєю чергою, зменшує обсяги морських, повітряних і автомобільних перевезень.

2. Більш швидке та економічне виробництво, менше відходів:

–3D-друк дає змогу створювати складні морські деталі та компоненти за менший час порівняно з традиційними методами виробництва.

–Це значно скорочує відходи матеріалу й усуває необхідність у дорогих формах або інструментах.

–Тепер виробники можуть виробляти індивідуальні деталі за запитом, зводячи до мінімуму витрати на зберігання і проблеми з управлінням запасами.

–Під час проєктування дизайнери мають орієнтуватися на ефективність. Традиційні методи виготовлення багатьох деталей і виробів передбачають велику кількість окремих етапів, кожен із яких може стати джерелом помилки та потребувати повторного запуску, що ускладнює весь виробничий процес. Натомість одноетапне виробництво, яке забезпечує 3D-друк, є значно вигіднішим і надійнішим.

–Традиційне виробництво здебільшого є віднімальним процесом, коли значна частина сировини втрачається та потребує повторного використання, що зумовлює високі витрати й утворення відходів. Натомість 3D-друк має перевагу завдяки адитивному підходу, за якого продукт формується з мінімальними втратами матеріалу. Якщо традиційні методи неминуче створюють відходи, які ще треба переробити або повторно застосувати, витрачаючи додатковий час і ресурси, то 3D-принтери великого формату забезпечують цей процес автоматично, значно підвищуючи ефективність.

–Термопластичні матеріали можна багаторазово розплавляти й охолоджувати, знову надаючи їм твердої форми. Завдяки цій властивості виробничі відходи легко піддаються повторному використанню.

3. Підвищена гнучкість дизайну та зменшення кількості помилок:

– Морські дизайнери та інженери можуть розкрити свій творчий потенціал за допомогою 3D-друку, оскільки він дає змогу створювати складні геометричні форми і складні деталі, які раніше було складно реалізувати.

– Прототипування стає ефективним і економічним, що дає змогу швидко виконувати ітерації та покращувати дизайн.

4. Наявність запчастин і технічне обслуговування:

– 3D-друк полегшує виробництво запасних частин для кораблів і суден, скорочуючи час простою і потребу у великих запасах.

– Проблеми, пов'язані із застарілими або важкодоступними компонентами, можна вирішити, забезпечивши безперебійну роботу.

5. Виробництво на замовлення:

– Важливою перевагою є можливість виготовляти деталі та вироби значно швидше, ніж за традиційних методів. Складні проекти можна створити у вигляді САПР-моделі й перетворити на готовий об'єкт усього за кілька годин. Це дає змогу швидко перевіряти та доопрацьовувати дизайнерські ідеї. У той час як класичні технології потребують тижнів або навіть місяців, щоб пройти шлях від проектування до прототипу й виробництва, 3D-друк істотно скорочує цей цикл.

– Морські компанії можуть друкувати необхідні деталі та компоненти за запитом, усуваючи необхідність у тривалих термінах поставки або дорогих міжнародних перевезеннях.

– Аварійним ремонтом можна ефективно управляти за допомогою можливостей 3D-друку на борту суден.

6. Різноманітність матеріалів і сумісність:

– 3D-друк дає змогу використовувати різні матеріали, включно з металами, полімерами та композитами, залежно від конкретних вимог морського застосування.

– Сумісність матеріалів із суворими морськими умовами є важливим аспектом, що забезпечує міцність і довговічність друкованих деталей.

7. Можливість віддаленого друку:

– Віддалений моніторинг і управління 3D-принтерами дають змогу морським компаніям використовувати досвід фахівців, навіть якщо вони географічно розділені.

– Компанії в районах, що не мають виходу до моря, можуть отримати вигоду з технологій 3D-друку без необхідності в спеціалізованих виробничих потужностях поблизу узбережжя.

Майбутнє управління ланцюгами поставок морської галузі схиляється до цифровізації та виробництва на вимогу. Завдяки цифровим запасам і можливостям швидкого виробництва галузь стане свідком скорочення часу реагування та економічної ефективності під час пошуку запасних частин, особливо тих, які важко знайти або які більше не виробляються.

8. Конкурентна перевага:

– Підприємства отримують можливість створювати якісніші, вдосконалені вироби у значно коротші терміни, що забезпечує їм конкурентні переваги. Завдяки цьому процес розробки продукту розпочинається раніше: прототипи виготовляються швидше, а отже, виріб оперативніше переходить у виробничу стадію та виходить на ринок. Це знижує ризики втрати інформації на різних етапах комунікації, які можуть призвести до серйозних проблем. Фізичний прототип дозволяє ефективно презентувати ідею партнерам, інвесторам та клієнтам, формуючи спільне розуміння майбутнього продукту.

– Суттєвою перевагою 3D-друку є можливість швидко створювати концепт, який можна побачити й потримати в руках, що усуває сумніви чи непорозуміння. Навіть якщо це лише прототип, він дає набагато точніше уявлення про кінцевий результат, ніж будь-який опис чи креслення.

Для визначення перспективності моделі за традиційних методів потрібні масштабні дослідження. Натомість 3D-друк дозволяє оперативно отримати відгуки потенційних покупців та інвесторів. Виріб можна коригувати аж до завершального етапу, чого не дають класичні технології. Це робить 3D-друк унікальним та ефективним інструментом для оцінки ринкового потенціалу й підвищення шансів на успішний комерційний старт. [34].

9. Конфіденційність:

Безперервне прототипування та виробництво за допомогою власного 3D-принтера забезпечує збереження проектів у межах компанії, що гарантує захист інтелектуальної власності. Жодна стороння організація не матиме доступу до ваших розробок і не зможе претендувати на них. Усі інноваційні рішення залишаються всередині підприємства, тож питання конфіденційності повністю знімається.

Отже, 3D-друк в морській галузі має великий потенціал для різноманітних застосувань, починаючи від створення прототипів та закінчуючи виробництвом складних деталей і обладнання:

Заміна лиття:

3D-друк, зокрема технологія SLS, може бути використана для створення міцних та точних деталей, які раніше виготовлялися за допомогою лиття, але з меншими витратами та швидше, особливо для малих партій.

Створення складних геометричних форм:

3D-друк дозволяє створювати деталі з внутрішніми каналами, решітчастими структурами та іншими складними елементами, які неможливо або важко виготовити традиційними методами.

Виготовлення прототипів:

3D-друк дозволяє швидко та дешево створювати прототипи для тестування нових конструкцій та обладнання, що значно прискорює процес розробки.

Виробництво запасних частин:

3D-друк може використовуватися для виготовлення запасних частин для суден та іншого морського обладнання, особливо для рідкісних або застарілих моделей, що дозволяє зменшити час простою та витрати на ремонт.

Виготовлення обладнання для підводних робіт:

3D-друк може бути використаний для створення спеціалізованого обладнання для підводних робіт, такого як інструменти, камери та інші пристрої.

10. Інші застосування:

Виготовлення моделей кораблів та морських об'єктів:

3D-друк може бути використаний для створення детальних моделей кораблів, морських платформ, портів та іншого обладнання для навчання, візуалізації та презентацій.

Створення індивідуальних інтер'єрів суден:

3D-друк дозволяє створювати унікальні та індивідуальні елементи інтер'єру для суден, наприклад, декоративні панелі, меблі та інші елементи, що покращують комфорт та естетичний вигляд.

Дослідження та розробки:

3D-друк може бути використаний для дослідження та розробки нових матеріалів та технологій для морської галузі.

Автори статті вважають, що основними перевагами 3D-друку в морській галузі є:

Зменшення витрат на виробництво:

3D-друк дозволяє знизити витрати на виготовлення прототипів та деталей, особливо в малих партіях.

Скорочення часу виробництва:

3D-друк дозволяє значно скоротити час на виготовлення деталей та обладнання, що прискорює процес розробки та ремонту.

Можливість створення складних геометричних форм:

3D-друк дозволяє створювати деталі з складними геометричними формами, які неможливо або важко виготовити традиційними методами.

Збільшення гнучкості виробництва:

3D-друк дозволяє швидко змінювати конструкції та виробляти деталі на замовлення, що збільшує гнучкість виробництва.

Доступність запасних частин:

3D-друк може застосовуватися для виготовлення запасних частин до рідкісних або застарілих моделей обладнання, що дозволяє скоротити час простою та знизити витрати на ремонт.

Втім, поряд із беззаперечними перевагами впровадження адитивних технологій у промисловість існують і чинники, що стримують цей процес. Згідно з опитуванням експертів у сфері 3D-друку, проведеним у 2019 році компанією Dimensional Research на замовлення Essentium, основними проблемами залишаються висока вартість обладнання й матеріалів, складність масштабування результатів та недостатній рівень довіри до технології. (рис. 13).

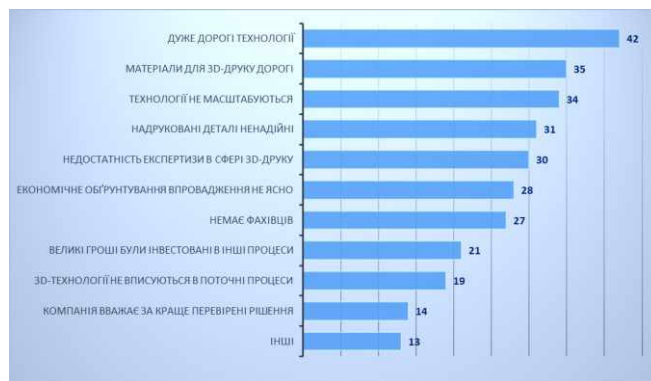


Рисунок 13 – Основні проблеми впровадження АТ в серійне виробництво
(джерело: розроблено авторами на основі даних [35])

Автори статті, підкреслюють, що до цих проблем впровадження АТ в виробництво треба додати:

- початкові витрати на принтер;
- 3D-друкований об'єкт здебільшого вимагає деякої постобробки;
- час друку;
- для роботи з 3D-моделями потрібні спеціальні навички;
- скорочення та втрата робочих місць у виробництві.

Усунення цих проблем є важливим для розширення використання 3D-друку в суднобудівництві та в різних галузях виробництва, для підвищення його ефективності та надійності.

Стосовно України, автори статті підкреслюють, що в Україні 3D-друк активно розвивається у різних галузях, зокрема у морській. Особливо актуальним 3D-друк є у виробництві дронів та іншого обладнання для морських операцій, де швидкість та індивідуалізація виробництва мають критичне значення.

Застосування 3D-друку в морській галузі України:

1. Прототипування та виробництво деталей (дозволяє швидко створювати прототипи морського обладнання, що значно прискорює процес розробки та випробувань. Крім того, він використовується для виробництва дрібних, але важливих деталей, які можуть бути важкодоступними або дорогими у традиційному виробництві).

2. Виробництво дронів (для створення корпусів, лопатей та інших компонентів дронів, які використовуються для розвідки, моніторингу та інших морських операцій). Найбільш відомі українські морські дрони – Sea Baby, MAGURA V5, та «Марічка» (рис. 14, 15, 16). Ці дрони мають різні характеристики, але всі вони призначені для ураження ворожих цілей, таких як кораблі та інфраструктурні об'єкти.

Враховуючи досвід України у використанні дронів у військових цілях, 3D-друк стає важливим інструментом для забезпечення потреб армії. [36].

3. Створення індивідуальних інструментів та обладнання. Унікальні інструменти та обладнання, адаптовані під конкретні потреби морських операцій, що підвищує ефективність та безпеку роботи.

4. Ремонт та обслуговування. Для швидкого виготовлення запасних частин для морського обладнання, що зменшує час простою та витрати на ремонт.



Рисунок 14 – Фото: морської дрон Sea Baby
(джерело: [37])



Рисунок 15 – Український дрон Magura V5
(джерело: фото [38])



Рисунок 16 – Підводний безпілотною «Марічка»
(джерело: [39]).

Висновки.

1. Трансформували підхід підприємств до виготовлення продукції, дозволяючи випускати саме ті вироби, які потрібні замовнику. Очікування споживачів також змінилися, адже тепер вони отримують товари значно швидше та ефективніше. Галузь 3D-друку є однією з найбільш динамічних і має потужний потенціал для подальшого розвитку.

2. Сьогодні дедалі більше промислових секторів починають інтегрувати технології 3D-друку у свої виробничі процеси, що свідчить про зростання їхнього значення для сучасної індустрії.

3. Унікальність 3D-друку полягає у здатності створювати складні геометричні форми та взаємопов'язані елементи без додаткової збірки. Це дає можливість виготовляти невеликі, але складні вироби з мінімальними витратами ресурсів та у стислі терміни.

4. Важливою перевагою є здатність розробляти та виробляти об'єкти найрізноманітніших форм без залучення спеціальних інструментів. Це забезпечує підприємствам вищий рівень гнучкості під час виробництва і дозволяє значно зменшити витрати.

5. Технологія 3D-друку активно стимулює розвиток інновацій і чудово підходить для індивідуалізованого налаштування продукції за потребою. Вона відкриває перед підприємствами можливості створювати вироби новими способами, практично без обмежень для уяви. Крім того, технологія здатна відновлювати застарілі конструкції, що є особливо цінним для галузей, де виробництво деталей уже припинене.

6. Використання 3D-друку на борту морських суден може суттєво змінити парадигму технічного обслуговування систем безпеки, підвищуючи оперативність, автономність і адаптивність морських операцій.

7. Адитивні технології демонструють стабільне зростання у світовому суднобудуванні та поступово переходять від прототипування до серійного виробництва критичних компонентів.

8. Найбільш перспективними напрямками в суднобудуванні є виготовлення корпусних конструкцій, гребних гвинтів та запасних частин на вимогу.

9. Основними бар'єрами впровадження є відсутність нормативної бази, стандартизації матеріалів і кваліфікованих кадрів.

10. Україна має значний потенціал розвитку адитивних технологій у суднобудуванні, але він потребує державної підтримки, створення нормативної бази та інвестицій у наукові дослідження.

11. Подальші наукові дослідження мають бути спрямовані на розвиток адитивних матеріалів, створення стандартів виробництва та тестування, а також на інтеграцію цифрових технологій моделювання та друку в загальну інфраструктуру.

ЛІТЕРАТУРА

1. Андрощук Г. О. Адитивні технології: перспективи і проблеми 3D-друку // Наука, технології, інновації. – 2017. – № 1. – С. 68–77.
2. Buswell R. A., Soar R. C., Penddlebury M., Gibb A. G., Edum-Fowte F. T., Thorpe T. Investigation of the potential for applying freeform processes to construction // Proceedings of the 3rd International Conference on Innovation in Architecture, Engineering and Construction (AEC). – Rotterdam, The Netherlands, 2005. – P. 141–150. – Режим доступу: <https://dspace.lboro.ac.uk/2134/10144>
3. Delgado D., Clayton P., O'Brien W. J., Seeper-sad C., Juenger M., Ferron R., Salamone S. Applications of additive manufacturing in the construction industry – A forward-looking review // Automation in Construction. – 2018. – № 89. – P. 110–119. – Режим доступу: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0926580517301620>
4. Paolini A., Kollmannsberger S., Rank E. Additive manufacturing in construction: A review on processes, applications, and digital planning methods // Additive Manufacturing. – 2019. – Vol. 141(9). – P. 1–13.
5. Sartipi F., Sartipi A. Brief review on advancements in construction additive manufacturing // Journal of Construction Materials. – 2020. – № 1. – P. 2–4.
6. Андрійчук О. В., Оласюк П. Я. Застосування 3D-технологій у будівництві // Сучасні технології та методи розрахунку в будівництві. – 2015. – Вип. 3. – С. 11–18.
7. Петришина А. А. Тенденції розвитку тривимірного друку, обладнання та матеріалів для нього // Актуальні задачі сучасних технологій: матеріали IV Міжнар. наук.-техн. конф. молодих учених та студентів (25–26 листопада 2015 р.). – Тернопіль, 2015. – С. 26–27.
8. Струтинська О. В. Сучасний стан і перспективи розвитку технологій тривимірного моделювання та друкування // Наук. часопис НПУ імені М. П. Драгоманова. Серія 2: Комп'ютерно-орієнтовані системи навчання. – 2018. – № 20. – С. 88–94.
9. Згалат-Лозинська Л. О., Згалат-Лозинський О. Б. Розвиток та впровадження інноваційних технологій 3D-друку у будівництві // Вчені записки Таврійського національного університету імені В. І. Вернадського. Серія: Економіка і управління. – 2020. – Т. 31 (70), № 5. – С. 45–51.

10. Шинський І. О., Дорошенко В. С. 3D-технології при литті по газифікованих моделях // Метал та лиття України. – 2009. – № 4–5. – С. 30–33.
11. Дорошенко В. С. Приклади 3D-технології в ливарному виробництві. Зниження металоємності виливків // Лиття та металургія. – 2016. – № 1. – С. 34–39.
12. Манжілевський О. Д., Іскович-Лотоцький Р. Д. Сучасні адитивні технології 3D друку. Особливості практичного застосування : навч. посіб. – Вінниця : ВНТУ, 2021. – 105 с. – ISBN 978-966-641-824-4.
13. Дорошенко В. С. Стан і тенденції розвитку ринку 3D-технологій як елементу цифровізації виробництва продукції з полімерів і металів // Світогляд. – 2021. – № 6 (92). – С. 44–48.
14. Exponential technologies in manufacturing [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.x-t.ai/>
15. Global Additive Manufacturing Market, Forecast to 2025 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://namic.sg>
16. Wohlers T. Wohlers report 2014: Additive manufacturing and 3D-printing state of the industry: Annual world-wide progress report. – Wohlers Associates, 2014. – 276 p.
17. Global Additive Manufacturing Market – Industry Size, Share, Trends and Forecast to 2032. – Data Bridge Market Research [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.databridgemarketresearch.com/reports/global-additive-manufacturing-market>
18. Ахновська І., Брацлавець О. Розвиток світового ринку адитивних технологій в умовах техноглобалізму // Цифрова економіка та економічна безпека. – 2022. – № 1 (01). – С. 36–42. – DOI: <https://doi.org/10.32782/dees.1-6>
19. Прогноз розвитку ринку порошків для 3D-друку до 2031 року [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.prometall.info/analitika/prognoz_razvitiya_rynka_poroshkov_dlya_3d_pechat_i_do_2031_goda
20. Як працює 3D-принтер: принципи, матеріали та технології [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://easy3dprint.com.ua/ru/kak-rabotaet-3d-printer/>
21. Data Bridge Market Research Market Analysis Study 2023 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.databridgemarketresearch.com/>
22. Технології 3D друку і у чому вони заключаються [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://3ddevice.com.ua/ru/tekhnologii-3d-pechat_i/
23. BS EN ISO 25178-2. – DIN Media, 2022-02-04 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.dinmedia.de>
24. Як 3D-технології використовують в суднобудуванні [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://arcadia.com.ua/kak-3d-tehnologii-ispolzuyut-v-sudostroenii>
25. У Франції створили гвинт за допомогою 3D-принтера [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://military.com/uk/news/u-frantsiyi-stvoryly-gvynt-za-dopomogoyu-3d-pryntera/>
26. Newport News Shipbuilding напечатал первый коллектор для авианосца USS Enterprise [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://sea-man.org/news/3d-pechat-kollektor.html>
27. 3D-друк більших та міцніших човнів: морський центр застосувань (MAC) CEAD [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://ceadgroup.com/maritime-application-center-mac/>
28. Американці друкують деталі кораблів на принтерах [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.originalam.net/articles/3d-detali-korablej.html>
29. В США на 3D-принтері надрукували 8-метровий катер [Електронний ресурс] // ЦТС з посиланням на Seanews. – 2019. – Режим доступу: https://cfts.org.ua/news/2019/10/21/v_ssha_na_3d_printere_napechatali_8_metrovyi_kater_video_55823
30. На військових кораблях будуть друкувати запчастини на 3D-принтері: як таке взагалі можливо [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://focus.ua/digital/559210-na-voennyh-korablyah-budut-pechatat-zapchasti-na-3d-printere>
31. 3D-друк використовується для оптимізації поставок морських запасних частин [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://3dprint.fidller.com/2023/11/16/3d-pechat-ispolzuyetsya-dlya-optimizatsii-postavok-morskikh-zapasnykh-chastey/>
32. Роль 3D-друку в інновації морської галузі [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.smart.md/ru/the-role-of-3d-printing-in-maritime-industry-innovations>
33. Кумунц Д. А., Пізінцалі Л. В. Аналіз розвитку 3D-друку в суднобудівній галузі // Проблеми і перспективи сталого розвитку транспорту : тези доповідей XIII Всеукр. наук.-практ. конф. студентів та молодих вчених (24 квітня 2025 р.). – Одеса : ОНМУ, 2025. – Ч. 1. – С. 23–29.
34. 3D-друк: плюси, мінуси та його роль в сучасному світі [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://fialan.ua/ua/news/vagno-znat/3d-druck-ta-biznes/>
35. Dimensional Research, 2019 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.dimensionresearch.com/>

36. Морські дрони, водневий двигун, революція у 3D друку металом, Arm vs Qualcomm та роботизовані шорти [Відео] // YouTube [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.youtube.com/watch?v=rATVmlK9j0g>
37. Служба безпеки України. Офіційний телеграм-канал [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://t.me/SBUkr>
38. УНІАН. Інформаційне агентство [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.unian.net/>
39. Українські національні новини (УНН) [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://unn.ua/>

REFERENCES

1. Androshchuk H.O. Adytyvni tekhnolohii: perspektyvy i problemy 3D-druku [Additive technologies: Prospects and problems of 3D printing], Nauka, tekhnolohii, innovatsii, No. 1, pp. 68–77, 2017. (Ukr.)
2. Buswell R.A., Soar R.C., Pendlebury M., Gibb A.G., Edum-Fowte F.T., Thorpe T. Investigation of the potential for applying freeform processes to construction, Proceedings of the 3rd International Conference on Innovation in Architecture, Engineering and Construction (AEC), Rotterdam, The Netherlands, pp. 141–150, 2005. Available at: <https://dspace.lboro.ac.uk/2134/10144> (Eng.)
3. Delgado D., Clayton P., O'Brien W.J., Seeper-sad C., Juenger M., Ferron R., Salamone S. Applications of additive manufacturing in the construction industry – A forward-looking review, Automation in Construction, No. 89, pp. 110–119, 2018. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0926580517301620> (Eng.)
4. Paolini A., Kollmannsberger S., Rank E. Additive manufacturing in construction: A review on processes, applications, and digital planning methods, Additive Manufacturing, Vol. 141(9), pp. 1–13, 2019. (Eng.)
5. Sartipi F., Sartipi A. Brief review on advancements in construction additive manufacturing, Journal of Construction Materials, No. 1, pp. 2–4, 2020. (Eng.)
6. Andriichuk O.V., Olasiuk P.Ya. Zastosuvannia 3D-tekhnolohii u budivnytstvi [Application of 3D technologies in construction], Suchasni tekhnolohii ta metody rozrakhunku v budivnytstvi, Issue 3, pp. 11–18, 2015. (Ukr.)
7. Petryshyna A.A. Tendentsii rozvytku tryvymirnogo druku, obladnannia ta materialiv dlia noho [Trends in the development of 3D printing, equipment and materials], Aktualni zadachi suchasnykh tekhnolohii: materialy IV Mizhnarodnoi naukovo-tekhnichnoi konferentsii molodykh uchenykh ta studentiv (Ternopil, 25–26 November 2015), pp. 26–27, 2015. (Ukr.)
8. Strutynska O.V. Suchasnyi stan i perspektyvy rozvytku tekhnolohii tryvymirnogo modeliuvannia ta drukuvannia [Current state and prospects of 3D modeling and printing technologies], Naukovyi chasopys NPU imeni M.P. Drahomanova. Serii 2: Kompiuterno-orientovani systemy navchannia, No. 20, pp. 88–94, 2018. (Ukr.)
9. Zhalat-Lozynska L.O., Zhalat-Lozynskyi O.B. Rozvytok ta vprovadzhennia innovatsiinykh tekhnolohii 3D-druku u budivnytstvi [Development and implementation of innovative 3D printing technologies in construction], Vcheni zapysky Tavriiskoho natsionalnoho universytetu imeni V.I. Vernadskoho. Serii: Ekonomika i upravlinnia, Vol. 31(70), No. 5, pp. 45–51, 2020. (Ukr.)
10. Shynskyi I.O., Doroshenko V.S. 3D-tekhnolohii pry litti po hazifikovanykh modeliakh [3D technologies in casting on gasified models], Metal ta littia Ukrainy, No. 4–5, pp. 30–33, 2009. (Ukr.)
11. Doroshenko V.S. Pryklady 3D-tekhnolohii v lyvarnomu vyrobnytstvi. Znizhennia metaloiemnosti vylivkiv [Examples of 3D technology in foundry production: Reducing metal consumption of castings], Lyttia ta metalurii, No. 1, pp. 34–39, 2016. (Ukr.)
12. Manzhilevskyi O.D., Iskovych-Lototskyi R.D. Suchasni adytyvni tekhnolohii 3D druku. Osoblyvosti praktychnoho zastosuvannia [Modern additive 3D printing technologies: Features of practical application], Vinnytsia: VNTU, 105 p., 2021. ISBN 978-966-641-824-4. (Ukr.)
13. Doroshenko V.S. Stan i tendentsii rozvytku rynku 3D-tekhnolohii yak elementu tsyfrovizatsii vyrobnytstva produktsii z polymeriv i metaliv [State and trends in the development of the 3D technology market as an element of digitalization of polymer and metal products manufacturing], Svitohliad, No. 6(92), pp. 44–48, 2021. (Ukr.)
14. Exponential technologies in manufacturing [Electronic resource]. Available at: <https://www.x-t.ai/> (Eng.)
15. Global Additive Manufacturing Market, Forecast to 2025 [Electronic resource]. Available at: <http://namic.sg> (Eng.)
16. Wohlers T. Wohlers report 2014: Additive manufacturing and 3D-printing state of the industry: Annual world-wide progress report, Wohlers Associates, 276 p., 2014. (Eng.)
17. Global Additive Manufacturing Market – Industry Size, Share, Trends and Forecast to 2032 [Electronic resource], Data Bridge Market Research. Available at: <https://www.databridgemarketresearch.com/reports/global-additive-manufacturing-market> (Eng.)

18. Akhnovska I., Bratslavets O. Rozvytok svitovoho rynku adytyvnykh tekhnologii v umovakh tekhnogloballyzmu [Development of the global additive technology market in the conditions of technoglobalism], *Tsifrova ekonomika ta ekonomichna bezpeka*, No. 1(01), pp. 36–42, 2022. DOI: <https://doi.org/10.32782/dees.1-6>. (Ukr.)
19. Prohnoz rozvytku rynku poroshkov dlia 3D-druku do 2031 roku [Forecast of the development of the 3D printing powders market until 2031] [Electronic resource]. Available at: https://www.prometall.info/analitika/proghnoz_razvitiya_rynka_poroshkov_dlya_3d_pechati_do_2031_goda (Ukr.)
20. Yak pratsiuie 3D-printer: pryntsyipy, materialy ta tekhnologii [How a 3D printer works: Principles, materials and technologies] [Electronic resource]. Available at: <https://easy3dprint.com.ua/ru/kak-rabotaet-3d-printer/> (Ukr.)
21. Data Bridge Market Research Market Analysis Study 2023 [Electronic resource]. Available at: <https://www.databridgemarketresearch.com/> (Eng.)
22. Tekhnologii 3D druku i u chomu vony zakliuchaiutsia [3D printing technologies and what they are] [Electronic resource]. Available at: <https://3ddevice.com.ua/ru/tekhnologii-3d-pechati/> (Ukr.)
23. BS EN ISO 25178-2, DIN Media, 2022-02-04 [Electronic resource]. Available at: <https://www.dinmedia.de> (Eng.)
24. Yak 3D-tekhnologii vykorystovuiut v sudnobudivnytstvi [How 3D technologies are used in shipbuilding] [Electronic resource]. Available at: <https://arcadia.com.ua/kak-3d-tehnologii-ispolzuyut-v-sudostroenii> (Ukr.)
25. U Frantsii stvoryly hvynt za dopomohoiu 3D-printera [A propeller was created in France using a 3D printer] [Electronic resource]. Available at: <https://military.com/uk/news/u-frantsii-stvoryly-gvynt-za-dopomogoyu-3d-pryntera/> (Ukr.)
26. Newport News Shipbuilding napiechatav pershyi kollektor dlia aviainostsia USS Enterprise [Newport News Shipbuilding printed the first manifold for the aircraft carrier USS Enterprise] [Electronic resource]. Available at: <https://seaman.org/news/3d-pechat-kollektor.html> (Eng.)
27. 3D-druk bilshykh ta mitsnishykh chovniv: Morskyi tsentr zastosovan (MAC) CEAD [3D printing of larger and stronger boats: Maritime Application Center (MAC) CEAD] [Electronic resource]. Available at: <https://ceadgroup.com/maritime-application-center-mac/> (Eng.)
28. Amerykantsi drukuiut detali korabliv na printerakh [Americans print ship parts on printers] [Electronic resource]. Available at: <https://www.originalam.net/articles/3d-detali-korablej.html> (Ukr.)
29. V SSHA na 3D-printeri nadrukuvaly 8-metrovyi kater [An 8-meter boat was 3D printed in the USA] [Electronic resource] // CTS z posylanniam na Seanews, 2019. Available at: https://cts.org.ua/news/2019/10/21/v_ssha_na_3d_printere_napechatali_8_metrovyy_kater_video_55823 (Ukr.)
30. Na viiskovykh korabliakh budut drukuvaty zapchastyny na 3D-printeri: yak take vzahali mozhlyvo [Spare parts will be printed on 3D printers on warships: How is this possible] [Electronic resource]. Available at: <https://focus.ua/digital/559210-na-voennyh-korablyah-budut-pechatat-zapchasti-na-3d-printere> (Ukr.)
31. 3D-druk vykorystovuietsia dlia optymizatsii postavok morskikh zapasnykh chastei [3D printing is used to optimize the supply of marine spare parts] [Electronic resource], 16 November 2023. Available at: https://3dprint.fidller.com/2023/11/16/3d-pechat_ispolzuyetsya-dlya-optimizatsii-postavok-morskikh-zapasnykh-chastei/ (Eng.)
32. Rol 3D-druku v innovatsii morskoiu haluzi [The role of 3D printing in maritime industry innovations] [Electronic resource]. Available at: <https://www.smart.md/ru/the-role-of-3d-printing-in-maritime-industry-innovations> (Eng.)
33. Kumunts D.A., Pizintsali L.V. Analiz rozvytku 3D-druku v sudnobudivnii haluzi [Analysis of the development of 3D printing in the shipbuilding industry], *Tezy dopovidei XIII Vseukrainskoi naukovo-praktychnoi konferentsii studentiv ta molodykh vchenykh “Problemy i perspektyvy staloho rozvytku transportu”* (Odessa, 24 April 2025), Part 1, pp. 23–29, 2025. (Ukr.)
34. 3D-druk: pliusy, minusy ta ioho rol v suchasnomu sviti [3D printing: Pros, cons and its role in the modern world] [Electronic resource]. Available at: <https://fialan.ua/ua/news/vagno-znat/3d-druck-ta-biznes/> (Ukr.)
35. Dimensional Research, 2019 [Electronic resource]. Available at: <https://www.dimensionalresearch.com/> (Eng.)
36. Morski drony, vodnevyy dvygun, revoliutsiia u 3D-druku metalom, Arm vs Qualcomm ta robotyzovani shorts [Maritime drones, hydrogen engine, revolution in 3D metal printing, Arm vs Qualcomm and robotic shorts] [Video] [Electronic resource]. Available at: <https://www.youtube.com/watch?v=rATVmlK9j0g> (Eng.)
37. Sluzhba bezpeky Ukrainy. Ofitsiinyi Telegram-kanal [Security Service of Ukraine. Official Telegram channel] [Electronic resource]. Available at: <https://t.me/SBUkr> (Ukr.)
38. UNIAN. Informatsiine ahentstvo [UNIAN. Information agency] [Electronic resource]. Available at: <https://www.unian.net/> (Ukr.)
39. Ukrainski natsionalni novyny (UNN) [Ukrainian National News (UNN)] [Electronic resource]. Available at: <https://unn.ua/> (Ukr.)

Rossomakha O., Pizintsali L., Rossomakha O., Aleksandrovska N.

**ADDITIVE TECHNOLOGIES IN SHIPBUILDING AND SHIP REPAIR:
WORLD EXPERIENCE AND PROSPECTS OF IMPLEMENTATION IN UKRAINE**

The article discusses the current state and prospects of additive technologies in global shipbuilding. It shows that 3D printing is gradually moving from prototyping to the manufacture of full-fledged structural elements, including hull parts, propellers and spare parts. The international experience of leading companies (Naval Group, Newport News Shipbuilding, CEAD) in the application of additive technologies is analysed, as well as the dynamics of the global market, which is forecast to grow from \$91.84 billion in 2024 to \$419.22 billion in 2032. The key factors hindering the widespread introduction of 3D printing in the shipbuilding industry have been identified: the lack of a developed regulatory framework, standardisation and certification of materials, a limited number of qualified personnel and the high cost of equipment. The paper systematises information on the types of materials used in shipbuilding (aluminium, titanium and polymer alloys) and describes their advantages and limitations. Emphasis is placed on the prospects for the introduction of additive technologies in Ukraine, which has significant potential for development but lags significantly behind the world's leading players. The scientific novelty of the article lies in the comprehensive generalisation of international experience in the use of 3D printing specifically in the maritime industry, whereas most previous studies have focused on construction and aviation. The practical significance of the results obtained lies in the possibility of using them to develop a national strategy for the integration of additive technologies into the shipbuilding industry of Ukraine, the creation of industry standards and training programmes for specialists. It is concluded that the active introduction of 3D printing in shipbuilding can reduce production costs, shorten the delivery times for spare parts and increase the innovative potential of the industry.

Keywords: additive technologies, 3D printing, 3D printer, shipbuilding, modern materials

Стаття прийнята 15.09.2025

© Муравйов Г. М., Маркітан В. В., Перевертов Д. С.

ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ОТРИМУВАННЯ ПОВОРОТУ АВТОНОМНОГО СУДНА НА ОБШИРНОМУ МІЛКОВОДДІ

Метою цього дослідження є визначення та підтвердження параметрів моделі автономного судна на обширному мілководді шляхом імітаційного моделювання способом несиметричний зигзаг процесу маневрування для визначення впливу на параметри його руху. Через складні гідродинамічні ефекти в умовах обмеженої глибини, такі як зменшений під кильовий просвіт, підвищений опір та змінені схеми обтікання, змінюється стійкість на курсі. Тому автономні навігаційні системи потребують високоточного планування для організації безаварійного маневрування та безпечної експлуатації судна під час перевезення вантажу. Дослідження вирішує ці проблеми шляхом імітаційного моделювання впливу мілководдя на параметри повороту та його отримування у вигляді емпіричних залежностей. Це дозволило значно підвищити точність планування траєкторних точок і дало можливість використовувати системи підтримки прийняття рішень при маневруванні та використовувати оперативні способи контролю руху способом динамічного позиціонування, приймаючи траєкторні точки як віртуальні буї. При імітаційному моделюванні повороту використовувалась зміна глибини моря, початкового курсу та швидкості судна для оцінки часу затримання початку повороту та відхилення від планової траєкторії. Моделювання продемонструвало, що зі зменшенням глибини води радіус повороту та тактичний діаметр автономного судна значно збільшуються, що помітно впливає на стійкість курсу та затримку реакції. Система управління на основі створеної моделі змогла адаптувати команди траєкторії в режимі реального часу, мінімізуючи відхилення від запланованих траєкторних точок. Модель точно фіксувала асиметричні схеми повороту, типові для мілководдя, та покращувала прогностичні можливості алгоритмів автономної навігації в обмежених умовах. Результати виконаних досліджень підтверджують, що включення динаміки мілководдя до циклу прийняття рішень автономної навігаційної системи значно підвищує безпеку маневрування та точність траєкторії. Розроблена імітаційна модель, яка використовує несиметричний зигзаг, забезпечує надійну основу для майбутніх алгоритмів маневрування та управління рухом в режимі реального часу. Ця структура сприяє безпечнішій та ефективнішій автономній роботі в портах, а також створює умови для подальшої інтеграції прогностного управління на автономних судах.

Ключові слова: автономне судно, маневрування на мілководді, моделювання поворотів, адаптивна навігація, ефект просідання, управління траєкторією, імітаційне гідродинамічне моделювання способом несиметричний зигзаг.

Вступ. Швидкий розвиток та інтеграція морських електронних навігаційних карт на ходовому містку автономних надводних суден (MASS), створили нові можливості та виклики в галузі сучасного морського транспорту. Одним з найактуальніших питань у цій галузі є аналіз поведінки автономного судна під час маневрування на глибокій воді та обширному мілководді. Ефективна автоматизація цього процесу є важливою для організації безпечного маневрування, експлуатаційної ефективності та здатності судна відповідно реагувати на динамічні та часто непередбачувані умови навколишнього середовища. Проблема стає особливо гострою в умовах обширного мілководдя, де маневрування, особливо під час поворотів, ускладнюються гідродинамічними обмеженнями, такими як зменшення запасу води під кілем, збільшення опору та просідання при нелінійній взаємодії між корпусом та морським дном.

У таких умовах координатне планування не може використовувати статичні моделі маршрутизації; натомість воно повинно базуватися на даних у режимі реального часу. При цьому судно повинно змушене не лише точно враховувати параметри навколишнього середовища, але й адаптувати свій рух

для підтримки безпечних дистанцій до навігаційних небезпек та оптимізації управління маневруванням власного судна з урахуванням зміни глибини, течій та щільності руху зустрічних суден. Ця потреба підкреслює наукову та практичну важливість удосконалення механізмів автоматизації при оперативному координатному плануванні, особливо для маневрування в стиснених водах та аварійно небезпечних ділянках переходу.

Автономні судна, хоча й дедалі частіше використовуються в судноплавній галузі, зустрічаються з критичними проблемами безпеки, особливо в контексті мілководдя, де традиційні моделі планування координат та управління рухом, оптимізовані для глибоких вод, не справляються. Поворот на мілководді є особливо складною операцією через посилений вплив просідання, асиметричного потоку води, яка обтікає корпус судна, та затримка реакції його корпусу на перекладку руля. Щоб вирішити ці проблеми, це дослідження зосереджується на моделюванні маневрів повороту, а також побудови діаграм управління та розрахунку коефіцієнтів на мілководді для кожного параметру повороткості, шляхом використання імітаційного моделювання на навігаційному тренажері, як компонента покращеного координатного планування. Інтегруючи гідродинамічні ефекти мілководдя в архітектуру управління автономним судном, модель дозволяє адаптивне прийняття рішень, що покращує точність траєкторії та зменшує навігаційні ризики. Результати цієї роботи спрямовані на підтримку безпечніших та ефективніших автономних операцій суден на мілководді, тим самим сприяючи досягненню ширших цілей сталого розвитку, навігаційної надійності та інновацій у автономних суден морського транспорту.

Об'єкт і предмет дослідження. Об'єктом дослідження є процес руху автономних надводних суден на обширному мілководді. Тому організація навігаційної безпеки в таких районах характеризується складністю через вплив мілководдя на стан судна, маневрені характеристики та його рух, обмеження суднохідної акваторії маневрування, та підвищений ризик посадки на мілину або зіткнення з другими суднами. Такий вплив мілководдя вимагає підвищеного рівня навігаційної точності визначення параметрів руху та адаптивності, який перевищує традиційні методології планування маршруту на глибокій воді, особливо для суден, що працюють без прямого людського контролю на судні.

Предметом дослідження є визначення параметрів повороткості і отримання повороту шляхом імітаційного моделювання несиметричного зигзагу і його використання при плаванні автономного судна в умовах мілководдя, з особливим акцентом на покращення стратегій координатного планування та управління. Поворот є одним з найвимогливіших маневрів у контексті мілководдя, через нелінійний та глибинно-залежний характер гідродинамічних взаємодій. Предмет дослідження охоплює розробку та випробування імітаційної моделі, яка включає зворотний зв'язок щодо навколишнього середовища в режимі реального часу, ефекти просідання, зміни опору, викликані глибиною, та адаптивні механізми прийняття рішень. У дослідженні також розглядається, як удосконалені системи планування координат, інтегровані в контур управління маневруванням, можуть підтримувати автономне прийняття рішень під час маневрування в обмежених стиснених умовах. Це включає оцінку того, як прогнозування траєкторії, управління рулем/рульовим механізмом та корекцію курсу через зменшення глибини води та змінної топографії морського дна.

Ефективність цих алгоритмів управління оцінюється за допомогою верифікації, шляхом імітаційного моделювання, для відображення реалістичних сценаріїв мілководдя. Дослідження безпосередньо сприяє вирішенню практичних проблем автономної роботи в неідеальних умовах, розділу науки, який все ще недостатньо представлений в сучасних рамках MASS. Аналізуючи процес повороту в ширшому контексті циклу рейсу, дослідження підтримує розвиток інтелектуальних систем планування координат руху при маневруванні, здатних підтримувати високий рівень безпеки, надійності та енергоефективності. Зрештою, ця робота спрямована на подолання розриву, між теоретичними моделями планування процесу маневрування та фактичним маневруванням, підтримуючи перехід MASS від випробувань у відкритому морі до складних реальних умов стиснених вод, таких як порти та припортові райони.

Мета і задачі дослідження. Метою статті являється виконання експерименту імітаційного моделювання, детальний аналіз його результатів та побудова діаграм керованості і характеристик отримання поворотів, а також розрахунок емпіричних коефіцієнтів, які необхідні для визначення

параметрів діаграми керованості, зони її нестійкості та характеристик кута та часу отримання поворотів на обширному мілководді. Мета дослідження потребує виконати наступні завдання:

1. Виконання імітаційного моделювання маневрування автономного судна на обширному мілководді з використанням навігаційного тренажера.

2. Розрахунок коефіцієнтів мілководдя для визначення зони нестійкості, параметрів отримування повороту і побудова діаграм керованості для автономного судна на обширному мілководді і їх використання.

3. Розробка змістовної моделі маневрування автономного судна з урахуванням використання діаграм керованості у вигляді удосконаленої таблиці ШТ.

Аналіз літературних джерел. Перехід на електронні карти суден всього світу з 2018 року, призвів до розробки маневреного буклета і представлення даних про маневрені властивості судна у вигляді двох таблиць, характеристик гальмування і повороткості для стану в баласті і вантажі, які зручні для використання в навігаційному комп'ютері і компактні [1]. В цьому разі всі дані про маневрені характеристики представлені у вигляді таблиць гальмування і повороткості для стану у вантажі і баласті і поміщаються на двох листках паперу формату А4. Для визначення маневрених характеристик для поточного стану в рейсовому циклі, необхідно інтерполювати параметри по даним таблиць у вантажі та баласті і вводити в навігаційний комп'ютер відповідні дані.

У статті [2] представлено технічне та аналітичне дослідження реакцій на зигзагоподібний маневр у спрощених лінійних моделях руху судна по осі Х. Це дослідження сприяє фундаментальному розумінню динаміки судна, зокрема в контексті керування та маневреності, які є вирішальними як для звичайних, так і для автономних навігаційних систем. У статті розглядаються математичні та фізичні особливості, що виникають під час застосування лінійних диференціальних рівнянь для моделювання зигзагоподібних маневрів — стандартного тесту для оцінки маневрених можливостей судна. Хоча лінійні моделі широко використовуються на ранніх стадіях проектування управління та аналізу руху судна, завдяки своїй простоті та обчислювальній ефективності, вони часто недостатньо досліджуються на предмет поведінки на межі або постійної часу затримки повороту і реакції судна на управляючі дії.

Стаття має на меті заповнити недолік знань про особливості управління в умовах мілководдя, шляхом виявлення та аналізу конкретних аномалій та обмежень параметрів маневрування, що виникають у цих моделях під час моделювання зигзагоподібного руху. Автор досліджує динаміку ризику, використовуючи лінійну модель Номото (версії першого та другого порядку), застосовуючи її для моделювання стандартних зигзагоподібних тестів.

Порівнюючи результати моделювання та оцінюючи фазові співвідношення між вхідними даними руля та реакцією судна на ризику, дослідження систематично дозволяє визначити випадки, коли параметри моделі відрізняються від очікуваного значення або фізично реалістичної поведінки. Особлива увага приділяється випадкам неколивального руху та затримки стаціонарної реакції, що може спотворювати інтерпретацію характеристик керованості судна. У статті встановлено, що певні налаштування параметрів у лінійних моделях, можуть призводити до особливої або неінтуїтивної поведінки під час зигзагоподібного моделювання, а саме затримка початку реакції судна на перекладку руля, або завищена здатність до повороту, чутливість до налаштування параметрів, коли невеликі зміни гідродинамічних коефіцієнтів суттєво впливають на параметри руху і моделі. У дослідженні наголошується, що хоча лінійні моделі можуть забезпечити базове якісне уявлення, їх слід використовувати з обережністю в дослідженнях маневреності, особливо під час проектування або перевірки алгоритмів авторульового та управління для реальних або автономних суден.

Таким чином визначено, що використання виключно лінійних моделей руху по осі ризику може призвести до оманливих висновків в оцінках маневреності. Для високоточних застосувань, таких як автономне управління судном або точні середовища моделювання, слід розглядати нелінійне моделювання або гібридні підходи.

Стаття [3] є знаковим внеском у галузь маневрування та управління суднами. Автор створив систематичну основу для інтерпретації результатів стандартних маневрених випробувань, зокрема симетричного зигзагоподібного тесту 20x20x20, за допомогою спрощеного математичного моделювання. Основною метою цієї роботи було перетворити емпіричні оцінки рульового управління

на кількісно вимірювану та повторювану процедуру, яку можна було б використовувати для оцінки та порівняння різних конструкцій суден та їхніх характеристик поворотності. В основі роботи лежить концепція абстрагування динаміки ризикання судна в лінійну модель, яка могла б приблизно описати, як судно реагує на перекладку руля з часом. Він проаналізував стандартний зигзагоподібний маневр Кемпфа та запропонував ідею моделювання поведінки судна щодо ризикання за допомогою спрощеного набору параметрів, які могли б описати курсову стійкість та реакцію судна на поворот. Ця модель дозволила виразити основну поведінку рульового управління судном, використовуючи лише кілька ключових показників, тим самим значно спростивши процес визначення маневрених характеристик. Одним із головних внесків була пропозиція «індексів якості управління» — параметрів, які об'єктивно кількісно оцінюють характеристики повороту судна, включаючи час затримки реакції судна на перекладку руля, початкового курсу.

Незважаючи на лінійний характер моделі, підхід автора виявився ефективним для фіксації основної динаміки багатьох традиційних суден, особливо в умовах спокійної води та низької швидкості. Хоча модель не враховує нелінійну поведінку, вплив мілководдя або збурення навколишнього середовища, її цінність полягає в забезпеченні стабільної еталонної моделі для раннього аналізу та налаштування системи управління. Сьогодні, в контексті MASS (морських автономних надводних суден), модель Номото часто вбудовується в середовища моделювання вищого порядку або використовується як спрощений прогностичний контролер у навігаційних системах на основі штучного інтелекту.

У роботі [4] виконано критичний аналіз параметрів маневреності, зокрема коефіцієнта посилення Номото та індексів маневрування Норбіна, у поведінці суден під час повороту. Метою дослідження є аналіз впливу коефіцієнта посилення Номото (K) та індексів маневрування Норбіна на реакцію судна на поворот з метою підвищення точності прогнозування в навігаційних тренажерах маневрування. Досліджуючи математичну та фізичну значущість цих параметрів, дослідження сприяє кращому розумінню курсової стійкості та чутливості управління судном.

Аналіз автора використовує дані маневрування, які зазвичай отримуються зі стандартних тестових маневрів, таких як траєкторії повороту, та використовує модель Номото для отримання значень посилення, які представляють реакцію на ризикання на одиницю вхідного сигналу перекладки руля. У дослідженні також приведені індекси Норбіна, які пропонують додаткове розуміння якісної поведінки траєкторій повороту, зокрема того, наскільки різко та послідовно судно реагує на команди руля. Підхід є значною мірою порівняльним та аналітичним: автор оцінює різні значення цих параметрів та оцінює їхній вплив на радіус повороту, просування та тактичний діаметр. Коефіцієнт підсилення Номото безпосередньо впливає на те, наскільки швидко судно починає повертати у відповідь на команду руля. Більше підсилення відповідає швидшій реакції, але також може вказувати на меншу курсову стійкість.

Спільне використання параметрів Номото та Норбіна дозволяє отримати більш точне значення маневрених характеристик судна, особливо під час критичних маневрів, таких як поворот у стиснених водах. У контексті вдосконалення маневрування автономних суден такі параметри можуть служити основними змінними налаштуваннями для систем автокерма або алгоритмів управління на основі використання штучного інтелекту.

У статті [5] представлено розробку інструменту прогнозування маневрування, спеціально розробленого для торговельних суден, зосереджуючись на підвищенні точності та ефективності прогнозування поведінки судна під час стандартних маневрових операцій. Метою дослідження є покращення прийняття рішень у навігації та управлінні за допомогою інструменту на основі моделей, який може прогнозувати траєкторію та характеристики повороту судна за різних експлуатаційних умов. Автори використовують гідродинамічні моделі засновані на лінійних або напівемпіричних моделях, таких як модель Номото або її похідні, для моделювання маневрової поведінки судна, такої як круги повороту та зигзагоподібні випробування. Інструмент прогнозування включає основні вхідні параметри, такі як кут повороту керма, швидкість судна та початковий курс, для обчислення очікуваних траєкторних реакцій. Інструмент дозволяє швидко та надійно моделювати маневрування торговельних суден, допомагаючи операторам суден, конструкторам та морським інженерам оцінювати маневреність без проведення масштабних фізичних випробувань. Хоча інструмент є ефективним, він обмежений у

врахуванні нелінійної гідродинамічної поведінки, такої як та, що виникає при великих кутах керма, на мілководді або в умовах асиметричного навантаження.

У роботі [6] представлено стандартний метод Modular Mathematical Model Group (MMMG) — підхід до прогнозування маневрової поведінки судна. Розроблений як спільна платформа для досліджень маневрування, особливо при використанні методу MMMG забезпечує модульну структуру, яка дозволяє адаптуватися до процесу руху та точно прогнозувати координати судна під час таких маневрів, як поворотні кола, зигзагоподібні випробування та зупинки при аварійному збої. Метою дослідження є отримання параметрів системи управління маневруванням та складових елементів для валідації моделі MMMG. Вона базується на концепції модульності, де гідродинамічні сили, що діють на корпус, гвинт та руль моделюються окремо. Кожен компонент аналізується на основі емпіричних даних, теоретичних формулювань або експериментальних випробувань (наприклад, випробування модельного басейну), що дозволяє використовувати більшу частину налаштування для різних типів та конфігурацій суден. У статті наведено вичерпне пояснення рівнянь руху, моделей гідродинамічних сил, а також того, як вони виводяться та налаштовуються. У ньому підкреслюється, що модель MMMG дозволяє реалістично моделювати маневрену поведінку судна, зберігаючи при цьому управляєму складність, що робить її придатною для застосування як під час аналізу на стадії проектування, так і при розробці систем управління в реальному часі. Вона підтримує точне відтворення стандартних маневрених випробувань ІМО та розширюється для складніших умов, таких як мілководдя, вплив вітру або течій. Для вдосконалення методів маневрування автономних суден модель MMMG є однією з найбільш підходящих та надійних моделей маневрування. Вона пропонує точність, необхідну для безпечного прогнозування траєкторії та калібрування логіки управління, особливо під час низько швидкісних, високоточних маневрів, таких як швартування, поворот у обмежених водах або дії по ухиленню від зіткнення.

Теорія і практика безпечного управління судном і його експлуатацією, як відмічається в роботі [7] присвячена проблемі маневрування суден, його плануванні, включаючи криволінійні траєкторії. Показано, що це вимагає застосування змістовних та формалізованих моделей при плануванні координат руху та високоточного управління маневруванням для забезпечення гарантованої безпеки судноплавства. Уточнюються характеристики елементів маневрування, їх взаємозв'язок і відносини для розширення теоретичних знань. Обговорюються загальні принципи синтезу складних систем підтримки прийняття рішень в екстремальних ситуаціях.

Підкреслюється, що процес організації перевезення вантажів є складним багатоплановим процесом, який формується під впливом багатьох аспектів, таких як: науковий; технологічний; технічний; ергономічний; економічний; екологічний; соціальний та юридичний.

Науковий аспект домінує при розробці нормативних документів, змістовних і формалізованих моделей управління процесом експлуатації судна.

Технологічний аспект - при забезпеченні безпечного дотримання технології виробничих робіт під час експлуатації судна, так як навіть досить ретельно розроблені технологічні нормативи, через конструктивні недоробки, порушення технологічних вимог, недостатнього контролю над безпекою мореплавства з боку екіпажу і берегових служб призводять, як правило, до аварійної ситуації.

Технічний аспект управління включає забезпечення безвідмовної роботи судових технічних засобів, оскільки сучасні судна представляють складні інформаційно-енергетичні та ресурсні комплекси, що знижують рівень надійності, змушуючи резервувати та дублювати механізми та пристрої.

Ергономічний аспект управління забезпечує оптимальне розподіл ступеня участі у виробничій діяльності людини та технічних засобів, спрямоване на оптимізацію режимів роботи транспортного процесу.

Юридичний аспект управління визначає роль та відповідальність учасників транспортного процесу, розробку відповідної нормативної документації з безпеки судноплавства.

Соціальний аспект управління викликаний необхідністю використання водного простору як транспортної артерії та джерела отримання ресурсів для забезпечення життєдіяльності.

Науковий, технічний і технологічний аспекти в сукупності формують вимоги до характеристик і конструктивних особливостей судна.

Навігаційна безпека є основним параметром, який характеризує експлуатацію порту, і є найважливішою умовою ефективної його експлуатації, відмічається в роботі [8]. У свою чергу, морські порти вимагають особливого підходу до організації безпечної їх експлуатації. Досить багато аварій в портах відбуваються через неузгодженість в діях учасників багато операторної системи управління маневруванням судна, що включає: капітана судна; капітанів буксирів; обслуговуючого персоналу порту; берегової системи управління рухом і недостатньої точності планування координат шляху руху судном і лоцманської службою при заході / виході.

У портах і на підводних водних шляхах вплив зовнішніх навігаційних факторів може призвести до виникнення навігаційних аварій через обмежений простір для маневрування суден і інтенсивного судноплавства. Використовуючи моделі організації руху, що застосовуються у відкритому морі, ці інциденти можна прогнозувати заздалегідь. Однак методика планування шляху у відкритому морі не може бути використана при заході/виході з порту. Для планування координат при заході/виході з порту повинні використовуватись високоточні способи планування шляху траєкторними точками по координатах шляхових точок, знання маневрених характеристик для поточного стану судна, яке заходить, ступені мілководдя і геометрії акваторії порту для маневрування. Для верифікації запропонованих моделей було проведено натурні радіолокаційні спостереження береговими засобами порту Чорноморськ за траєкторіями руху суден при заході та виході з порту. Але дані про мілководдя при маневруванні суден не розглядалися.

У роботі [9] описується автоматизація процесу планування координат шляху автономного судна в рейсовому циклі з урахуванням зовнішніх і внутрішніх факторів, що впливають на рух. Розглядається організація маневрування в складних умовах плавання, робота в перевантажених зонах та оптимізація маршруту для підвищення безпеки і ефективності перевезень. Висвітлюються особливості використання сучасних сенсорів, навігаційних систем і технологій автоматизації для забезпечення надійного управління судном. Наведено огляд рішень щодо врахування навігаційних ризиків, визначення шляхових і траєкторних точок, а також аналіз технічних, навігаційних і кібернетичних ризиків. Описано принципи побудови схем маневрування, підготовки до рейсу та організації безпечного проходження аварійно небезпечних районів із урахуванням характеристик судна та умов плавання.

Науковий аспект – розробка алгоритмів планування координат (RRT*, квадродрева, графіка видимості) з підвищеною точністю та врахуванням навігаційних ризиків, а також вивчення моделей для аналізу навігаційної ситуації (математичні моделі, фільтр Калмана, ПД-регулятор).

Технологічний аспект включає забезпечення автоматизацією процесу прокладки маршруту та маневрування замість ручної роботи штурмана та використання алгоритмів для уникнення зіткнень та роботи в перевантажених зонах (порти, вузькі протоки).

Технічний аспект враховує опис датчиків і систем автономного керування, резервування функцій та дублювання обладнання для підвищення надійності та врахування технічних параметрів судна при побудові маршруту.

Соціальний аспект викликаний зменшенням людського фактору в судноплавстві й підвищення безпеки для екіпажу та навколишніх суден.

Юридичний аспект – у роботі згадується про відповідальність у контексті управління ризиками та кіберзагроз з використанням норм ІМО чи національних регламентів.

Науковий, технічний і технологічний аспекти в сукупності формують вимоги до характеристик і конструктивних особливостей судна.

У роботі [10] описується розробка та випробування системи управління автономними суднами, побудованої на основі оцінки ризиків у режимі реального часу. Розглядається ієрархічна структура контролю, що включає модулі навігації, автоматичного керування та управління силовими установками, які взаємодіють через наглядний ризик-контролер. Наведено підхід до виявлення небезпечних подій і прогнозування ризику з використанням моделей стану, інтегрованих з даними навігаційних карт та сенсорів. Пояснюються режими роботи судна, алгоритми реагування на зміну рівня ризику та способи перевірки безпеки за допомогою моделювання й формальних методів. Окрема увага приділяється можливостям адаптивного управління, тестуванню системи в різних сценаріях і забезпеченню безпечної взаємодії між автоматизованими системами та оператором.

Науковий аспект - використання методології STPA для ідентифікації небезпечних подій і Bayesian Belief Network для побудови онлайн-моделі ризику й розробка підходу до інтеграції ризик-орієнтованих моделей у системи високорівневого контролю (Supervisory Risk Controller, SRC).

Технологічний аспект – створення ENC-модуля для автоматичної обробки електронних навігаційних карт і врахування відстані до мілководдя/берега, автоматичне тестування контролера з симуляціями для виявлення різних сценаріїв та інтеграція даних із сенсорів (GNSS, AIS, радар) у ризик-модель у реальному часі.

Технічний аспект – використання ієрархічної структури та опрацювання сценаріїв відмов систем і неправильних команд.

Юридичний аспект є орієнтування на підвищення безпеки, що відповідає вимогам ІМО та класифікаційних товариств, а також розглядаються сценарії, які важливі для сертифікації та тестування.

Методи дослідження. Перехід на електронні карти суден всього світу з 2018 року, призвів до розробки маневреного буклета і представлення даних про маневрені властивості судна у вигляді двох таблиць, характеристик гальмування і повороткості для стану в баласті і вантажі, які зручні для використання в навігаційному комп'ютері і компактні [3]. В цьому разі всі дані про маневрені характеристики представлені у вигляді таблиць гальмування і повороткості для стану у вантажі і баласті і поміщаються на двох листках паперу формату A4. Для виконання досліджень був використаний сертифікований навігаційний тренажер Navi-Trainer Professional NTPro 5000.

На ньому було виконано імітаційне моделювання руху автономного судна т/х «Yara birkeland», при маневруванні на обширному мілководді способом несиметричний зігзаг, для визначення діаграми повороткості, зони її нестійкості та характеристик отримування повороту на глибокій воді і обширному мілководді. По результатам досліджень були визначені емпіричні коефіцієнти для розрахунку параметрів повороткості, діаграми керованості і зони її нестійкості та отримання повороту на мілководді для других суден.

Результати досліджень. Організація навігаційної безпеки морських автономних надводних суден (MASS) полягає в дотриманні нормативних вимог ММО[11-13]. Технологічний прогрес в області автономних суден вимагає перегляду існуючих правил і стандартів, щоб вони відповідали новим викликам. Проте цей процес є складним через відсутність консенсусу, щодо найкращих практик та невизначеності, пов'язаної зі швидким розвитком технологій. Створення ефективної нормативної бази вимагає глибокого розуміння потенційних ризиків і обмежень автономних суден при їх експлуатації. Тому процес моделювання руху автономного судна на обширному мілководді при імітаційному моделюванні повороту та його отримування являється єдиним інструментом визначення параметрів впливу мілководдя на маневрені характеристики та його управління. Процес маневрування автономного судна включає декілька етапів. Першим є збір даних про судно та виконання дистанційного автономного управління із берегового поста, шляхом використання датчиків на судні, супутникових знімків процесу маневрування з визначенням місця руху та електронні карти. Ці дані обробляються за допомогою вдосконалених алгоритмів, які аналізують рух судна відносно планових траєкторних координат, та врахування стан навколишнього середовища для виявлення потенційних загроз.

Наступним етапом є прийняття рішень, що передбачає визначення діаграм управляємості з урахуванням характеристик судна, таких як його маневреність. Планування повороту є динамічним процесом, що потребує синхронізації між технологіями обробки даних і реальними умовами навігації. Воно дозволяє уникати небезпек і покращує ефективність автономної навігації. Наприклад, виявлення підводних об'єктів у реальному часі допомагає скоротити ризик посадки на мілину, що є критично важливим для роботи суден у складних умовах, таких як порти, припортові акваторії канали та фарватери. Використання тренажерної підготовки дозволяє підготувати судоводія до оперативного контролю за дистанційним маневруванням, своєчасно прогнозувати потенційні ризики, ґрунтуючись на використанні систем підтримки прийняття рішень та оперативного контролю поточного стану при наявності високоточного планування переходу в рейсовому циклі траєкторними точками (ТТ) по таблиці шляхових точок.

Але виконання такої підготовки можливо тільки при наявності даних про вплив мілководдя на маневрові характеристики, які суттєво впливають на точність розрахунку ТТ. Для отримання таких

даних виникла потреба виконання імітаційного моделювання і визначення емпіричних залежностей для визначення діаграми керованості, параметрів зони нестійкості та параметрів отримання повороту для автономних суден. Тому імітаційне моделювання являється єдиним способом отримання необхідних коефіцієнтів впливу обширного мілководдя на маневрені характеристики автономного судна і важливим кроком у досягненні навігаційної безпеки експлуатації автономного судна при дистанційному його управлінні [14,15].

До характеристик керованості відносяться два види параметрів – стійкості і повороткості. Стійкість на курсі характеризують: постійна часу затримки повороту $T(\delta)$; стійкість яка описується критерієм Q ; зона нестійкості $\pm \varpi_0$, $\pm \delta_0 r$; параметри отримання повороту, час $t_0(\delta)$ і кут $\Theta_0(\delta)$.

До характеристик повороткості відносять геометричні параметри кривої циркуляції - зсув $\ell_1(\delta)$; пряме зміщення, $\ell_2(\delta)$; тактичний діаметр $D_t(\delta)$; діаметр сталої циркуляції $D_y(\delta)$; період циркуляції $T(V, \delta)$.

Особливістю великотоннажних суден являється доповнення до викладеного вище, необхідністю розглядати додатково ще один параметр – зворотне зміщення $\ell_3(\delta)$. Для звичайних суден його, як правило, навіть не розглядають. Причиною тому є його мала величина, яка порівнянна з точністю траскторних вимірювань. З цих причин виявити його $\ell_3(\delta)$ при натурних випробуваннях практично не можливо.

Кількість характеристик гальмування і форма їх представлення, які повинні бути на судні, визначаються рекомендаціями ММО та вимогами національних нормативних документів України (РШСУ - 98). При призначенні режиму руху судна використовують умовний поділ всієї потужності головного двигуна на частини, рівні 0.7, 0.5, 0.3 від режиму повного переднього ходу.

Для позначення режимів руху будемо використовувати умовні позначення, які рекомендовані РШСУ -98: ПП - передній повний хід; ППм - передній повний маневрений хід; ПС - передній середній хід; ПМ - передній малий хід; ПСМ - передній самий малий хід; ЗП - повний задній хід; ЗС - задній середній хід; ЗМ - малий задній хід; ЗСМ - задній самий малий хід.

Сьогодні на судах широко впроваджена рекомендація ММО про складання, до виходу з порту, судового плану переходу з деталізацією всіх етапів руху судна від причалу до причалу. Для автономного судна зазначений план обов'язковий, однак побудувати його при відсутності відповідних даних про маневрені властивості неможливо.

У той же час вимоги, які містяться в Резолюції ММО А. 751 (18), прийнятої 4 листопада 1993 року, а також 2003 року не визначають обсяг і кількість даних, які повинні бути на судні. Вони містять вимоги, які скоріше можна віднести до тих, при яких повинні проектуватися судна, іншими словами нормують їх значення. Судноводій зазвичай працює на судні, яке вже побудовано, і він повинен визначати значення параметрів і враховувати ті характеристики, якими воно володіє.

У зв'язку з необхідністю обробки великої кількості інформації була проведена систематизація способів подання даних про параметри судна і його пристроїв, які забезпечують маневрені властивості судна. і виконано аналіз способів представлення даних про характеристики та прийняли форму представлення даних у вигляді таблиць, запропоновану проф. Мальцевим А.С., яка зручна для обробки кібернетичними пристроями. Поряд з зручністю роботи комп'ютера було запропоновано способи представлення даних з таким розрахунком, щоб судноводій міг використовувати необхідну інформацію при управлінні судном на містку. При цьому після завантаження рекомендується виконати інтерполяцію характеристик гальмування і повороткості для поточного стану в навігаційний комп'ютер, що дозволить оперативно визначати дані для коригування руху. За способом визначення коефіцієнтів диференціального рівняння, яке описує рух судна, розрізняють: експериментальний; розрахунковий; експериментально-розрахунковий. Лінійні графіки ММО мають ту ж інформативність, що і $V(t)$ і $S(t)$. Однак вони незручні в роботі через труднощі інтерполяції при виборі t і V на нелінійній шкалі. Вони громіздкі, потрібно 5 листів по 20 характеристик на кожному. Незважаючи на те, що вони рекомендовані ІМО і потрібно їх наявність на судні, трудомісткість процесу вибірки великої кількості даних, відсутність їх для використовуваних режимів роблять недоцільним їх розглядати для планування координат руху. Нерівномірна шкала швидкості і часу не дозволяє зробити якісно інтерполяцію.

Параметри циркуляції т/х «Yara birkeland» на мілководді приведені в табл.1.

Таблиця 1 – Параметри циркуляції т/х «Yara birkeland» на мілководді

Кут перекладки руля	Параметр	Умовне позначення	Коефіцієнт мілководдя H/T=1.2	Коефіцієнт мілководдя H/T=1.4	Коефіцієнт мілководдя H/T=1.6	Коефіцієнт мілководдя H/T=1.8	Коефіцієнт мілководдя H/T=2.0
5	Зсув	11	7.89	10.20	13.09	16.55	20.58
	Пряме зміщення	12	11.40	16.22	22.22	29.38	37.72
	Тактичний діаметр	Dт	20.88	28.85	38.58	50.07	63.33
	Сталий	Dу	16.57	22.56	29.54	37.53	46.51
10	Зсув	11	5.49	7.11	9.12	11.53	14.34
	Пряме зміщення	12	7.34	10.44	10.44	18.91	24.28
	Тактичний діаметр	Dт	13.62	18.82	25.17	32.66	41.31
	Сталий	Dу	10.60	14.43	18.90	24.01	29.76
15	Зсув	11	4.42	5.72	7.33	9.27	11.53
	Пряме зміщення	12	5.53	7.87	7.87	14.26	18.30
	Тактичний діаметр	Dт	10.42	14.40	19.26	25.00	31.61
	Сталий	Dу	7.97	10.84	14.20	18.04	22.36
20	Зсув	11	3.79	4.90	6.29	7.95	9.89
	Пряме зміщення	12	4.48	6.37	6.37	11.54	14.82
	Тактичний діаметр	Dт	8.49	11.73	15.69	20.37	25.76
	Сталий	Dу	6.38	8.69	11.38	14.46	17.92
25	Зсув	11	3.35	4.33	5.55	7.02	8.73
	Пряме зміщення	12	3.73	5.30	5.30	9.60	12.33
	Тактичний діаметр	Dт	7.19	9.94	13.29	17.25	21.82
	Сталий	Dу	5.30	7.22	9.45	12.01	14.88
30	Зсув	11	3.04	3.93	5.05	6.38	7.94
	Пряме зміщення	12	3.20	4.55	4.55	8.24	10.58
	Тактичний діаметр	Dт	6.23	8.60	11.51	14.93	18.89
	Сталий	Dу	4.50	6.12	8.02	10.18	12.62
35	Зсув	11	2.78	3.59	4.61	5.83	7.25
	Пряме зміщення	12	2.79	3.96	3.96	7.18	9.21
	Тактичний діаметр	Dт	5.50	7.59	10.15	13.18	16.67
	Сталий	Dу	3.89	5.29	6.93	8.80	10.91

Кут перекладки руля	Параметр	Умовне позначення	Коефіцієнт мілководдя H/T=1.2	Коефіцієнт мілководдя H/T=1.4	Коефіцієнт мілководдя H/T=1.6	Коефіцієнт мілководдя H/T=1.8	Коефіцієнт мілководдя H/T=2.0
5	Зсув	11	7.89	10.20	13.09	16.55	20.58
	Пряме зміщення	12	11.40	16.22	22.22	29.38	37.72
	Тактичний діаметр	Dт	20.88	28.85	38.58	50.07	63.33
	Сталий діаметр	Dу	16.57	22.56	29.54	37.53	46.51
10	Зсув	11	5.49	7.11	9.12	11.53	14.34

Для співставлення поворотності різних суден радіус циркуляції виражають у безрозмірному вигляді.

$$\bar{R} = \frac{R_{уст}}{L} \quad (1)$$

де $\bar{R}$ – відносний радіус; L – довжина судна.

Величина, зворотна радіусу, називається кривизною. Її також зручно виражати у безрозмірному вигляді:

$$\bar{\omega} = \frac{L}{R_{уст}} = \frac{1}{\bar{R}} \quad (2)$$

де $\bar{\omega}$ – безрозмірна кутова швидкість.

Для отримання вказаних характеристик на автономному судні «Yara birkeland» в вантажі було проведено імітаційне моделювання щодо визначення характеристик отримання повороту. Перед цим була проаналізована робота Мальцева А.С. про несиметричний зигзаг та відібрані необхідні поєднання кутів перекладки та одержання. Перелік використаних маневрів наведено у табл. 2. При позначенні маневрів використовувався дріб, перша цифра якого позначає кут перекладки руля на початку циркуляції, друга при отриманні та третя - кут повороту, на який повинно повернути судно до моменту виходу на заданий курс.

Таблиця 2 – Несиметричний зигзаг визначення характеристик отримання повороту і діаграми керованості

Кут пере- кладки для	Кут перекладки для входу в циркуляцію $\delta_{вх}$				
	5	10	15	20	30
5	5/5/20	10/5/20	15/5/20	20/5/20	30/5/20
10	5/10/20	10/10/20	15/10/20	20/10/20	30/10/20
15	5/15/20	10/15/20	15/15/20	20/15/20	30/15/20
20	5/20/20	10/20/20	15/20/20	20/20/20	30/20/20
30	5/30/20	10/30/20	15/30/20	20/30/20	30/30/20

Для досягнення визначеної мети в роботі випробувальні маневри несиметричного зигзагу автономного судна з урахування впливу обширного мілководдя на його поворотність і використання систем підтримки прийняття рішень для контролю маневрування в небезпечних ділянках переходу, які приведені в табл. 2.

Для оцінки впливу мілководдя на динамічні властивості судна було проведено випробування щодо визначення характеристик отримання повороту для автономного судна «Yara birkeland», які дозволили отримати результати наведені у табл. 3. Також треба підкреслити потребу оцінки впливу мілководдя на параметри отримання повороту, оскільки автономне судно при дистанційному управлінні рухом повинно автоматично перекладати руль та своєчасно виконувати зворотну перекладку руля для отримання повороту.

Таблиця 3 – Характеристики отримання повороту «Yara birkeland»

Кут для входу в циркуляцію		Параметр	Кут перекладки для отримання повороту									
			Обширне мілководдя (Н/Т = 1.1)					Глибока вода				
			5	10	15	25	35	5	10	15	25	35
праворуч	5	Θ0	13,5	7,5	5,4	3,9	2,7	9,5	4,8	3,5	2,9	2,8
		T0, хв	1,45	0,55	0,5	0,4	0,3	3,0	2,0	1,3	1,25	1,1
	10	Θ0	16,0	12,9	11,5	10,5	10,4	21,0	15,4	10,1	9,0	7,7
		T0, хв	2,8	1,75	1,15	0,9	0,85	3,45	1,85	0,95	0,85	0,8
	15	Θ0	21,0	17,1	14,8	12,6	11,5	29,4	18,8	16,5	14,3	12,1
		T0, хв	4,1	2,0	1,7	1,65	1,5	4,65	2,4	1,95	1,55	1,2
	25	Θ0	33,2	28,1	26,0	24,5	23,5	36,5	25,4	18,3	17,2	16,0
		T0, хв	5,0	2,7	1,85	1,7	1,55	5,2	2,95	1,9	1,8	1,75
	35	Θ0	47,2	36,4	33,2	32,2	32,0	52,1	42,3	37,1	36,5	36,0
		T0, хв	6,1	3,25	3,0	2,75	2,5	6,4	3,7	3,0	2,8	2,6
ліворуч	5	Θ0	8,2	4,5	4,1	3,5	3,3	17,1	8,1	5,8	5,2	5,1
		T0, хв	2,2	2,0	1,8	1,7	1,5	2,85	1,4	1,1	0,9	0,7
	10	Θ0	13,1	10,2	8,4	7,3	6,5	20,4	14,6	8,9	8,8	8,3
		T0, хв	3,2	1,8	1,6	1,2	1,0	3,6	1,95	1,2	0,95	0,8
	15	Θ0	19,7	15,2	11,9	8,8	8,1	38,4	24,1	16,6	14,9	12,1
		T0, хв	3,9	2,45	2,1	1,45	1,2	4,8	1,95	1,5	1,2	1,05
	25	Θ0	36,5	27,2	22,0	21,4	18,9	47,1	39,4	32,0	30,9	28,8
		T0, хв	4,6	2,45	2,0	1,85	1,7	4,7	2,6	1,7	1,6	1,55
	35	Θ0	44,5	36,1	30,5	29,1	28,0	58,1	46,2	33,1	32,0	31,5
		T0, хв	5,6	2,85	1,9	1,8	1,75	5,8	2,9	2,5	2,0	1,9

Нижче на рис. 1. та рис.2 приведені діаграми керованості і таблиці параметрів керованості автономного судна на глибокій воді та на обширному мілководді, табл. 4 і табл.5. Крім того на діаграмах керованості можна визначити параметри зони нестійкості $\pm \bar{\omega}_0$, $\pm \delta_{op}$.

Виконаний аналіз результатів моделювання показав, що на малих кутах перекладки руля при вході в поворот кут отримання повороту на мілководді збільшується при всіх вищезазначених кутах перекладки.

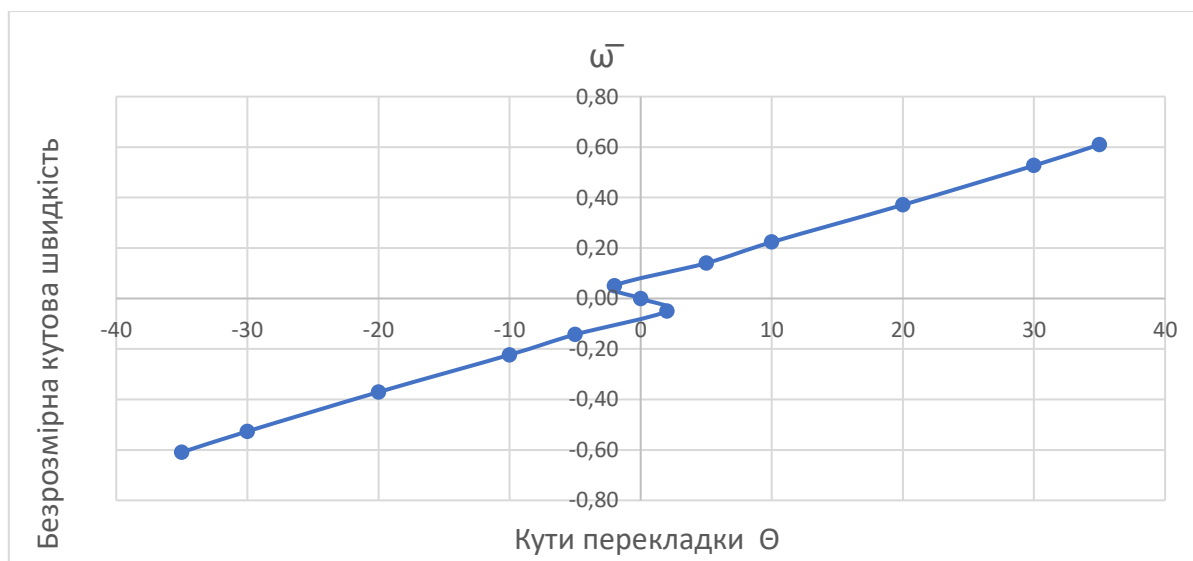


Рисунок 1. Діаграма керованості автономного судна «Yara birkeland» у вантажі на глибокій воді

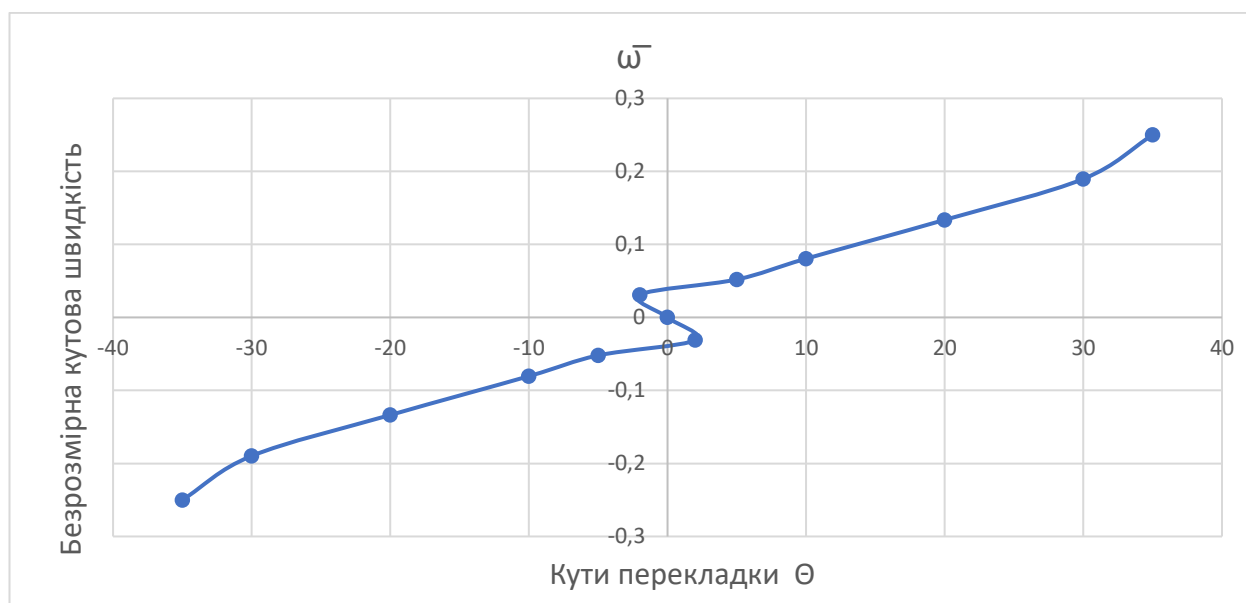


Рисунок 2. Діаграма керованості автономного судна «Yara birkeland» у вантажі на обширному мілководді

Таблиця 4 - Залежність кутової швидкості від кута перекидки на обширному мілководді (Н/Т=1.2)

δ	-35	-30	-20	-10	-5	2	0	-2	5	10	20	30	35
$\bar{\omega}$	0.25	0.19	-0.13	-0.08	-0.05	-0.03	0	0.03	0.05	0.08	0.13	0.19	0.25

Таблиця 5 – Залежність кутової швидкості від кута перекидки на глибокій воді

δ	-35	-30	-20	-10	-5	2	0	-2	5	10	20	30	35
$\bar{\omega}$	0.61	-0.53	-0.37	-0.22	-0.14	-0.05	0	0.05	0.14	0.22	0.37	0.53	0.61

Отримані характеристики поворотності для обширного мілководдя для кута перекидки руля приведені в табл. 6.

Таблиця 6 – Залежність елементів та параметрів циркуляції т/х «Yara birkeland» у вантажі з ходу для $\delta = 35$ на обширному мілководді.

Н/Т	V_c , уз	ω , $^{\circ}/c$	ap^0	$L1$, кбт	$L2$, кбт	Dt , кбт	Dy , кбт
1.2	8.1	0.025	0.53	2.78	2.49	4.56	3.89
1.4	7.2	0.036	0.76	2.32	1.98	4.01	3.4
1.6	6.6	0.05	1.04	1.69	1.71	3.53	2.89
1.8	5.9	0.055	1.13	1.55	1.32	2.98	2.21
2.0	5.1	0.06	1.28	1.42	1.02	2.02	1.93
∞	4.7	0.04	0.95	1.37	0.74	1.65	1.4

Порівняльний графік характеристик кута отримання повороту для обширного мілководдя при Н/Т= 1.1 і глибокої води приведено на рис.3 та рис.4

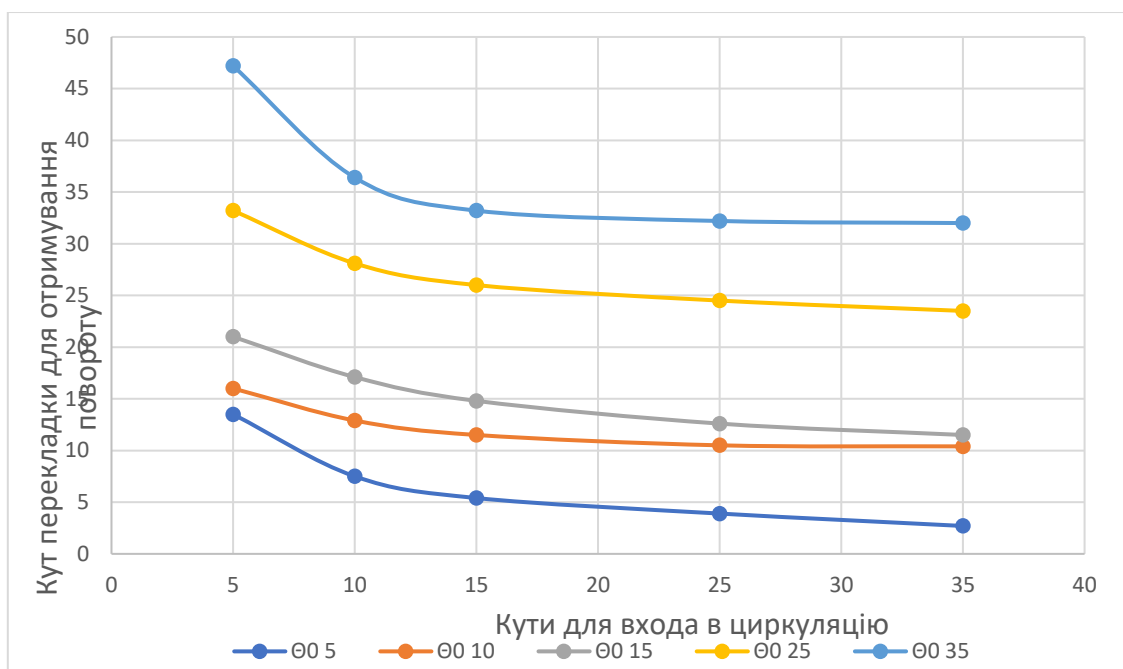


Рисунок 3 Порівняльний графік характеристик кута отримання повороту для обширного мілководдя при $H/T = 1.1$

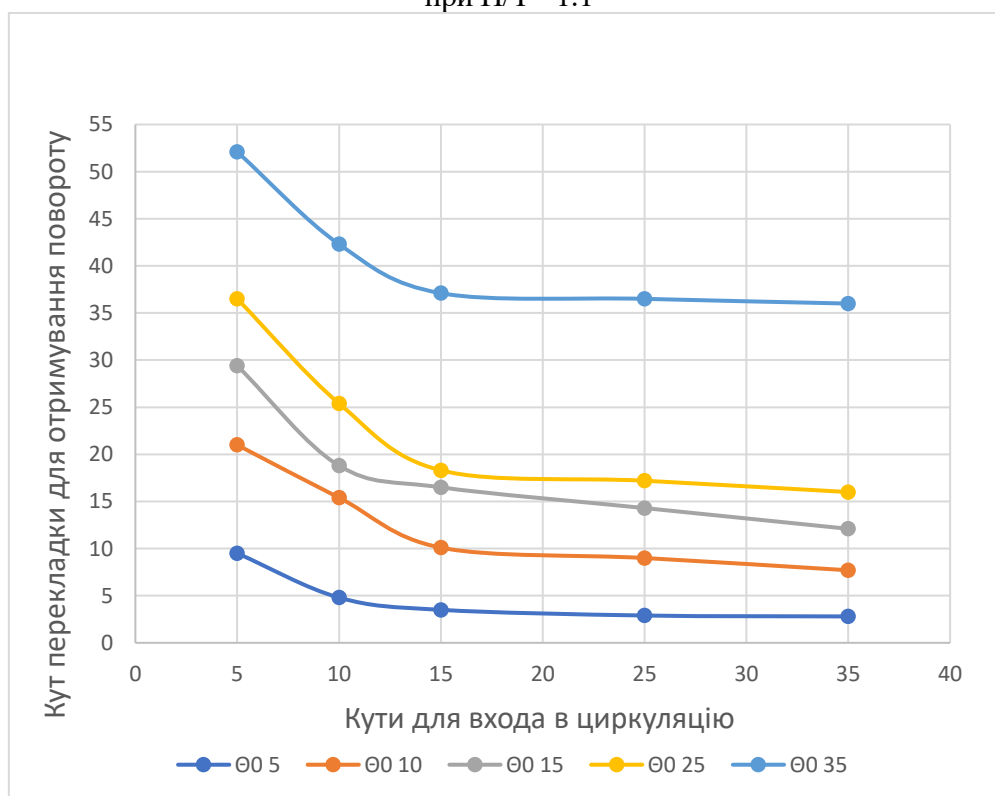


Рисунок 4 Порівняльний графік характеристик кута отримання повороту для глибокої води

При отримуванні малими кутами перекладки руля до значення θ збільшується тільки на 50%. При $\delta_{\text{од}} \geq 15^\circ$ картина змінюється і значення θ на мілководді менше, ніж на глибокій воді. Це означає, що для отримання доцільно використовувати кути $\delta_{\text{вих}}$ не більше 15° . Враховуючи результати імітаційного моделювання можна визнати доцільним створення спеціальних діаграм керованості щодо врахування впливу мілководдя на отримання повороту автономного судна.

Перспективи подальшого розвитку досліджень. В перспективі, для імітаційного отримання повороту необхідно виконати практичну верифікацію використання діаграм керованості для автономного судна на обширному мілководді з урахування запасу води під кілем. Крім того в

подальшому потрібно використання імітаційного моделювання планування руху автономного судна через аварійно-небезпечні ділянки рейсового циклу із використанням сучасних датчиків, комп'ютерних систем та штучного інтелекту.

Подальші наукові роботи повинні бути направлені на удосконалення діаграм керованості з урахуванням навігаційних та кібернетичних ризиків. Вимагає подальшого дослідження впровадження навчання з використанням навігаційного тренажера для підвищення надійності роботи команди берегових автономних систем при роботі на обширному мілководді. Підвищення надійності роботи звичайного та автоматичного суден буде реалізовано за рахунок підвищеної точності визначення впливу мілководдя на точність розрахунку планових координат траєкторними точками маневрування, включаючи криволінійні траєкторії. Це дозволить розглядати їх як віртуальні буї і використовувати системи автоматичної підтримки прийняття рішень та суттєво підвищити оперативність контролю руху судна, за рахунок використання системи динамічного позиціонування.

Висновки. Імітаційне моделювання повороту на обширному мілководді передбачає використання алгоритмів для динамічного врахування факторів, таких як маневрені характеристики судна, вплив погодних умов, розташування перешкод, які можуть порушити роботу автономного судна. Процес адаптації методу розрахунку отримування повороту під час рейсового циклу на обширному мілководді потребує використання сучасних систем моніторингу параметрів навігаційної безпеки, включаючи радіолокатор, гідролокатор та інші датчики параметрів навігаційних морських операцій. Ці інструменти в режимі реального часу відстежують зміну параметрів руху судна та умов навколишнього середовища, таких як рельєф морського дна або поява нових підводних об'єктів та дозволяють своєчасно коригувати курс та швидкість судна, відповідно до їх впливу. Подальші дослідження в цьому напрямі відкривають можливості для розширення використання автономних суден у мілководних регіонах з високою інтенсивністю руху та на обширному мілководді. Таким чином, системний підхід до розрахунку параметрів повороту для автономних суден в районах обширного мілководдя і використання систем підтримки прийняття рішень при маневруванні дозволяє забезпечити допустимий рівень навігаційної безпеки навіть у складних умовах навігаційних і кібернетичних ризиків

Muravyov G., Markitan V., Perevertov D.

INTELLIGENT SYSTEMS FOR PLANNING THE PATH AND CONTROLLING THE MOVEMENT OF AUTONOMOUS VESSELS IN EXTENSIVE SHALLOW WATER IN CASE OF CYBER ATTACKS

The purpose of this study is to determine and validate the parameters of the autonomous vessel model in extensive shallow water by simulating the asymmetric zigzag maneuvering process to determine the impact on its motion parameters. Due to complex hydrodynamic effects in conditions of limited depth, such as reduced under-keel clearance, increased resistance, and changed flow patterns, the course stability changes. Therefore, autonomous navigation systems require high-precision planning to organize trouble-free maneuvering and safe operation of the vessel during cargo transportation. The study solves these problems by simulating the influence of shallow water on the turning parameters and obtaining it in the form of empirical dependencies. This allowed to significantly increase the accuracy of trajectory point planning and made it possible to use decision support systems during maneuvering and use operational methods of motion control by dynamic positioning, taking trajectory points as virtual buoys. In the simulation modeling of the turn, the change in sea depth, initial course and ship speed was used to estimate the delay time of the start of the turn and deviation from the planned trajectory. The simulation demonstrated that with decreasing water depth, the turning radius and tactical diameter of the autonomous ship increase significantly, which significantly affects the course stability and reaction delay. The control system based on the created model was able to adapt the trajectory commands in real time, minimizing deviations from the planned trajectory points. The model accurately captured the asymmetric turn patterns typical of shallow water and improved the predictive capabilities of autonomous navigation algorithms in limited conditions. The results of the performed studies confirm that the inclusion of shallow water dynamics in the decision-making cycle of the autonomous navigation system significantly increases the safety of maneuvering and trajectory accuracy. The developed simulation model, which uses an

asymmetric zigzag, provides a reliable basis for future maneuvering algorithms and real-time traffic control. This framework contributes to safer and more efficient autonomous operation in ports, and also creates conditions for further integration of predictive control on autonomous vessels.

Keywords: *autonomous vessel, shallow water maneuvering, turn modeling, adaptive navigation, subsidence effect, trajectory control, simulated hydrodynamic modeling using the asymmetric zigzag method.*

ЛІТЕРАТУРА

1. Maltsev A.S. (2023) Navigation support for the process of managing the maneuvering of a sea vessel.(Maneuvering booklet)/ Eliva Press - 218 p. <https://www.elivabooks.com/pl/book/book-8240761357>
2. Artyszuk, J. (2016) Peculiarities of zigzag behaviour in linear models of ship yaw motion. Annual of Navigation 26, DOI: 10.1515/aon-2016-0002, pp. 23–38.
3. Nomoto, K. (1960) Analysis of Kempf's standard maneuver test and proposed steering quality indices. In First Symposium on Ship Maneuverability, May 24–25, DTMB Rep. 1461 (AD 442036). Washington: DTMB, pp. 275–304.
4. Aisjah, Aulia. (2010). An Analysis Nomoto Gain and Norbin Parameter on Ship Turning Maneuver. IPTEK The Journal for Technology and Science. 21. 10.12962/j20882033.v21i2.31.
5. Oladosu Emmanuel O., Charles Ugochukwu Orji, Kombo Theophilus-Johnson (2022), DEVELOPMENT OF A MANEUVERING PREDICTION TOOL FORMERCHANT SHIPS, International Research Journal of Modernization in Engineering Technology and Science, Volume:05/Issue:04/October-2022
6. Yasukawa, H., Yoshimura, Y. Introduction of MMG standard method for ship maneuvering predictions. *J Mar Sci Technol* 20, 37–52 (2015). <https://doi.org/10.1007/s00773-014-0293-y>
7. Мальцев А.С. (2007) Теорія і практика безпечного управління судном при маневруванні [Дис. докт. техн. наук, Одеська національна морська академія] <https://uacademic.info/ua/document/0507U000538>
8. Maltsev, A., & Surinov, I. (2021). Improving the navigational preparation of a bridge crew for entering/leaving a port, including activities in case of emergency. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 3(3 (111)), 42–57. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.235092>.
9. Muravyov, G. (2024). Automation of coordinate planning voyage cycle of an autonomous vessel. International Science Journal of Engineering & Agriculture, 3(5), 120–139. <https://doi.org/10.46299/j.isjea.20240305.12>.
10. Johansen, T., Blindheim, S., Torben, T. R., Utne, I. B., Johansen, T. A., & Sørensen, A. J. (2023). Development and testing of a risk-based control system for autonomous ships. Reliability engineering & system safety, 234, 109195, <https://doi.org/10.1016/j.ress.2023.109195>.
11. de Vos, Jiri & Hekkenberg, Robert & Valdez Banda, Osiris. (2021). The Impact of Autonomous Ships on Safety at Sea – A Statistical Analysis. Reliability Engineering & System Safety. 210. 107558. 10.1016/j.ress.2021.107558.
12. IMO. Generic Guidelines for Developing IMO Goal-Based Standards. MSC.1/Circ.1394/Rev.2. 2019. Available online: <https://imorules.com/GUID-CEEB55CC-E9D9-4CFB-B515-6B767644BA62.html> (accessed on 11 November 2022).
13. International Maritime Organization (IMO). Revised Guidelines for Formal Safety Assessment (FSA) for Use in the IMO Rule-Making Process (MSC-MEPC.2/Circ.12/Rev.2); IMO: London, UK, 2018; Available online: [https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/OurWork/HumanElement/Documents/MSC-MEPC.2-Circ.12-Rev.2%20-%20Revised%20Guidelines%20For%20Formal%20Safety%20Assessment%20\(Fsa\)For%20Use%20In%20The%20Imo%20Rule-Making%20Proces...%20\(Secretariat\).pdf](https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/OurWork/HumanElement/Documents/MSC-MEPC.2-Circ.12-Rev.2%20-%20Revised%20Guidelines%20For%20Formal%20Safety%20Assessment%20(Fsa)For%20Use%20In%20The%20Imo%20Rule-Making%20Proces...%20(Secretariat).pdf) (accessed on 22 June 2025).
14. Valdez Banda, Osiris & Goerlandt, Floris. (2018). A STAMP-based approach for designing maritime safety management systems. Safety Science. 109. 10.1016/j.ssci.2018.05.003.
15. Miller, Anna & Rybczak, Monika & Rak, Andrzej. (2021). Towards the Autonomy: Control Systems for the Ship in Confined and Open Waters. Sensors. 21. 2286. 10.3390/s21072286.

REFERENCES

1. Maltsev A.S. (2023) Navigation support for the process of managing the maneuvering of a sea vessel.(Maneuvering booklet)/ Eliva Press - 218 p. <https://www.elivabooks.com/pl/book/book-8240761357>
2. Artyszuk, J. (2016) Peculiarities of zigzag behaviour in linear models of ship yaw motion. *Annual of Navigation* 26, DOI: 10.1515/aon-2016-0002, pp. 23–38.
3. Nomoto, K. (1960) Analysis of Kempf's standard maneuver test and proposed steering quality indices. In *First Symposium on Ship Maneuverability*, May 24–25, DTMB Rep. 1461 (AD 442036). Washington: DTMB, pp. 275–304.
4. Aisjah, Aulia. (2010). An Analysis Nomoto Gain and Norbin Parameter on Ship Turning Maneuver. *IPTEK The Journal for Technology and Science*. 21. 10.12962/j20882033.v21i2.31.
5. Oladosu Emmanuel O., Charles Ugochukwu Orji, Kombo Theophilus-Johnson (2022), DEVELOPMENT OF A MANEUVERING PREDICTION TOOL FORMERCHANT SHIPS, *International Research Journal of Modernization in Engineering Technology and Science*, Volume:05/Issue:04/October-2022
6. Yasukawa, H., Yoshimura, Y. Introduction of MMG standard method for ship maneuvering predictions. *J Mar Sci Technol* 20, 37–52 (2015). <https://doi.org/10.1007/s00773-014-0293-y>
7. Maltsev A.S. (2007) Teoriia i praktyka bezpechnoho upravlinnia sudnom pry manevruvanni [Dys. dokt. tekhn. nauk, Odeska natsionalna morska akademiia] <https://uacademic.info/ua/document/0507U000538>
8. Maltsev, A., & Surinov, I. (2021). Improving the navigational preparation of a bridge crew for entering/leaving a port, including activities in case of emergency. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3(3 (111)), 42–57. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.235092>.
9. Muravyov, G. (2024). Automation of coordinate planning voyage cycle of an autonomous vessel. *International Science Journal of Engineering & Agriculture*, 3(5), 120–139. <https://doi.org/10.46299/j.isjea.20240305.12>.
10. Johansen, T., Blindheim, S., Torben, T. R., Utne, I. B., Johansen, T. A., & Sørensen, A. J. (2023). Development and testing of a risk-based control system for autonomous ships. *Reliability engineering & system safety*, 234, 109195, <https://doi.org/10.1016/j.ress.2023.109195>.
11. de Vos, Jiri & Hekkenberg, Robert & Valdez Banda, Osiris. (2021). The Impact of Autonomous Ships on Safety at Sea – A Statistical Analysis. *Reliability Engineering & System Safety*. 210. 107558. 10.1016/j.ress.2021.107558.
12. IMO. Generic Guidelines for Developing IMO Goal-Based Standards. MSC.1/Circ.1394/Rev.2. 2019. Available online: <https://imorules.com/GUID-CEEB55CC-E9D9-4CFB-B515-6B767644BA62.html> (accessed on 11 November 2022).
13. International Maritime Organization (IMO). Revised Guidelines for Formal Safety Assessment (FSA) for Use in the IMO Rule-Making Process (MSC-MEPC.2/Circ.12/Rev.2); IMO: London, UK, 2018; Available online: [https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/OurWork/HumanElement/Documents/MSC-MEPC.2-Circ.12-Rev.2%20-%20Revised%20Guidelines%20For%20Formal%20Safety%20Assessment%20\(Fsa\)For%20Use%20In%20The%20Imo%20Rule-Making%20Proces...%20\(Secretariat\).pdf](https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/OurWork/HumanElement/Documents/MSC-MEPC.2-Circ.12-Rev.2%20-%20Revised%20Guidelines%20For%20Formal%20Safety%20Assessment%20(Fsa)For%20Use%20In%20The%20Imo%20Rule-Making%20Proces...%20(Secretariat).pdf) (accessed on 22 June 2025).
14. Valdez Banda, Osiris & Goerlandt, Floris. (2018). A STAMP-based approach for designing maritime safety management systems. *Safety Science*. 109. 10.1016/j.ssci.2018.05.003.
15. Miller, Anna & Rybczak, Monika & Rak, Andrzej. (2021). Towards the Autonomy: Control Systems for the Ship in Confined and Open Waters. *Sensors*. 21. 2286. 10.3390/s21072286.

Стаття прийнята 20.10.2025

© Гончарук І.П., Васалатій Н.В.

ОПЕРАТИВНЕ ПРОГНОЗУВАННЯ ПОРТОВОГО ХВИЛЮВАННЯ ТА РУХІВ ПРИШВАРТОВАНИХ СУДЕН ПІД ВПЛИВОМ ДОВГОПЕРІОДНИХ ХВИЛЬ У ПОРТАХ ЧОРНОГО МОРЯ

У статті розглянуто проблему портового хвилювання, спричиненого довгоперіодними хвилями, які становлять один із найбільш небезпечних та недостатньо досліджених гідрометеорологічних факторів ризику для морських портів. На основі аналізу світових випадків прояву інфрагравітаційних хвиль, сейш та метеоцунамі встановлено їх здатність проникати в портові акваторії, збуджувати резонансні коливання та викликати небезпечні рухи пришвартованих суден, що призводить до перевантажень швартових систем, пошкоджень інфраструктури та операційних простоїв. Показано, що порти Чорного моря є вразливими до несеїсмічних довгоперіодних хвиль, що підтверджується подією «одеського цунамі» 2014 року [1]. Проведений огляд сучасних моделей хвильового прогнозу й аналіз рухів суден демонструє відсутність інтегрованого підходу, який би об'єднував прогноз хвильового поля відкритого моря, моделювання портових осциляцій та визначення рухів пришвартованих суден відповідно до критеріїв безпеки. У роботі обґрунтовано необхідність розроблення нового обчислювально ефективного методу оперативного прогнозування, адаптованого до умов портів Чорного моря, який забезпечить підвищення рівня гідрометеорологічної безпеки портових операцій.

Ключові слова: довгоперіодні хвилі, інфрагравітаційні хвилі, сейші, метеоцунамі, портові осциляції, швартові операції, рухи пришвартованих суден, резонанс, портове хвилювання, оперативний прогноз.

Постановка проблеми. Портове хвилювання, спричинене довгоперіодними хвилями, є одним із ключових, але недостатньо вивчених гідрометеорологічних факторів ризику для морських портів. Такі хвилі здатні проникати в акваторії портів, збуджувати їхні власні резонансні коливання та викликати небезпечні рухи пришвартованих суден, що призводить до перевищення допустимих навантажень у швартових лініях, пошкоджень інфраструктури та значних простоїв причалів. Світовий досвід портів Ресем (Бразилія), Chimbote (Перу), Асаїутла (Сальвадор), Ngqura (ПАР) підтверджує масштаби цієї проблеми та необхідність її прогнозування.

Події на кшталт «одеського цунамі» 2014 року свідчать, що порти Чорного моря також є вразливими до несеїсмічних довгоперіодних хвиль. Попри наявні гідродинамічні моделі хвильового режиму, у регіоні відсутні інтегровані методи оперативного прогнозування, які б поєднували прогноз хвиль у відкритому морі, портові осциляції та рухи пришвартованих суден відповідно до міжнародних критеріїв безпеки.

Отже, існує науково-практична потреба у розробленні методу оперативного прогнозування портового хвилювання та рухів пришвартованих суден, адаптованого до умов портів Чорного моря. Такий метод має враховувати фізичні механізми формування довгих хвиль, їхню взаємодію з геометрією портових акваторій та забезпечувати кількісну оцінку рівня небезпеки для швартових операцій.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питання оперативного прогнозування портового хвилювання та рухів пришвартованих суден активно розвивається в межах кількох наукових напрямів: моделювання довгоперіодних хвиль, чисельного прогнозування портових осциляцій, аналізу рухів пришвартованих суден та створення операційних систем оцінювання ризиків. Сукупність цих досліджень формує теоретичний фундамент для розроблення ефективного методу прогнозування портового хвилювання й рухів суден [2]. Дослідження [3] зосереджене на створенні аналітичного підходу для прогнозування рухів пришвартованих суден на основі метеопрогнозу та хвильових моделей.

Автори показали, що ключовими факторами, які впливають на точність прогнозу, є значна висота хвилі та співвідношення розмірів судна; найкраще піддаються прогнозуванню вертикальні рухи і поздовжні переміщення. Хоча метод забезпечує прийнятну точність, він здебільшого орієнтований на спектральні характеристики звичайного хвилювання і не враховує специфіку інфрагравітаційних хвиль. Розвиток машинного навчання дозволив суттєво підвищити точність прогнозу рухів суден у порту. У роботі [4] запропоновано повністю керовану ML-модель, що використовує часові ряди рухів суден та хвильові параметри для прогнозування їх динаміки. Результати [5] демонструють потенціал напівнаглядних моделей, які ефективно працюють навіть із частково маркованими даними; включення інфрагравітаційної компоненти хвилювання значно збільшує точність прогнозу. Незважаючи на це, ML-моделі залишаються прив'язаними до конкретних портів і потребують великих обсягів високоякісних даних. Проблематика довгоперіодних хвиль та портових резонансів має фундаментальне значення для прогнозування швартових ризиків. У роботі [6] систематизовано механізми генерації довгих хвиль і їхню взаємодію з береговими та портовими структурами. У роботі [7] представили чисельне моделювання довгих хвиль та рухів суден у японському порту Томакомай, підтвердивши критичну роль резонансних ефектів для оцінки безпеки швартування. У дослідженні [8] застосовано хвильлет-аналіз для ідентифікації небезпечних режимів резонансу у взаємодії «портова акваторія – судно». Окремий напрям становлять системи управління ризиками швартових операцій. У дослідженні [9] автори показали, що більшість інцидентів відбувається за умов помірного хвилювання через присутність довгоперіодних хвиль та портових резонансів. Подальша робота авторів представила систему прогнозування ризиків для пришвартованих суден, яка поєднує хвильовий прогноз, моделювання рухів суден і розрахунок рівня ризику для операцій [10]. Інструмент SWAMS ALERT пропонує оперативну оцінку небезпечних навантажень у швартових канатах, інтегруючи рухи судна та гідродинамічні фактори [11]. Сучасні платформи хвильового прогнозу також роблять суттєвий внесок у безпеку портових операцій. Автори [12] представили регіональну модельну систему для прогнозу хвиль у Середземному морі з орієнтацією на потреби портової інфраструктури. У наступній роботі автори розробили операційну платформу Assu-Waves, яка забезпечує локальне уточнення хвильового режиму в портах, хоча система не охоплює рухи пришвартованих суден [13].

Загалом огляд літератури свідчить, що існує розвинена теорія довгих хвиль та портових осциляцій; доступні чисельні моделі для хвиль і рухів суден; створено низку інструментів для ризик-орієнтованого управління швартовими операціями; активно розвиваються ML-підходи для прогнозу рухів суден.

Водночас існуючі моделі переважно порт-специфічні, погано адаптуються до інших акваторій і не часто забезпечують повну інтеграцію ланцюга «довгоперіодні хвилі - портові осциляції - рухи пришвартованих суден». Це визначає актуальність розроблення узагальненого та обчислювально ефективного методу оперативного прогнозування, орієнтованого на забезпечення безпеки швартових операцій у морських портах.

Мета дослідження на основі аналізу механізмів формування довгоперіодних хвиль, світового досвіду їх прогнозування та оцінки вразливості портів Чорного моря обґрунтувати та сформулювати наукові засади розроблення методу оперативного прогнозування портового хвилювання та рухів пришвартованих суден, здатного підвищити рівень гідрометеорологічної безпеки портових операцій.

Основні результати дослідження. На основі узагальнення світових підходів до аналізу портового хвилювання та оцінювання гідрометеорологічних ризиків у морських портах визначено ключові механізми формування довгоперіодних хвиль, їхню взаємодію з портовими акваторіями та вплив на безпеку швартових операцій. Показано, що інфрагравітаційні хвилі, сейші та метеоцунамі становлять суттєву небезпеку для портів незалежно від їхнього географічного розташування, оскільки здатні проникати в акваторію через вхідні створки, збуджувати власні моди портових осциляцій та викликати резонансні процеси.



Рисунок 1. Механізм утворення довгоперіодних хвиль та їх проникнення до порту

У результаті аналізу фізичних механізмів довгоперіодних хвиль встановлено, що їхній діапазон періодів (від десятків секунд до десятків хвилин) збігається з характерними власними періодами портових басейнів. Це створює умови для резонансного зростання амплітуд коливань рівня моря всередині порту та підсилення рухів пришвартованих суден. Навіть хвилі з амплітудами 10–20 см можуть генерувати небезпечні переміщення суден у шести ступенях свободи, перевищувати нормативні межі критеріїв PIANC та спричинити зупинку вантажних операцій.

Портові осциляції виникають унаслідок збудження довгоперіодних стоячих хвиль, відомих як сейші, що формуються в замкнених або напівзамкнених акваторіях — портах, бухтах і затоках. У класичних працях А. Rabinovich та інших дослідників наведено аналітичні моделі портових басейнів різних типів, від простих прямокутних геометрій до складних конфігурацій берегової лінії. Власні періоди таких осциляцій визначаються довжиною, глибиною й формою акваторії, та коли зовнішні збурення — довгоперіодні хвилі або різкі зміни атмосферного тиску — мають спектральні компоненти, близькі до цих власних частот, відбувається резонанс. Це призводить до істотного зростання амплітуд рівня моря всередині порту, особливо коли його характерні періоди знаходяться в діапазоні 30 секунд – 10 хвилин, властивому інфрагравітаційним хвилям та метеоцунамі.

Інфрагравітаційні хвилі (IG), що є важливою складовою довгоперіодних коливань, формуються внаслідок модуляції груп короткоперіодних хвиль, трансформації хвильового режиму на шельфі, нелінійних хвильових взаємодій та локальних резонансних явищ у прибережній зоні. Через значні довжини хвиль інфрагравітаційні коливання слабо затухають у процесі поширення, що дозволяє їм легко проникати через вхідні створки порту та збуджувати стоячі хвилі, подібні до сейш. На похилих берегах IG-хвилі здатні істотно змінювати локальний рівень моря, а в умовах портової інфраструктури — провокувати небезпечні рухи пришвартованих суден, включаючи surge, sway та вертикальні переміщення.

Метеоцунамі, ще одна форма довгоперіодних хвиль, генерується атмосферними збуреннями, такими як швидкорухомі фронти, squall-lines і мезомасштабні конвективні системи, що створюють хвильові пакети цунамі-подібної тривалості. На відміну від тектонічних цунамі, їхнє походження пов'язане з атмосферними процесами, проте гідродинамічна дія може бути подібною. Дослідження засвідчують, що такі події здатні викликати значні коливання рівня моря навіть у регіонах із низькою сейсмічністю, як-от Чорне чи Адріатичне моря. Характерним прикладом є «одеське цунамі» 27 червня 2014 року, коли атмосферне збурення спричинило хвилі з амплітудами десятків сантиметрів, зафіксованих на кількох mareograph-станціях. Подібні явища мають важливе значення для портової інфраструктури, адже здатні генерувати резонансні коливання в басейні порту та

небезпечні рухи пришвартованих суден, що істотно підвищує ризик аварійності та операційних втрат.

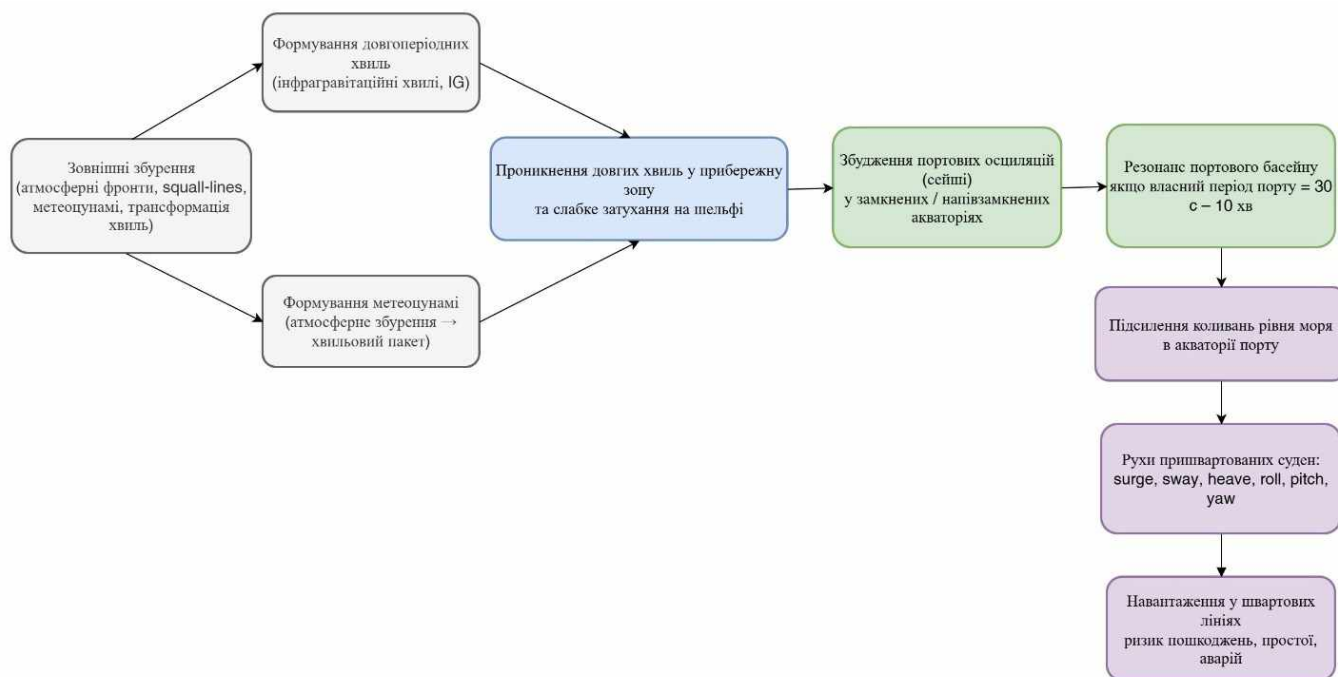


Рисунок 2. Механізми формування портових осциляцій

Проведений огляд світових кейсів із портів Pecém, Chimbote, Acapulco, Ngqura засвідчив, що проблема портового хвилювання має глобальний характер і призводить до значних економічних втрат та транспортних ризиків. У більшості випадків довгоперіодні хвилі формуються за рахунок трансформації океанічного хвилювання, атмосферних збурень або локальних резонансних явищ. У ряді портів (зокрема Ngqura та Punta Langosteira) вже створено інтегровані інструменти прогнозування, які поєднують моделі хвильового режиму з моделями рухів пришвартованих суден. Ці рішення демонструють принципову можливість переходу від гідродинамічного аналізу до операційних систем підтримки рішень.

Аналіз матеріалів свідчить, що порти Чорного моря демонструють підвищену вразливість до несеїсмічних довгоперіодних хвиль, включаючи інфрагравітаційні хвилі, сейші та метеоцунамі. На відміну від багатьох океанічних узбереж, ця вразливість є менш очевидною через відносно низьку загальну енергію хвилювання, однак геометрія портових акваторій, глибини на підходах та резонансні властивості басейну Чорного моря створюють умови для розвитку небезпечних коливань рівня навіть за помірних зовнішніх факторів.

Ключовим доказом є подія «одеського цунамі» 27 червня 2014 року, яка показала, що атмосферно зумовлені збурення можуть генерувати хвилі з амплітудами 40–60 см і періодами 15–30 хв, що відповідає власним модам низки портових акваторій регіону. Встановлено, що такі хвилі здатні викликати портові осциляції та небезпечні рухи пришвартованих суден, що суттєво підвищує ризики для швартових операцій портів Одеси, Чорноморська, Південного й інших гаваней узбережжя.

Більшість портів Чорного моря мають широкі входні створки, значні глибини на підходах та конфігурації, сприятливі для резонансу, а систематичні вимірювання IG-компоненти та спеціалізовані системи оперативного прогнозування відсутні. Це свідчить про структурний рівень гідрометеорологічної вразливості, яка може проявлятися у формі неконтрольованих коливань рівня, збільшених рухів суден, перевантажень швартових систем і потенційних простоїв причалів.

Оцінювання сучасних методів моделювання хвильових процесів показало, що спектральні моделі типу SWAN добре відтворюють умови на підходах до порту, тоді як моделі мілкої води, mild-slope та Boussinesq-моделі забезпечують можливість моделювання портових осциляцій. Проте їх застосування в оперативних задачах обмежене великою обчислювальною складністю. У спеціалізованих моделях (CGWAVE, Delft3D-Surfbeat) продемонстровано здатність точно відтворювати амплітудно-частотну структуру портових резонансів, однак ці моделі потребують адаптації для реального часу.

Проведений аналіз існуючих рішень дозволив виявити наукову прогалину: на сьогодні не існує універсального методу, який би у єдиній інтегрованій схемі пов'язував прогноз хвильового поля відкритого моря, портові осциляції та прогноз рухів пришвартованих суден із можливістю оперативного застосування в портах Чорного моря. Більшість наявних систем створені для окремих портів та не враховують специфіку замкнених морів з індивідуальним спектром довгоперіодних хвиль.

Висновки. Проведений аналіз підтвердив, що довгоперіодні хвилі — інфрагравітаційні хвилі, сейші та метеоцунамі — є суттєвим джерелом гідрометеорологічних ризиків для морських портів, оскільки здатні проникати в акваторії, збуджувати власні резонансні моди портових басейнів та викликати небезпечні рухи пришвартованих суден. Світова практика демонструє, що інтегровані системи прогнозування, які поєднують хвильовий прогноз, моделювання портових осциляцій та оцінювання швартових рухів суден, дозволяють ефективно зменшувати ризики та оптимізувати роботу портів. У портах Чорного моря, попри наявність окремих моделей хвильового поля, все ще відсутній комплексний підхід, який би пов'язував довгоперіодні хвилі, портові резонанси та динаміку пришвартованих суден в єдину операційну систему, здатну працювати в реальному часі. Це підтверджує актуальність розроблення адаптованого методу оперативного прогнозування, спрямованого на підвищення гідрометеорологічної безпеки портових операцій.

Майбутні напрями реалізації запропонованого методу передбачають декілька взаємопов'язаних етапів. По-перше, необхідною є розробка регіоналізованої моделі хвильового поля Чорного моря з можливістю виділення і точного відтворення інфрагравітаційної компоненти, яка відіграє ключову роль у формуванні портових осциляцій. По-друге, потрібна побудова високороздільних чисельних моделей портових басейнів для визначення їхніх власних частот та чутливості до зовнішніх збурень у широкому діапазоні періодів. По-третє, слід інтегрувати моделі рухів пришвартованих суден, що враховують нелінійність швартових систем і критерії безпеки PIANC, у єдину схему прогнозування. Важливим напрямом є також створення модулю автоматизованої оцінки ризику, який на основі синтезу результатів моделювання надаватиме диспетчерським службам порту оперативні рішення щодо можливості або обмеження швартових операцій. Подальша робота може включати використання методів машинного навчання для уточнення прогнозів, побудову системи реального моніторингу довгоперіодних хвиль та впровадження хмарної платформи для оперативної взаємодії між моделями.

Реалізація цих напрямів дозволить сформувати обчислювально ефективний та технологічно адаптивний інструмент прогнозування портового хвилювання і рухів пришвартованих суден, що забезпечить підвищення рівня гідрометеорологічної безпеки портів Чорного моря та сприятиме зменшенню операційних ризиків у швартових процесах.

ЛІТЕРАТУРА

1. Rabinovich, A. B. (2017). Seiches and harbor oscillations. In WORLD SCIENTIFIC eBooks (pp. 243–286). https://doi.org/10.1142/9789813204027_0011
2. Sande, J., Figuero, A., Tarrío-Saavedra, J., Peña, E., Alvarelllos, A., & Rabuñal, J. R. (2019). Application of an Analytic Methodology to Estimate the Movements of Moored Vessels Based on Forecast Data. *Water*, 11(9), 1841. <https://doi.org/10.3390/w11091841>
3. Troch, C., Terblanche, L., & Rossouw, M. (2023). MOORED SHIP MOTION FORECAST TOOL FOR THE PORT OF NGQURA. *Coastal Engineering Proceedings*, 37, 67. <https://doi.org/10.9753/icce.v37.structures.67>
4. Romano-Moreno, E., Tomás, A., Diaz-Hernandez, G., Lara, J. L., Molina, R., & García-Valdecasas, J. (2022). A Semi-Supervised Machine Learning model to forecast movements of moored vessels. *Journal of Marine Science and Engineering*, 10(8), 1125. <https://doi.org/10.3390/jmse10081125>
5. Pinheiro, L. V., Fortes, C. J. E. M., & Santos, J. A. (2018). Risk Analysis and Management of Moored Ships in Ports. Volume 3: Structures, Safety, and Reliability. <https://doi.org/10.1115/omae2018-78396>
6. Lee, S., Sasa, K., Aoki, S., Yamamoto, K., & Chen, C. (2021). New evaluation of ship mooring with friction effects on mooring rope and cost-benefit estimation to improve port safety. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 13, 306–320. <https://doi.org/10.1016/j.ijnaoe.2021.04.002>
7. Pinheiro, L., Fortes, C., Reis, M. T., Santos, J., & Soares, C. G. (2020). RISK FORECAST SYSTEM FOR MOORED SHIPS. *Coastal Engineering Proceedings*, 36v, 37. <https://doi.org/10.9753/icce.v36v.management.37>
8. Makris, C., Papadimitriou, A., Baltikas, V., Spiliopoulos, G., Kontos, Y., Metallinos, A., Androulidakis, Y., Chondros, M., Klonaris, G., Malliouri, D., Nagkoulis, N., Zissis, D., Tsoukala, V., Karambas, T., & Memos, C. (2024). Validation and application of the Accu-Waves Operational Platform for wave forecasts at ports. *Journal of Marine Science and Engineering*, 12(2), 220. <https://doi.org/10.3390/jmse12020220>
9. Makris, C., Androulidakis, Y., Karambas, T., Papadimitriou, A., Metallinos, A., Kontos, Y., Baltikas, V., Chondros, M., Krestenitis, Y., Tsoukala, V., & Memos, C. (2020). Integrated modelling of sea-state forecasts for safe navigation and operational management in ports: Application in the Mediterranean Sea. *Applied Mathematical Modelling*, 89, 1206–1234. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2020.08.015>
10. Van Dongeren, A., De Jong, M., Van Der Lem, C., Van Deyzen, A., & Bieman, J. D. (2016). Review of Long Wave Dynamics over Reefs and into Ports with Implication for Port Operations. *Journal of Marine Science and Engineering*, 4(1), 12. <https://doi.org/10.3390/jmse4010012>
11. Costas, R., Figuero, A., Peña, E., Sande, J., & Rosa-Santos, P. (2022). Integrated approach to assess resonance between basin eigenmodes and moored ship motions with wavelet transform analysis and proposal of operational thresholds. *Ocean Engineering*, 247, 110678. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.110678>
12. Alvarelllos, A., Figuero, A., Carro, H., Costas, R., Sande, J., Guerra, A., Peña, E., & Rabuñal, J. (2021). Machine Learning based moored ship movement Prediction. *Journal of Marine Science and Engineering*, 9(8), 800. <https://doi.org/10.3390/jmse9080800>
13. Van Der Molen, W., Monárdez, P., & Van Dongeren, A. (2006). Numerical simulation of Long-Period waves and ship motions in Tomakomai Port, Japan. *Coastal Engineering Journal*, 48(1), 59–79. <https://doi.org/10.1142/s0578563406001301>

REFERENCES

1. Rabinovich, A. B. (2017). Seiches and harbor oscillations. In WORLD SCIENTIFIC eBooks (pp. 243–286). https://doi.org/10.1142/9789813204027_0011
2. Sande, J., Figuero, A., Tarrío-Saavedra, J., Peña, E., Alvarelllos, A., & Rabuñal, J. R. (2019). Application of an Analytic Methodology to Estimate the Movements of Moored Vessels Based on Forecast Data. *Water*, 11(9), 1841. <https://doi.org/10.3390/w11091841>
3. Troch, C., Terblanche, L., & Rossouw, M. (2023). MOORED SHIP MOTION FORECAST TOOL FOR THE PORT OF NGQURA. *Coastal Engineering Proceedings*, 37, 67. <https://doi.org/10.9753/icce.v37.structures.67>
4. Romano-Moreno, E., Tomás, A., Diaz-Hernandez, G., Lara, J. L., Molina, R., & García-Valdecasas, J. (2022). A Semi-Supervised Machine Learning model to forecast movements of moored vessels. *Journal of Marine Science and Engineering*, 10(8), 1125. <https://doi.org/10.3390/jmse10081125>
5. Pinheiro, L. V., Fortes, C. J. E. M., & Santos, J. A. (2018). Risk Analysis and Management of Moored Ships in Ports. Volume 3: Structures, Safety, and Reliability. <https://doi.org/10.1115/omae2018-78396>
6. Lee, S., Sasa, K., Aoki, S., Yamamoto, K., & Chen, C. (2021). New evaluation of ship mooring with friction effects on mooring rope and cost-benefit estimation to improve port safety. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 13, 306–320. <https://doi.org/10.1016/j.ijnaoe.2021.04.002>

7. Pinheiro, L., Fortes, C., Reis, M. T., Santos, J., & Soares, C. G. (2020). RISK FORECAST SYSTEM FOR MOORED SHIPS. Coastal Engineering Proceedings, 36v, 37. <https://doi.org/10.9753/icce.v36v.management.37>
8. Makris, C., Papadimitriou, A., Baltikas, V., Spiliopoulos, G., Kontos, Y., Metallinos, A., Androulidakis, Y., Chondros, M., Klonaris, G., Malliouri, D., Nagkoulis, N., Zissis, D., Tsoukala, V., Karambas, T., & Memos, C. (2024). Validation and application of the Accu-Waves Operational Platform for wave forecasts at ports. Journal of Marine Science and Engineering, 12(2), 220. <https://doi.org/10.3390/jmse12020220>
9. Makris, C., Androulidakis, Y., Karambas, T., Papadimitriou, A., Metallinos, A., Kontos, Y., Baltikas, V., Chondros, M., Krestenitis, Y., Tsoukala, V., & Memos, C. (2020). Integrated modelling of sea-state forecasts for safe navigation and operational management in ports: Application in the Mediterranean Sea. Applied Mathematical Modelling, 89, 1206–1234. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2020.08.015>
10. Van Dongeren, A., De Jong, M., Van Der Lem, C., Van Deyzen, A., & Bieman, J. D. (2016). Review of Long Wave Dynamics over Reefs and into Ports with Implication for Port Operations. Journal of Marine Science and Engineering, 4(1), 12. <https://doi.org/10.3390/jmse4010012>
11. Costas, R., Figuero, A., Peña, E., Sande, J., & Rosa-Santos, P. (2022). Integrated approach to assess resonance between basin eigenmodes and moored ship motions with wavelet transform analysis and proposal of operational thresholds. Ocean Engineering, 247, 110678. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.110678>
12. Alvarellos, A., Figuero, A., Carro, H., Costas, R., Sande, J., Guerra, A., Peña, E., & Rabuñal, J. (2021). Machine Learning based moored ship movement Prediction. Journal of Marine Science and Engineering, 9(8), 800. <https://doi.org/10.3390/jmse9080800>
13. Van Der Molen, W., Monárdez, P., & Van Dongeren, A. (2006). Numerical simulation of Long-Period waves and ship motions in Tomakomai Port, Japan. Coastal Engineering Journal, 48(1), 59–79. <https://doi.org/10.1142/s0578563406001301>

Honcharuk I.P., Vasalatiy N.V.

REAL-TIME FORECASTING OF PORT WAVES AND MOVEMENTS OF MOORED VESSELS UNDER THE INFLUENCE OF LONG-PERIOD WAVES IN BLACK SEA PORTS

The article discusses the problem of port waves caused by long-period waves, which are one of the most dangerous and insufficiently studied hydrometeorological risk factors for seaports. Based on an analysis of global cases of infragravity waves, seiches, and meteorological tsunamis, their ability to penetrate port waters, excite resonant vibrations, and cause dangerous movements of moored vessels has been established, leading to overloading of mooring systems, damage to infrastructure, and operational downtime. It has been shown that Black Sea ports are vulnerable to non-seismic long-period waves, as confirmed by the 2014 Odessa tsunami. A review of current wave forecast models and analysis of vessel movements demonstrates the lack of an integrated approach that would combine open sea wave field forecasting, port oscillation modeling, and the determination of moored vessel movements in accordance with safety criteria. The paper substantiates the need to develop a new computationally efficient method of operational forecasting adapted to the conditions of Black Sea ports, which will ensure an increase in the level of hydrometeorological safety of port operations.

Keywords: long-period waves, infragravity waves, seiches, meteorological tsunamis, port oscillations, mooring operations, movements of moored vessels, resonance, port waves, operational forecasting.

Стаття прийнята 01.10.2025

© Кириченко О.С.

ВПЛИВ НАДІЙНОСТІ ТЕРМОСТАБІЛІЗАЦІЇ ВОЛОКОННО-ОПТИЧНОГО ГІРОСКОПА НА ЯКІСТЬ КЕРУВАННЯ КУРСОМ СУДНА

У роботі проаналізовано вплив показників надійності системи термостабілізації волоконно-оптичного гіроскопа на якість керування курсом судна в умовах тривалої експлуатації. Показано наявність суперечливих вимог при виборі робочого режиму термоелектричного модуля: підвищення струму сприяє інтенсифікації ефекту Пельтьє та покращенню теплової стабільності чутливих елементів гіроскопа, але водночас призводить до зростання температурних і термомеханічних навантажень, що прискорюють деградаційні процеси в матеріалах і з'єднаннях модуля. Розглянуто фізично обґрунтовані моделі відмов, які враховують температурний фактор за законом Арреніуса та вплив механічних напружень за степеневим законом. Запропоновано комплексний підхід, що пов'яже робочий струм термоелектричного модуля з імовірністю безвідмовної роботи протягом рейсу, середнім напрацюванням до відмови та подальшими навігаційними наслідками. Проведено кількісне моделювання для термоелектричного модуля ТЕС1-01102 у діапазоні струмів 0-2 А з урахуванням характерних суднових умов експлуатації. Встановлено, що підвищення струму зумовлює нелінійне зростання коефіцієнта прискорення деградації та суттєве скорочення ресурсу модуля навіть у межах допустимих режимів. Досліджено вплив деградації системи термостабілізації на дрейф нульового зсуву гіроскопа, який у процесі інтегрування трансформується в похибку курсу та бічне відхилення судна від заданої лінії шляху. Показано, що за навігаційний інтервал активного руху тривалістю 6 год величина бічного відхилення може досягати десятків метрів. Отримані залежності мають узагальнений характер і можуть бути використані для оцінювання допустимих режимів роботи термоелектричних систем термостабілізації в інерціальних навігаційних комплексах суднового призначення. Отримані результати дозволяють інженерно обґрунтувати вибір робочої точки регулятора з урахуванням компромісу між ефективністю термостабілізації, надійністю та навігаційною точністю для різних типів морських і річкових суден.

Ключові слова: інерціальна навігаційна система; термоелектричний модуль; ефект Пельтьє; термомеханічні напруження; середнє напрацювання; дрейф нуля; бічне відхилення.

Постановка проблеми. Сучасні суднові навігаційні комплекси широко використовують волоконно-оптичні гіроскопи як базові елементи інерціальних навігаційних систем, що забезпечують визначення кутового положення та курсу судна з високою точністю і надійністю [1-4]. Особливості експлуатації таких систем у морському середовищі, зокрема тривалі рейси, змінні теплові навантаження, вібрації та обмежені можливості технічного обслуговування, висувають підвищені вимоги до стабільності характеристик гіроскопів і допоміжних систем [5].

Одним із основних факторів, що впливають на точність волоконно-оптичних гіроскопів, є температурна стабільність чутливого елемента та електронних компонентів. Для забезпечення стабільного теплового режиму все ширше застосовуються термоелектричні модулі на основі ефекту Пельтьє, які дозволяють реалізувати компактні та безінерційні системи термостабілізації [6, 7]. Разом із тим підвищення ефективності термоелектричного охолодження за рахунок збільшення робочого струму супроводжується зростанням температурних і термомеханічних навантажень, що може призводити до прискореної деградації елементів модуля та зниження його ресурсу [8, 9].

Таким чином, виникає наукове протиріччя між вимогами до високої точності навігаційних вимірювань, що потребують інтенсивних режимів термостабілізації, та необхідністю забезпечення прийнятного рівня надійності й ресурсу термоелектричних модулів за умов тривалої суднової експлуатації.

На відміну від традиційних підходів, орієнтованих переважно на енергетичну оптимізацію термоелектричних модулів за холодильним коефіцієнтом (COP) або ізольований аналіз дрейфів чутливих елементів інерціальної навігації, у даній роботі обґрунтовано системний підхід до оцінки ефективності систем термостабілізації. Запропонований підхід поєднує термомеханічні моделі надійності термоелектричних модулів із кінематичними моделями формування навігаційних похибок, встановлюючи функціональний зв'язок між прискоренням деградації виконавчих елементів та імовірнісними характеристиками точності утримання судна на заданій траєкторії руху.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Фундаментальні засади побудови та функціонування волоконно-оптичних гіроскопів, а також їх застосування в інерціальних і інтегрованих навігаційних системах детально розглянуто у класичних монографіях і навчальних посібниках [1-4]. У цих роботах показано, що температурні впливи є одним із визначальних чинників формування систематичних похибок інерціальних датчиків.

Дослідження термоелектричних ефектів, конструкцій термоелектричних модулів та шляхів підвищення їх енергетичної ефективності широко представлені в роботах [6-10]. У них розглянуто як фізичні основи ефекту Пельтьє, так і чисельні та експериментальні методи аналізу робочих характеристик мініатюрних термоелектричних охолоджувачів. Окрему увагу приділено впливу тепловідведення та режимів конвекції на температурний стан модуля.

Питання надійності термоелектричних модулів, зокрема за умов термоциклічних навантажень, досліджуються в роботах [11-14], де застосовуються підходи фізики відмов, прискорених випробувань і статистичного аналізу ресурсу електронних компонентів. Показано, що температурний фактор і термомеханічні напруження є домінуючими механізмами деградації.

Методи аналізу похибок інерціальних датчиків і їх впливу на навігаційні параметри розглянуто в роботі [15], тоді як питання структурної побудови та узгодження навігаційних систем, а також оцінки навігаційних похибок у морських застосуваннях висвітлено в [16, 17]. Експериментальні та теоретичні аспекти теплопередачі в умовах нерівномірних теплових потоків, а також їх вплив на працездатність і теплову стабільність високотемпературних теплових систем розглянуто в роботі [18].

Чисельне моделювання теплових і термомеханічних процесів у термоелектричних модулях і суміжних елементах суднового електрообладнання розглянуто в роботах [19-21], де показано можливості 3D-моделювання для оцінки температурних полів і напружень. Питання термомеханічної надійності термоелектричних модулів на основі матеріалів Bi_2Te_3 досліджено в [22].

Метою роботи є кількісна оцінка впливу показників надійності термостабілізації волоконно-оптичного гіроскопа на якість керування курсом судна шляхом побудови аналітичного зв'язку між робочим струмом термоелектричного модуля, показниками безвідмовності та довговічності в межах рейсу і навігаційними похибками, зокрема похибкою курсу та бічним відхиленням судна від заданої лінії шляху.

Виклад основного матеріалу та основні результати дослідження. У межах даної роботи волоконно-оптичний гіроскоп розглядається як узагальнений представник класу суднових інерціальних датчиків, а система термостабілізації – як типовий термоелектричний вузол на основі ефекту Пельтьє. Для аналізу використано результати чисельного моделювання робочих характеристик термоелектричного модуля, раніше отримані для систем термостабілізації гіроскопів суднової навігації [6].

Оцінка надійності проводиться з використанням мультиплікативної моделі прискорення деградації, яка враховує температурний фактор за законом Арреніуса та вплив термомеханічних напружень за степеневим законом, що відповідає підходам фізики відмов і прискорених випробувань електронних компонентів [11-14]. Отримані залежності коефіцієнта прискорення деградації та середнього напрацювання до відмови аналізуються в прив'язці до робочого струму термоелектричного модуля.

Подальший аналіз пов'язує зміну теплового режиму та деградацію модуля з ростом дрейфу нульового зсуву гіроскопа, який шляхом інтегрування призводить до накопичення похибки курсу і бічного відхилення судна від заданої траєкторії руху, що узгоджується з класичними моделями

інерціальної навігації [15-17]. Таким чином, встановлюється причинно-наслідковий ланцюг між режимом роботи термоелектричної системи, її надійністю та навігаційними показниками судна.

Функція безвідмовної роботи термоелектричного модуля в умовах рейсової експлуатації при фіксованому режимі струму описується диференціальним рівнянням:

$$\frac{dR(t, I)}{dt} = -\lambda(I)R(t, I); R(0, I) = 1, \quad (1)$$

де $R(t, I)$ – функція імовірності безвідмовної роботи термоелектричного модуля до моменту часу у межах рейсу; t – напрацювання термоелектричного модуля, год; I – робочий струм термоелектричного модуля, А; $\lambda(I)$ – інтенсивність відмов термоелектричного модуля при струмі I , 1/год.

Розв’язок цього рівняння має експоненційний вигляд:

$$R(t, I) = \exp(-\lambda(I)t), \quad (2)$$

де t – напрацювання, год.

Середнє напрацювання до відмови (Mean Time Between Failures, MTBF) термоелектричного модуля при струмі визначається як:

$$MTBF(I) = \int_0^{\infty} R(t, I) dt = \frac{1}{\lambda(I)}. \quad (3)$$

Фізично обґрунтовану залежність інтенсивності відмов термоелектричного модуля від навантаження представимо через еталонний режим та коефіцієнти прискорення деградації:

$$\lambda(I) = \lambda_{ref} AF(I) = \lambda_{ref} AF_T(I) AF_{\sigma}(I), \quad (4)$$

де λ_{ref} – інтенсивність відмов у еталонному режимі струму I_{ref} , 1/год; $AF(I)$ – загальний коефіцієнт прискорення деградації; $AF_T(I)$ – температурний множник прискорення деградації; $AF_{\sigma}(I)$ – множник, що враховує вплив термомеханічних напружень.

Температурний множник $AF_T(I)$ описується законом Арреніуса:

$$AF_T(I) = \exp \left[\frac{E_a}{k_B} \left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T(I)} \right) \right], \quad (5)$$

де E_a – енергія активації домінуючого деградаційного механізму, еВ; k_B – стала Больцмана, еВ/К; T_{ref} – абсолютна температура в еталонному режимі, К; $T(I)$ – абсолютна температура критичної області термоелектричного модуля при струмі I , К.

Абсолютна температура визначається за співвідношенням:

$$T(I) = t_{hot}(I) + 273,15, \quad (6)$$

де t_{hot} – температура гарячої сторони термоелектричного модуля, °С.

Вплив термомеханічних напружень $AF_{\sigma}(I)$ враховується степеневим законом:

$$AF_{\sigma}(I) = \left(\frac{\sigma(I)}{\sigma_{ref}} \right)^n, \quad (7)$$

де $\sigma(I)$ – еквівалентні напруження в структурі термоелектричного модуля при струмі I , Па; σ_{ref} – еквівалентні напруження в еталонному режимі, Па; n – показник чутливості деградації до напружень.

Параметри E_a та показник n у роботі трактуються як ефективні, що відображають домінантні механізми старіння у межах єдиної моделі прискорення. Такий підхід є стандартним у надійності (фізично обґрунтований підхід до аналізу відмов; методи прискорених випробувань на надійність) і забезпечує коректну порівняльну чутливість показників до температури T і напружень σ .

Загальний коефіцієнт прискорення деградації $AF(I)$:

$$AF(I) = AF_T(I) AF_{\sigma}(I). \quad (8)$$

Деградація термоелектричного модуля знижує ефективність термостабілізації навігаційного датчика, що проявляється у зростанні температурної нестабільності чутливого елемента. Для

узгодження моделі деградації з навігаційною моделлю вважатимемо, що температурна похибка пропорційна загальному коефіцієнту прискорення деградації та визначається згідно з формулою:

$$\Delta T(I) = \Delta T_{ref} AF(I), \quad (9)$$

де ΔT_{ref} – еталонний перепад температур у системі термостабілізації при номінальному режимі роботи; $AF(I)$ – загальний коефіцієнт прискорення деградації, визначений формулами (5)–(8).

Розглянемо абсолютні показники безвідмовності та довговічності в рейсі. Еталонна інтенсивність відмов λ_{ref} задається через еталонний MTBF:

$$\lambda_{ref} = \frac{1}{MTBF_{ref}}, \quad (10)$$

де $MTBF_{ref}$ – еталонне середнє напрацювання до відмови, год.

Середнє напрацювання до відмови MTBF (год) при струмі I :

$$MTBF(I) = \frac{1}{\lambda(I)} = \frac{MTBF_{ref}}{AF(I)}, \quad (11)$$

де $MTBF_{ref}$ – еталонний MTBF; $AF(I)$ – коефіцієнт прискорення деградації.

Імовірність безвідмовної роботи протягом рейсу тривалістю t_r (год):

$$R(t_r, I) = \exp(-\lambda(I)t_r), \quad (12)$$

де $R(t_r, I)$ – імовірність безвідмовної роботи термоелектричного модуля протягом рейсу; t_r – тривалість рейсу, год.

Для оцінки довговічності введемо міру накопиченого пошкодження:

$$\frac{dD(t)}{dt} = v_{ref} AF(I); D(0) = 0, \quad (13)$$

де $D(t)$ – міра накопичення пошкодження; v_{ref} – еталонна швидкість деградації, 1/год; t – час, год.

Ресурс T_{res} (год) термоелектричного модуля при струмі I :

$$T_{res}(I) = \frac{1}{v_{ref} AF(I)} = \frac{T_{res,ref}}{AF(I)}, \quad (14)$$

де v_{ref} – еталонна швидкість деградації (частка вичерпання ресурсу за годину), 1/год; $T_{res,ref}$ – еталонний ресурс (тривалість безвідмовної роботи за еталонних умов), год.

Запропонована модель є фізично обґрунтованою інженерною апроксимацією, призначеною для відносної оцінки впливу робочих режимів на ресурсні показники термоелектричного модуля. Абсолютні значення MTBF та T_{res} можуть бути уточнені шляхом калібрування параметрів за експериментальними або паспортними даними.

Розглянемо навігаційну модель накопичення похибки курсу та бічного (поперечного) відхилення судна Cross-Track Error (ХТЕ) від заданої лінії шляху (запланованої траєкторії руху) як наслідок деградації термоелектричного модуля в умовах інтенсивної експлуатації. Зниження ефективності охолодження призводить до того, що у квазістаціонарному режимі похибка термостабілізації ΔT викликає дрейф нульового зсуву гіроскопа b :

$$b \approx k_b \Delta T, \quad (15)$$

де b – нульовий зсув (bias) вимірювання кутової швидкості гіроскопа (систематична складова похибки), рад/с; k_b – температурний коефіцієнт нульового зсуву (bias), що характеризує чутливість гіроскопа до температурних відхилень, (рад/с)/К; ΔT – температурна похибка термостабілізації чутливого вузла гіроскопа, К.

Похибка курсу визначається інтегруванням зсуву нуля (bias):

$$\frac{de_{\psi}(\tau)}{d\tau} = b; e_{\psi}(0) = 0, \quad (16)$$

де $e_{\psi}(t)$ – похибка курсу (heading error), рад; τ – поточний час навігаційного інтервалу, с.

Під навігаційним інтервалом розуміється інтервал активного руху судна зі сталою або квазісталою швидкістю $v > 0$, протягом якого відбувається накопичення похибки курсу та формується бічне відхилення від заданої лінії шляху.

Умова $e_\psi(0)=0$ означає, що на початку інтервалу похибка курсу приймається нульовою (початкова орієнтація судна відкоригована/задана).

З формули (16) похибка курсу $e_\psi(t)$:

$$e_\psi(\tau) = k_b \Delta T \tau. \quad (17)$$

Бічне відхилення від лінії шляху визначається як інтеграл бокової складової швидкості судна, яка за малих курсових похибок апроксимується як $v_\perp \approx v e_\psi$:

$$XTE(t_p) \approx \int_0^{t_p} v e_\psi d\tau, \quad (18)$$

де t_n – тривалість навігаційного інтервалу, с; v – швидкість судна, м/с.

Після підстановки залежності (17) в (18) отримаємо:

$$XTE(t_p) = \frac{1}{2} v k_b \Delta T t_p^2. \quad (19)$$

У формулі (19) множник $1/2$ враховує поступове (лінійне) накопичення похибки курсу від нуля до $e_\psi(t_p)$. Також, еквівалентно можна записати:

$$XTE(t_p) = \frac{1}{2} S e_\psi(t_p), \quad (20)$$

де $S = v t_p$ – пройдена відстань за навігаційний інтервал.

Для порівняння, у разі припущення миттєвого виникнення похибки курсу з амплітудою $e_\psi(t_p)$ на початку інтервалу (миттєва поява похибки на старті), отримаємо верхню оцінку XTE без множника $1/2$:

$$XTE(t_p) \approx S e_\psi(t_p). \quad (21)$$

Навігаційна модель сформульована для квазістаціонарного теплового режиму та систематичної складової похибок. Отримані оцінки мають консервативний характер і придатні для аналізу впливу термостабілізації на навігаційну точність.

Для числової ілюстрації впливу режиму навантаження термоелектричного модуля на показники надійності та навігаційні наслідки використано розрахункові залежності температури гарячої сторони $t_{hot}(I)$ та еквівалентних термомеханічних напружень $\sigma(I)$, отримані для допустимого діапазону струму $I \in [0; 2]$ А в умовах заданого теплообміну (примусова конвекція, теплове випромінювання) та матеріалів конструкції (керамічні пластини корпусу Al_2O_3 , геометрія TEC1-01102) [6]. У межах цього діапазону значення $t_{hot}(I)$ та $\sigma(I)$ є не «аварійними», а фізично допустимими (тобто такими, що відповідають робочій області без миттєвого виходу за граничні умови), однак саме вони визначають швидкість накопичення пошкодження та, відповідно, відмінності у безвідмовності й довговічності при тривалій експлуатації. Таким чином, у розрахунку підлягає встановленню не факт працездатності в межах допустимого струму, а кількісна чутливість показників надійності до вибору робочої точки через ланцюг причинності. Спрощену узагальнену схему всієї моделі, що відображає причинно-наслідкові зв'язки між основними фізичними та експлуатаційними параметрами, наведено у вигляді виразу:

$$I \Rightarrow (t_{hot}(I), \sigma(I)) \Rightarrow AF(I) \Rightarrow \lambda(I), MTBF(I), T_{res}(I) \Rightarrow \Delta T \Rightarrow b \Rightarrow e_\psi \Rightarrow XTE, \quad (22)$$

де I – струм термоелектричного модуля, А; $t_{hot}(I)$ – температура гарячої сторони, °С; $\sigma(I)$ – еквівалентні напруження, Па; $AF(I)$ – коефіцієнт прискорення деградації; $\lambda(I)$ – інтенсивність відмов, 1/год; $MTBF(I)$ – середнє напрацювання до відмови, год; $T_{res}(I)$ – ресурс, год; ΔT – похибка термостабілізації, К; b – нульовий зсув (bias) гіроскопа, рад/с; e_ψ – похибка курсу, рад; XTE – бічне відхилення від лінії шляху (Cross-Track Error), м.

Оскільки побудовані в [6] залежності $t_{hot}(I)$ та $\sigma(I)$ є монотонними і суттєво нелінійними на інтервалі $0 \dots 2$ А, практична задача експлуатації полягає у виборі робочої точки, яка, з одного боку забезпечує потрібну холодопродуктивність/термостабільність, а з іншого – не спричиняє надмірного прискорення деградації. Саме тому для порівняльної оцінки обрано два репрезентативні режими I_1 та I_2 із допустимого діапазону, а не довільні «крайні» точки. По-перше, ці режими відповідають реальному принципу роботи регулятора термостабілізації: він підтримує температуру, змінюючи струм у певній

робочій області, тому порівняння близьких значень струму є фізично й експлуатаційно обґрунтованим. По-друге, вибір I_1 та I_2 дозволяє показати критично важливий для практики ефект: навіть відносно невелике збільшення струму в межах допустимого діапазону може призвести до помітного зростання $t_{hot}(I)$ та $\sigma(I)$, а через них – до істотної різниці в $AF(I)$, $MTBF(I)$ і $T_{res}(I)$, що безпосередньо відповідає змісту дослідження якості та надійності на стадіях експлуатації у транспортних системах.

Необхідно зазначити, що включення еквівалентних напружень $\sigma(I)$ у модель надійності є принципово важливим для технічних засобів транспорту, оскільки відмови термоелектричних модулів у реальних умовах найчастіше мають термомеханічну природу: деградація пайок і контактів, мікротріщини керамічних пластин, втомні пошкодження напівпровідникових ніжок унаслідок циклування температур і нерівномірного поля деформацій. Тобто $\sigma(I)$ не є «додатковим» параметром, а виступає інтегральною характеристикою напруженого стану, що зв'язує тепловий режим із довговічністю та ремонтпридатністю (через очікувану частоту відмов і потребу в заміні модуля як ремонтної операції) у межах транспортної експлуатації. Саме тому дані $\sigma(I)$, отримані в допустимому діапазоні струмів 0...2 А, є релевантними для оцінки безвідмовності й довговічності, вони відображають не момент руйнування, а різницю в швидкості накопичення пошкодження за різних робочих точок.

Прийнято два режими струму з робочої області регулятора: $I_1=0,6$ А; $I_2=0,75$. Відповідні значення для температури гарячої сторони модуля та еквівалентних напружень беруться з результатів попередньої роботи [6]:

$$t_{hot}(I_1) = 32,2 \text{ } ^\circ\text{C}; \sigma(I_1) = 6,6 \cdot 10^6 \text{ Па};$$

$$t_{hot}(I_2) = 35,1 \text{ } ^\circ\text{C}; \sigma(I_2) = 8,5 \cdot 10^6 \text{ Па}.$$

Обчислюється абсолютна температура гарячої сторони для кожного режиму:

$$T_1 = t_{hot}(I_1) + 273,15 = 32,2 + 273,15 \approx 305,4 \text{ К};$$

$$T_2 = t_{hot}(I_2) + 273,15 = 35,1 + 273,15 \approx 308,3 \text{ К}.$$

Еталонний режим приймається як $I_{ref}=I_1$, отже $T_{ref}=T_1$ та $\sigma_{ref}=\sigma(I_1)$. Це дозволяє оцінити прискорення деградації для I_2 відносно квазіоптимальної робочої точки.

Обчислюється температурний множник прискорення деградації за законом Арреніуса:

$$AF_T(I_2) = \exp\left[\frac{E_a}{k_B}\left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}\right)\right] = \exp\left[\frac{0,7}{8,617 \cdot 10^{-5}}\left(\frac{1}{305,4} - \frac{1}{308,3}\right)\right] \approx \exp(0,25) \approx 1,29.$$

Числова підстановка (прийнято $E_a=0,7$ еВ; $k_B=8,617 \cdot 10^{-5}$ еВ/К):

$$AF_\sigma(I_2) = \left(\frac{\sigma(I_2)}{\sigma(I_1)}\right)^n = \left(\frac{8,5 \cdot 10^6}{6,6 \cdot 10^6}\right)^3 \approx 1,29^3 \approx 2,15,$$

де $n=3$ – прийнятий показник чутливості деградації до напружень.

Обчислюється загальний коефіцієнт прискорення деградації:

$$AF(I) = AF_T(I_2) AF_\sigma(I_2) = 1,29 \cdot 2,15 \approx 2,8.$$

Обчислюється еталонна інтенсивність відмов λ_{ref} (для I_1) за заданим еталонним напрацюванням до відмови $MTBF_{ref}$ (прийнято $MTBF_{ref}=50000$ год):

$$\lambda_{ref} = \frac{1}{MTBF_{ref}} = \frac{1}{50000} = 2,0 \cdot 10^{-5} \text{ 1/год}.$$

Обчислюється інтенсивність відмов у режимі I_2 :

$$\lambda(I_2) = \lambda_{ref} AF(I) = 2,0 \cdot 10^{-5} \cdot 2,8 \approx 5,6 \cdot 10^{-5} \text{ 1/год}.$$

Обчислюється середнє напрацювання до відмови в режимі I_2 :

$$MTBF(I_2) = \frac{1}{\lambda(I_2)} = \frac{MTBF_{ref}}{AF(I_2)} = \frac{50000}{2,8} \approx 1,8 \cdot 10^4 \text{ год},$$

Обчислюється імовірність безвідмовної роботи протягом рейсу тривалістю $t_r=240$ год (10 діб):

$$R(t_r, I_1) = \exp(-\lambda(I_1) t_r) = \exp(-2,0 \cdot 10^{-5} \cdot 240) = \exp(0,0048) \approx 0,995;$$

$$R(t_r, I_2) = \exp(-\lambda(I_2) t_r) = \exp(-5,6 \cdot 10^{-5} \cdot 240) = \exp(0,0134) \approx 0,987.$$

Обчислюється ресурс (довговічність) T_{res} термоелектричного модуля у режимі I через еталонний ресурс $T_{res,ref}=40000$ год:

$$T_{res}(I_1) = 40000 \text{ год};$$

$$T_{res}(I_2) = \frac{T_{res,ref}}{AF(I_2)} = \frac{40000}{2,8} \approx 1,4 \cdot 10^4 \text{ год}.$$

Для навігаційної частини приймаються температурні похибки термостабілізації:

$$\Delta T_1 = 0,1 \text{ К}; \Delta T_2 = 0,5 \text{ К},$$

а температурний коефіцієнт дрейфу нульового зсуву гіроскопа (bias) k_b задається як:

$$k_b = 0,05 \frac{^\circ/\text{год}}{^\circ\text{C}}.$$

Обчислюється перехід коефіцієнта k_b до SI:

$$k_b^{SI} = 0,05 \frac{\pi}{180} \frac{1}{3600} \approx 2,42 \cdot 10^{-7} \frac{\text{рад/с}}{\text{К}}.$$

Обчислюється коефіцієнт bias k_b (зсув нуля) вимірювання кутової швидкості, зумовлений похибкою термостабілізації:

$$b_1 = k_b^{SI} \Delta T_1 = 2,42 \cdot 10^{-7} \cdot 0,1 = 2,42 \cdot 10^{-8} \text{ рад/с};$$

$$b_2 = k_b^{SI} \Delta T_2 = 2,42 \cdot 10^{-7} \cdot 0,5 = 1,21 \cdot 10^{-7} \text{ рад/с}.$$

Обчислюється похибка курсу наприкінці навігаційного інтервалу активного руху:

$$e_\psi(\tau) = b\tau,$$

де τ – час активного руху.

Для тривалості $\tau_p=6$ год отримаємо:

$$\tau_p = 6 \cdot 3600 = 2,16 \cdot 10^4 \text{ с};$$

$$e_{\psi,1}(\tau_p) = b_1 \tau_p = 2,42 \cdot 10^{-8} \cdot 2,16 \cdot 10^4 \approx 5,2 \cdot 10^{-4} \text{ рад};$$

$$e_{\psi,2}(\tau_p) = b_2 \tau_p = 1,21 \cdot 10^{-7} \cdot 2,16 \cdot 10^4 \approx 2,6 \cdot 10^{-3} \text{ рад}.$$

Обчислюється швидкість v у SI для швидкості судна $v_c=10$ вузлів та пройдена відстань S за інтервал:

$$v = v_c \cdot 0,5144 = 5,14 \text{ м/с};$$

$$S = 5,14 \cdot 2,16 \cdot 10^4 \approx 1,11 \cdot 10^5 \text{ м}.$$

Обчислюється Cross-Track Error (ХТЕ) як бічне відхилення від лінії шляху з урахуванням лінійного наростання похибки курсу (множник 1/2):

$$ХТЕ_1 = \frac{1}{2} S e_{\psi,1}(\tau_p) = \frac{1}{2} 1,11 \cdot 10^5 \cdot 5,2 \cdot 10^{-4} \approx 2,9 \cdot 10^1 \text{ м} \approx 29 \text{ м};$$

$$ХТЕ_2 = \frac{1}{2} S e_{\psi,2}(\tau_p) = \frac{1}{2} 1,11 \cdot 10^5 \cdot 2,6 \cdot 10^{-3} \approx 1,45 \cdot 10^2 \text{ м} \approx 145 \text{ м}.$$

Також, наведемо верхню (worst-case) консервативну оцінку ХТЕ (миттєва поява похибки на початку інтервалу):

$$ХТЕ_1^{\max} = S e_{\psi,1}(\tau_p) = 1,11 \cdot 10^5 \cdot 5,2 \cdot 10^{-4} \approx 5,8 \cdot 10^1 \text{ м} \approx 58 \text{ м};$$

$$ХТЕ_2^{\max} = S e_{\psi,2}(\tau_p) = 1,11 \cdot 10^5 \cdot 2,6 \cdot 10^{-3} \approx 2,9 \cdot 10^2 \text{ м} \approx 291 \text{ м}.$$

При переході від квазіоптимального режиму I_1 до підвищеного режиму I_2 коефіцієнт прискорення деградації зростає до $AF(I_2) \approx 2,8$, що призводить до скорочення МТBF та ресурсу приблизно у 2,8 рази, а у навігаційній частині – до пропорційного зростання bias, похибки курсу та ХТЕ за однакових умов руху. Це підтверджує, що вибір робочої точки регулятора термостабілізації термоелектричного модуля є експлуатаційно важливим фактором як для показників надійності (безвідмовність, довговічність), так і для якості керування курсом судна через накопичення бічного відхилення (Cross-Track Error) на навігаційному інтервалі активного руху.

На рис. 1 показано залежності показників надійності та навігаційних похибок від робочого струму термоелектричного модуля, що відображають причинно-наслідковий зв'язок між деградацією модуля та навігаційними наслідками. Слід зазначити, що оцінка показників надійності виконується на характерному рейсовому інтервалі $t_r=240$ год, тоді як навігаційні похибки аналізуються на типовому інтервалі активного руху $t_n=6$ год, що відповідає різним часовим масштабам деградаційних та навігаційних процесів.

Залежності, наведені на рис. 1, відображають послідовний причинно-наслідковий ланцюг впливу робочого струму I термоелектричного модуля на показники надійності та навігаційні наслідки. Як видно з рис. 1, а, зі зростанням I спостерігається суттєве нелінійне збільшення коефіцієнта прискорення деградації $AF(I)$, що в досліджуваному діапазоні зростає у кілька разів і свідчить про активізацію термічно та термомеханічно зумовлених механізмів старіння. Це безпосередньо відображається на функції надійності $R(t_r, I)$ (рис. 1, б): для типового рейсу тривалістю $t_r=240$ год підвищення струму, яке забезпечує інтенсифікацію ефекту Пельтьє та покращення теплових характеристик, водночас супроводжується поступовим зниженням імовірності безвідмовної роботи, що вказує на існування компромісу між ефективністю термоелектричного охолодження та довготривалою надійністю модуля.

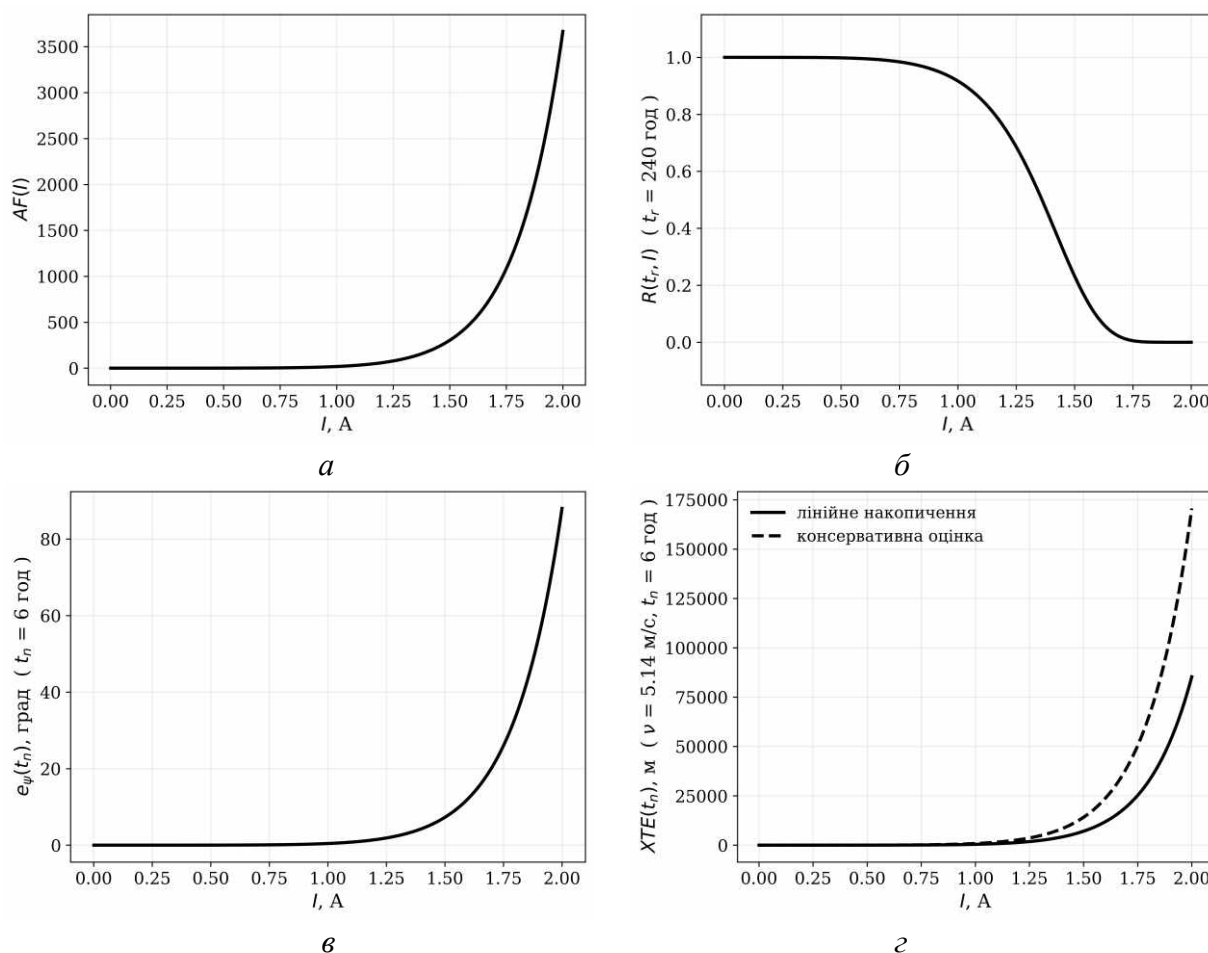


Рисунок 1 – Залежності показників надійності $\{AF, R\}$ та навігаційних похибок $\{e_\psi, XTE\}$ від робочого струму I : а – коефіцієнт прискорення деградації $AF(I)$; б – імовірність безвідмовної роботи $R(t_r, I)$ протягом рейсу; в – похибка курсу $e_\psi(t_n, I)$ наприкінці навігаційного інтервалу; з – бічне відхилення від лінії шляху $XTE(t_n, I)$

Накопичений вплив деградаційних процесів призводить до зростання систематичної похибки курсу $e_\psi(t_n, I)$ (рис. 1, в), яка за навігаційний інтервал $t_n=6$ год може досягати одиниць і десятків градусів, що відображає істотне погіршення умов термостабілізації навігаційного датчика. Такі великі значення курсової похибки відповідають граничним режимам деградації та тривалій автономній роботі

інерціальної навігаційної системи без зовнішніх корекцій і не характеризують типовий експлуатаційний стан. Інтегрування цієї похибки за часом в процесі руху судна зі швидкістю $v \approx 5,1$ м/с (10 вузлів) зумовлює зростання бічного відхилення від лінії шляху $XTE(t_n, I)$ (рис. 1, *з*). У робочому діапазоні струмів до $I \approx 1,5$ А отримані значення ХТЕ перебувають у межах десятків метрів (близько 10-15 м), що відповідає реалістичним експлуатаційним сценаріям судноводіння за відсутності зовнішніх корекцій. Однакова форма кривих на рис. 1, *а* та рис. 1, *в* пояснюється лінійною пропорційністю похибки курсу коефіцієнта прискорення деградації при фіксованому навігаційному інтервалі, що зумовлює відмінність лише у масштабі вертикальної осі. Слід зазначити, що для розглянутого термоелектричного модуля ТЕС1-01102 максимальний робочий струм у проведеному аналізі становить 2 А, тому значення 1,5 А відповідає 75 % верхньої межі допустимого діапазону струмів (0-2 А). Саме в цій області відповідні ділянки кривих курсової похибки $e_\psi(I)$ (рис. 1, *в*) та бічного відхилення $XTE(I)$ (рис. 1, *з*) демонструють фізично обґрунтовані та практично спостережувані рівні навігаційних похибок. Водночас при подальшому зростанні робочого струму понад цю межу система термостабілізації входить у зону різкого нелінійного зростання коефіцієнта прискорення деградації, що зумовлює стрибкоподібне збільшення оцінюваного бічного відхилення. Аналогічно, відповідна ділянка кривої курсової похибки $e_\psi(I)$ характеризує різке зростання систематичної похибки курсу, що відображає втрату ефективності термостабілізації гіроскопа. Отримані за консервативною схемою інтегрування за часом великі значення ХТЕ відповідають граничному теоретичному сценарію без корекції курсу та слугують верхньою оцінкою можливих навігаційних наслідків деградації, а не типовому експлуатаційному режиму. Під консервативною схемою інтегрування розуміється підхід, за якого похибка курсу вважається максимальною протягом усього навігаційного інтервалу, що забезпечує верхню оцінку можливого бічного відхилення. Сценарій з такими великими значеннями ХТЕ показано спеціально як межу застосовності системи, тобто не як рекомендацію, а як попередження про недоцільність використання термоелектричної стабілізації для навігації без корекції при підвищених струмах.

Отримані залежності мають прикладне значення для широкого кола суден, на яких використовуються інерціальні навігаційні системи з термоелектричною термостабілізацією гіроскопів, і де вибір робочого режиму термоелектричних модулів визначається не лише енергетичними, але й надійнісними та навігаційними обмеженнями.

Таким чином, у роботі розглянуто вплив режиму струму термоелектричного модуля в межах допустимого діапазону на деградаційні процеси, показники надійності та навігаційну точність судна. Підвищення струму супроводжується зростанням температури та термомеханічних напружень, що призводить до прискорення деградації термоелектричного модуля. Для кількісного опису цього ефекту використано фактор прискорення деградації, сформований на основі температурної моделі Арреніуса, який дозволяє узгоджено оцінювати як імовірність безвідмовної роботи на інтервалі напрацювання, так і накопичення навігаційної похибки на характерному інтервалі автономного руху судна.

Загальна структура причинно-наслідкових зв'язків між режимом струму, деградаційними процесами та навігаційною похибкою узагальнено відображено у виразі (22). Нижче наведено фізичну та експлуатаційну інтерпретацію цієї схеми з урахуванням отриманих числових результатів (при інтервалі напрацювання $t_r=240$ год і інтервалі автономного руху $t_n=6$ год):

$$I \rightarrow T(I), \sigma(I) \rightarrow AF(I) \rightarrow \left\{ \begin{array}{l} R(t_r, I), \quad t_r = 240 \text{ год;} \\ \Delta T(I), e_\psi(t_n, I), XTE(t_n, I), \quad t_n = 6 \text{ год} \end{array} \right\}. \quad (23)$$

Логічні зв'язки між режимом струму, деградаційними процесами та навігаційною похибкою узагальнено у вигляді блок-схеми на рис. 2.

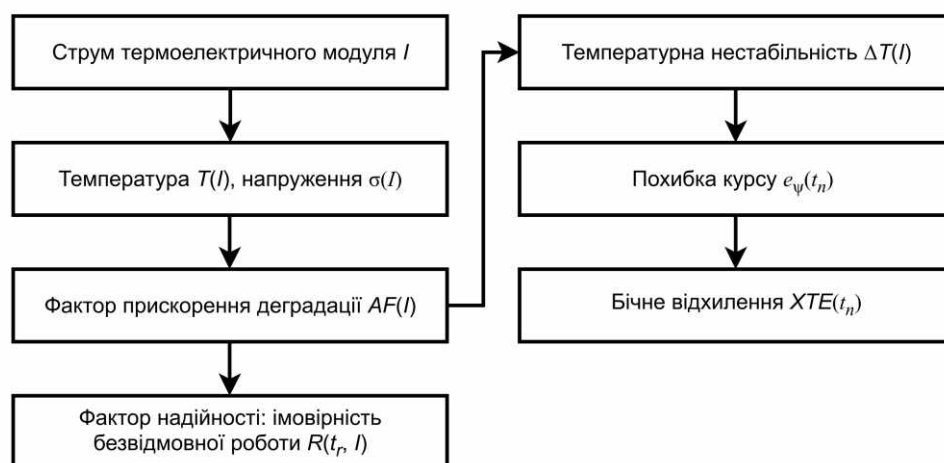


Рисунок 2 – Узагальнена блок-схема впливу режиму струму термоелектричного модуля в системі термостабілізації гіроскопа на деградаційні процеси, показники надійності та навігаційну похибку судна

Незважаючи на допустимий діапазон робочих струмів термоелектричного модуля, підвищені режими призводять до прискорення деградаційних процесів, що описується фактором прискорення на основі температурної моделі Арреніуса. Цей фактор визначає як імовірність безвідмовної роботи на інтервалі напрацювання, так і погіршення умов термостабілізації навігаційного датчика, що проявляється у зростанні навігаційної похибки на характерному інтервалі автономного руху судна.

Висновок. Запропоновано аналітичний підхід до оцінки ресурсу системи термостабілізації волоконно-оптичного гіроскопа, який, на відміну від традиційних енергетичних критеріїв, враховує вплив термомеханічних напружень на показники надійності та навігаційної точності. Показано, що перехід від номінального режиму роботи термоелектричного модуля (0,6 А) до форсованого (0,75 А) призводить до зростання коефіцієнта прискорення деградації приблизно у 2,8 рази, що супроводжується суттєвим скороченням прогнозованого середнього напрацювання до відмови (MTBF). На прикладі рейсу тривалістю 240 год встановлено, що підвищення робочого струму задля інтенсифікації охолодження супроводжується зниженням розрахункової імовірності безвідмовної роботи системи. Кількісний аналіз навігаційної складової показав, що деградація параметрів термостабілізації призводить до зростання систематичної похибки курсу, яка за інтервал активного руху 6 год трансформується у бічне відхилення судна від заданої траєкторії руху на рівні десятків метрів. Отримані результати підтверджують, що вибір робочої точки термоелектричного модуля має здійснюватися на основі компромісу між глибиною охолодження, допустимим рівнем деградації та вимогами до навігаційної точності.

ЛІТЕРАТУРА

1. Lefèvre H. The Fiber-Optic Gyroscope. 3rd ed. Norwood (MA): Artech House, 2022. 550 p.
2. Titterton D., Weston J. Strapdown Inertial Navigation Technology. 2nd ed. London: The Institution of Engineering and Technology, 2004. 576 p. DOI: <https://doi.org/10.1049/PBRA017E>
3. Groves P. D. Principles of GNSS, Inertial, and Multisensor Integrated Navigation Systems. 2nd ed. Boston: Artech House, 2013. 776 p.
4. Farrell J. A., Barth M. The Global Positioning System and Inertial Navigation. New York: McGraw-Hill, 1999. 392 p.
5. Fossen T. I. Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control. Chichester: John Wiley & Sons, 2011. 575 p. DOI: <https://doi.org/10.1002/9781119994138>
6. Кириченко О.С., Ключков Ю.П., Мельник В.Ю., Коломієць Д.П., Вечурко О.М., Шевченко В.І. Моделювання робочих характеристик термоелектричного модуля для волоконно-оптичних гіроскопів суднової навігації. Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки. 2025. Т. 36(75). № 5. С. 262-270. DOI: <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.5.1/36>

7. Rowe D. M. (Ed.). *Thermoelectrics Handbook: Macro to Nano*. Boca Raton: CRC Press, 2006. 1008 p. DOI: <https://doi.org/10.1201/9781420038903>
8. Goldsmid H. J. *Introduction to Thermoelectricity*. 2nd ed. Berlin; Heidelberg: Springer-Verlag, 2016. xviii + 278 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-662-49256-7>
9. Snyder G. J., Ursell T. S. Thermoelectric efficiency and compatibility. *Physical Review Letters*. 2003. Vol. 91. No. 14. Art. 148301. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.91.148301>
10. Riffat S. B., Ma X. Thermoelectrics: A review of present and potential applications. *Applied Thermal Engineering*. 2003. Vol. 23. No. 8. P. 913-935. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1359-4311\(03\)00012-7](https://doi.org/10.1016/S1359-4311(03)00012-7)
11. Yan J., Liu Z., Wang Y., Shen L. A performance degradation and lifetime prediction model for thermoelectric device under thermal cycling. *Applied Thermal Engineering*. 2025. (in press). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2025.126655>
12. Indmeskine F. E., Saintis L., Kobi A. Review on accelerated life testing plan to develop predictive reliability models for electronic components based on design-of-experiments. *Quality and Reliability Engineering International*. 2023. DOI: <https://doi.org/10.1002/qre.3330>
13. Guo Z., Chen H., Hu Y., Jiang J., Ye X. Reliability prediction of electronic components based on physics of failure with manufacturing parameters fluctuations. *Microelectronics Reliability*. 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.microrel.2025.115662>
14. Collins D. H., Huzurbazar A. V. Highly accelerated life testing (HALT): A review from a statistical perspective. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Computational Statistics*. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1002/wics.70000>
15. El-Sheimy N., Hou H., Niu X. Analysis and modeling of inertial sensors errors. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. 2008. Vol. 57. No. 1. P. 140-149. DOI: <https://doi.org/10.1109/TIM.2007.908635>
16. Kaplan, Elliott D.; Hegarty, Christopher J. (Eds.) *Understanding GPS/GNSS: Principles and Applications*. 3rd Edition. Norwood, Massachusetts (MA): Artech House, 2017. 1064 p.
17. Mueen S. M., Almutairi A. (Eds.). *Machine Health Monitoring and Fault Diagnosis Techniques*. Basel: MDPI Books, 2023. 374 p. DOI: <https://doi.org/10.3390/books978-3-0365-7333-5>
18. Zhou L., Meng F., Sun Y. Numerical study on infrared detectors cooling by multi-stage thermoelectric cooler combined with microchannel heat sink. *Applied Thermal Engineering*. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2023.121817>
19. Gong T., Gao L., Wu Y., Zhang L., Yin S., Li J. Numerical simulation on a compact thermoelectric cooler for the optimized design. *Applied Thermal Engineering*. 2019. Vol. 160. Art. 114082. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.10.047>
20. 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*. 2017. № 1(6). С. 60-63.
21. Кириченко О.С., Білюк І.С., Шарейко Д.Ю., Фоменко А.М., Гаврилов С.О., Бутрім Л.І. Чисельне тримірне моделювання термоелектричного охолоджувача вимірювального електроустаткування автоматичних систем. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського*. 2018. Т. 29(68). № 6. С. 58-63.
22. Nguyen Y. N., Son I. Thermomechanical stability of Bi₂Te₃-based thermoelectric modules employing variant diffusion barriers. *Journal of Alloys and Compounds*. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.intermet.2021.107404>

REFERENCES

1. Lefèvre H. *The Fiber-Optic Gyroscope*. 3rd ed. Norwood (MA): Artech House, 2022. 550 p.
2. Titterton D., Weston J. *Strapdown Inertial Navigation Technology*. 2nd ed. London: The Institution of Engineering and Technology, 2004. 576 p. DOI: <https://doi.org/10.1049/PBRA017E>
3. Groves P. D. *Principles of GNSS, Inertial, and Multisensor Integrated Navigation Systems*. 2nd ed. Boston: Artech House, 2013. 776 p.
4. Farrell J. A., Barth M. *The Global Positioning System and Inertial Navigation*. New York: McGraw-Hill, 1999. 392 p.
5. Fossen T. I. *Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control*. Chichester: John Wiley & Sons, 2011. 575 p. DOI: <https://doi.org/10.1002/9781119994138>
6. Kyrychenko O.S., Klochkov Yu.P., Melnyk V.Iu., Kolomiets D.P., Vechurko O.M., Shevchenko V.I. Modeliuvannya robochykh kharakterystyk termoelektrychnoho modulia dlia volokonno-optychnykh hiroskopiv sudnovoi navihatsii. *Vcheni zapysky Tavriiskoho natsionalnoho universytetu imeni V.I. Vernadskoho. Seriya: Tekhnichni nauky*. 2025. T. 36(75). № 5. S. 262-270. DOI: <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.5.1/36>

7. Rowe D. M. (Ed.). Thermoelectrics Handbook: Macro to Nano. Boca Raton: CRC Press, 2006. 1008 p. DOI: <https://doi.org/10.1201/9781420038903>
8. Goldsmid H. J. Introduction to Thermoelectricity. 2nd ed. Berlin; Heidelberg: Springer-Verlag, 2016. xviii + 278 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-662-49256-7>
9. Snyder G. J., Ursell T. S. Thermoelectric efficiency and compatibility. Physical Review Letters. 2003. Vol. 91. No. 14. Art. 148301. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.91.148301>
10. Riffat S. B., Ma X. Thermoelectrics: A review of present and potential applications. Applied Thermal Engineering. 2003. Vol. 23. No. 8. P. 913-935. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1359-4311\(03\)00012-7](https://doi.org/10.1016/S1359-4311(03)00012-7)
11. Yan J., Liu Z., Wang Y., Shen L. A performance degradation and lifetime prediction model for thermoelectric device under thermal cycling. Applied Thermal Engineering. 2025. (in press). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2025.126655>
12. Indmeskine F. E., Saintis L., Kobi A. Review on accelerated life testing plan to develop predictive reliability models for electronic components based on design-of-experiments. Quality and Reliability Engineering International. 2023. DOI: <https://doi.org/10.1002/qre.3330>
13. Guo Z., Chen H., Hu Y., Jiang J., Ye X. Reliability prediction of electronic components based on physics of failure with manufacturing parameters fluctuations. Microelectronics Reliability. 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.microrel.2025.115662>
14. Collins D. H., Huzurbazar A. V. Highly accelerated life testing (HALT): A review from a statistical perspective. Wiley Interdisciplinary Reviews: Computational Statistics. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1002/wics.70000>
15. El-Sheimy N., Hou H., Niu X. Analysis and modeling of inertial sensors errors. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. 2008. Vol. 57. No. 1. P. 140-149. DOI: <https://doi.org/10.1109/TIM.2007.908635>
16. Kaplan, Elliott D.; Hegarty, Christopher J. (Eds.) Understanding GPS/GNSS: Principles and Applications. 3rd Edition. Norwood, Massachusetts (MA): Artech House, 2017. 1064 p.
17. Mueen S. M., Almutairi A. (Eds.). Machine Health Monitoring and Fault Diagnosis Techniques. Basel: MDPI Books, 2023. 374 p. DOI: <https://doi.org/10.3390/books978-3-0365-7333-5>
18. Zhou L., Meng F., Sun Y. Numerical study on infrared detectors cooling by multi-stage thermoelectric cooler combined with microchannel heat sink. Applied Thermal Engineering. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2023.121817>
19. Gong T., Gao L., Wu Y., Zhang L., Yin S., Li J. Numerical simulation on a compact thermoelectric cooler for the optimized design. Applied Thermal Engineering. 2019. Vol. 160. Art. 114082. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.10.047>
20. Kyrychenko O.S., Kostiuchenko V.I., Zakharov D.O. Modeliuvannia statsionarnykh teplovykh poliv strumoprovodnykh shyn riznoho profilu. Enerhetyka ta kompiuterno-intehrovani tekhnolohii v APK. 2017. № 1(6). S. 60-63.
21. Kyrychenko O.S., Biliuk I.S., Shareiko D.Iu., Fomenko A.M., Havrylov S.O., Buhrim L.I. Chyselne trymirne modeliuvannia termoelektrychnoho okholodzhuвача vymiriuvalnoho elektroustatkuvannia avtomatychnykh system. Vcheni zapysky Tavriiskoho natsionalnoho universytetu imeni V.I. Vernadskoho. 2018. T. 29(68). № 6. S. 58-63.
22. Nguyen Y. N., Son I. Thermomechanical stability of Bi₂Te₃-based thermoelectric modules employing variant diffusion barriers. Journal of Alloys and Compounds. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.intermet.2021.107404>

Kyrychenko O.S.

INFLUENCE OF THERMOELECTRIC STABILIZATION RELIABILITY OF A FIBER-OPTIC GYROSCOPE ON SHIP COURSE CONTROL QUALITY

The paper analyzes the influence of reliability characteristics of a thermoelectric stabilization system for a fiber-optic gyroscope on the quality of ship course control under long-term operating conditions. The presence of conflicting requirements in selecting the operating mode of a thermoelectric module is demonstrated: an increase in operating current enhances the Peltier effect and improves thermal stability of the sensitive gyroscope elements, but simultaneously leads to higher temperature-induced and thermomechanical loads, which accelerate degradation processes in the module materials and interconnections. Physically substantiated failure models are considered, accounting for the temperature factor described by the Arrhenius law and the effect of mechanical stresses represented by a power-law relationship. A comprehensive approach is proposed that relates the operating current of the thermoelectric module to the probability of failure-free operation during a voyage, the mean time to failure, and the resulting navigation consequences. Quantitative modeling is

performed for the TEC1-01102 thermoelectric module over the current range of 0-2 A, taking into account typical marine operating conditions. It is established that an increase in current results in a nonlinear growth of the degradation acceleration factor and a significant reduction in module lifetime, even within permissible operating regimes. The influence of thermoelectric stabilization degradation on the gyroscope bias drift is investigated, showing that this drift is integrated over time into heading error and lateral deviation of the vessel from the intended track. It is demonstrated that for a navigation interval of active motion lasting 6 h, the lateral deviation may reach several tens of meters. The obtained dependencies have a generalized character and can be used to assess allowable operating regimes of thermoelectric stabilization systems in shipborne inertial navigation complexes. The results provide an engineering basis for selecting the controller operating point while considering the trade-off between thermal stabilization efficiency, reliability, and navigation accuracy for various types of marine and inland vessels.

Keywords: *inertial navigation system; thermoelectric module; Peltier effect; thermomechanical stresses; mean time between failures (MTBF); bias drift; lateral deviation.*

Стаття прийнята 15.09.2025

© Тимошук О.М., Левченко О.В.

ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДІВ ЗНИЖЕННЯ ВИКИДІВ ОКСИДІВ СІРКИ В АТМОСФЕРУ

У статті розглянуто проблему викидів оксидів сірки (SO_x), що утворюються під час експлуатації суднових енергетичних установок при спалюванні морських палив із підвищеним вмістом сірки. Проаналізовано екологічні наслідки викидів SO_x для атмосферного повітря та морського середовища, а також чинні міжнародні вимоги Міжнародної морської організації, встановлені Додатком VI Конвенції MARPOL 73/78. Розглянуто глобальні та регіональні обмеження щодо вмісту сірки в судовому паливі, зокрема вимоги стандарту IMO 2020 та зон контролю викидів SO_x . Проаналізовано основні технічні та паливні підходи до скорочення викидів оксидів сірки, включаючи використання альтернативних палив і судових систем очищення випускних газів. Показано, що застосування скрубєрних систем є ефективним і економічно доцільним способом забезпечення відповідності сучасним екологічним вимогам без радикальної модернізації суднових енергетичних установок.

Ключові слова: випускні гази, екологічні показники, емісія оксидів сірки, охорона довкілля, очищення випускних газів, підготовка палива, скрубєрне очищення, суднове паливо, судовий дизель, судові енергетичні установки

Актуальність теми роботи. Посилення міжнародних екологічних вимог до судноплавства, зокрема запровадження глобальних і регіональних обмежень IMO щодо вмісту сірки в судовому паливі, актуалізує проблему скорочення викидів оксидів сірки (SO_x) в атмосферу. Незважаючи на чинність стандарту IMO 2020 та суворі вимоги в зонах контролю викидів SO_x (SECA), на більшості транспортних суден і надалі широко використовується важке високосірчисте паливо через його економічну доступність. Альтернативні низькосірчисті палива та газові енергоносії, хоча й забезпечують суттєве зниження або повне усунення викидів SO_x , супроводжуються значними фінансовими витратами, технічними складнощами переобладнання суднових енергетичних установок (CEU) та обмеженнями інфраструктурного характеру.

У цьому контексті особливого значення набуває пошук і наукове обґрунтування ефективних, технічно здійсненних та економічно доцільних методів зниження викидів SO_x без радикальної зміни типу палива або силової установки. Одним із найбільш перспективних напрямів є застосування судових систем очищення випускних газів (скрубєрів), які дозволяють забезпечити відповідність вимогам Додатка VI МАРПОЛ у всіх зонах експлуатації суден. Дослідження ефективності, конструктивних особливостей та експлуатаційних аспектів таких систем є важливим для зменшення негативного впливу судноплавства на довкілля та забезпечення сталого розвитку морського транспорту.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблематика зниження викидів оксидів сірки судовими енергетичними установками є предметом великої кількості наукових досліджень у вітчизняній та зарубіжній науковій літературі. Значна кількість робіт присвячена аналізу екологічних наслідків використання високосірчистих морських палив та шляхам нейтралізації шкідливих компонентів відпрацьованих газів судових двигунів. Зокрема, у працях [1,2,7] розглянуто технічні підходи до зниження токсичності вихлопних газів і удосконалення систем очищення відпрацьованих газів судових дизелів.

У дослідженнях [3,9,11,12] значну увагу приділено питанням експлуатації судових дизельних двигунів, впливу якості палива на екологічні та енергетичні показники, а також проблемам забезпечення надійності судових енергетичних установок за умов посилення екологічних вимог. Роботи [18-21] присвячені застосуванню паливних присадок і методам підготовки важких палив з метою покращення їх екологічних характеристик, зокрема зменшення викидів SO_x та твердих частинок.

Окремий напрям досліджень стосується використання альтернативних рідких і газових палив у суднових двигунах. У роботах [24-31] проаналізовано можливості застосування метанолу, диметилефіру, водопаливних емульсій, нафтового та природного газу, показано їх потенціал щодо зниження викидів оксидів сірки та інших шкідливих компонентів. Водночас автори відзначають наявність суттєвих технічних, економічних та інфраструктурних обмежень, що стримують широке впровадження таких рішень у морському транспорті [35-38].

У низці сучасних публікацій [27, 28, 32-34] розглянуто застосування суднових систем очищення вихлопних газів (скруберів) як одного з найбільш ефективних способів забезпечення відповідності вимогам Додатка VI Конвенції MARPOL 73/78 при використанні традиційних високосірчистих палив. Показано, що такі системи дозволяють суттєво знизити викиди SO_x без необхідності радикальної модернізації суднових енергетичних установок.

Разом з тим, аналіз наукових джерел свідчить, що питання комплексної оцінки ефективності різних методів зниження викидів оксидів сірки з урахуванням експлуатаційних, економічних та екологічних чинників залишається актуальним і потребує подальших досліджень. Це зумовлює необхідність проведення додаткового аналізу сучасних технічних рішень, спрямованих на зменшення негативного впливу судноплавства на атмосферне повітря.

Мета дослідження полягає в аналізі та науковому обґрунтуванні ефективних методів зниження викидів оксидів сірки (SO_x) у випускних газах (ВГ) суднових енергетичних установок з метою забезпечення відповідності вимогам ІМО, зменшення негативного впливу судноплавства на атмосферне повітря та підвищення екологічної безпеки експлуатації морських суден.

Виклад основного матеріалу На всіх режимах експлуатації суден, так і під час їх будівництва, обслуговування та ремонту, в докілья виділяються шкідливі викиди, що забруднюють повітря. Одним із шкідливих викидів [5, 6], що видаляються з відпрацьованими газами суднових є оксиди сірки – SO_x . Оксиди сірки – SO_x утворюються через наявність сполук сірки в морських паливах, що використовуються в СЕУ. Наявність сірки в паливі, що використовується на сьогоднішній день, досягає до 3,5% за масою.

Оксиди сірки – SO_x , що виділяються в атмосферу, перебувають у повітрі до 2...5 діб, далі окислюються, утворюючи сірчану кислоту, яка є основною причиною кислотних дощів. Спільно з оксидами азоту та сірки окис вуглецю – CO , що виділяється при спалюванні палива в двигунах внутрішнього згоряння (ДВЗ), мають спрямовану дію на рефлекторні системи людини. Двоокис вуглецю – CO_2 є основним джерелом парникового ефекту, тому йому приділяється найпильніша увага.

Ці викиди оксидів вуглецю підвищують середню глобальну температуру планети за рахунок поглинання сонячної енергії в атмосфері та пом'якшують різницю між денними і нічними температурами. Зростання вмісту в атмосфері парникових газів призводить до підвищення температури та танення льодовиків та загрожує прибережним мешканцям підвищення рівня моря. Саме двоокис вуглецю – CO_2 змінює погодні умови та вегетаційний період для продовольчих культур.

Димність випускних газів обумовлена наявністю в їх складі твердих та рідких аерозольних частинок. Маса цих частинок, які викидаються з випускними газами двигунів, порівняно мала. Приблизно 95...98% маси цих частинок складає суміш сажі, незгорілих вуглеводнів, сульфатів та інших включень. Сажа є продуктом неповного згоряння палива. Вихід сажі залежить від коефіцієнта надлишку повітря, типу сумішоутворення та якості палива. Суміш компонентів сажі, що викидаються з випускними газами ДВЗ може переноситися на значні відстані вітром, а потім осідати на землі чи у воді. Незважаючи на те, що ці частки регулюються як неспецифікована маса в повітрі, вони мають значний вплив на рослинність і екосистеми залежно від масового вмісту хімічних компонентів. Оскільки об'єми викидів нестаціонарні в часі та просторі, прогнозування регіональних впливів залишається складним процесом.

Забруднення атмосферного повітря внаслідок викидів оксидів сірки, що утворюються під час спалювання морських палив із підвищеним вмістом сірки, зумовило необхідність жорсткого міжнародного регулювання у сфері морського транспорту. Координація заходів щодо обмеження викидів SO_x у суднопластві здійснюється на міжнародному рівні в межах діяльності Міжнародної морської організації (ІМО), нормативні документи якої є обов'язковими для виконання державами-учасницями [7]. Основна увага ІМО у сфері контролю викидів SO_x зосереджена на встановленні вимог до якості суднових палив та запровадженні зон контролю викидів, у межах яких діють посилені екологічні обмеження.

Реалізація цих заходів спрямована на зменшення негативного впливу судноплавства на атмосферу та запобігання утворенню кислотних опадів у прибережних районах.

За час своєї діяльності ІМО вжила заходів, спрямованих на запобігання аварій танкерів, на мінімізацію забруднення навколишнього середовища через чищення нафтових танків та скидання відходів машинних приміщень. Також ІМО вжила заходів боротьби зі шкідливими викидами, що виділяються з ВГ СЕУ. Заходи ІМО щодо боротьби зі шкідливими викидами з суден містяться у «Міжнародній конвенції щодо запобігання забруднення водного середовища морськими суднами», відомої як MARPOL 73/78.

У 1997 році в Конвенцію MARPOL 73/78 було внесено поправки до «Протоколу 1997 року», який включає Додаток VI під назвою «Правила запобігання забрудненню повітря суднами». Додаток VI MARPOL, вперше прийнятий у 1997 році і набрав чинності 19 травня 2005 року, встановлює обмеження на викиди SO_x [8], що містяться у ВГ СЕУ суден та забороняє навмисні викиди озоноруйнівних речовин. У 2011 році ввели обов'язкові заходи до Додатку VI MARPOL щодо скорочення викидів парникових газів – CO_2 . У Додатку VI MARPOL додано новий розділ 4 «Заходи енергоефективності суден».

У Додатку VI MARPOL представлені межі вмісту сірки у паливі, яке використовується для СЕУ для контролю викидів SO_x і побічно викидів твердих частинок (відсутні явні межі контролю викидів твердих частинок). Межі допустимого вмісту сірки в паливі наведені в табл. 1 та представлені графічно на рис. 1

Таблиця 1 – Хронологія зміни вимог Додатку VI MARPOL щодо вмісту сірки у морському паливі

Регіон	2000	2010	2012	2015	2020
Глобальний	4,5%	-	3,5%	-	0,5%
Зони контролю викидів SO_x	1,5%	1%	-	0,1%	0,1%



Рисунки 1 – Зміна вимог додатку VI MARPOL щодо вмісту сірки у морському паливі

Необхідно відмітити, перспективні вимоги до вмісту сірки в паливі такі, що викиди SO_x в довкілля поступово знижувались для суднових двигунів. При цьому альтернативні межі також дозволені для скорочення викидів SO_x . Наприклад, якщо паливо з 1,5% сірки спалюється в двигунах, кількість викидів SO_x у ВГ становить до 6 г/кВт×год. Отже, якщо на судах застосовується високосірчисте паливо замість палива з 1,5% сірки, тоді потрібна система очищення сірки із ВГ для забезпечення контролю викидів $SO_x \leq 6$ г/кВт×год.

Усі судна, що збудовані після 2012 року, мають відповідати вимогам щодо енергетичної ефективності, яка оцінюється відповідно до Energy Efficiency Design Index (EEDI) та вимагають більшої енергоефективності. При цьому конструктори можуть вибрати будь-який метод для досягнення вимог EEDI в конкретному дизайні судна. Для розв'язання цього завдання для кожного судна розробляється окремий План управління енергетичною ефективністю (Ship Energy Efficiency Management Plan – SEEMP). Норми SEEMP, призначені для підвищення енергоефективності суден під час експлуатації.

Якщо судно має більшу енергоефективність при експлуатації, то менше спалюється палива для виконання призначеної роботи. Отже, менше парникових газів – CO_2 потрапляють у атмосферу.

Наявність сажі у випускних газах оцінюється двома вимірювальними коефіцієнтами ослаблення світлового потоку, якими є натуральний коефіцієнт – $K, \text{м}^{-1}$; відносний коефіцієнт – $N, \%$ [9]. У табл. 2 наведені співвідношення між наявністю сажі у ВГ та вимірювальними коефіцієнтами димності. Димність ВГ суднового двигуна, що виявляє наявність сажі, визначається залежно від витрати ВГ – $V_{\Gamma}, \text{м}^3/\text{с}$. Гранично допустимий рівень димності ВГ наведено на рис. 2.

Таблиця 2 – Співвідношення між наявністю сажі у випускних газах та коефіцієнтами димності

Сажа, $\text{г}/\text{м}^3$	Одиниці виміру	
	$N, \%$	$K, \text{м}^{-1}$
0	0	0
0,025	10	0,245
0,050	20	0,519
0,100	30	0,829
0,125	40	1,188
0,212	50	1,612
0,325	60	2,131
0,430	70	2,800

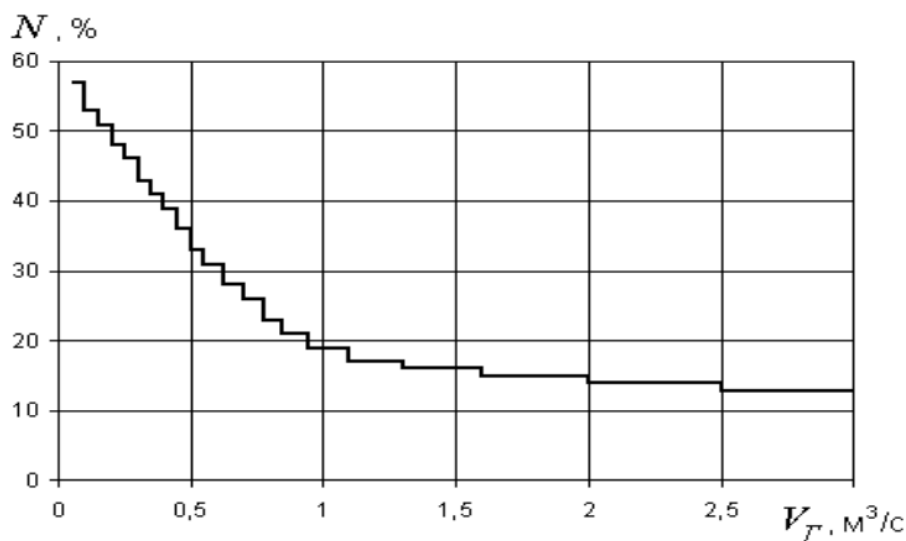


Рисунок 2 – Гранично допустимий рівень димності

Якщо судно відповідає нормам вимог ІМО, видається «Міжнародний сертифікат попередження забруднення повітря», термін дії якого становить до 5 років. В такий спосіб контролюються шкідливі викиди (NO_x , SO_x , CO_2 , сажа та тверді частинки), що виділяються з ВГ СЕУ, для зменшення забруднення повітря.

Викиди оксидів сірки – SO_x обумовлені наявністю сірки в паливах, що використовуються в суднових двигунах. Згідно з чинними правилами ІМО, максимальна глобальна межа вмісту сірки в судновому паливі становить 3,5%.

У зонах контролю викидів SO_x (SECAs) вміст сірки в паливі, що використовується на борту судна, нині не повинно перевищувати 0,1% за масою. Було затверджено глобальне обмеження рівня максимального вмісту сірки у судновому паливі. Цей стандарт набув чинності 1 січня 2020 року.

На даний час на транспортних судах широко використовується важке паливо – мазут, що має низьку ціну. Дане паливо є високосірчистим, оскільки у ньому міститься сірка до 3,5% за масою.

Вочевидь, що паливо, яке використовується в даний час на транспортних судах, не відповідає

вимогам майбутніх обмежень контролю ІМО викидів SO_x . Тому виконуються дослідження з пошуку, визначення та обрання різних методів зниження забруднення випускних газів сірчистими з'єднаннями для задоволення майбутніх вимог ІМО.

Глобальні вимоги щодо вмісту сірки в судовому паливі створили стимул використання чистішого палива з низьким вмістом сірки до 0,1% замість традиційного важкого палива з високим вмістом сірки.

Для судових двигунів використовуються марингазойл (MGO) та морське дизельне паливо (MDO) як джерела заміни важкого палива – високосірчистого мазуту [10]. Однак такі палива приблизно вдвічі дорожче ніж мазути, тому власникам транспортних суден не вигідно використовувати ці палива на судах. У деяких випадках робляться спроби для покращення морського палива і скорочення викидів SO_x в довкілля. Однією з цих спроб є змішування важкого мазуту з термічним паливом, переробленим із відходів пластмас [11]. Проте, практична реалізація є надто складною через деякі технічні проблеми і відсутності досвіду використання.

Також науковцями проводяться дослідження щодо використання альтернативних видів рідкого та газового палив у СЕУ для скорочення викидів SO_x з суден. До таких альтернативних видів палива можна віднести метанол [24], диметилефір [25], водопаливні емульсії [26, 27], нафтовий газ [28, 29, 30] та природний газ [31].

Проте за показниками теплотворної здатності та ефективності ці джерела енергії поки не досягають необхідного рівня, придатного для використання цих палив у судових двигунах.

Перспективним є застосування малосірчистого мазуту (М-100 із вмістом сірки до 0,1% за масою). Його властивості лежать у межах допуску ІМО. Цей мазут виходить традиційними методами перегонки з малосірчистої нафти, та його ціна лежить у межах ціни стандартних мазутів.

Одним із найбільш перспективних шляхів зниження шкідливих сірчистих викидів є переведення СЕУ на газове паливо. Застосування природного газу в двигунах внутрішнього згоряння дозволяє повністю виключити викиди сірки [32, 33, 34]. Однак досі в деяких країнах використання природного газу як моторного палива неможливо через відсутність берегової інфраструктури для постачання скрапленого природного газу на торгові судна [35, 36]. Крім того, модернізація СЕУ для переведення на газове паливо є складним завданням [37, 38]. Тому на жодних судах застосування даного методу зниження забруднення ВГ оксидами сірки ускладнено.

Висновок. У роботі встановлено, що викиди оксидів сірки (SO_x) судовими енергетичними установками суттєво впливають на забруднення атмосферного повітря та формування кислотних опадів. Аналіз вимог Додатка VI Конвенції MARPOL 73/78 показав, що контроль викидів SO_x здійснюється шляхом обмеження вмісту сірки в судовому паливі та впровадження зон SECA. Обґрунтовано, що використання судових систем очищення випускних газів є ефективним і технічно здійсненним способом забезпечення відповідності вимогам ІМО за збереження економічної доцільності експлуатації суден. Застосування скрубєрів дозволяє знизити викиди SO_x до рівнів, еквівалентних спалюванню палива з вмістом сірки не більше 0,1%.

ЛІТЕРАТУРА

1. Заблоцкий Ю.В. Исследование влияния органических покрытий на работу элементов топливной аппаратуры высокого давления судовых дизелей // Судовые энергетические установки: науч.-техн. сб. – 2015. – № 35. – Одесса: НУ ОМА. – С. 83-92.
2. Zablotsky Y.V. A study of the influence of organic coatings on the operation of high-pressure fuel system components of marine diesel engines // Ship power plants. – 2015. – № 35. – P. 83-92.
3. Зверьков Д.О., Сагін С.В. Зниження механічних втрат у судових дизелях // Суднові енергетичні установки: наук.-техн. зб. – 2020. – Вип. 40. – С. 20-25. DOI : 10.31653/smf341.2020.20-25.
4. Zverkov D.O., Sagin S.V. Reduction of mechanical losses in marine diesel engines // Ship power plants. – 2020. – № 41. – P. 20–25. DOI: 10.31653/smf341.2020.20-25.
5. Побережний Р.В., Сагін С.В. Забезпечення екологічних показників дизелів суден річкового та морського транспорту // Суднові енергетичні установки: наук. -техн. зб. – 2020. – Вип. 41. – Одеса: НУОМА. – С. 5-9. DOI: 10.31653/smf340.2020.5-9.

6. Poberezhniy R.V., Sagin S.V. Ensuring the environmental performance of diesel engines in river and sea transport vessels // Ship power plants. – 2020. – Vol. 41. – P. 5-9. DOI: 10.31653/smf340.2020.5-9.
7. Сагін С.В. Зниження енергетичних витрат в прецизійних парах паливної апаратури суднових дизелів / С.В. Сагін // Суднові енергетичні установки : наук.-техн. зб. Вип. 38. – Одеса : НУ «ОМА», 2018. – С. 139-149.
8. Сагін С.В., Столярик Т.О. Динаміка суднових дизелів під час використання моторних мастил з різними структурними характеристиками // Автоматизація суднових технічних засобів : наук. -техн. зб. – 2021. – Вип. 27. – Одеса: НУ«ОМА». – С. 108-119. DOI: 10.31653/1819-3293-2021-1-27-108-119.
9. 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.
10. Солодовников В. Г. Обеспечение требований энергетической эффективности при подготовке тяжелых топлив для судовых двигателей внутреннего сгорания / В. Г. Солодовников // Austria-science. – 2017. – № 7. – С. 33-37
11. Марченко О.О., Сагін С.В. Вдосконалення процесу очищення суднових важких палив // Суднові енергетичні установки: науково-технічний збірник. – 2020. – Вип. 41. – Одеса: НУ«ОМА». – С. 10-14. DOI: 10.31653/smf341.2020.10-14.
12. Marchenko O.O., Sagin S.V. Improving the process of cleaning marine heavy fuels // Ship power plants. – 2020. – Vol. 41. – P. 10-14. DOI: 10.31653/smf340.2020.10-14.
13. Руснак Д.Ю., Сагін С.В. Забезпечення екологічних вимог при ультразвуковій десульфурізації вуглеводних палив // Суднові енергетичні установки : наук.-техн. зб. – 2020. – Вип. 40. – Одеса : НУ«ОМА». – С. 49-54. DOI: 10.31653/smf340.2020.49-54.
14. Rusnak D.Y., Sagin S.V. Ensuring environmental requirements during ultrasonic desulfurization of hydrocarbon fuels // Ship power plants. – 2020. – Vol. 40. – P. 49-54. DOI: 10.31653/smf340.2020.49-54.
15. 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>.
16. 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>.
17. Судновий механік: Довідник // Авт. кол.: За ред. А.А.Фока, д-ра техн. наук, судн. старшого механіка. – У 3-х т. – Т. 1. – Одеса: Фенікс. 2008. – 1036 с., с. 162 – 195.
18. Мацкевич Д.В., Сагін С.В., Ханмамедов С.А. Изменение реологических характеристик смазочных материалов в циркуляционной масляной системе в процессе эксплуатации среднеоборотного двигателя // Судовые энергетические установки : науч.-техн. сб, 2010. – Вып. 25. – Одесса: ОНМА. – С.109-118.
19. Matskevych D.V., Sagin S.V., Hanmamedov S.A. Changes in the rheological characteristics of lubricants in the circulating oil system during operation of a medium-speed engine // Ship power plants. – 2010. – № 25. – P. 109-118.
20. Шевченко В. А., Онищенко О. А. Проблеми удосконалення, підвищення енергетичної ефективності тенденції розвитку складних суднових технічних систем і комплексів. *4th International scientific and practical conference “Perspectives of world science and education” (December 25-27, 2019) CPN Publishing Group, Osaka, Japan.* 2019, p.p. 995-1005.
21. Banisoleiman K., Rattenbury N. Reliability trends, operating issues and acceptance criteria related to exhaust gas turbochargers used in the marine industry// A classification society view by Lloyd’s Register, marine services.- London, 2008.- September. 21-39 p.p.
22. Emission Project Guide. MAN B&W Two-stroke Marine Engines / MAN Diesel & Turbo Teglholmsgade 41 2450 Copenhagen SV, Denmark, 2017. -108 p. 4. HERE. Международный журнал компании «Альфа Лаваль». № 30. 2012. С. 10-13.
23. Sagin S.V., Kuropyatnyk O.O., Tkachenko I.V 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.
24. Sagin S.V., Kuropyatnyk O.O., Tkachenko I.V. Ensuring the environmental friendliness of marine diesel engines of specialized ships // Ship power plants. – 2022. – № 45. – P. 5–16. doi: 10.31653/smf45.2022.5-16.
25. Kuropyatnyk O. A. Exhaust Gas Recirculation as a Major Technique Designed to Reduce NOx Emissions from Marine Diesel Engines / O. A. Kuropyatnyk, S. V. Sagin // OUR SEA : International Journal of Maritime Science & Technology. – 2019. – Vol. 66. – Iss. 1. – P. 1-9. <https://doi.org/10.17818/NM/2019/1.1>.
26. Kuropyatnyk O. A. Selection of optimal operating modes of exhaust gas recirculation system for marine low- speed diesel engines / O. A. Kuropyatnyk // Materials of the International Conference “Process Management and Scientific Developments” (Birmingham, United Kingdom, January 16, 2020. Part 4). – P. 203-211. DOI. 10.34660/INF.2020.4.52992.
27. MAN B&W ME/ME-C/ME-GI/ME-B-TII engines [Electronic resource]. – Copenhagen, Denmark : MAN Diesel.

– 2010. – 357 p.

33. Сагін С. В. Определение диапазона стратификации вязкости смазочного материала в трибологических системах судовых дизелей // Вісник Одеськ. нац. мор. ун-ту. – 2019. – Вип. 1(58). – С. 89-100.

33. Sagin S.V. Determination of the range of lubricant viscosity stratification in tribological systems of marine diesel engines // Herald of the Odessa National Maritime University. – 2019. – № 1(58). – P. 89–100.

34. Sagin S.V., Kuropyatnyk O.A. Using exhaust gas bypass for achieving the environmental performance of marine diesel engines // Austrian Journal of Technical and Natural Sciences. Scientific journal. – 2021. – № 7-8 – P. 36-43. <https://doi.org/10.29013/AJT-21-7.8-36-43>.

34. Sagin S.V., Kuropyatnyk O.A. Using exhaust gas bypass for achieving the environmental performance of marine diesel engines // Austrian Journal of Technical and Natural Sciences. Scientific journal. – 2021. – № 7-8 – P. 36-43. <https://doi.org/10.29013/AJT-21-7.8-36-43>.

35. Varbanets R., Karianskiy A. Analyse of marine diesel engine performance // Journal of Polish CIMAC. Energetic Aspects. Gdansk: Faculty of Ocean Engineering and Ship Technology Gdansk University of Technology. 2012. Vol. 7. No. 1. P. 269–275.

36. Zablotsky Y.V. The use of chemical fuel processing to improve the economic and environmental performance of marine internal combustion engines/ Yu.V. Zablotsky // Materials of the International Conference “Scientific research of the SCO countries: synergy and integration”. Part 1. August 31, 2019. Beijing, PRC. – P. 131-138. DOI. 10.34660/INF.2019.15.36257.

37. 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. 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>.

38. Zablotsky Yu. V. Reducing of thermal factor of exit-gas system of marine medium-speed diesel engine due to the usage of fuel additives / Yu. V. Zablotsky // Science and Education : material of the XIII international research and practice conference, Munich, November 2nd – 3 rd, 2016. – Munich : Vela Verlag Waldkraiburg. – 2016. – P. 96-103.

39. Заблоцький Ю.В., Сагін А.С. Визначення динамічних навантажень під час зміни режимів мащення прецизійних пар паливної апаратури судових дизелів // Суднові енергетичні установки : науково-технічний збірник. – 2022. – Вип. 44. – Одеса : НУ «ОМА». – С. 121-131. doi: 10.31653/smf44.2022.121-131.

39. Zablotskyi Yu.V., Sagin A.S. Determination of dynamic loads during the change of lubrication modes of precision pairs of fuel equipment of marine diesel engines // Ship power plants. – 2022. – № 44. – P. 121-131. doi: 10.31653/smf44.2022.121-131.

40. Dvulit Z.P., Levchenko O.V., Derkach D.M. Formation of marketing decisions in the enterprise management system // Menedzhment ta pidpriemnytstvo v Ukraini: etapy stanovlennia ta problemy rozvytku. – 2020 – Vol. 2(1). – P. 21–28. <https://science.lpnu.ua/sites/default/files/journal-paper/2020/jun/21855/st3.pdf>

Tymoshchuk O., Levchenko O.

RESEARCH OF METHODS FOR REDUCING SULFUR OXIDE EMISSIONS INTO THE ATMOSPHERE

The article examines the problem of sulfur oxide (SO_x) emissions generated during the operation of marine power plants when burning marine fuels with high sulfur content. The environmental consequences of SO_x emissions for the atmospheric air and the marine environment are analyzed, along with the current international requirements of the International Maritime Organization established by Annex VI of the MARPOL 73/78 Convention. Global and regional restrictions on sulfur content in marine fuel are reviewed, specifically the IMO 2020 standard requirements and Sulfur Emission Control Areas (SECAs).

The study analyzes the main technical and fuel-based approaches to reducing sulfur oxide emissions, including the use of alternative fuels and marine exhaust gas cleaning systems (EGCS). It is shown that the application of scrubber systems is an effective and economically viable way to ensure compliance with modern environmental requirements without radical modernization of marine power plants.

Keywords: exhaust gases, environmental performance, sulfur oxide emissions, environmental protection, exhaust gas cleaning, fuel preparation, scrubber cleaning, marine fuel, marine diesel, marine power plants.

Стаття прийнята 15.10.2025

© Сокол А. О., Сокол І. В., Гусєв В. М., Куценко Ю. О.

РОЗШИРЕННЯ МОЖЛИВОСТЕЙ СИСТЕМИ ОЦІНЮВАННЯ КОМПЕТЕНЦІЙ У СФЕРІ СУДНОВОДІННЯ

У статті розглянуто застосування суднових навігаційних симуляторів як інструменту оцінювання професійної компетентності майбутніх судноводіїв відповідно до вимог Кодексу ПДНВ 78/95 з урахуванням Манільських поправок. Проаналізовано міжнародні та національні нормативні документи, а також наукові дослідження, присвячені проблемам тестування, оцінювання та використання симуляційних технологій у морській освіті. Обґрунтовано обмеженість традиційних форм контролю знань (письмових екзаменів і усних співбесід) щодо визначення рівня сформованості практичних навичок і вмінь.

Розроблено комплексне симуляційне завдання та систему бального оцінювання, що охоплюють ключові професійні компетенції майбутніх судноводіїв. Оцінювання проведено із використанням навігаційного тренажера «Navi-Trainer Professional 5000» за участю здобувачів освіти випускного курсу спеціальності J7 Морський та внутрішній водний транспорт, спеціалізації J7.01 Навігація та управління морськими суднами. Здійснено порівняльний аналіз результатів симуляційного та письмового оцінювання, який виявив сильний прямий кореляційний зв'язок між ними (коефіцієнт Спірмена +0,73).

Результати дослідження підтверджують вищу інформативність і практичну спрямованість симуляційного оцінювання, його відповідність реальним умовам роботи на борту судна та міжнародним стандартам підготовки моряків. Визначено проблемні аспекти підготовки здобувачів освіти й надано рекомендації щодо вдосконалення симуляційних завдань і подальшого впровадження симуляційних технологій у систему оцінювання професійної компетентності майбутніх судноводіїв.

Ключові слова: навчання, симуляція, навігація, управління судном, компетентність, симулятор, оцінювання, судноводії, прийняття рішень

Компетентність у Кодексі з підготовки і дипломування моряків та несення вахти 17/95 з урахуванням Манільських поправок [1] (далі – ПДНВ 78/95) визначається як рівень знань, навичок і вмінь, які необхідно досягти для виконання функцій на борту судна відповідно до узгоджених міжнародною спільнотою стандартів. Традиційно, в морській сфері професійну компетентність оцінюють за допомогою письмових екзаменів та усних співбесід, за допомогою яких неможливо оцінити навички, а відповідно і неможливо визначити остаточно рівень оволодіння компетентністю. Сучасні технології, такі як навігаційні симулятори, надають можливість оцінити знання, навички і вміння здобувача.

У Кодексу ПДНВ 78/95 поправок містяться таблиці, що визначають мінімальні стандарти компетенції та стверджується, що симулятори можуть бути використані для демонстрації рівня володіння компетентностями. Частина Кодексу ПДНВ 78/95 розглядається як така, що вимагає від учасників Конвенції визначення цілей і завдань симуляційного навчання, максимально наближених до реальної роботи на борту судна.

Сучасні технології симуляції систем, які імітують реальну роботу суден, розширюють можливості оцінювання рівня компетентності здобувачів освіти. При цьому основним завданням вважається розробка і реалізація нових форм оцінювання, що ґрунтуються на педагогічних принципах, з акцентом на орієнтацію на здобувача освіти, забезпечуючи справедливості і відповідності міжнародним стандартам. Симуляційне оцінювання рівня підготовки здобувача освіти, їх рівень засвоєння компетенцій зазначених в ПДНВ 78/95 є найбільш досконалий ідеальний інструмент для оцінювання.

Метою дослідження є вивчення застосування систем симуляції роботи суден для оцінювання професійної компетентності майбутнього судноводія.

Для досягнення мети дослідження необхідно виконати такі завдання:

1. Аналіз літератури з тестування, оцінки та використання симуляції.
2. Узагальнення досвіду використання симуляторів з метою оцінювання компетентності майбутніх судноводіїв.
3. Визначення компетенцій, які мають бути включені до завдання для оцінювання за допомогою симуляторів.
4. Розробка завдання для симуляційного оцінювання та системи оцінювання.
5. Проведення симуляційного оцінювання серед здобувачів освіти.
6. Аналіз результатів симуляційного оцінювання.
7. Порівняння результатів симуляційного оцінювання з результатами традиційного оцінювання.
8. Розробка рекомендацій для подальших досліджень.

Огляд літератури. Проведено огляд міжнародних і національних нормативних актів, що регулюють підготовку майбутніх моряків, включно з програмами оцінювання, аналіз літератури й інтернет-джерел для визначення сучасних підходів до тестування та використання симуляції для оцінювання.

В роботі Пітера Мюрхеда та Даррелла Фішер [2] містяться педагогічні рекомендації для інструкторів щодо розробки курсів, методів їх проведення, навчальних засобів оцінювання здобувачів освіти та курсів, використання морського моделювання та основ забезпечення якості.

У статті [3] представлено особливості діагностики сформованості лідерської компетентності майбутніх судноводіїв, зокрема критерії, показники і рівні. В цій роботі за основу класифікації для визначення критеріїв запропоновано обрати структуру лідерської компетентності, що поєднує її основні компоненти; розглянуто особливості діагностування сформованості лідерської компетентності майбутніх судноводіїв, визначено критерій як інструмент оцінки здобувачів освіти. Визначені вимоги, яким повинні відповідати заявлені критерії.

В своїй роботі Ністор Філіп «Стандартизація в навчанні та кваліфікації робочої сили в сфері морського транспорту» [4] підкреслює важливість стандартизації в підготовці та кваліфікації моряків, аналізує фактори, що впливають на вдосконалення та функціонування міжнародних норм щодо морських перевезень.

Дослідження [5] спрямоване на вивчення нових вимог щодо підготовки з питань обізнаності про морське середовище та навчання лідерству і роботі в команді. Звертається увага на командну роботу, лідерство, можливості команди, спільну мету, командні норми, комунікації, робочі процедури команди, інтеграцію членів команди. Досліджено оптимальність розподілу цих видів діяльності по всій навчальній програмі з урахуванням довгострокового розгортання; обговорено оцінку компетентності лідерства.

В статті [6] розглядаються результати роботи Європейського агентства з морської безпеки для забезпечення впровадження стандартів ПДНВ 78/95 у державах-членах ЄС (EMSA) щодо запровадження проекту UniMET, який має намір уніфікувати мінімальні вимоги до морської освіти та підготовки моряків та заохочувати досягнення вищих стандартів у підготовці моряків, і представлено результати проекту Sail Ahead щодо інтеграції попереднього навчання моряків з вимогами роботи на березі.

В дослідженні [7] проведено всебічний аналіз наявних методів оцінювання, що застосовуються в морській тренажерній підготовці, і виявлення їхнього зв'язку з бажаними результатами навчання; представлено детальне розуміння переваг та обмежень визначених методів оцінювання.

В статті [8] проведено огляд наявних підходів до оцінки ефективності навчання на морському симуляторі. Аналізуються результати академічних досліджень у сфері оцінки навчання на морському симуляторі. Виявлено різні методи оцінювання, проте жоден із них не призначено як стандартну систему оцінювання для всіх морських симуляторів. В статті зазначається що для

забезпечення об'єктивної оцінки навчання на морському симуляторі необхідно розробити і впровадити об'єктивну систему оцінки, яка буде застосовуватися до всіх курсів навчання на морському симуляторі, що дасть змогу забезпечити стандартизовану оцінку всіх моряків у рамках Стандартів навчання, сертифікації та несення вахти.

Таким чином, проведений аналіз літературних джерел свідчить про актуальність обраного напрямку досліджень.

Основна частина

1. Розроблення завдання для оцінювання і системи оцінювання

Комплексне завдання для оцінювання майбутніх судноводіїв було розроблено у відповідності до вимог Кодексу ПДНВ 78/95 і робочих освітніх програм таких освітніх компонентів: «Навігація та лоція», «Управління судном», «Навігаційні інформаційні системи», «Електронавігаційні прилади», «Радіонавігаційні прилади і системи», «Організація роботи екіпажу та основи безпечного несення вахти», «Міжнародні правила запобігання зіткненню суден у морі та безпечне несення вахти», «Використання радіолокатора та засобів автоматичної радіолокаційної прокладки при розходженні суден». Кількісна оцінка роботи здобувачів освіти здійснюється на основі системи бального оцінювання.

Для реалізації симуляційних завдань використано навігаційні містки тренажера «Navi-Trainer Professional 5000» виробництва компанії TRANSAS, які оснащені симулятором радару, ECDIS, органів управління кермом, двигунами та навігаційним обладнанням. Для коректного порівняння результатів було розроблено однакове завдання для виконання як за допомогою симулятора так і для виконання письмової роботи. Район плавання та тип судна для виконання завдання на симуляторі збігався з районом та типом судна, що використовувався для виконання письмового завдання.

2. Учасники оцінювання

У дослідженні брали участь здобувачі освіти випускного курсу спеціальності 271 Морський та внутрішній водний транспорт, спеціалізації 271.01 Навігація та управління морськими суднами.

3. Проведення симуляційного оцінювання

Здобувачі освіти отримали завдання із задалегідь встановленою метою, завданнями і часовим обмеженням. Інструкторами-викладачами був проведений інструктаж щодо виконання вправи та особливості керування судном. Вправа складалася з низки завдань, складених у відповідності до вимог Правила П/1 «Обов'язкові мінімальні вимоги для дипломування вахтових помічників капітана суден валовою місткістю 500 або більше» Кодексу ПДНВ 78/95. Для визначення компетентності майбутніх судноводіїв щодо розпізнавання навігаційних вогнів і знаків на симуляторі були відтворені умови плавання у денний та нічний час. Кожен учасник експерименту розміщувався на окремому містку. Робота здобувачів освіти на симуляторі спостерігалася безпосередньо інструкторами-викладачами, а їхні записи на картах і в журналах перевірялися після завершення вправи та оцінювалися за розробленою системою оцінювання.

4. Порівняння результатів симуляційного оцінювання та письмових робіт

Виконання письмової роботи з оцінювання знань здобувачів освіти відбувалось за тиждень після виконання симуляційного завдання. Результати виконання письмової роботи та оцінки отриманої під час виконання симуляційного завдання є незалежними.

За результатами порівняння оцінок отриманих за виконання симуляційного завдання та письмової роботи, аналізу результатів з використанням методу рангової кореляції Спірмена встановлено високу валідність отриманих результатів для визначення компетентності. Коефіцієнт кореляції +0,73 свідчить про сильний прямий зв'язок між оцінками.

5. Аналіз завдань симуляційного оцінювання

Завдання симуляційного оцінювання мали три основні складові: теоретична підготовка здобувача освіти що була отримана під час навчальних занять, практичні навички роботи із тренажером та досвід роботи на борту судна (проходження практики). Проведений аналіз виявив завдання, які складно було розв'язувати здобувачам освіти, що допомогло виявити прогалини в

підготовці майбутніх судноводіїв, а також дозволило відкоригувати симуляційні завдання для використання у майбутньому.

6. Аналіз думок здобувачів освіти

Після виконання симуляційного завдання та виконання письмової роботи із здобувачами освіти було проведено анкетування. За результатами анкетування було з'ясовано що виконання симуляційного завдання для здобувачів освіти виявилось складнішим аніж виконання письмової роботи. Серед переваг симуляційного завдання над письмовою роботою: високий рівень реалізму завдання, міцний зв'язок із знаннями отриманими на практиці. З іншого боку – складність деяких завдань, обмеженість в часі на прийняття рішення і виконання маневру, неможливість виправлення помилок.

Результати дослідження

Опис симуляційного та письмового завдання

Здобувачі освіти виконували наступні завдання:

Завдання 1 – нанесення початкової позиції на карту і планування короткого переходу.

Завдання 2 – приймання лоцмана на борт для проведення судна в порт.

Завдання 4, 5 – перехід на симульованому судні в реальному часі з визначенням місця судна різними методами.

Завдання 6 – визначення часу до зміни курсу, підготовка до маневру.

Завдання 7 – розрахунок передбачуваного місця судна, враховуючи припливи.

Завдання 8 – розрахунок фактичного припливу.

Завдання 9 – визначення фактичної траєкторії і швидкості судна.

Завдання 10 – розрахунок курсу за гірокомпасом і магнітним компасом.

Завдання 12 – розрахунок часу прибуття на станцію для приймання лоцмана.

Завдання 13 – визначення поправки магнітного компаса та її врахування у визначення курсу судна.

Завдання 14 – вміння розрізняти денні навігаційні сигнали.

Завдання 15 – вміння розрізняти нічні навігаційні сигнали.

Завдання 3, 11, 13 – перевірка розрахунків траєкторії руху судна.

Під час виконання завдання здобувачі освіти повинні вміти ідентифікувати орієнтири, радіолокаційні цілі, символи на карті, відрізняти сигнали радіолокаційної системою, за допомогою радіолокатора визначати пеленги і відстані від об'єктів.

Симуляційна вправа вимагала від здобувачів освіти продемонструвати знання, уміння та навички у розв'язанні практичних завдань у реалістичному робочому середовищі.

Проведення симуляційного оцінювання

Перед початком роботи на симуляторі здобувачі освіти були проінструктовані щодо завдання, яке їм необхідно було виконати, та часу його виконання. Під час виконання вправи кожен здобувач освіти займав окремий місток судна.

Виконання завдань вимагали розрахунків траєкторії руху судна і правильної експлуатації обладнання містка. На відміну від виконання письмової роботи, час, який відводиться на виконання симуляційного завдання, був більшим бо необхідно було враховувати залежність від реального часу руху судна, впливу чинників довкілля та людського чинника в маневруванні судном.

Результати симуляційного оцінювання та оцінювання письмової роботи

Результати симуляційного оцінювання

Результати симуляційного оцінювання, проведеного за тиждень до письмової роботи, є абсолютно незалежними і виражені у відсотках від повної оцінки за виконання кожного завдання окремо. Завдання вважалось виконаним, як для симуляційного так і письмового оцінювання, за умови отримання 70% правильних відповідей. Загалом отриманий середній бал становив менше за рекомендований за таких основних причин: у здобувачів освіти не було достатньо тренувань на симуляторі, і це було перше самостійне (не під керівництвом інструктора) використання симулятора для оцінювання.

Аналіз результатів письмової роботи

Результати письмового оцінювання здобувачів освіти, свідчать про взаємозв'язок з результатами симуляційного оцінювання. Причинами, за якими певні здобувачі освіти погано склали письмовий екзамен, є випадкові помилки, які не є характерними під час навчання, а також відсутність досвіду несення ваhti на містку.

Порівняння результатів симуляційного оцінювання та результатів письмової роботи

Порівняння результатів виконання письмової роботи та виконання завдань на симуляторі дозволяє визначити, чи існує кореляція між ними. Тісна кореляція свідчить, що симуляційне оцінювання є таким самим хорошим засобом визначення компетентності, як і письмова робота, а слабка кореляція може вказувати на відсутність зв'язку з результатами.

Аналіз середніх балів за виконання письмової роботи і за симуляційне оцінювання показує, що виконання завдань на симуляторі далось здобувачам освіти складніше аніж письмове. Порівняння оцінок можна побачити на рис. 1.

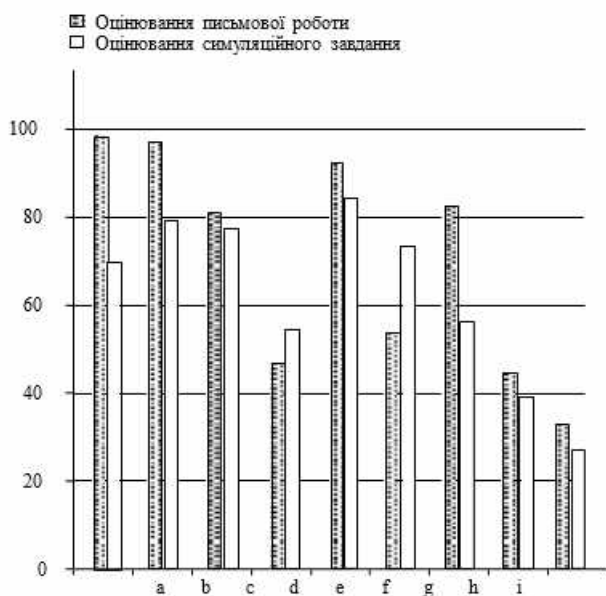


Рисунок 1 – Порівняльна оцінка результатів письмового та симуляційного оцінювань

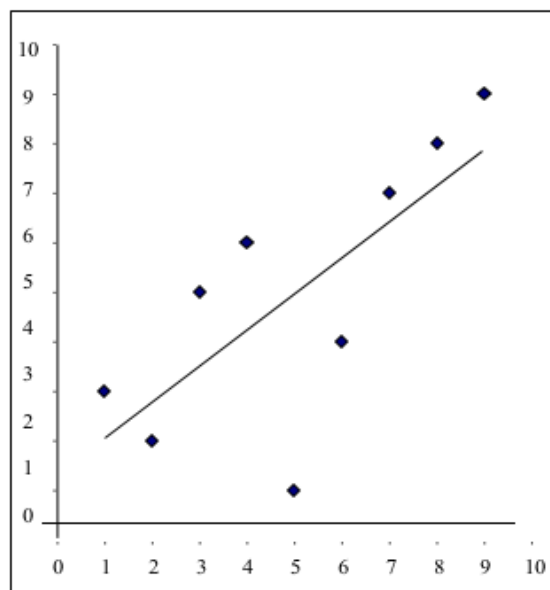


Рисунок 2 – Графік розсіювання, що показує різницю рангів Спірмена

Аналіз завдань симуляційного оцінювання

Завдання симуляційного оцінювання аналізувалися в класичний спосіб, щоб визначити, наскільки добре здобувачі освіти виконали завдання, шляхом порівняння середнього балу, отриманого всіма учасниками в кожному завданні, з максимально досяжним балом рис. 3.

Завдання, виконані повністю, свідчать про простоту або відмінне володіння навичками з боку здобувачів освіти. Так, вирішення завдань 1 і 2, які відпрацьовуються протягом усього курсу навчання, свідчать про високий рівень майстерності здобувачів освіти у цьому напрямі. Завдання 3, відпрацьоване під час тренувань на симуляторі, також не становило особливих труднощів.

Завдання 4, 5 та 14 виявилися складним майже для половини здобувачів освіти.

Завдання 6 правильно виконали лише третина здобувачів освіти. Середній бал за завдання 50% говорить про його середню складність.

Завдання 7 (середньої складності), менше половини здобувачів освіти виконали повністю правильно.

Завдання 8 виявилися складним. Через відсутність кореляції між оцінками це завдання необхідно переглянути, перш ніж використовувати його в тому ж контексті знову.

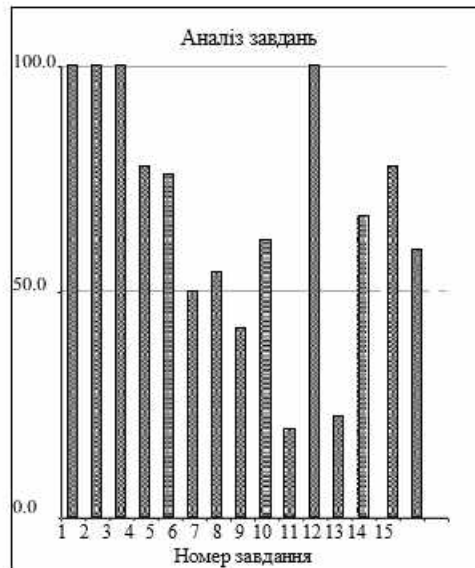


Рисунок 3 – Аналіз завдань

Завдання 9, 13 і 15 мають деякі видимі невідповідності і потребує певного переопрацювання.

Завдання 10 з найнижчим середнім балом в оцінці має бути переглянute. А завдання 11, навпаки, було практичною операцією, що виконалася всіма учасниками легко.

Завдання 12 отримало другий за низькістю середній бал через допущені здобувачами освіти помилки у розрахунках. Це завдання необхідно переглянути і відпрацьовувати в аудиторії та під час практичних занять на симуляторі.

Анкетне опитування здобувачів освіти

Після завершення симуляційного та письмового оцінювання здобувачам освіти було запропоновано відповісти на питання щодо проходження курсу навчання, розуміння поставлених завдань, здатності виконати завдання вчасно, схожості симуляційного обладнання з реальним обладнанням на містках суден, загальної думки про методи симуляції. Здобувачі освіти давали відповіді на наступні питання у вигляді рейтингу від одного до п'яти:

1. Відповідність завдань з симуляційного та письмового оцінювання знанням отриманим на теоретичних заняттях.
2. Відповідність завдань симуляційного оцінювання навчанню на тренажерах.
3. Можливість зрозуміти завдання для оцінювання.
4. Легкість виконання завдання з оцінювання.
5. Доречність завдання з оцінювання для майбутньої роботи на борту судна.
6. Подібність симуляційного обладнання реальному обладнанню на містку судна.
7. Достатність часу для виконання завдання.
8. Уподобання способу використання моделювання для оцінювання знань, умінь та навичок отриманих здобувачами під час навчання.

Аналіз анкетування здобувачів освіти показав, що завдання для симуляційного та письмового оцінювання відповідають знанням отриманим під час теоретичного навчання в аудиторіях, відповідність роботи з симуляційним обладнанням реальним умов роботи на судні, здобувачі освіти добре розуміли завдання, також зазначили про достатність часу для виконання завдань. Здобувачі освіти зазначили, що завдання для оцінювання не можна вважати легкими, а метод оцінювання за допомогою симулятора сподобався не всім здобувачам освіти але більшість учасників експерименту засвідчило, що задоволені оцінюванням за допомогою симулятора та відчули, що симуляція є хорошим досвідом навчання. Здобувачі освіти зазначили, що під час симуляційного оцінювання завдання мали виконуватися безперервно, оскільки судно продовжувало рух, і вони відчували певний тиск, аналогічний тиску, який відчувають під час несення навігаційної вахти в морі, що відрізняється від написання письмової роботи, де можна було самостійно визначатися з часом на то чи інше завдання. Загалом здобувачі освіти вважають, що оцінювання за допомогою симулятора є кроком уперед порівняно з традиційним письмовим оцінюванням.

Рівень складності оцінки

Встановлено, що для здобувачів освіти оцінювання за допомогою симулятора є більш складним, ніж оцінювання за допомогою виконання письмової роботи. У випадку помилки під час оцінювання за допомогою симуляції не має можливості виправити її через те, що оцінювання проводиться в режимі реального часу.

Навчальні аспекти симуляції

Складним виявилось завданням де потрібно було враховувати припливи на рух судна (потрібно зауважити що ця тема є складною і для теоретичного навчання). Завдяки симуляції можна було побачити вплив припливної течії на зміну курсу судна, що зміцнювало теорію, вивчену в аудиторії. Використання здобувачами освіти органів управління на містку для повернення судна на курс показало, що це зміцнює їх впевненість як майбутніх фахівців.

Актуальність оцінювання для роботи в морі

Симуляційне оцінювання є актуальним для майбутніх судноводіїв оскільки являє собою перевірку практичної та теоретичної підготовки здобувачів освіти до роботи в морі. Додавання ще кількох суден-цілей зробило б оцінювання більш цікавим і стало б додатковим відволікаючим фактором.

Порівняння оцінювання за допомогою симулятора та письмової роботи

Для виконання письмової роботи потрібно було опанувати теорію з освітніх компонентів циклу професійної підготовки, виконання симуляційного завдання була складнішою, і вимагала від здобувачів освіти демонстрацію не тільки теоретичної, а й практичної підготовки.

Попередня робота перед оцінюванням за допомогою симулятора

Проведений експеримент показав що здобувачам освіти потрібно більше практичних занять щоб опанувати керуванням судном на тренажері. Оцінювання було першим випадком, для здобувачів освіти, коли керування судном на симуляторі виконувалось самостійно, як то відбувається у реальному житті, а не в групах, як це відбувалось під час навчальних занять.

Удосконалення вправ з оцінювання симуляцій

Для покращення досвіду моделювання і додаткового навантаження необхідно візуальне введення інших суден. Крім того, під час підходу до порту потрібно додати маневрування катера лоцмана в бік суден здобувачів освіти. Також під час інструктажу слід зосередити увагу на маневрених характеристиках судна.

Висновки. У ході дослідження підтверджено, що традиційні форми контролю знань у підготовці майбутніх судноводіїв не забезпечують повноцінної оцінки професійної компетентності, оскільки не дозволяють об'єктивно визначити рівень сформованості практичних навичок і вмінь, передбачених Кодексом ПДНВ 78/95 з урахуванням Манільських поправок. Натомість використання сучасних навігаційних симуляторів створює умови для комплексного оцінювання знань, навичок і вмінь здобувачів освіти в середовищі, максимально наближеному до реальної професійної діяльності на борту судна.

Аналіз наукових джерел і узагальнення практичного досвіду засвідчили, що симуляційне оцінювання відповідає міжнародним вимогам до підготовки моряків, забезпечує об'єктивність, справедливості і прозорість процедури контролю, а також орієнтацію на здобувача освіти. Визначення переліку компетенцій, що підлягають оцінюванню за допомогою симуляторів, та розробка відповідних завдань і критеріїв оцінювання дозволили сформувати ефективну модель симуляційного контролю професійної підготовки.

Проведене симуляційне оцінювання і аналіз його результатів у порівнянні з традиційними методами продемонстрували вищу інформативність і достовірність симуляційного підходу щодо визначення рівня сформованості професійних компетентностей майбутніх судноводіїв. Отримані результати свідчать про доцільність і перспективність широкого впровадження симуляційних технологій у систему оцінювання відповідно до вимог ПДНВ 78/95, а також окреслюють напрями подальших досліджень щодо вдосконалення методик і стандартів симуляційного оцінювання.

ЛІТЕРАТУРА

1. Манільські поправки до додатка до Міжнародної конвенції про підготовку і дипломування моряків та несення вахти (ПДНВ) 1978 року (Резолюція 1 Конференції Сторін Міжнародної конвенції про підготовку і дипломування моряків та несення вахти 1978 року). Манільські поправки до Кодексу з підготовки і дипломування моряків та несення вахти (ПДНВ) (Резолюція 2 Конференції Сторін Міжнародної конвенції про підготовку і дипломування моряків та несення вахти 1978 року). URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/896_052#Text (дата звернення 05.12.2025).
2. Fisher, D and Muirhead, P. (2001). Practical Teaching Skills for Maritime Instructors. Malmö, Sweden: WMU Publications.
3. Vorokhobina D. Peculiarities of diagnostics of the formation of leadership competence of future specialists in

navigation and ship handling. *Освіта. Інноватика. Практика*, 2023. Том 11, № 8. С. 19-24. <https://doi.org/10.31110/2616-650X-vol11i8-003>

4. Nistor, F. (2015). *Standardization in Training and Qualification of the Labor Force in Shipping*. *ResearchGate*, July 2015. DOI:10.13140/RG.2.1.1312.4961

5. Vervoort, M. (2012). Maritime leadership competence and its further implementation and assessment into the nautical education program. In 4th International Conference on Education and New Learning Technologies EDULEARN12 Proceedings (pp. 804-810). Barcelona, Spain.

6. Ziarati, R., Ziarati, M., & Acar, U. (2012). Harmonising Maritime Education and Training at Sea and Ashore. *ResearchGate*, July 2012.

7. Tusher, H. M., Nazir, S., Ghosh, S., & Rusli, R. (2023). Seeking the best practices of assessment in maritime simulator training. *TransNav the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation* 17(1):105-114. DOI:10.12716/1001.17.01.10

8. Ганношина І.М., Левченко О.В. Методи оцінювання ефективності навчання під час тренажерної підготовки судноводіїв. *Вісник приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*. Вип. 49. Т. 2. 2024 С.172-178. DOI: 10.31498/2225-6733.49.2.2024.321391.

REFERENCES

1. Manilski popravky do dodatka do Mizhnarodnoi konventsii pro pidhotovku i dyplomuvannia moriakiv ta nesennia vakhty (PDNV) 1978 roku (Rezoliutsiia 1 Konferentsii Storin Mizhnarodnoi konventsii pro pidhotovku i dyplomuvannia moriakiv ta nesennia vakhty 1978 roku). Manilski popravky do Kodeksu z pidhotovky i dyplomuvannia moriakiv ta nesennia vakhty (PDNV) (Rezoliutsiia 2 Konferentsii Storin Mizhnarodnoi konventsii pro pidhotovku i dyplomuvannia moriakiv ta nesennia vakhty 1978 roku) [Manila Amendments to the Annex to the International Convention on Standards of Training, Certification and Watchkeeping for Seafarers (STCW), 1978]. Available at: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/896_052#Text (Accessed: 05 December 2025).

2. Fisher, D. and Muirhead, P. (2001). *Practical Teaching Skills for Maritime Instructors*. Malmo, Sweden: WMU Publications.

3. Vorokhobina, D. (2023). Peculiarities of diagnostics of the formation of leadership competence of future specialists in navigation and ship handling. *Osvita. Innovatyka. Praktyka* [Education. Innovation. Practice], Vol. 11, No. 8, pp. 19-24. <https://doi.org/10.31110/2616-650X-vol11i8-003>

4. Nistor, F. (2015). *Standardization in Training and Qualification of the Labor Force in Shipping*. *ResearchGate*, July 2015. DOI: 10.13140/RG.2.1.1312.4961

5. Vervoort, M. (2012). Maritime leadership competence and its further implementation and assessment into the nautical education program. In: *4th International Conference on Education and New Learning Technologies (EDULEARN12) Proceedings*, Barcelona, Spain, pp. 804-810.

6. Ziarati, R., Ziarati, M. and Acar, U. (2012). Harmonising Maritime Education and Training at Sea and Ashore. *ResearchGate*, July 2012.

7. Tusher, H. M., Nazir, S., Ghosh, S. and Rusli, R. (2023). Seeking the best practices of assessment in maritime simulator training. *TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, 17(1), pp. 105-114. DOI: 10.12716/1001.17.01.10

8. Hannoshyna, I. M. , Levchenko, O. V. (2024). Metody otsiniuvannia efektyvnosti navchannia pid chas trenazhernoi pidhotovky sudnovodiiv [Methods for evaluating the effectiveness of training during simulator training for navigators]. *Visnyk Pryazovskoho derzhavnoho tekhnichnoho universytetu. Seriya: Tekhnichni nauky* [Reporter of the Priazovskyi State Technical University. Section: Technical Sciences], Issue 49, Vol. 2, pp. 172-178. doi: 10.31498/2225-6733.49.2.2024.321391.

Sokol A., Sokol I., Husiev V., Kuschenko Y.

EXPANDING THE CAPABILITIES OF THE COMPETENCY ASSESSMENT SYSTEM IN THE FIELD OF SHIP HANDLING

The article examines the use of ship navigation simulators as a tool for assessing the professional competence of future deck officers in accordance with the requirements of the STCW 78/95 Code, as amended by the Manila Amendments. International and national regulatory documents, as well as scientific studies addressing issues of testing, assessment, and the use of simulation technologies in maritime education, are

analyzed. The limitations of traditional knowledge assessment methods (written examinations and oral interviews) in determining the level of formation of practical skills and abilities are substantiated.

A comprehensive simulation-based task and a point-based assessment system covering the key professional competencies of future deck officers were developed. The assessment was conducted using the Navi-Trainer Professional 5000 navigation simulator with the participation of final-year students of specialty 271 Maritime and Inland Water Transport, specialization 271.01 Navigation and Control of Seagoing Vessels. A comparative analysis of the results of simulation-based and written assessments revealed a strong positive correlation between them (Spearman's correlation coefficient +0.73).

The research results confirm the higher informativeness and practical orientation of simulation-based assessment, its compliance with real onboard working conditions, and international standards for the training of seafarers. Problematic aspects of student training were identified, and recommendations were provided for improving simulation tasks and for the further implementation of simulation technologies in the professional competence assessment system of future deck officers.

Keywords: training, simulation, navigation, ship management, competence, simulator, assessment, ship navigator, decision-making.

Стаття прийнята 16.09.2025

© Кучерук Г.Ю., Ганношина І.М.

ІННОВАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ НАВІГАЦІЇ І СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ РУХОМ СУДЕН

У статті розглядаються сучасні тенденції розвитку інноваційних технологій у сфері навігації та систем управління рухом суден. Проаналізовано перспективні напрями цифровізації морського транспорту, використання автоматизованих та інтелектуальних систем управління, впровадження супутникових і хмарних технологій, а також інтеграцію засобів штучного інтелекту для підвищення безпеки судноплавства. Особлива увага приділяється створенню «розумних портів», впровадженню концепції автономних суден та можливостям оптимізації логістичних процесів у глобальних ланцюгах постачання, кіберзахисту навігаційних та управлінських систем.

Ключові слова: інноваційні технології, навігаційні системи, управління рухом суден, автономні судна, інтелектуальні системи, навігаційні супутникові системи, предиктивна аналітика, цифрові двійники, кібербезпека.

Постановка проблеми. Сучасний розвиток світового судноплавства супроводжується зростанням обсягів міжнародної торгівлі, ускладненням логістичних ланцюгів та підвищенням вимог до безпеки морських перевезень. В умовах глобалізації та цифрової трансформації особливого значення набувають інноваційні технології навігації та системи управління рухом суден, адже вони дозволяють забезпечити безперервний моніторинг, підвищити точність навігаційних розрахунків, оптимізувати маршрути та мінімізувати ризики аварійних ситуацій. Використання супутникових систем, штучного інтелекту, інтелектуальних транспортних платформ і предиктивної аналітики відкриває нові можливості для інтеграції морського транспорту у глобальні цифрові мережі та підвищення ефективності його функціонування. Для України актуальність теми зумовлена необхідністю модернізації морських портів, адаптації до міжнародних стандартів судноплавства та підвищення конкурентоспроможності на світовому ринку транспортних послуг. Отже, дослідження інноваційних технологій навігації та систем управління рухом суден є важливим як у теоретичному, так і в практичному аспекті, оскільки сприяє підвищенню ефективності та сталого розвитку морського транспорту.

Дослідження науковців у сфері інноваційних технологій у навігації і системі управління рухом суден присвячені декільком основним напрямам: розвитку і проблематиці MASS (Maritime Autonomous Surface Ships) – автономних морських суден, здатних здійснювати плавання, маневрування та виконувати завдання без безпосередньої участі людини на борту або з мінімальним контролем здалеку [1-4]; застосуванню цифрових близнюків для моделювання аварійних сценаріїв [5-8]; розвитку інтелектуальних VTS та предиктивної аналітики для прогнозування трафіку, виявлення ризикових збігів курсів і підтримки планування швартувань [9-14]; інтеграції AI у навігаційні процеси та логістику для оптимізації маршрутів, розпізнавання аномалій у вантажних потоках та прогнозування попиту [15-21].

Невирішена частина проблеми. Попри значні досягнення у сфері розробки та впровадження інноваційних технологій навігації та управління рухом суден, залишається низка проблемних аспектів, що потребують подальшого дослідження. По-перше, не всі судноплавні компанії та порти мають технічну й фінансову можливість швидко адаптуватися до цифрових інновацій, що призводить до нерівномірності впровадження сучасних систем у світовій практиці. По-друге, актуальною залишається проблема кібербезпеки навігаційних і диспетчерських систем, адже зростання рівня цифровізації підвищує вразливість морського транспорту до кібератак. По-третє, недостатньо опрацьованим є питання інтеграції штучного інтелекту та предиктивної аналітики у комплексні системи управління рухом, що вимагає нових методичних підходів і нормативного забезпечення. Крім того, малодослідженими залишаються аспекти екологічної ефективності та впливу інноваційних технологій на скорочення викидів у процесі морських перевезень. В умовах України також спостерігається

обмеженість емпіричних досліджень, що враховують специфіку вітчизняної морської інфраструктури, що ускладнює практичне застосування передових зарубіжних рішень.

Виклад основного матеріалу. У сучасних умовах глобалізації та зростання інтенсивності вантажопотоків традиційні системи навігації зазнають суттєвих змін під впливом цифровізації, автоматизації та розвитку інформаційних технологій. Основні сучасні напрями впровадження інноваційних технологій навігації та систем управління рухом суден наведені у табл.1.

Використання глобальних навігаційних супутникових систем забезпечує високоточне позиціонування суден, а інтеграція з електронними картографічними комплексами дозволяє екіпажам отримувати детальну інформацію про маршрути та гідрометеорологічні умови. У перспективі широке впровадження отримають сенсори та системи моніторингу, що збирають дані в реальному часі, а також технології доповненої реальності, які допомагають екіпажу приймати швидші та точніші рішення.

Глобальні навігаційні супутникові системи (GNSS), до яких належать GPS (США), Galileo (ЄС) та BeiDou (Китай), сьогодні стали невід'ємним інструментом у сфері морського транспорту та судноплавства. Вони забезпечують високоточне визначення координат суден у будь-якій точці світу, що дозволяє підвищити рівень безпеки руху, зменшити ризики зіткнень та аварійних ситуацій. Використання GNSS створює передумови для ефективного планування та оптимізації морських маршрутів, скорочення часу перевезень і витрат на паливо завдяки вибору найбільш раціональних шляхів.

Крім того, сучасні супутникові системи інтегруються з автоматизованими інформаційними платформами управління рухом (VTS), системами ідентифікації суден (AIS) та предиктивною аналітикою, що дає змогу здійснювати не лише поточний моніторинг, а й прогнозування ситуації у складних погодних умовах чи зонах підвищеної навігаційної небезпеки. Для портової діяльності GNSS відкривають можливості точного позиціонування під час маневрування, швартування та вантажно-розвантажувальних операцій, що підвищує ефективність логістичних процесів.

Важливою тенденцією є розробка багатосистемних приймачів, здатних одночасно працювати з кількома супутниковими системами, що значно підвищує надійність і безперервність навігаційних сигналів навіть у складних умовах — поблизу узбережжя, у вузьких каналах чи під час сильних магнітних збурень.

Не менш важливим напрямом є розвиток інтелектуальних систем управління рухом суден. Сучасні системи VTS (Vessel Traffic Service), оснащені елементами штучного інтелекту, дозволяють здійснювати прогнозування руху суден і запобігати аварійним ситуаціям. Система AIS (Automatic Identification System) нового покоління забезпечує точне відстеження місцезнаходження суден, що особливо важливо в районах з інтенсивним рухом. Використання цифрових «близнюків» суден і портів дає змогу моделювати різні сценарії навігації та обирати оптимальні шляхи, а хмарні рішення сприяють ефективній координації між судновласниками, портами та логістичними операторами.

Інтелектуальні системи управління рухом суден (Vessel Traffic Management Systems, VTMS) є ключовим напрямом модернізації сучасного судноплавства та морської логістики. Вони поєднують дані з глобальних навігаційних супутникових систем, автоматичної ідентифікації суден (AIS), гідрометеорологічних станцій, радарів і сенсорів для створення єдиного інформаційного простору, що дозволяє диспетчерським центрам здійснювати комплексний контроль за рухом суден у реальному часі.

Сучасний розвиток таких систем ґрунтується на використанні штучного інтелекту, що дає змогу не лише відстежувати поточний стан, а й прогнозувати поведінку суден, визначати оптимальні маршрути з урахуванням погодних умов, трафіку й екологічних обмежень. Інтелектуальні системи здатні автоматично виявляти потенційні зіткнення або небезпечні маневри, пропонуючи диспетчерам і капітанам варіанти ухилення

Таблиця 1

Напрямки впровадження інноваційних технологій навігації та систем управління рухом суден

Напрямок впровадження	Опис технологій / системи	Переваги для судноплавства	Приклади застосування	Проблеми / виклики
Глобальні навігаційні супутникові системи (GNSS)	Використання GPS, Galileo, ГЛОНАСС, BeiDou для високоточного визначення координат суден	Підвищення точності позиціонування, оптимізація маршрутів, зниження аварійності	Планування маршрутів, контроль швидкості, інтеграція з AIS	Перевиривання або спотворення сигналу, необхідність багатосистемних приймачів
Інтелектуальні системи управління рухом (VTS / VTMS)	Інтеграція AIS, радарів, сенсорів та гідрометеоданих; використання AI	Прогнозування поведінки суден, уникнення зіткнень, оптимізація портових операцій	Диспетчеризація руху в портах, контроль трафіку	Висока вартість, стандартизація, кіберзахист
Автономні судна (MASS)	Судна з AI, сенсорами та камерами для автономного управління	Зниження людських помилок, економія палива, оптимізація маршрутів	Тестові автономні лайнери, інтеграція з «розумними портами»	Невизначеність правової бази, кібербезпека, інтеграція з традиційними судами
Цифрові «блізнюки» суден і портів	Моделювання реальних суден та інфраструктури у цифровому середовищі	Оптимізація операцій, прогнозування аварійних ситуацій	Моделювання швартування, прогнозування завантаження портів	Висока вартість, складність інтеграції
Предиктивна аналітика та AI	Аналіз великих масивів даних для прогнозу завантаження, трафіку, ризиків	Оптимізація логістики, підвищення ефективності	Прогнозування затримок, оцінка ризику зіткнень	Необхідність прозорих моделей, навчання персоналу
Візуальні навігаційні системи	Камери, оптичні сенсори, алгоритми обробки зображень	Підвищення безпеки при низькій видимості, контроль у портах	Виявлення перешкод, контроль маневрів	Обмежена ефективність у складних погодних умовах
Інтеграція з «розумними портами»	Автоматизовані системи управління терміналами, вантажними потоками	Підвищення ефективності обробки суден, скорочення часу стоянки	Порти Чорного моря: Одеса, Чорноморськ	Вартість модернізації, сумісність з наявною інфраструктурою
Системи моніторингу та раннього попередження	Виявлення аномалій у русі суден, аварійних ситуацій	Підвищення безпеки, своєчасне реагування	AIS та радарне спостереження у портах України	Потреба високоточного обладнання, інтеграції з VTS
Енергоефективні навігаційні системи	Оптимізація маршрутів з урахуванням економії палива	Зниження витрат, зменшення викидів CO ₂	Програмне забезпечення для оптимізації маршруту	Потреба точних даних про погодні умови, складність інтеграції
Кіберзахист навігаційних та управлінських систем	Захист від несанкціонованого доступу до систем управління судном	Підвищення надійності та безпеки	Впровадження стандартів ISO/IEC 27001 у портах України	Підготовка персоналу, оновлення систем, витрати на кіберзахист

Джерело: узагальнено авторами на підставі [2-4, 6, 9,16]

Велике значення мають інтелектуальні технології для управління рухом у портах та вузьких акваторіях, де висока концентрація суден створює підвищений ризик аварій. Використання цифрових «двійників» суден і портової інфраструктури дає змогу моделювати сценарії руху, оптимізувати процеси швартування та підвищувати ефективність логістичних операцій.

Окрім цього, розвиток інтелектуальних систем пов'язаний із глобальним трендом автоматизації суден та появою їх автономних аналогів. Для них VTMS стають не лише допоміжним, а й основним інструментом управління, забезпечуючи координацію руху без безпосередньої участі людини. Водночас актуальними залишаються виклики щодо кібербезпеки, стандартизації та взаємної сумісності таких систем у міжнародному масштабі.

Особливу увагу науковці та практики приділяють розробці та впровадженню автономних суден у межах концепції MASS. Такі судна здатні функціонувати з мінімальною участю людини, використовуючи системи штучного інтелекту для прийняття рішень, що суттєво знижує ризик людських помилок. Разом із тим виникають проблеми правового регулювання, стандартизації та кібербезпеки, які потребують глобального вирішення.

Впровадження автономних суден (MASS) є одним із найбільш перспективних напрямів розвитку морського транспорту, оскільки вони відкривають нові можливості для підвищення ефективності, безпеки та екологічної стійкості судноплавства. Автономні судна оснащуються комплексом сенсорів, радарів, камер, систем супутникової навігації та штучного інтелекту, що дозволяє їм приймати рішення щодо курсу, швидкості та маневрів без безпосередньої участі людини. Завдяки цьому знижується ризик людських помилок, які є однією з основних причин аварій на морі.

Важливим аспектом є інтеграція автономних суден із сучасними інтелектуальними системами управління рухом та «розумними портами», що дозволяє координувати рух у портах, планувати швартування, оптимізувати логістичні процеси та мінімізувати затримки. Крім того, автономні судна можуть ефективніше використовувати паливо за рахунок оптимізації маршрутів і маневрів, що сприяє зменшенню викидів шкідливих речовин у навколишнє середовище.

Розвиток MASS також стимулює необхідність вдосконалення нормативно-правової бази та стандартів безпеки, оскільки питання відповідальності за аварії, кіберзахисту систем управління і взаємодії автономних суден із традиційними залишаються частково невирішеними. Наукові дослідження останніх років наголошують на важливості симуляційних тестів та поступового впровадження автономних технологій у контрольованих водних зонах перед комерційним застосуванням на відкритому морі.

В Україні перспектива впровадження автономних суден особливо актуальна для портів Чорного та Азовського морів, де підвищення безпеки та ефективності маневрування в умовах інтенсивного трафіку може суттєво підвищити конкурентоспроможність на міжнародних ринках. При цьому важливо розвивати локальні технології, адаптовані до умов української морської інфраструктури та погодних особливостей акваторій.

Системи моніторингу та раннього попередження в навігації й управлінні судном є необхідним елементом забезпечення безпеки мореплавства та ефективної експлуатації флоту. Вони являють собою комплекс технічних засобів і програмних рішень, спрямованих на своєчасне виявлення потенційних загроз, інформування екіпажу або автоматизованих систем управління та підтримку прийняття рішень у складних умовах. У сфері навігаційної безпеки ключову роль відіграють автоматична ідентифікаційна система (AIS), електронна картографічна система (ECDIS), а також радіолокаційні комплекси з функцією автоматичного прокладання цілей (ARPA), які дозволяють відстежувати рух інших суден, прогнозувати можливість зіткнень і формувати попередження. Важливим напрямом є моніторинг технічного стану судна, зокрема енергетичних установок, двигунів і допоміжного обладнання, що реалізується завдяки системам condition monitoring і технологіям предиктивного обслуговування, які дозволяють завчасно виявити несправності та мінімізувати аварійні ризики. Значну роль відіграє контроль за навколишнім середовищем, який включає виявлення небезпечних гідрометеорологічних умов, інтеграцію з глобальними супутниковими системами прогнозування погоди, а також моніторинг викидів у навколишнє середовище. Автоматизовані системи раннього попередження екіпажу

забезпечують сигналізацію при виході судна за межі безпечного маршруту, при перевантаженні баластних систем або небезпечному крені, що підвищує ситуаційну обізнаність.

Важливою складовою у системі інноваційних технологій є інтеграція суднових систем з береговими службами управління рухом суден (VTS), що дає змогу оперативно обмінюватися даними, координувати дії та знижувати ризик інцидентів у зонах інтенсивного руху. Завдяки таким системам досягається зниження ймовірності аварій, підвищується ефективність використання судна, оптимізуються витрати палива та формується основа для майбутнього розвитку автономних суден.

Енергоефективні навігаційні системи у морському та річковому транспорті — це комплекс технологічних та програмно-апаратних рішень, спрямованих на зниження витрат пального, оптимізацію маршрутів та зменшення викидів у навколишнє середовище при управлінні суднами. Їх застосування безпосередньо пов'язане з концепціями **"зеленої" логістики, сталої навігації та цифровізації транспорту**. Вони поєднують цифрові технології (AI, Big Data, цифрові близнюки) з практичними інструментами моніторингу й управління рухом судна. Їх впровадження сприяє зменшенню витрат пального, підвищенню безпеки та відповідності сучасним екологічним стандартам.

У зв'язку з цифровізацією галузі та широким використанням автоматизованих і супутникових технологій все більшого значення набуває кіберзахист навігаційних та управлінських систем морського транспорту. Сучасні судна обладнані системами супутникової навігації, електронними картографічними комплексами, автоматизованими системами управління та обміну даними, що підвищує ефективність і безпеку перевезень, але водночас створює вразливості до кіберзагроз. Основними ризиками є спуфінг і глушіння сигналів GPS та ГЛОНАСС, несанкціонований доступ до систем ECDIS, AIS, VTS, SCADA, а також втручання у роботу глобальної морської системи зв'язку GMDSS чи супутникових каналів зв'язку.

Для мінімізації таких загроз необхідно застосовувати комплексний підхід, що включає технічні та організаційні заходи. До технічних методів належать багаторівневий захист суднових інформаційних систем, сегментація мереж, застосування шифрування і VPN-з'єднань, регулярне оновлення програмного забезпечення, а також багатофакторна аутентифікація для екіпажу й технічних фахівців. Організаційні заходи передбачають навчання екіпажу основам кібергігієни, проведення аудитів і тестів на проникнення, розробку планів реагування на кіберінциденти та впровадження міжнародних стандартів, зокрема вимог IMO Resolution MSC.428(98), що регламентує управління кіберризиками на судах. Перспективними напрямками є застосування штучного інтелекту для моніторингу та виявлення аномальної активності, використання цифрових близнюків суден для прогнозування потенційних атак і відпрацювання сценаріїв реагування, а також інтеграція кіберзахисту в загальні системи безпеки суднової навігації та управління.

Використання інноваційних технологій у навігації та управлінні суднами відкриває нові можливості для інтеграції суднових систем із береговими службами та створює передумови для розвитку автономного флоту. Таким чином, системи моніторингу та раннього попередження стають стратегічним інструментом підвищення безпеки й надійності управління морськими перевезеннями.

Впровадження інноваційних технологій у судноплавстві забезпечує низку переваг, серед яких оптимізація маршрутів і зниження витрат на паливо, підвищення рівня безпеки, зменшення аварійності, зниження негативного впливу на довкілля та відповідність принципам сталого розвитку. Проте процес цифровізації галузі супроводжується низкою викликів, зокрема високими інвестиційними витратами, необхідністю міжнародної уніфікації стандартів та посиленням кіберзахисту.

Отже, інноваційні технології навігації і системи управління рухом суден відкривають нові можливості для розвитку світового судноплавства. Їхнє впровадження є важливим кроком до створення «розумних портів» та автономних суден, що дозволить досягти більшої ефективності й безпеки у глобальних логістичних ланцюгах. Подальший прогрес у цій сфері залежатиме від розвитку міжнародної співпраці, вдосконалення нормативної бази та активного застосування інновацій у практичній діяльності морських перевізників.

Висновок. Інноваційні технології навігації та системи управління рухом суден є ключовими чинниками підвищення безпеки, ефективності та конкурентоспроможності морського транспорту. Особливої актуальності набуває використання глобальних навігаційних супутникових систем (GNSS), інтелектуальних систем управління рухом, цифрових «близнюків» суден і портів, а також автономних

суден із штучним інтелектом. Застосування цих технологій дозволяє оптимізувати маршрути, зменшувати ризики аварійних ситуацій, підвищувати точність маневрування та ефективність логістичних процесів у портах і на відкритому морі. Системи моніторингу та раннього попередження забезпечують своєчасне виявлення загроз та підтримують прийняття оптимальних рішень екіпажем. Їх впровадження дозволяє знизити аварійність, підвищити ефективність експлуатації судна та відповідність міжнародним стандартам безпеки. Ефективний кіберзахист вимагає поєднання сучасних технологічних рішень, належного управління ризиками та підготовки персоналу, що дозволяє гарантувати безпеку судноплавства в умовах зростання цифрових загроз.

Україна має значний потенціал для інтеграції передових навігаційних технологій та інтелектуальних систем управління у морські порти Чорного та Азовського морів. Водночас залишаються невирішені проблеми: стандартизація систем, кібербезпека, висока вартість впровадження та необхідність підготовки кваліфікованого персоналу.

Отже, подальший розвиток та впровадження інноваційних технологій навігації й управління рухом суден є актуальним завданням як для підвищення безпеки судноплавства, так і для зміцнення економічної ефективності та міжнародної конкурентоспроможності морського транспорту України.

ЛІТЕРАТУРА

1. Мельник О. М., Онищенко О. А., Волошин А. О., Васалатій Н. В., Логінов О. В., Корякін К. С. Розвиток дистанційних технологій керування судном // *Розвиток транспорту*. – 2022. – № 3(14). – Одеса: Нац. ун-т «Одеська морська академія» – С.180 – 189. https://journals.onmu.in.ua/index.php/journal/article/download/182/320/?utm_source
2. A human-centred review on maritime autonomous surfaces / A. Smith, J. Brown // *Maritime Policy & Management*. – 2024. – Vol. 51, Issue 4. – P. 345–368. – Режим доступу: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/01441647.2024.2325453>
3. Reliability assessment of autonomous maritime navigation systems / L. Zhang, P. Wang // *Reliability Engineering & System Safety*. – 2025. – Vol. 247. – P. 115–128. – Режим доступу: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0029801825012946?utm_source=chatgpt.com
4. Maritime Autonomous Surface Ships: Architecture for autonomous navigation systems / M. Johnson, E. Lee // *Journal of Marine Science and Engineering*. – 2025. – Vol. 13, Issue 1. – P. 122. – Режим доступу: https://www.mdpi.com/2077-1312/13/1/122?utm_source=chatgpt.com
5. Menges D., Lee K.K., Smith J. Digital Twin of Autonomous Surface Vessels for Safe Maritime Navigation Enabled Through Predictive Modeling and Reinforcement Learning / D. Menges, K. K. Lee, J. Smith // *Journal of Marine Science and Engineering*. – 2025. – Vol. 13, Issue 2. – P. 110–128. – Режим доступу: <https://arxiv.org/abs/2401.04032>
6. Liu H., Zhao Y., Wang P. Simulation of emergency scenarios in maritime autonomous surface ships using Digital Twins / H. Liu, Y. Zhao, P. Wang // *Safety Science*. – 2024. – Vol. 164. – P. 105–117. – Режим доступу: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925753523001984>
7. Chen L., Zhang X. Digital Twin-Based Risk Assessment for Maritime Accident Scenarios / L. Chen, X. Zhang // *Ocean Engineering*. – 2023. – Vol. 275. – P. 115–130. – Режим доступу: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0029801822014275>
8. Johnson M., Lee E. Maritime Autonomous Surface Ships: Digital Twin Approach for Predictive Safety and Emergency Management / M. Johnson, E. Lee // *Journal of Navigation*. – 2025. – Vol. 78, Issue 1. – P. 55–73. – Режим доступу: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/20464177.2025.2460268>
9. Cui B., Zhang Z., Wang X. Intelligent Monitoring of Marine Vessel Dynamics Based on AIS Data / B. Cui, Z. Zhang, X. Wang // *Ocean Engineering*. – 2024. – Vol. 274. – P. 112–126. – Режим доступу: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0029801824027252>
10. Shin G., Lee J. Maritime Accident Prediction in Busan Port Using Machine Learning / G. Shin, J. Lee // *Ocean Engineering*. – 2025. – Vol. 276. – P. 34–50. – Режим доступу: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0029801824033067>
11. Shin G., Kim H. Vessel Trajectory Prediction in Harbors: A Deep Learning Approach / G. Shin, H. Kim // *Ocean Engineering*. – 2025. – Vol. 277. – P. 87–102. – Режим доступу: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0029801824032463>
12. Rawson A., Smith S. Intelligent Geospatial Maritime Risk Analytics Using the Discrete Global Grid System (DGGS) / A. Rawson, S. Smith // *Journal of Navigation*. – 2022. – Vol. 75, Issue 3. – P. 555–573. – Режим доступу: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/20964471.2021.1965370>

13. El Mekkaoui S., Benabbou L., Caron S. Deep Learning-Based Ship Speed Prediction for Intelligent Maritime Traffic Management / S. El Mekkaoui, L. Benabbou, S. Caron // *Journal of Marine Science and Engineering*. – 2023. – Vol. 11, Issue 7. – P. 845. – Режим доступу: <https://www.researchgate.net/publication/367075690>
14. Mustapha B.S. Potential Roles of Vessel Traffic Services (VTS) in Maritime Emission Reduction / B.S. Mustapha // *World Maritime University Dissertations*. – 2023. – P. 1–67. – Режим доступу: https://commons.wmu.se/context/all_dissertations/article/3248/viewcontent/MEM_2023_BUNZA.pdf
15. Alanazi A.M., Marakasov E., Alabdullatif O.A. The Rise of Advanced VTS/VTMS Systems / A.M. Alanazi, E. Marakasov, O.A. Alabdullatif // *International Journal of Innovative Science and Research Technology*. – 2024. – Vol. 9, Issue 5. – P. 1–12. – Режим доступу: <https://ijisrt.com/assets/upload/files/IJISRT24MAY2324.pdf>
16. Durlík I., Miller T., Kostecka E., Tuński T. Artificial Intelligence in Maritime Transportation: A Comprehensive Review of Safety and Risk Management Applications / I. Durlík, T. Miller, E. Kostecka, T. Tuński // *Applied Sciences*. – 2024. – Vol. 14, Issue 18. – P. 8420. – Режим доступу: <https://www.mdpi.com/2076-3417/14/18/8420>
17. Jwo D.J. Artificial Neural Networks for Navigation Systems / D.J. Jwo // *Applied Sciences*. – 2023. – Vol. 13, Issue 7. – P. 4475. – Режим доступу: <https://www.mdpi.com/2076-3417/13/7/4475>
18. Schneider H. Navigation Map-Based Artificial Intelligence / H. Schneider // *Marine Robotics Journal*. – 2023. – Vol. 3, Issue 2. – P. 26–38. – Режим доступу: <https://www.mdpi.com/2673-2688/3/2/26>
19. Kilic K.I. Challenges and AI-driven Solutions in Maritime Search and Rescue Operations / K.I. Kilic // *Transport Policy*. – 2025. – Vol. 125. – P. 112–126. – Режим доступу: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0308597X25001071>
20. Wang N., Lin Y., Zhang J. Kunpeng: An Embodied Large Model for Intelligent Maritime / N. Wang, Y. Lin, J. Zhang // *arXiv preprint*. – 2024. – P. 1–20. – Режим доступу: <https://arxiv.org/abs/2407.09048>
21. Горбань А. В., Маранов О. В., Клочков Ю. П., Дорофеева З. Я. Інформаційне забезпечення для моніторингу та управління рухом суден з використанням даних супутникової навігації / А. В. Горбань, О. В. Маранов, Ю. П. Клочков, З. Я. Дорофеева // *Водний транспорт. Збірник наукових праць*. – 2021. – Вип. 1(32). — <https://www.researchgate.net/publication/350335469>

Стаття прийнята 14.09.2025

© Зазірний А.А., Грошев О.В., Вечирко О.М.

КОНЦЕПТУАЛЬНИЙ ПІДХІД ЩОДО ВИРІШЕННЯ ЗАВДАННЯ СТАБІЛІЗАЦІЇ СУДНА НА ТРАЄКТОРІЇ НА ОСНОВІ ВИКОРИСТАННЯ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ

Метою статті є побудова прогнозуючої моделі для використання в алгоритмі адаптивної стабілізації судна на заданій траєкторії на основі нейронних мереж. Запропонована схема прогнозуючої моделі помилки стабілізації судна на траєкторії на основі сімейства нейронних мереж. Прикінцевий склад моделі представлений у вигляді єдиної нейронної мережі, яку не можна віднести до будь-якого стандартного типу. Запропонований порядок навчання нейромережевої прогнозуючої моделі. Дві нейронні мережі, вільні параметри яких не залежать від фізичних характеристик судна можуть бути навчені заздалегідь. Нейромережа, що відповідає за формування динаміки поведінки судна, може навчатися за двома підходами. Якщо розглядається конкретне судно, то застосовують одноразове навчання мережі. Зразками для такого навчання виступають результати спеціально проведених експериментів або навіть генеровані дані на основі достовірної імітаційної моделі, у впевненості якої є великий ступінь впевненості. За такого підходу переважно використовують пакетний режим навчання. Якщо зразки послідовно надходять до поточної експлуатації, то мережа збирає інформацію про фізичні властивості таких суден, і у даному разі коефіцієнти мережі налаштовуються щоразу при надходженні нового зразка. Перший підхід забезпечує швидше навчання в порівнянні з другим, але вимагає проведення спеціальних експериментів. При послідовному налаштуванні нейронної мережі проведення спеціальних експериментів не потрібно, проте досягнення необхідної точності прогнозу вимагає більше часу. Синтез прогнозуючої моделі в MATLAB показав можливість її представлення у вигляді єдиної нейронної мережі з фіксованою архітектурою. Запропонована нейромережева модель має концептуальний характер і вимагає вирішення ряду завдань, наприклад визначення методів навчання всіх складових мережі. Метод навчання складається з алгоритму формування набору датасетів та алгоритму налаштування вільних параметрів мережі. Перспективою подальшого вдосконалення нейромережевої прогнозуючої моделі є врахування на вході елементів течії, що дозволить спростити архітектуру нейромережі.

Ключові слова: судноводіння, безпека судноплавства, нейронна мережа, судно, траєкторія, алгоритм, модель, автоматична стабілізація, хвиля, рушій

Постановка проблеми. У процесі виконання рейсу судноводій щоразу виконує важливе, але дуже стандартне завдання – утримання судна на заданій траєкторії. За кілька останніх десятиріч років вирішення цього завдання зробило стрімкий ривок: спочатку ручне керування, далі – автоматизоване, і нарешті повністю автоматичне, побудоване на застосуванні методів оптимального управління. Традиційно прогнозуюча модель судна будувалася на простих диференціальних (ДР) (різницевих (РР)) рівняннях. Але це – ще не межа: питання адаптивного керування судном за траєкторією можуть вирішуватися іншим способом. Так, за останні 10-15 років суттєвого розвитку одержали методи штучного інтелекту. Тобто, з'явилися нові підстави з іншого боку подивитися на проблему адаптивного утримання судна на заданій траєкторії. Важлива роль тут належить різноманітним нейронним мережам (НМ), які вже у деяких моделях адаптивного управління судном самостійно визначають кут перекидки керма.

Для моделювання руху судна НМ безперечною перевагою перед апаратом звичайних ДР, маючи перед останніми більш універсальні апроксимуючі властивості. Крім того, будучи більш швидкісними у

порівнянні з апаратом диференціальних рівнянь, нейромережеві моделі в режимі реального часу оперативніше виконують пошук оптимального набору кутів перекладки керма на горизонті управління. Але можливості НМ вивчені ще далеко не повністю.

Таким чином, актуальним питанням наукових досліджень є подальше вивчення можливостей НМ для управління судном на окремих ділянках виконання рейсу

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У роботах [1] – [3] детально розглянуті особливості застосування теорії оптимального управління для автоматичної стабілізації судна на траєкторії.

Адаптивне управління судном на базі нейронних мереж і ДР описано у статтях [4], [5].

Забезпечення автономної стабілізації судна вздовж траєкторії, досягнутої за рахунок застосування двошарової мережі прямого поширення, навченої за допомогою ДР руху судна роботі контролера, наведено у [6].

Робота [7] присвячена використанню радіальної базової функції для моделювання невизначеності в алгоритмі управління рухом по поверхні.

Спільне використання рекурентної двошарової нейронної мережі і ПІД-регулятора для прогнозу швидкості повороту судна описано у статті [8].

Але незважаючи на ці досягнення, дослідження щодо побудови прогнозуючої моделі для стабілізації судна на траєкторії на основі НМ залишаються не повністю завершеними.

Метою статті є побудова прогнозуючої моделі для використання в алгоритмі адаптивної стабілізації судна на заданій траєкторії на основі нейронних мереж.

Викладення основного матеріалу дослідження.

Загальний підхід щодо подання дискретної прогнозуючої моделі для адаптивного управління судном. У загальному випадку вихідна (керована) векторна величина Y для судна, яке розглядається як об'єкт управління, є безперервною функцією часу: $Y(t) = A(U(t), F(t))$, де A – нелінійний оператор, $U(t), F(t)$ – вектори управлінь та обурювальних впливів, відповідно, кожна складова яких безперервно залежить від часу.

Прогнозуюча модель – алгоритм, який дозволяє спрогнозувати значення $Y(t)$ на проміжку майбутнього часу $(t_0; t_1]$, де t_0 – поточний момент часу; t_1 – довільний момент майбутнього часу, якщо відомі $U(t), F(t)$ на проміжку $(t_{-1}; t_1]$, де $0 \leq t_{-1} \leq t_1$. Як алгоритм прогнозуючої моделі можуть виступати, наприклад, системи звичайних диференціальних (різницевих) рівнянь, моделі авторегресії, нейронні мережі.

Прогнозуюча модель встановлює взаємозв'язок між виходом $Y(t)$ і управлінням $U(t)$, що розглядаються на інтервалі майбутнього часу $(t_0; t_1]$. Отже, вибравши функціонал якості управління $J = J(Y(t), U(t))$ та цільову умову для нього (зазвичай, мінімізацію функціоналу J на відрізок $(t_0; t_1]$), можна задачу забезпечення цільової умови розглянути як задачу оптимізації у просторі компонент вектора керуючих впливів $U(t)$.

Розглянемо дискретну прогнозуючу модель судна. У цій послідовності моменти часу $t_1, t_2, \dots, t_n$ розділені проміжком Δt . Тоді часові послідовності значень векторів управлінь і збурень і вихідної керованої величини позначимо як $\{U(t_i)\}_{i=1:n} = U(t_1), U(t_2), \dots, U(t_n)$; $\{F(t_i)\}_{i=1:n} = F(t_1), F(t_2), \dots, F(t_n)$ і $\{Y(t_i)\}_{i=1:n} = Y(t_1), Y(t_2), \dots, Y(t_n)$, відповідно.

Прогнозуюча модель дискретного часу – це алгоритм, який дозволяє однозначно визначити значення вихідного вектора $\{Y(t_i)\}_{i=1:n}$ і керованої величини на крок вперед $Y(t_{n+1})$ (якщо відомі послідовності управлінь $\{U(t_i)\}_{i=1:n}$ і збурень $\{F(t_i)\}_{i=1:n}$).

Подання дискретної прогнозуючої моделі помилки стабілізації судна на траєкторії на основі нейронної мережі. У загальному випадку існує багато підходів щодо побудови нейромережевої прогнозуючої моделі помилки стабілізації судна на траєкторії. Формально модель можна представити у

вигляді єдиної нейронної мережі, що не відноситься до будь-якого стандартного типу. Але завжди, незалежно від типу мережі, виникає питання про налаштування нейромережевої прогнозуючої моделі.

Модель прогнозу помилки стабілізації судна на траєкторії враховуватиме три основні складові, що безпосередньо впливають на цю помилку. Тому пропонується архітектура (схема) прогнозуючої моделі помилки стабілізації судна на траєкторії складається з трьох нейронних мереж «Dinamika», «Cinematika» і «Fault», з'єднаних блоками підсумовування, множення, поодиноких затримок. Найважливішим питанням після цього є порядок налаштування нейромережевої прогнозуючої моделі. Вільні параметри нейронних мереж «Fault» і «Cinematika» не залежать від фізичних характеристик судна, тому їх можна навчити заздалегідь. Нейромережа «Dinamika» може бути навчена двома способами. Згідно першого підходу, мережа навчається для конкретного судна один раз і більше не перенавчається. За другого підходу, результатами поточної експлуатації різноманітних суден є збір інформації про фізичні властивості й особливості конкретного судна. Нейромережа послідовно навчається на зразках, а вагові коефіцієнти мережі налаштовуються щоразу при надходженні нового зразка.

Можливе комплексування двох підходів: мережа попередньо навчається з урахуванням накопиченої вибірки зразків (пакетний режим), а у процесі експлуатації лише дещо адаптується до поточних умов (послідовний режим).

Для отримання вектора X_{din} необхідно знати значення величин V_R, α_R, γ на крок уперед, які залежать від параметрів руху судна, прогнозованих НМ «Dinamika». Тому використання цієї мережі можна розширити для прогнозу зазначених параметрів, якщо вони не можуть вважатися постійними в умовах плавання судна.

Створення моделі в середовищі MATLAB доводить можливість побудови прогнозуючої моделі стабілізації судна на траєкторії в нейромережевому базисі. Це забезпечує швидкий пошук оптимального вектора кутів перекидки керма на горизонті керування.

Якщо нейромережа «Cinematika» може приймати на вхід елементи течії, то можна не використовувати блоки підсумовування для врахування швидкості постійної течії.

Отже, розглянемо можливість побудови прогнозуючої моделі стабілізації судна на траєкторії в нейромережевому базисі.

Для стабілізації судна на траєкторії регульованою величиною $Y \in e_{\perp}$ – відхилення від заданої траєкторії (маршруту) у перпендикулярному (найкоротшому) напрямку. Його алгоритм обчислення залежить від певної функції h і на поверхні еліпсоїда дорівнює

$$Y = e_{\perp} = h(\varphi, \lambda, Q), \quad (1)$$

де φ – геодезична широта центру ваги судна G ; λ – його геодезична довгота; $Q = q_1, q_2, \dots, q_m$ – вектор m параметрів заданої траєкторії руху судна.

Аналіз співвідношення (1) показує, що отримання прогнозованого значення помилки регулювання на крок вперед (тобто величини $e_{\perp}(t_{n+1})$) цілком залежить від можливості прогнозування координат судна на крок вперед ($\varphi(t_{n+1}), \lambda(t_{n+1})$):

$$Y(t_{n+1}) = e_{\perp}(t_{n+1}) = h(\varphi(t_{n+1}), \lambda(t_{n+1}), Q). \quad (2)$$

Таким чином, для апроксимації функції багатьох змінних застосуємо двохшарову НМ «Fault» (рис. 1), яка задовольнятиме умовам теореми про універсальну апроксимацію [9] та прогнозує помилку регулювання на крок уперед.

Перший шар мережі складається з нейронів з нелінійними монотонно зростаючими безперервними та обмеженими функціями активації, другий – має один нейрон з тотожною функцією активізації. Вхідний сигнал мережі має вигляд $X_{\text{fault}} = (\varphi(t_{n+1}), \lambda(t_{n+1}), Q)^T$.

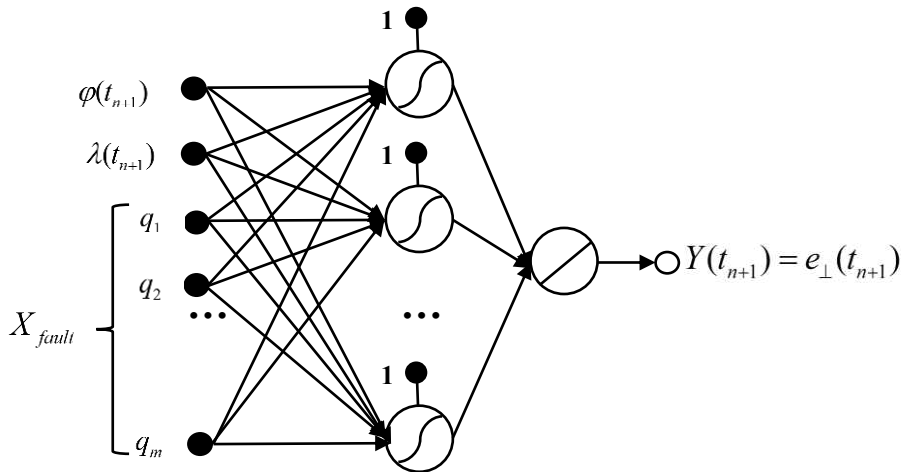


Рисунок 1. Архітектура нейронної мережі «Fault»

Далі, відповідно до виразу (2), здійснимо прогноз геодезичних координат судна $\varphi(t_{n+1})$, $\lambda(t_{n+1})$. Диференціальні рівняння координат мають такий вигляд:

$$\frac{d\varphi}{dt} = \frac{V_N}{M}; \quad \frac{d\lambda}{dt} = \frac{V_E}{N \cos \varphi}, \quad (3)$$

де M, N – головні радіуси кривизни, що залежать від широти φ .

Інтегруючи вираз (3) на проміжку часу $[t_n; t_{n+1}]$ і виносячи за знак інтеграла величини, обернені радіусу кривизни меридіана і паралелі, маємо такі наближені співвідношення:

$$\begin{aligned} \varphi(t_{n+1}) &\approx \varphi(t_n) + (1/M_n) \int_{t_n}^{t_{n+1}} V_N(t) dt; \\ \lambda(t_{n+1}) &\approx \lambda(t_n) + (1/N_n \cos \varphi(t_n)) \int_{t_n}^{t_{n+1}} V_E(t) dt, \end{aligned} \quad (4)$$

де M_n, N_n – значення, які приймають головні радіуси кривизни в момент часу t_n .

Дані співвідношення реалізуються двома вузлами підсумовування, на входи яких надходять доданки у співвідношеннях (4) (рис 2). При цьому перед підсумовуванням інтеграли множаться на постійні вагові коефіцієнти $(1/M_n)$ та $(1/N_n \cos \varphi(t_n))$.

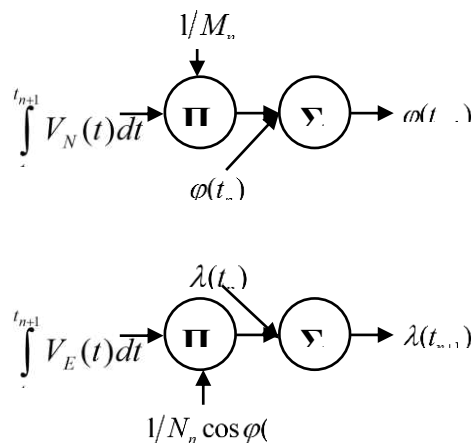


Рисунок 2. Загальний вигляд схеми, що реалізує операції підсумовування та множення для

підрахунку координат

На значення інтегралів $\int_{t_n}^{t_{n+1}} V_N(t)dt$ та $\int_{t_n}^{t_{n+1}} V_E(t)dt$ впливає вид підінтегральних функцій на відрізок часу $[t_n; t_{n+1}]$, які, своєю чергою, визначаються як:

$$\begin{aligned} V_N &= V_x \cos K - V_y \sin K + V_T \cos K_T; \\ V_E &= V_x \sin K + V_y \cos K + V_T \sin K_T, \end{aligned} \quad (5)$$

де V_x, V_y – поздовжня і поперечна складові відносної швидкості судна; K – його справжній курс; V_T – швидкість течії; K_T – справжній курс течії.

Тоді, з урахуванням виразу (5) інтеграли $\int_{t_n}^{t_{n+1}} V_N(t)dt$ та $\int_{t_n}^{t_{n+1}} V_E(t)dt$ мають такий вигляд:

$$\begin{aligned} \int_{t_n}^{t_{n+1}} V_N(t)dt &= \int_{t_n}^{t_{n+1}} (V_x \cos K - V_y \sin K)dt + \int_{t_n}^{t_{n+1}} V_T \cos K_T dt; \\ \int_{t_n}^{t_{n+1}} V_E(t)dt &= \int_{t_n}^{t_{n+1}} (V_x \sin K + V_y \cos K)dt + \int_{t_n}^{t_{n+1}} V_T \sin K_T dt. \end{aligned} \quad (6)$$

Для формування кінематичного вектору Y_{cin} задіяні перші доданки у формулі (6). Їхнє прогнозування здійснює двошарова нейронна мережа НМ «Cinematika» (рис. 3), на вхід якої надходить вектор $X_{cin} = (V_x(t_n), V_y(t_n), K(t_n), V_x(t_{n+1}), V_y(t_{n+1}), K(t_{n+1}))^T$. Подібно до мережі «Fault», її перший шар нейронів має нелінійні монотонно зростаючі безперервні та обмежені функції активації, другий – має два нейрони з тотожною функцією активізації.

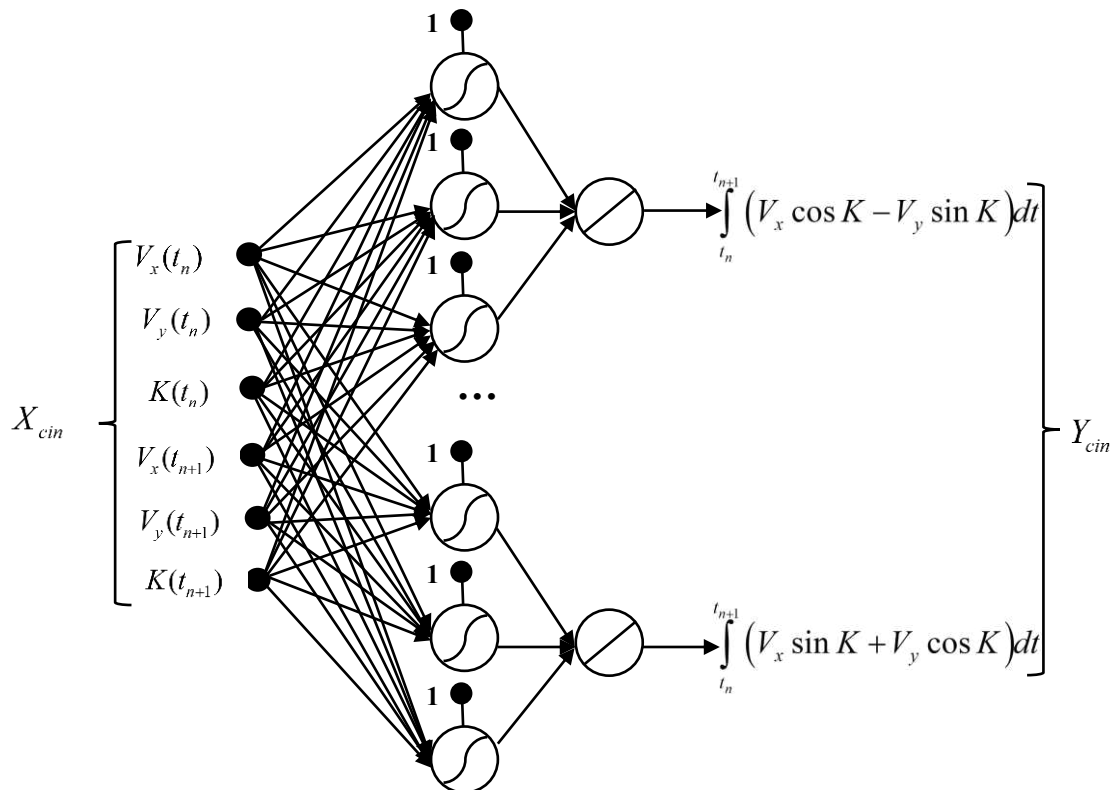


Рисунок 3. Архітектура нейронної мережі НМ «Cinematika»

Інтеграли з лівої частини співвідношення (6) формуються суматорами, на входи яких надходить інформація з виходу НМ «Cinematika» й інтеграли від складових течії (рис. 4).

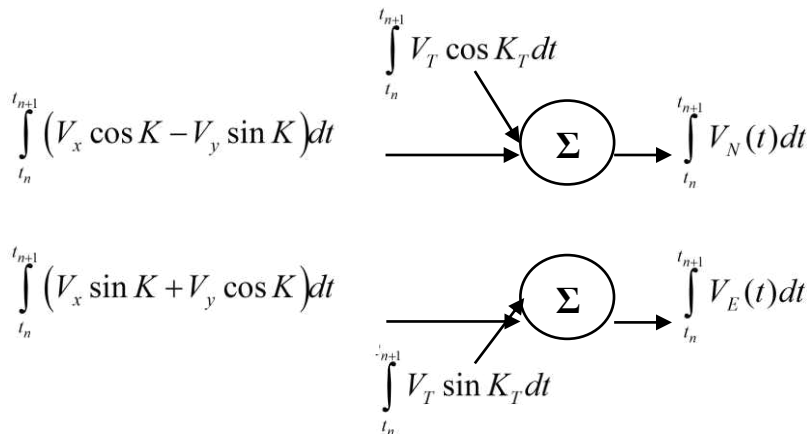


Рисунок 4. Загальний вигляд суматорів, що враховують складові швидкості течії та інформацію з виходів НМ «Cinematika»

Для прогнозування на крок вперед складових швидкості та курсу, відповідно до принципу кінетостатики, запишемо рівняння руху судна у вигляді

$$F_x = 0; F_y = 0; M_z = 0, \quad (7)$$

де F_x, F_y – проекції сумарного вектора сил, у т. ч. сили інерції, на осі рухомої системи координат (Gx спрямована у бік носа, Gy – у бік правого борту); M_z – проекція головного моменту, у т. ч. момент сили інерції, сил на вертикальну вісь Gz (спрямована вниз).

Розглянемо структуру зусиль і моменту (ліві частини виразів (7)), що діють на судно:

$$\begin{aligned} F_x &= F_x^c + F_x^{in} + F_x^v + F_x^P + F_x^R + F_x^A + F_x^W; \\ F_y &= F_y^c + F_y^{in} + F_y^v + F_y^P + F_y^R + F_y^A + F_y^W; \\ M_z &= M_z^c + M_z^{in} + M_z^v + M_z^P + M_z^R + M_z^A + M_z^W, \end{aligned} \quad (8)$$

де верхні індекси при доданках позначають сили та момент так: c – відцентрові; in – інерційної природи; v – неінерційної природи; P – з боку рушія (наприклад, гвинти); R – з боку керма; A – аеродинамічні; W – з боку хвиль, що набігають.

Відцентрові сили та момент визначаються так [2]: $F_x^c = mV_y\omega$; $F_y^c = -mV_x\omega$; $M_z^c = 0$, де c – маса судна; $\omega = \frac{dK}{dt}$ – кутова швидкість повороту судна.

Для визначення сил та моменту інерційної природи (за умови нехтування асиметрією судна щодо площини Gyz) скористуємося відомими виразами [10]:

$$\begin{aligned} F_x^{in} &= -(m + \lambda_{11})V_x^g + (m + \lambda_{22})V_y\omega; \\ F_y^{in} &= -(m + \lambda_{22})V_y^g - (m + \lambda_{11})V_x\omega; \\ M_z^{in} &= (J_z + \lambda_{66})\omega + (\lambda_{11} - \lambda_{22})V_xV_y, \end{aligned}$$

де J_z – момент інерції щодо осі Gz ; $\lambda_{11}, \lambda_{22}$ – приєднані маси судна; λ_{66} – приєднаний момент інерції щодо осі Gz .

Сили та момент неінерційної природи мають дві складові – позиційні та обертальні. Перші залежать від кута дрейфу та відносної швидкості судна, тобто є функціями V_x, V_y , другі – від швидкості повороту ω і відносної швидкості. Нехтування обертальними впливами для поздовжньої осі призводить до таких співвідношень:

$$\begin{aligned}F_x^v &= F_x^v(V_x, V_y); \\F_y^v &= F_y^v(V_x, V_y, \omega); \\M_z^v &= M_z^v(V_x, V_y, \omega).\end{aligned}$$

Силі дії з боку гвинтового рушія визначаються такими виразами [10]:

$$\begin{aligned}F_x^P &= k_1 \rho n^2 D^4; \\F_y^P &= \rho n^2 D^4 |2k_{q0} - J_p (dk_{q0}/dJ_p)| J_p \operatorname{tg} \chi \beta_k; \\M_z^P &= -F_y^P l_k,\end{aligned}\quad (9)$$

де k_1 – коефіцієнт упору гвинта; ρ – густина води; D – діаметр гвинта; n – частота обертання гвинта; k_{q0} – коефіцієнт моменту гвинта на валу в швартовному режимі; J_p – відносна хода; χ – коефіцієнт скосу потоку; β_k – місцевий кут дрейфу; l_k – відстань від центру тяжкості судна до місця встановлення гвинта.

Коефіцієнт упору гвинта залежить від відносної ходи $k_1 = k_1(J_p)$, яка визначається співвідношенням $J_p = \frac{(1 - \psi_p) V_x}{nD}$, де ψ_p – коефіцієнт попутного потоку. У разі косого потоку складова F_x^P змінюватиметься в порівнянні з її значенням при осьовому натіканні [15] через залежність ψ_p від місцевого кута дрейфу β_k . Місцевий кут дрейфу дорівнює:

$$\beta_k = -\arcsin \left(\frac{V_y - l_k \omega}{\sqrt{(V_y - l_k \omega)^2 + V_x^2}} \right). \text{ Тому тяга } F_x^P \text{ також залежить і від величин } V_y, \omega.$$

Отже, співвідношення (9) підштовхують до висновку про те, що бічна сила гвинта F_y^P залежатиме від чотирьох величин: V_x, V_y, ω, n . Проте за практичних розрахунків керованості враховується лише її момент [10]:

$$\begin{aligned}F_x^P &= F_x^P(V_x, V_y, \omega, n); \\F_y^P &\approx 0; \\M_z^P &= M_z^P(V_x, V_y, \omega, n).\end{aligned}$$

Сили та моменти, що впливають на корпус судна з боку керма визначаються як [10]:

$$\begin{aligned}F_x^R &= C_{XR} (\rho/2) (V_x^2 + V_y^2) A_{RE}; \\F_y^R &= C_{YR} (\rho/2) (V_x^2 + V_y^2) A_{RE}; \\M_z^R &= F_y^R l_R,\end{aligned}$$

де C_{XR}, C_{YR} – коефіцієнти поздовжньої та поперечної сил керма; A_{RE} – наведена (ефективна) площа керма в плані; l_R – відстань від центру ваги судна до місця встановлення керма.

Коефіцієнти C_{XR}, C_{YR} залежать від кута атаки на кермо α , який визначається з [10]:

$$\alpha = \delta - \gamma_E \left(\beta + \frac{l_R}{\sqrt{V_x^2 + V_y^2}} \omega \right),$$

де γ_E – наведений коефіцієнт впливу корпусу і гвинта на напрямок потоку, що набігає на кермо; β – кут дрейфу судна.

Коефіцієнт γ_E є добутком $\gamma_E = \gamma_1 \gamma_2$, де γ_1 – коефіцієнт впливу корпусу; γ_2 – коефіцієнт впливу гвинта, що залежить від частоти його обертання n .

Наведена площа $A_{RE} = A_{RO} + A_{RD} (1 + C_T)$, де A_{RO} – площа керма, що не потрапляє в потік від гвинта; A_{RD} – площа керма, розташована у гвинтовому струмені; C_T – коефіцієнт навантаження гвинта по упору, що залежить від n при фіксованій швидкості осьового натікання.

На основі наведених вище міркувань отримуємо:

$$F_x^R = F_x^R(V_x, V_y, \omega, \delta, n);$$

$$F_y^R = F_y^R(V_x, V_y, \omega, \delta, n);$$

$$M_z^R = M_z^R(V_x, V_y, \omega, \delta, n).$$

Аеродинамічні дії визначаються такими співвідношеннями [10]:

$$F_x^A = C_{AX} (\rho/2) V_R^2 A_{VB};$$

$$F_y^A = C_{AY} (\rho/2) V_R^2 A_{VL};$$

$$M_z^A = C_{AM} (\rho/2) V_R^2 A_{VL} L,$$

де C_{AX}, C_{AY}, C_{AM} – аеродинамічні коефіцієнти, що залежать від курсового кута α_R відносного вітру; V_R – модуль вектора швидкості відносного вітру; L – довжина судна по ватерлінії; A_{VB}, A_{VL} – площі проєкцій надводної частини корпусу на площину мідель-шпангоуту і діаметральну площину відповідно.

Отже, аеродинамічні сили та момент є функціями елементів відносного вітру V_R, α_R .

Середні сили та момент, що впливають на судно з боку регулярного хвилювання [10]:

$$F_x^W = C_{wx} \rho g L (0,1 - \cos \gamma) (h/2)^2 \cdot \left(1,0 + A_{2x} \frac{V_n \omega_w}{g} \right) \cdot \exp \left(-A_1 \frac{2\pi g}{\omega_w^2 L} \right);$$

$$F_y^W = C_{wy} \rho g L \sin \gamma (h/2)^2 \cdot \left(1,0 + A_{2y} \frac{V_n \omega_w}{g} \right) \cdot \exp \left(-A_1 \frac{2\pi g}{\omega_w^2 L} \right);$$

$$M_z^W = C_{wm} \rho g L^2 \sin 2\gamma (h/2)^2 \cdot \left(1,0 + A_{2m} \frac{V_n \omega_w}{g} \right) \cdot \exp \left(-A_1 \frac{2\pi g}{\omega_w^2 L} \right),$$

де $C_{wx}, C_{wy}, C_{wm}, A_{2x}, A_{2y}, A_{2m}$ – коефіцієнти, що залежать від геометричних характеристик корпусу; $A_1 = \text{const}$; h, γ, ω_w – висота, курсовий кут, кругова частота хвилювання відповідно; g – прискорення вільного падіння; V_n – проєкція вектора відносної швидкості на напрямок поширення хвиль. Кругова частота хвилювання, своєю чергою, виражається його період τ відомим співвідношенням $\omega_w = 2\pi/\tau$.

Отже, сили та момент хвильового характеру видаються як функції своїх змінних:

$$\begin{aligned}F_x^W &= F_x^W(h, \gamma, \tau, V_x, V_y); \\F_y^W &= F_y^W(h, \gamma, \tau, V_x, V_y); \\M_z^W &= M_z^W(h, \gamma, \tau, V_x, V_y).\end{aligned}$$

Аналіз залежностей окремих складових правих частин рівнянь (8), свідчить:

$$\begin{aligned}\overset{g}{V}_x &= f_x(V_x, V_y, \omega, n, \delta, V_R, \alpha_R, h, \gamma, \tau); \\ \overset{g}{V}_y &= f_y(V_x, V_y, \omega, n, \delta, V_R, \alpha_R, h, \gamma, \tau); \\ \overset{g}{\omega} &= f_\omega(V_x, V_y, \omega, n, \delta, V_R, \alpha_R, h, \gamma, \tau),\end{aligned}\tag{10}$$

де f_x, f_y, f_ω – безперервні функції.

За результатами інтегрування співвідношення (10) на проміжку часу $[t_{n-1}; t_n]$, маємо:

$$\begin{aligned}V_x(t_n) &= V_x(t_{n-1}) + \int_{t_{n-1}}^{t_n} f_x(g)dt; \\ V_y(t_n) &= V_y(t_{n-1}) + \int_{t_{n-1}}^{t_n} f_y(g)dt; \\ \omega(t_n) &= \omega(t_{n-1}) + \int_{t_{n-1}}^{t_n} f_\omega(g)dt.\end{aligned}\tag{11}$$

Значення інтегралів з правої частини виразів (11) визначаються виглядом функцій f_x, f_y, f_ω на проміжку $[t_{n-1}; t_n]$. Відомо, що у дискретній моделі інтеграли визначаються приблизно значеннями даних функцій на кінцях часового відрізка. Це пояснюється, тим, що їхня поведінка на внутрішніх точках невідома, а також тим, що величини V_x, V_y, ω на правій межі t_n невідомі, тому що вони самі і є шуканими параметрами. Отже, справедливо:

$$\begin{aligned}V_x(t_n) &= F_{VX}^1(X_{n-1}); \\ V_y(t_n) &= F_{VY}^1(X_{n-1}); \\ \omega(t_n) &= F_\omega^1(X_{n-1}),\end{aligned}$$

$$\text{де вхідний вектор } X_{n-1} = \begin{pmatrix} V_x(t_{n-1}), V_y(t_{n-1}), \omega(t_{n-1}); \\ n(t_{n-1}), \delta(t_{n-1}), V_R(t_{n-1}), \alpha_R(t_{n-1}), h(t_{n-1}), \gamma(t_{n-1}), \tau(t_{n-1}); \\ n(t_n), \delta(t_n), V_R(t_n), \alpha_R(t_n), h(t_n), \gamma(t_n), \tau(t_n). \end{pmatrix}$$

Аналогічні співвідношення запишемо для моменту часу t_{n+1} :

$$\begin{aligned}V_x(t_{n+1}) &= F_{VX}^2(X_n); \\ V_y(t_{n+1}) &= F_{VY}^2(X_n); \\ \omega(t_{n+1}) &= F_\omega^2(X_n),\end{aligned}$$

$$\text{де вхідний вектор } X_n = \begin{pmatrix} V_x(t_n), V_y(t_n), \omega(t_n); \\ n(t_n), \delta(t_n), V_R(t_n), \alpha_R(t_n), h(t_n), \gamma(t_n), \tau(t_n); \\ n(t_{n+1}), \delta(t_{n+1}), V_R(t_{n+1}), \alpha_R(t_{n+1}), h(t_{n+1}), \gamma(t_{n+1}), \tau(t_{n+1}). \end{pmatrix}$$

Перепишемо останній вектор у вигляді

$$X_n = \begin{pmatrix} F_{VX}^1(X_{n-1}), F_{VY}^1(X_{n-1}), F_{\omega}^1(X_{n-1}); \\ n(t_n), \delta(t_n), V_R(t_n), \alpha_R(t_n), h(t_n), \gamma(t_n), \tau(t_n); \\ n(t_{n+1}), \delta(t_{n+1}), V_R(t_{n+1}), \alpha_R(t_{n+1}), h(t_{n+1}), \gamma(t_{n+1}), \tau(t_{n+1}). \end{pmatrix}$$

Другий умовний рядок вектора X_n входить до складу вектора X_{n-1} , тому:

$$\begin{aligned} V_x(t_{n+1}) &= F_{VX}(X_{\text{din}}); \\ V_y(t_{n+1}) &= F_{VY}(X_{\text{din}}); \\ \omega(t_{n+1}) &= F_{\omega}(X_{\text{din}}), \end{aligned} \quad (12)$$

$$\text{де вектор } X_n = \begin{pmatrix} V_x(t_{n-1}), V_y(t_{n-1}), \omega(t_{n-1}); \\ n(t_{n-1}), \delta(t_{n-1}), V_R(t_{n-1}), \alpha_R(t_{n-1}), h(t_{n-1}), \gamma(t_{n-1}), \tau(t_{n-1}); \\ n(t_n), \delta(t_n), V_R(t_n), \alpha_R(t_n), h(t_n), \gamma(t_n), \tau(t_n); \\ n(t_{n+1}), \delta(t_{n+1}), V_R(t_{n+1}), \alpha_R(t_{n+1}), h(t_{n+1}), \gamma(t_{n+1}), \tau(t_{n+1}). \end{pmatrix}$$

Курс судна на час t_{n+1} може бути отриманий з використанням формули трапецій:

$$K(t_{n+1}) = K(t_n) + [\omega(t_n) + \omega(t_{n+1})](\Delta t/2).$$

З урахуванням виразу (12) для $\omega(t_{n+1})$ і відповідного співвідношення для $\omega(t_n)$ отримаємо

$$K(t_{n+1}) = K(t_n) + [F_{\omega}^1(X_{n-1}) + F_{\omega}(X_{\text{din}})](\Delta t/2).$$

Оскільки всі складові вектора X_{n-1} є водночас і складовими вектора X_{din} , то справедливо:

$$K(t_{n+1}) = F_K(X_{\text{din}}, K(t_n)).$$

Позначивши $Y_{\text{din}} = (V_x(t_{n+1}), V_y(t_{n+1}), K(t_{n+1}))^T$, отримаємо відображення

$$Y_{\text{din}} = F_{\text{din}}(X_{\text{din}}, K(t_n)), \quad (13)$$

де F_{din} – відображення векторного простору, якому належить складовий вектор $[X_{\text{din}}, K(t_n)]$, на векторний простір, елементом якого є Y_{din} .

Відображення (13) може бути виконане з будь-якою заданою точністю НМ «Dinamika», яка задовольняє умовам теореми універсальної апроксимації, точніше, – зв'язкою з трьох таких мереж (рис. 5). У зв'язці мереж є нейронна мережа, що прогнозує швидкість дрейфу судна. Варіанти реалізації НМ «Dinamika» розглянуті у [11].

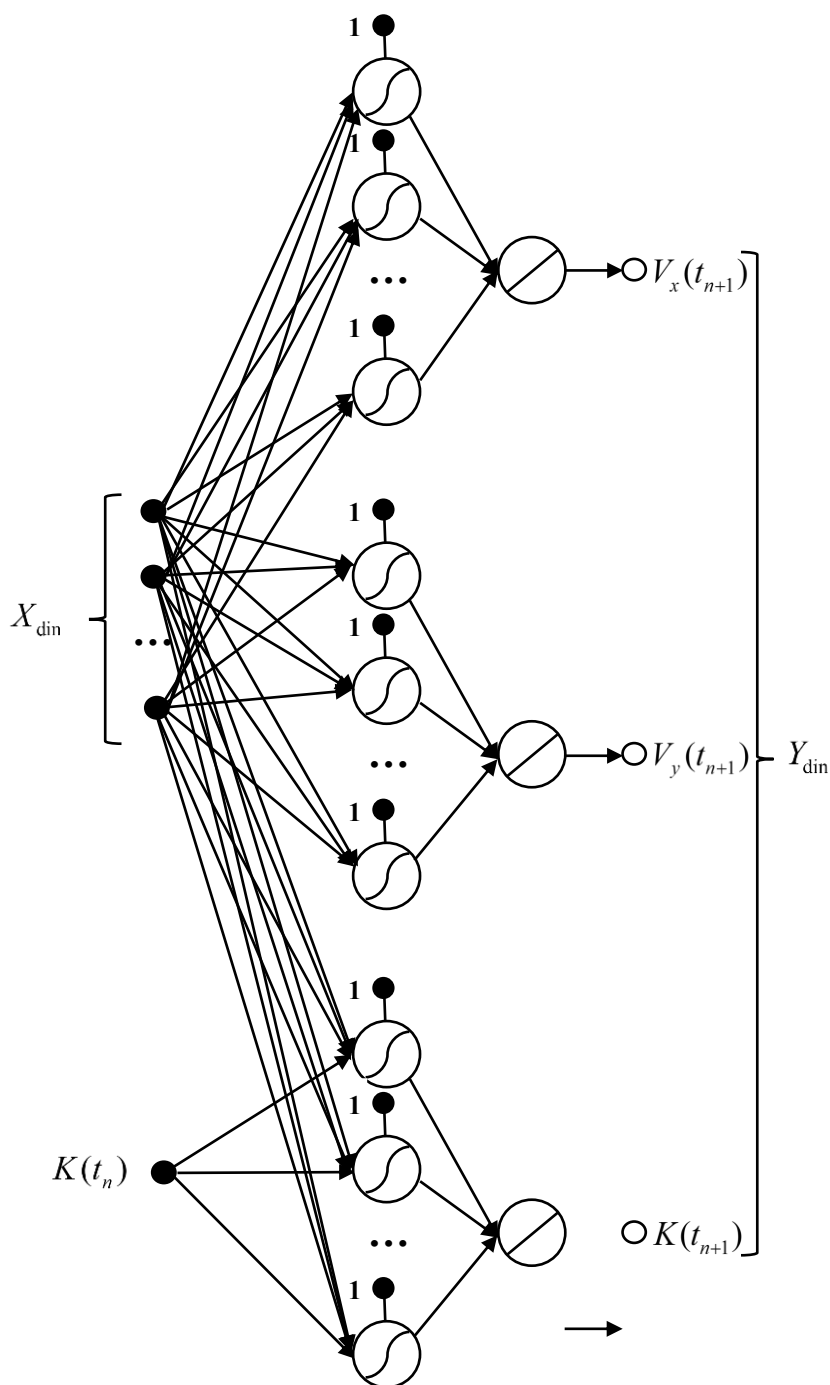


Рисунок 5. Архітектура нейронної мережі «Dynamika»

До складу прогнозуючої моделі входять три нейронні мережі: «Dynamika», «Cinematika» і «Fault» (рис. 6). Вільні параметри першої нейронної мережі «Dynamika» залежать від фізичних показників конкретного судна, тому ця НМ має навчатися на зразках, одержаних внаслідок проведення натурних спостережень. Інші мережі не залежать від фізичних показників конкретного судна, тому вони можуть бути навчені заздалегідь, у «лабораторних умовах». Тут можливі три варіанти.

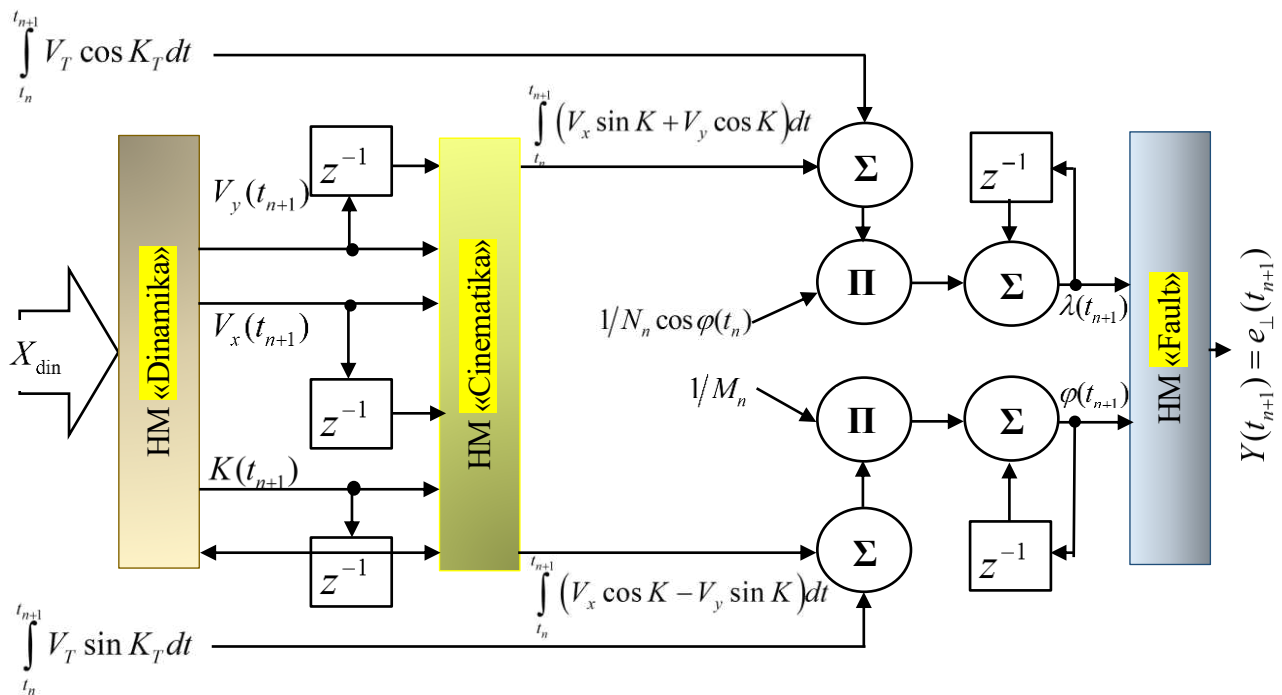


Рисунок 6. Загальна схема нейромережевої моделі для прогнозу помилки стабілізації судна на траєкторії

У першому варіанті мережа навчається безпосередньо з її вхідними зразками: $\{[X_{\text{din}}, K(t_n)], Y_{\text{din}}\}$. У другому варіанті використовуються зразки $\{[X_{\text{din}}, K(t_n)], Y_{\text{cin}}\}$. При цьому натурні спостереження можуть проводитися спеціально або зразки формуються у процесі поточної експлуатації судна. У третьому варіанті для налаштування мережі використовуються пари $\{[X_{\text{din}}, K(t_n)], Y = e_{\perp}\}$. У ході експерименту намагаються помилку стабілізації $e_{\perp}$ варіювати у досить широких межах.

Запропоновану архітектуру нейромережевої прогнозуючої моделі вдалося реалізувати в пакеті Neural Network Toolbox на основі MATLAB, де всі суматори та блоки множення були представлені у вигляді нейронних мереж. Таким чином, архітектура системи являє собою єдину нейронну мережу, що складається з шістнадцяти шарів, шести входів (одного векторного X_{din} і п'яти скалярних) та одного виходу $Y = e_{\perp}$. Скалярними входами є величини $K(t_n)$, $\varphi(t_n)$, $\lambda(t_n)$ і два інтеграли від складових течії (другі складові правих частин виразу (6)). Розроблена нейронна мережа технічно здатна до навчання, що може бути реалізовано у MATLAB.

Висновки. У рамках стандартних обмежень на основі рівнянь руху судна в заданих умовах плавання може бути побудована прогнозуюча модель для використання в алгоритмі адаптивної стабілізації судна на заданій траєкторії (маршруті). Прогнозуюча модель має у своєму складі три нейронні мережі, пов'язані блоками складання, множення та одиничних затримок. Кожна нейронна мережа задовольняє умовам теореми про універсальну апроксимацію та є двошаровою мережею прямого поширення, нейрони прихованого шару якої мають нелінійні функції активації, а нейрони вихідного шару – тотожні.

Перша нейронна мережа відображає алгоритм отримання помилки відхилення від маршруту в

перпендикулярному напрямку і не має прямого відношення до руху загалом. Для визначення відхилення необхідно знати лише геодезичні координати об'єкта на даний момент та параметри, що задають маршрут на еліпсоїді. Друга мережа перетворює кінематичні параметри (курс, поздовжня та поперечна відносна швидкість) рухомого об'єкта, що рухається поверхнею еліпсоїда, у приріст координат, пройдених відносно води. Третя нейронна мережа відповідає за динаміку судна.

Синтез прогнозуючої моделі в MATLAB показав можливість її представлення у вигляді єдиної нейронної мережі з фіксованою архітектурою. Запропонована нейромережева модель має концептуальний характер і для її практичного використання вимагає вирішення ряду завдань, наприклад визначення методів навчання всіх складових мережі. Метод навчання складається з алгоритму формування набору датасетів та алгоритму налаштування вільних параметрів мережі. Не менш важливим є синтез алгоритмів тестування мереж для визначення критеріїв можливості використання мереж у структурі прогнозуючої моделі. Після перевірки адекватності прогнозуючої моделі слід її використовувати для адаптивного утримання судна на траєкторії.

ЛІТЕРАТУРА

1. Вагущенко Л. Л. Системы автоматического управления движением судна / Л. Л. Вагущенко, Н. Н. Цымбал. – Одесса: Фенікс, 2007. – 328 с.
2. Fossen T. I. Handbook of Marine Craft Hydrodynamic and Motion Control / T.I. Fossen. – Chichester: John Wiley & Sons Ltd, 2011. – XVIII. — 575 p.
3. Timchenko V. L. Optimization of nonlinear systems of variable structure for control of marine moving vehicles / V. L. Timchenko, O. A. Ukhin, D. O. Lebedev // Journal of Automation and Information Sciences. – 2017. – Vol.49. – Is.7. – Pp. 33-47. DOI: 10.1615/JAutomatInfScien.v49.i7.30.
4. Reese B. M. A graph search and neural network approach to adaptive nonlinear model predictive control / B.M. Reese, E.G. Collins Jr. // Engineering Applications of Artificial Intelligence. – 2016. – Vol.55. – Pp. 250-268. DOI: 10.1016/j.engappai.2016.07.001.
5. Soloway D. I. Neural generalized predictive control / D. Soloway, P.J. Haley // Proceedings of the 1996 IEEE International Symposium on Intelligent Control. – IEEE, 1996. – Pp. 277–282. DOI: 10.1109/ISIC.1996.556214.
6. Hui Z. Neural network robust control of ship trajectory tracking / Z. Hui, S. Ji-hong // Mechatronics and Automation (ICMA), 2014 IEEE International Conference on. – IEEE, 2014. – Pp. 1371–1375. DOI: 10.1109/ICMA.2014.6885899.
7. Liu C. Adaptive NN-DSC Control Design for Path Following of Underactuated Surface Vessels with Input Saturation / C. Liu, C.P. Chen, Z. Zou, T. Li // Neurocomputing. – 2017. – Vol. 267. – Pp. 466-474. DOI: 10.1016/j.neucom.2017.06.042.
8. Kula K. S. Model-based controller for ship track-keeping using neural network / K.S. Kula // Cybernetics (CYBCONF), 2015 IEEE 2nd International Conference on. – IEEE, 2015. – Pp. 178–183. DOI: 10.1109/CYBConf.2015.7175928.
9. Haykin S. Neural Networks and Learning Machines: Third Edition / S. Haykin. – New York: Prentice Hall, 2009. – xxx. – 906 p.
10. Справочник по теории корабля: в трех томах / под ред. Я. И. Войткунского. – Л.: Судостроение, 1985. – Т. 3. Управляемость водоизмещающих судов. Гидродинамика судов с динамическими принципами поддержания. – 539 с.
11. Гофман А. Д. Движительно-рулевой комплекс и маневрирование судна: справ. / А. Д. Гофман. – Л.: Судостроение, 1988. – 360 с.

REFERENCES

1. Vagushchenko, L. L., and N. N. Tsymbal. Sistemy avtomaticheskogo upravleniya dvizheniem sudna. Odessa: Feniks, 2007.
2. Fossen, Thor. I. Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control. Chichester: John Wiley & Sons Ltd, 2011.
3. Timchenko, Victor L., Oleg A. Ukhin, and Denis O. Lebedev. «Optimization of Nonlinear Systems of Variable Structure for Control of Marine Moving Vehicles» Journal of Automation and Information Sciences 49.7 (2017): 33–47. DOI: 10.1615/JAutomat Inf Scien.v49.i7.30.

4. Reese, Brandon M., and Emmanuel G. Collins Jr. «A graph search and neural network approach to adaptive nonlinear model predictive control» Engineering Applications of Artificial Intelligence. 55 (2016): 250–268. DOI: 10.1016/j.engappai.2016.07.001.
5. Soloway, Donald, and Pamela J. Haley. «Neural generalized predictive control. A Newton-Raphson Implementation» Proceedings of the 1996 IEEE International Symposium on Intelligent Control. IEEE, 1996. 277–282. DOI: 10.1109/ISIC.1996.556214.
6. Hui, Zhao, and Shen Ji-Hong. «Neural network robust control of ship trajectory tracking» Mechatronics and Automation (ICMA), 2014 IEEE International Conference on. IEEE, 2014: 1371–1375. DOI: 10.1109/ICMA.2014.6885899.
7. Liu, Cheng, C. Philip Chen, Zaojian Zou, and Tieshan Li. «Adaptive NN-DSC control design for path following of underactuated surface vessels with input saturation» Neurocomputing 267 (2017): 466–474. DOI: 10.1016/j.neucom.2017.06.042.
8. Kula, Krzysztof S. «Model-based controller for ship track-keeping using Neural Network» Cybernetics (CYBCONF), 2015 IEEE 2nd International Conference on. IEEE, 2015: 178–183. DOI: 10.1109/CYBConf.2015.7175928.
9. Haykin, Simon. Neural Networks and Learning Machines: Third Edition. New York: Prentice Hall, 2009.
10. Voitkunsky, Ya. I. «Manoeuvrability of conventional ships. Hydrodynamics of gliders hydrofoils and hovercrafts» Ship Theory Handbook. L.: Sudostroenie, 1985.
11. Gofman, A. D. Dvizhitel'no-rulevoi kompleks i manevrirovaniye sudna: spravochnik. L.: Sudostroenie, 1988.

Zazirnyi A. A., Hroshev O. V., Vechurko O.M.

ONCEPTUAL APPROACH TO SOLVING THE PROBLEM OF SHIP STABILIZATION ON A TRAJECTORY BASED ON THE USE OF NEURAL NETWORKS

The aim of the article is to build a predictive model for use in the algorithm of adaptive stabilization of a vessel on a given trajectory based on neural networks. A scheme of a predictive model of vessel stabilization error on a trajectory based on a family of neural networks is proposed. The final composition of the model is presented in the form of a single neural network, which cannot be attributed to any standard type. A procedure for training a neural network predictive model is proposed. Two neural networks, the free parameters of which do not depend on the physical characteristics of the vessel, can be trained in advance. A neural network responsible for forming the dynamics of vessel behavior can be trained using two approaches. If a specific vessel is considered, then one-time network training is used. Samples for such training are the results of specially conducted experiments or even generated data based on a reliable simulation model, the confidence of which has a high degree of confidence. With this approach, a batch training mode is mainly used. If samples are sequentially received into current operation, the network collects information about the physical properties of such vessels, and in this case the network coefficients are adjusted each time a new sample is received. The first approach provides faster learning compared to the second, but requires special experiments. With sequential adjustment of the neural network, special experiments are not required, but achieving the required forecast accuracy requires more time. Synthesis of the predictive model in MATLAB showed the possibility of its representation in the form of a single neural network with a fixed architecture. The proposed neural network model is conceptual in nature and requires solving a number of problems, such as determining the methods for training all components of the network. The training method consists of an algorithm for forming a set of datasets and an algorithm for setting free network parameters. The prospect of further improving the neural network predictive model is to take into account the flow elements at the input, which will simplify the architecture of the neural network.

Keywords: ship handling, maritime safety, neural network, vessel, trajectory, algorithm, model, automatic stabilization, wave, propulsor

© Долинська Н.Б., Калініченко Є.В.

МЕТОД ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ НАВІГАЦІЙНОЇ БЕЗПЕКИ НА ВНУТРІШНІХ ВОДНИХ ШЛЯХАХ УКРАЇНИ НА ОСНОВІ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ ТЕЛЕМАТИЧНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

У статті розглянуто проблему забезпечення навігаційної безпеки на внутрішніх водних шляхах України в умовах зростаючої інтенсивності судноплавства та динамічних змін навігаційної обстановки. Обмежені габарити фарватеру, змінні гідрологічні та метеорологічні умови, а також значний вплив людського фактора зумовлюють необхідність переходу від традиційних реактивних підходів до проактивних методів управління навігаційною безпекою. Метою дослідження є розробка методу забезпечення навігаційної безпеки на основі інтелектуальних телематичних технологій, спрямованого на зниження рівня навігаційних ризиків, підвищення обґрунтованості навігаційних рішень і мінімізацію впливу людського фактора. Запропонований метод базується на системному підході та інтеграції телематичних даних із судових і берегових джерел, зокрема систем автоматичної ідентифікації суден, річкових інформаційних служб, електронних навігаційних карт і гідрометеорологічної інформації. Метод реалізовано у вигляді адаптивного циклу, що включає формування системної моделі навігаційної ситуації, ідентифікацію навігаційних загроз, багатофакторну оцінку рівня навігаційної небезпеки, прогнозування розвитку ситуації та формування рекомендацій для підтримки прийняття рішень у реальному часі. На відміну від існуючих підходів, які здебільшого мають реактивний характер і зосереджені на аналізі окремих параметрів навігації, розроблений метод забезпечує інтегроване та проактивне управління навігаційними ризиками з урахуванням специфіки внутрішніх водних шляхів України. Практичне застосування запропонованого методу створює передумови для підвищення рівня навігаційної безпеки, зниження аварійності та вдосконалення систем управління судноплавством на внутрішніх водних шляхах.

Ключові слова: навігаційна безпека, внутрішні водні шляхи, інтелектуальні телематичні технології, метод забезпечення безпеки, підтримка прийняття рішень.

Постановка проблеми. Внутрішні водні шляхи України є важливою складовою національної транспортної системи, що забезпечує перевезення вантажів і пасажирів за умов обмежених габаритів судноплавного простору, змінних гідрологічних і метеорологічних умов, а також зростаючої інтенсивності руху суден. За таких умов забезпечення належного рівня навігаційної безпеки набуває особливої актуальності, оскільки навігаційні інциденти на внутрішніх водних шляхах, зокрема зіткнення, посадки на мілину та порушення режимів руху, призводять до значних економічних втрат, загроз життю людей і негативного впливу на довкілля.

Традиційні підходи до забезпечення навігаційної безпеки на внутрішніх водних шляхах здебільшого базуються на використанні окремих технічних засобів навігації та досвіді судноводія, що обмежує можливості комплексного аналізу навігаційної ситуації та своєчасного реагування на її зміни. Фрагментарність інформації, відсутність інтеграції даних із різнорідних джерел і значний вплив людського фактора знижують ефективність прийняття навігаційних рішень, особливо в умовах динамічного розвитку навігаційної обстановки.

Сучасний розвиток інтелектуальних телематичних технологій, зокрема систем автоматичної ідентифікації суден, річкових інформаційних служб, електронних навігаційних карт та засобів інтелектуальної обробки даних, створює передумови для переходу до нових підходів управління навігаційною безпекою. Водночас наявні наукові та прикладні рішення переважно зосереджені на окремих аспектах моніторингу або оцінювання ризиків і не забезпечують формування цілісного методу, орієнтованого на інтегровану оцінку навігаційної ситуації, прогнозування розвитку небезпечних умов і підтримку прийняття рішень у реальному часі.

Таким чином, наукова проблема полягає у відсутності адаптованого до умов внутрішніх водних шляхів України методу забезпечення навігаційної безпеки, який би поєднував системний підхід, інтелектуальні телематичні технології та механізми проактивного управління навігаційними ризиками. Розв'язання цієї проблеми є необхідною умовою підвищення рівня безпеки судноплавства, зниження аварійності та забезпечення сталого розвитку внутрішнього водного транспорту.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питання забезпечення навігаційної безпеки на внутрішніх водних шляхах активно досліджується у наукових роботах, присвячених застосуванню системного аналізу, електронних навігаційних карт, телематичних технологій та інтелектуальних методів підтримки прийняття рішень. Значна частина досліджень спрямована на формування інструментальних підходів до інтегрованої оцінки навігаційної ситуації та зниження рівня навігаційних ризиків.

У роботі [1] розроблено методологію системного аналізу для впровадження інструментального навігаційного методу на внутрішніх водних шляхах України з використанням електронних картографічних систем та алгоритмів функціональної стійкості. Запропонований підхід забезпечує інтегровану оцінку навігаційної ситуації та підтримку прийняття рішень у реальному часі, що підтверджує доцільність використання системного підходу для підвищення навігаційної безпеки. Застосування телематичних технологій для підвищення безпеки внутрішньої навігації розглянуто в роботі [2], де запропоновано використання автономних інформаційних систем і мобільних застосунків для оперативного реагування на надзвичайні ситуації. Математичний апарат дослідження базується на марковських процесах, що дозволяє оцінювати ймовірнісні сценарії розвитку небезпечних подій, однак не формує цілісного методу управління навігаційною безпекою. У дослідженні [3] розглянуто можливості впровадження e-Navigation на внутрішніх водних шляхах України шляхом оцінювання поточної навігаційної інформації, визначення ключових компонентів навігаційних систем і розробки технічних рекомендацій щодо зниження аварійності. Робота має практичну спрямованість, проте зосереджується переважно на рівні системних рішень без формалізації інтегрованого методу управління ризиками. Проблема відсутності комплексного методичного забезпечення управління навігаційною безпекою в Україні підкреслюється в роботі [4], де запропоновано створення системи управління безпекою судноплавства. Автори зазначають перспективність інтеграції інтелектуальних інформаційних технологій для підтримки прийняття рішень і прогнозування ризиків, однак запропоновані підходи мають концептуальний характер. Методологія системного аналізу з використанням океанографічних досліджень та електронних навігаційних карт для забезпечення навігаційної безпеки на внутрішніх водних шляхах України представлена в роботі [5]. Запропонований підхід забезпечує інтегровану оцінку та прогнозування навігаційних ризиків і підтверджений експериментальними результатами, що свідчить про його наукову та практичну цінність.

У роботі [6] запропоновано гібридну систему підтримки прийняття рішень на основі поєднання детермінованих і нечітких моделей, яка дозволяє інтегрувати експертні рішення з математичними методами оцінювання безпеки. Подібний підхід є перспективним для застосування на внутрішніх водних шляхах, однак потребує адаптації до специфіки телематичних навігаційних систем. Автоматизовані системи управління навігаційною безпекою з використанням нечіткого виведення розглянуто в роботі [7], де оцінювання ризиків поєднується з аналізом дій судноводія та підтримкою прийняття рішень у реальному часі. Такі рішення є важливими з точки зору мінімізації впливу людського фактора. У дослідженні [8] показано ключову роль високоточного позиціонування, прецизійних PNT-даних і розвитку AIS-комунікацій для підвищення безпеки навігації на внутрішніх водних шляхах, що створює технологічне підґрунтя для реалізації інтелектуальних телематичних методів у реальному часі. Інтелектуальні методи обробки геопросторових даних та оцінювання екологічних ризиків, представлені в роботах Кусуля та співавторів [9], демонструють можливості інтеграції різномірних даних і моніторингу складних систем, що може бути адаптовано для задач навігаційної безпеки на внутрішніх водних шляхах. Водночас дослідження, присвячені впровадженню інноваційних технологій для оцінювання та прогнозування стану автомобільних шляхів України [10], хоча й демонструють ефективні підходи до управління транспортною інфраструктурою, безпосередньо

не орієнтовані на проблеми навігаційної безпеки внутрішніх водних шляхів і потребують суттєвої адаптації.

Таким чином, аналіз останніх досліджень і публікацій свідчить про наявність значного наукового доробку у сфері навігаційної безпеки, телематичних технологій та інтелектуальних систем підтримки прийняття рішень. Водночас відсутній цілісний метод забезпечення навігаційної безпеки на внутрішніх водних шляхах України, який би поєднував системний підхід, інтегровану телематичну інформацію, багатофакторну оцінку ризиків і прогнозування розвитку навігаційної ситуації в реальному часі, що й зумовлює актуальність даного дослідження.

Мета дослідження полягає у розробленні методу забезпечення навігаційної безпеки на внутрішніх водних шляхах України на основі інтелектуальних телематичних технологій, спрямованого на зниження рівня навігаційних ризиків, підвищення обґрунтованості навігаційних рішень та мінімізацію впливу людського фактора шляхом інтегрованої оцінки навігаційної ситуації, прогнозування розвитку навігаційних ризиків і формування рекомендацій у реальному часі з урахуванням специфіки внутрішніх водних шляхів.

Основні результати дослідження. Основним результатом проведеного дослідження є розроблення методу забезпечення навігаційної безпеки на внутрішніх водних шляхах України на основі інтелектуальних телематичних технологій. Запропонований метод орієнтований на інтегровану обробку навігаційної інформації з різномірних судових і берегових джерел, багатофакторне оцінювання навігаційної ситуації та підтримку прийняття управлінських рішень у реальному часі.

Метод реалізовано у вигляді логічно впорядкованої послідовності етапів, що утворюють адаптивний цикл управління навігаційною безпекою. Такий підхід забезпечує узгодження процесів збору, аналізу та прогнозування навігаційних даних із формуванням рекомендацій, спрямованих на зниження рівня навігаційних ризиків з урахуванням специфіки внутрішніх водних шляхів. Логічна схема методу забезпечення навігаційної безпеки зображена на рис. 1.

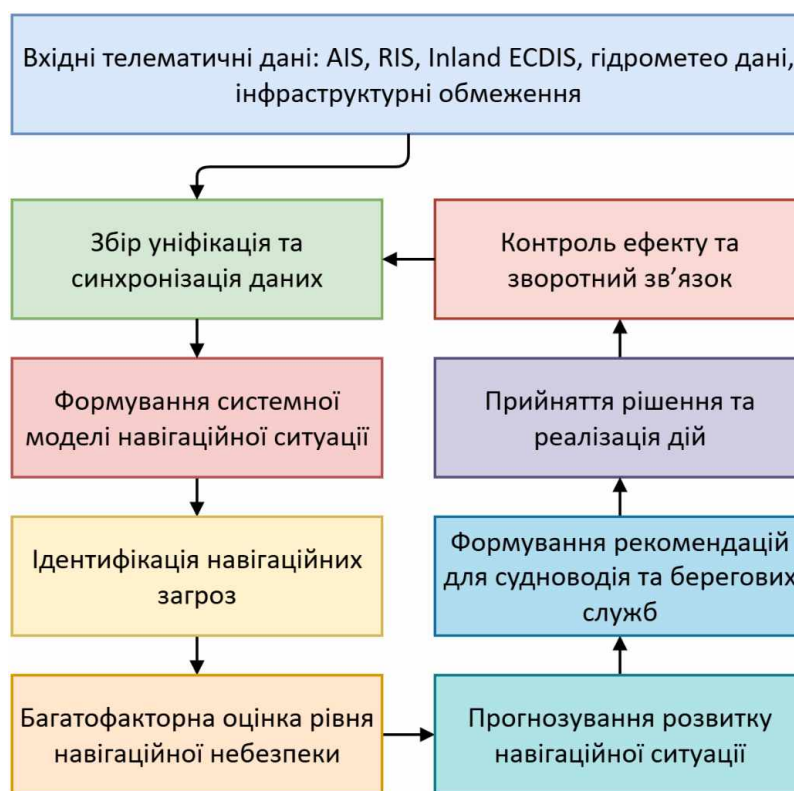


Рисунок 1 – Логічна схема методу забезпечення навігаційної безпеки на внутрішніх водних шляхах України на основі інтелектуальних телематичних технологій

Наведена на рис. 1 зображена логічна схема методу забезпечення навігаційної безпеки на внутрішніх водних шляхах України на основі інтелектуальних телематичних технологій характеризує реалізацію методу як адаптивного циклу, у межах якого телематичні дані з суднових і берегових джерел збираються, уніфікуються та синхронізуються з подальшим формуванням системної моделі навігаційної ситуації. Далі виконується ідентифікація навігаційних загроз і багатофакторна оцінка рівня навігаційної небезпеки, після чого здійснюється прогнозування розвитку ситуації та генеруються рекомендації для судноводія і берегових служб управління рухом. Наявність контуру зворотного зв'язку забезпечує уточнення параметрів оцінювання та адаптацію методу до змін навігаційної обстановки в реальному часі.

Системний підхід до забезпечення навігаційної безпеки на внутрішніх водних шляхах України на основі інтелектуальних телематичних технологій

Забезпечення навігаційної безпеки на внутрішніх водних шляхах України потребує застосування системного підходу, який дозволяє враховувати багатофакторний характер навігаційної обстановки, динаміку її змін та взаємодію між технічними, природними й організаційними складовими судноплавства. У межах проведеного дослідження навігаційна безпека розглядається не як сукупність окремих заходів або технічних засобів, а як результат функціонування інтегрованої системи, що базується на використанні інтелектуальних телематичних технологій.

Запропонований системний підхід передбачає формування єдиного інформаційного простору навігаційної безпеки, у якому поєднуються дані про навігаційне середовище, параметри руху суден та обмеження, пов'язані з інфраструктурою внутрішніх водних шляхів. Основу такого підходу становить інтеграція телематичних засобів збору й передачі інформації (AIS, RIS, електронні навігаційні карти, гідрометеорологічні сервіси) з аналітичними модулями обробки даних і підтримки прийняття рішень.

У структурі системного підходу виділено три взаємопов'язані підсистеми. Перша підсистема характеризує навігаційне середовище та включає гідрологічні, метеорологічні й гідрографічні параметри, що визначають умови судноплавства на конкретній ділянці внутрішнього водного шляху. Друга підсистема відображає стан і рух суден, зокрема їхні просторово-часові параметри, навігаційний статус, швидкісні режими та взаємне розташування в потоці. Третя підсистема охоплює інформаційно-аналітичні засоби, які забезпечують обробку телематичних даних, ідентифікацію навігаційних загроз та формування інтегральної оцінки рівня навігаційної небезпеки.

Інтелектуальні телематичні технології в межах запропонованого підходу виконують роль інтеграційного ядра системи, забезпечуючи синхронізацію різномірних даних, їх просторово-часову узгодженість та адаптацію до змін навігаційної ситуації. Це дозволяє перейти від фрагментарного моніторингу окремих параметрів до комплексного аналізу навігаційної обстановки в реальному часі.

Важливою особливістю системного підходу є врахування часової структури процесу навігації. Оцінювання навігаційної безпеки здійснюється одночасно на кількох часових рівнях: поточному, що відображає фактичний стан обстановки; короткостроковому, орієнтованому на підтримку маневрування та уникнення небезпечних ситуацій; а також прогнозованому, який дозволяє передбачати розвиток навігаційних ризиків у найближчій перспективі. Така багаторівнева оцінка створює передумови для переходу від реактивного реагування на загрози до проактивного управління навігаційною безпекою.

Запропонований системний підхід забезпечує методологічну основу для подальшого синтезу системи забезпечення навігаційної безпеки, оскільки дозволяє формалізувати взаємодію між елементами навігаційного процесу та визначити місце інтелектуальних телематичних технологій у структурі методу. Це, у свою чергу, створює умови для розробки адаптивного методу управління навігаційними ризиками, орієнтованого на специфіку внутрішніх водних шляхів України.

Синтез системи забезпечення навігаційної безпеки на внутрішніх водних шляхах України

Синтез системи забезпечення навігаційної безпеки на внутрішніх водних шляхах України здійснюється на основі запропонованого системного підходу та передбачає формалізацію послідовності дій, спрямованих на ідентифікацію, оцінювання та зниження навігаційних ризиків у реальному часі. У межах дослідження синтез системи розглядається як процес перетворення різномірних телематичних даних у керовані інформаційні та аналітичні результати, що безпосередньо підтримують прийняття навігаційних рішень.

Запропонована система реалізує метод забезпечення навігаційної безпеки у вигляді послідовного адаптивного циклу, який включає декілька взаємопов'язаних етапів. На першому етапі здійснюється збір і уніфікація телематичної навігаційної інформації, що надходить із суднових та берегових джерел. До таких джерел належать системи автоматичної ідентифікації суден, річкові інформаційні служби, електронні навігаційні карти, а також гідрометеорологічні та інфраструктурні інформаційні ресурси. Уніфікація даних забезпечує їх просторово-часову узгодженість та формування єдиного інформаційного потоку.

Другий етап передбачає формування актуальної моделі навігаційної ситуації для конкретної ділянки внутрішнього водного шляху. На цьому етапі виконується інтеграція параметрів навігаційного середовища, характеристик руху суден та наявних обмежень інфраструктури. Сформована модель відображає не лише поточний стан навігаційної обстановки, але й взаємодію між окремими факторами, що впливають на рівень безпеки судноплавства.

На третьому етапі здійснюється ідентифікація навігаційних загроз, які можуть призвести до виникнення небезпечних або аварійних ситуацій. До таких загроз належать ризики зіткнення суден, посадки на мілину, порушення габаритних обмежень, вплив несприятливих гідрометеорологічних умов та перевищення допустимої інтенсивності руху. Особливістю запропонованого підходу є те, що ідентифікація загроз базується на комплексному аналізі сукупності факторів, а не на контролі окремих параметрів.

Четвертий етап полягає у багатофакторному оцінюванні рівня навігаційної небезпеки. Для цього використовується інтеграція ідентифікованих ризиків з урахуванням їх відносної вагомості та динаміки зміни навігаційної ситуації. Результатом є формування інтегрального показника рівня навігаційної небезпеки, який дозволяє класифікувати стан судноплавства як допустимий, підвищений або критичний. Така оцінка забезпечує об'єктивну основу для прийняття подальших управлінських рішень.

П'ятий етап синтезованої системи пов'язаний із прогнозуванням розвитку навігаційної ситуації на короткострокову перспективу. Застосування інтелектуальних алгоритмів аналізу даних дозволяє враховувати тенденції зміни параметрів руху суден і навігаційного середовища, а також оцінювати ймовірність переходу навігаційної ситуації у небезпечний стан. Прогнозний компонент є ключовим елементом методу, оскільки забезпечує можливість проактивного управління навігаційною безпекою.

На завершальному етапі здійснюється формування рекомендацій щодо управління навігаційною безпекою. Залежно від рівня небезпеки та прогнозу розвитку ситуації система генерує рекомендації для судноводія або берегових служб управління рухом, зокрема щодо коригування швидкісного режиму, зміни траєкторії руху, вибору альтернативного маршруту або посилення контролю за рухом суден. Реалізація зворотного зв'язку забезпечує адаптацію параметрів оцінювання та підвищує стійкість методу до змін навігаційної обстановки.

Запропонований синтез системи забезпечення навігаційної безпеки дозволяє реалізувати цілісний метод управління навігаційними ризиками на внутрішніх водних шляхах України. Його особливістю є поєднання системного аналізу, інтелектуальних телематичних технологій і прогнозних механізмів, що створює умови для підвищення рівня безпеки судноплавства та зниження впливу людського фактору на процес прийняття навігаційних рішень.

Висновки. У результаті проведеного дослідження розроблено метод забезпечення навігаційної безпеки на внутрішніх водних шляхах України на основі інтелектуальних телематичних технологій, який орієнтований на інтегроване управління навігаційними ризиками з урахуванням специфіки внутрішніх водних шляхів. Метод забезпечує перехід від фрагментарного аналізу окремих навігаційних параметрів до цілісної оцінки навігаційної ситуації у реальному часі.

На відміну від існуючих підходів, які переважно зосереджені на оцінюванні окремих ризиків або функціонуванні окремих навігаційних систем, розроблений метод поєднує системний підхід, інтеграцію телематичних даних із різномірних суднових і берегових джерел та багатофакторну оцінку рівня навігаційної небезпеки в межах єдиного адаптивного циклу. Це дозволяє враховувати взаємодію навігаційного середовища, параметрів руху суден та інфраструктурних обмежень, що не реалізується у більшості відомих рішень.

Суттєвою відмінністю запропонованого методу є наявність прогностичного компонента, який забезпечує оцінювання можливого розвитку навігаційної ситуації на короткострокову перспективу. На відміну від реактивних підходів, що базуються на фіксації вже наявних небезпечних умов, розроблений метод орієнтований на проактивне управління навігаційною безпекою та своєчасне попередження виникнення критичних ситуацій.

Крім того, метод відрізняється реалізацією механізму зворотного зв'язку, що забезпечує адаптацію параметрів оцінювання до змін навігаційної обстановки та зменшує вплив людського фактора на процес прийняття навігаційних рішень. Це підвищує стійкість системи до динамічних змін умов судноплавства та сприяє підвищенню обґрунтованості управлінських рішень.

Практична значущість отриманих результатів полягає у можливості застосування запропонованого методу в судових навігаційних системах, річкових інформаційних службах та системах управління рухом суден на внутрішніх водних шляхах України. Запропонований метод може бути використаний як науково-методична основа для подальшого розвитку інтелектуальних систем навігаційної безпеки та впровадження сучасних телематичних рішень у внутрішньому водному транспорті.

ЛІТЕРАТУРА

1. Panin, V. V., Doronin, V. V., & Aleynikov, V. M. (2018). APPLICATION OF THE SYSTEM ANALYSIS OF IMPLEMENTATION OF THE INSTRUMENTAL METHOD OF NAVIGATION ON INLAND WATERWAYS OF UKRAINE. *Radio Electronics, Computer Science, Control*, 0(2). <https://doi.org/10.15588/1607-3274-2018-2-14>
2. Perzyński, T., & Lewiński, A. (2017). New Telematic Solutions for Improving Safety in Inland Navigation. In J. Mikulski (Ed.), *Smart Solutions in Today's Transport* (Vol. 715, pp. 70–81). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-66251-0_6
3. Buravtsova, J. (2021). IMPLEMENTATION OF RIVER ELECTRONIC NAVIGATION SYSTEMS AND ONSHORE INFORMATION SERVICES ON THE INLAND WATERWAYS OF UKRAINE. *Shipping & Navigation*, 32(2), 10–17. <https://doi.org/10.31653/2306-5761.32.2021.10-17>
4. Kosharskaya, L., Makhurenko, G., & Postan, M. (2017). Application of the system approach to the development of the project of a safety management system for navigation in Ukraine. *Technology Audit and Production Reserves*, 4(2(36)), 29–36. <https://doi.org/10.15587/2312-8372.2017.109094>
5. Doronin, V. V., & Spian, O. M. (2019). Application of system analysis of implementation of a multicomponent system of river e-navigation. *Oceanographic Journal (Problems, Methods and Facilities for Researches of the World Ocean)*, 1(12), 88–104. [https://doi.org/10.37629/2709-3972.1\(12\).2019.88-104](https://doi.org/10.37629/2709-3972.1(12).2019.88-104)
6. Miciuła, I., & Wojtaszek, H. (2019). Automatic Hazard Identification Information System (AHIS) for decision support in inland waterway navigation. *Procedia Computer Science*, 159, 2313–2323. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2019.09.406>
7. Грицук, І., Носов, П., Пономарьова, В., & Дягилева, О. (2023). REDUCTION OF NAVIGATION RISKS BY USING FUZZY LOGIC TO AUTOMATE CONTROL PROCESSES UNDER UNCERTAINTY. *Наука і Техніка Сьогодні*, 6(20). [https://doi.org/10.52058/2786-6025-2023-6\(20\)-8-22](https://doi.org/10.52058/2786-6025-2023-6(20)-8-22)
8. Hesselbarth, A., Medina, D., Ziebold, R., Sandler, M., Hoppe, M., & Uhlemann, M. (2020). Enabling Assistance Functions for the Safe Navigation of Inland Waterways. *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine*, 12(3), 123–135. <https://doi.org/10.1109/MITS.2020.2994103>
9. Kussul, N., Skakun, S., & Kravchenko, O. (2011). Environmental Risk Assessment Using Geospatial Data and Intelligent Methods. *International Journal "Information Technologies & Knowledge"*, 5(2), 129–141.
10. National University of Transport, Kyiv, Ukraine, & Koncha, P. (2025). ADAPTING INNOVATIVE ASSESSMENT AND FORECASTING METHODS FOR HIGHWAYS IN UKRAINE. *Modern Science*, 176. <https://doi.org/10.62204/2336-498X-2025-1-1>

REFERENCES

1. Panin, V. V., Doronin, V. V., & Aleynikov, V. M. (2018). APPLICATION OF THE SYSTEM ANALYSIS OF IMPLEMENTATION OF THE INSTRUMENTAL METHOD OF NAVIGATION ON INLAND WATERWAYS OF UKRAINE. *Radio Electronics, Computer Science, Control*, 0(2). <https://doi.org/10.15588/1607-3274-2018-2-14>

2. Perzyński, T., & Lewiński, A. (2017). New Telematic Solutions for Improving Safety in Inland Navigation. In J. Mikulski (Ed.), *Smart Solutions in Today's Transport* (Vol. 715, pp. 70–81). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-66251-0_6
3. Buravtsova, J. (2021). IMPLEMENTATION OF RIVER ELECTRONIC NAVIGATION SYSTEMS AND ONSHORE INFORMATION SERVICES ON THE INLAND WATERWAYS OF UKRAINE. *Shipping & Navigation*, 32(2), 10–17. <https://doi.org/10.31653/2306-5761.32.2021.10-17>
4. Kosharskaya, L., Makhurenko, G., & Postan, M. (2017). Application of the system approach to the development of the project of a safety management system for navigation in Ukraine. *Technology Audit and Production Reserves*, 4(2(36)), 29–36. <https://doi.org/10.15587/2312-8372.2017.109094>
5. Doronin, V. V., & Spilian, O. M. (2019). Application of system analysis of implementation of a multicomponent system of river e-navigation. *Oceanographic Journal (Problems, Methods and Facilities for Researches of the World Ocean)*, 1(12), 88–104. [https://doi.org/10.37629/2709-3972.1\(12\).2019.88-104](https://doi.org/10.37629/2709-3972.1(12).2019.88-104)
6. Miciuła, I., & Wojtaszek, H. (2019). Automatic Hazard Identification Information System (AHIIS) for decision support in inland waterway navigation. *Procedia Computer Science*, 159, 2313–2323. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2019.09.406>
7. Gritsuk, I., Nosov, P., Ponomaryova, V., & Dyagileva, O. (2023). REDUCTION OF NAVIGATION RISKS BY USING FUZZY LOGIC TO AUTOMATE CONTROL PROCESSES UNDER UNCERTAINTY. *Science and Technology Today*, 6(20). [https://doi.org/10.52058/2786-6025-2023-6\(20\)-8-22](https://doi.org/10.52058/2786-6025-2023-6(20)-8-22)
8. Hesselbarth, A., Medina, D., Ziebold, R., Sandler, M., Hoppe, M., & Uhlemann, M. (2020). Enabling Assistance Functions for the Safe Navigation of Inland Waterways. *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine*, 12(3), 123–135. <https://doi.org/10.1109/MITS.2020.2994103>
9. Kussul, N., Skakun, S., & Kravchenko, O. (2011). Environmental Risk Assessment Using Geospatial Data and Intelligent Methods. *International Journal "Information Technologies & Knowledge"*, 5(2), 129–141.
10. National University of Transport, Kyiv, Ukraine, & Koncha, P. (2025). ADAPTING INNOVATIVE ASSESSMENT AND FORECASTING METHODS FOR HIGHWAYS IN UKRAINE. *Modern Science*, 176. <https://doi.org/10.62204/2336-498X-2025-1-1>

Dolynska N., Kalinichenko Y.

METHOD FOR ENSURING NAVIGATION SAFETY ON INLAND WATERWAYS OF UKRAINE BASED ON INTELLIGENT TELEMATIC TECHNOLOGIES

The article discusses the problem of ensuring navigational safety on Ukraine's inland waterways in the context of increasing shipping intensity and dynamic changes in the navigational situation. Limited fairway dimensions, variable hydrological and meteorological conditions, as well as the significant influence of the human factor necessitate a transition from traditional reactive approaches to proactive methods of navigational safety management. The aim of the study is to develop a method for ensuring navigational safety based on intelligent telematic technologies, aimed at reducing navigational risks, improving the validity of navigational decisions, and minimizing the influence of the human factor. The proposed method is based on a systematic approach and the integration of telematic data from ship and shore sources, in particular automatic ship identification systems, river information services, electronic navigation charts, and hydrometeorological information. The method is implemented in the form of an adaptive cycle, which includes the formation of a systemic model of the navigation situation, the identification of navigation threats, a multifactorial assessment of the level of navigation danger, forecasting the development of the situation, and the formation of recommendations to support real-time decision-making. Unlike existing approaches, which are mostly reactive and focused on the analysis of individual navigation parameters, the developed method provides integrated and proactive management of navigation risks, considering the specifics of Ukraine's inland waterways. The practical application of the proposed method creates the conditions for improving navigation safety, reducing accidents, and improving navigation management systems on inland waterways.

Keywords: navigation safety, inland waterways, intelligent telematics technologies, safety assurance method, decision support.

Стаття прийнята 20.10.2025

© Бажак О.В., Гаценко Л.В.

ІНТЕЛЕКТУАЛЬНЕ УПРАВЛІННЯ ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯМ ГІБРИДНИХ СУДНОВИХ УСТАНОВОК

У статті розглянуто питання підвищення ефективності та надійності гібридних суднових енергетичних установок шляхом інтеграції технологій штучного інтелекту в системи управління енергоспоживанням. Морський транспорт забезпечує значну частину міжнародної торгівлі, проте суднобудівна галузь залишається одним із найбільших джерел викидів CO₂, що обумовлює необхідність підвищення енергоефективності та екологічності морських операцій. Проаналізовано еволюцію архітектури суднових автоматизованих електроенергетичних систем та основні стратегії енергоменеджменту: централізовані та децентралізовані системи управління, ієрархічні методології, модельне прогнозує керування, агентно-орієнтовані системи. Представлено детальний аналіз переваг та недоліків кожного підходу з урахуванням параметрів ефективності, стабільності, вартості впровадження та експлуатації, екологічного впливу, складності та масштабованості систем. Розглянуто практичні приклади застосування штучного інтелекту в морській індустрії, зокрема в автономній навігації, системах підтримки прийняття рішень, діагностиці обладнання, прогнозованому технічному обслуговуванні та оптимізації маршрутів судноплавства. Особливу увагу приділено інтеграції штучного інтелекту з системами моніторингу стану обладнання та аналізу надійності на основі динамічних Байєсівських мереж та моделей процесів Вінер. Представлено методологію health-aware управління енергоспоживанням, яка поєднує стратегію мінімізації еквівалентного споживання палива з динамічним оцінюванням надійності компонентів з урахуванням історії експлуатаційних режимів та деградації обладнання [2,6]. Розглянуто математичні моделі процесів деградації та методи розрахунку інтенсивностей відмов компонентів суднових енергоустановок [8]. Визначено основні виклики та обмеження, пов'язані з питаннями безпеки та кібербезпеки систем на основі штучного інтелекту, кваліфікації персоналу, складності інтеграції з існуючими системами, забезпечення стабільності та передбачуваності алгоритмів, якості даних та стандартизації форматів обміну інформацією, регуляторних та етичних аспектів впровадження автономних систем. Окреслено перспективні напрямки розвитку симбіозу штучного інтелекту та систем управління суднової електроенергії, включаючи повну автоматизацію, інтеграцію з альтернативними джерелами енергії, розвиток цифрових двійників та системи обміну даними судно-берег.

Ключові слова: суднові енергосистеми, енергоефективність, оптимізація, машинне навчання, штучний інтелект, морський транспорт, екологічний вплив, безпека мореплавства, кібербезпека.

Постановка проблеми. Морський транспорт відіграє ключову роль у глобалізації, забезпечуючи значну частину перевезень міжнародної торгівлі. Ефективність, безпека та екологічність морських операцій є критичними аспектами розвитку світової економіки. За даними Міжнародної морської організації (ІМО), у 2023 році світова суднобудівна галузь викинула понад 1 мільярд тонн CO₂ [1].

У зв'язку з цим вимоги до морської індустрії щодо підвищення енергоефективності, зниження експлуатаційних витрат та мінімізації екологічного впливу постійно зростають. Надійні та ефективні суднові автоматизовані електроенергетичні системи (CAEES) є основою безпечної та безперебійної роботи в морській індустрії. Судно, подібне до плаваючого міста, потребує електроенергії для забезпечення життєдіяльності екіпажу, функціонування навігаційного обладнання, вантажних систем та інших критичних механізмів [2].

Водночас із зростаючими вимогами до морської індустрії спостерігається швидкий розвиток технологій штучного інтелекту (ШІ), які демонструють видатний потенціал для трансформації різних

сфер життя, включаючи морський транспорт. ІІІ вже допомагає оптимізувати маршрути, прогнозувати потреби в технічному обслуговуванні, підвищувати безпеку судноплавства та автоматизувати численні процеси. За даними звіту Lloyd's Register, глобальний ринок розробок ІІІ в морській індустрії оцінюється в 1,5 мільярда доларів на рік і, як очікується, подвоїться протягом наступних п'яти років [3].

У цьому контексті дослідження симбіозу ІІІ та САЕЕС є актуальним. Інтеграція з ІІІ може відкрити численні можливості для вирішення існуючих проблем, підвищення ефективності, стабільності та безпеки судових операцій, а також сприяти досягненню екологічних цілей міжнародних регуляторних органів [4].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Останні дослідження в галузі управління САЕЕС демонструють зростаючий інтерес до впровадження інтелектуальних та оптимізаційних підходів для підвищення якості енергосистем.

Одним із провідних напрямків є еволюція та застосування систем енергоменеджменту (EMS), які інтегрують кілька джерел енергії (включаючи відновлювані) та комплекти накопичення енергії з метою оптимізації загального енергоспоживання на судні [5].

Дослідники активно зосереджуються на стратегії модельного прогнозуючого керування (MPC) для оптимізації розподілу енергії, управління навантаженням та регулювання напруги/частоти. MPC дозволяє враховувати нелінійну динаміку системи та множинність експлуатаційних обмежень, забезпечуючи проактивне керування на основі прогнозів майбутньої поведінки системи [4].

Наступним шляхом досліджень є розробка агентно-орієнтованих систем керування (АОС). АОС використовує автономних агентів для координації різних компонентів САЕЕС, тим самим підвищуючи живучість системи. Це може принести високу стійкість до відмов та здатність до динамічної реконфігурації [4].

Крім того, дослідники вивчали можливість використання цифрових двійників для моніторингу, оптимізації та прогнозування стану САЕЕС. Цифрові двійники дозволяють моделювати поведінку фізичної системи у віртуальному середовищі, що полегшує моніторинг процесів, прискорює вирішення проблем та забезпечує більш точне прогнозування конфігурації судна [6].

Ще одним напрямком є децентралізовані системи керування. Цей підхід допомагає підвищити стабільність та масштабованість САЕЕС шляхом розподілу функцій керування між локальними контролерами. Децентралізація керування призводить до швидшої реакції на локальні події та зменшує ризик єдиних точок відмови [1].

Інтеграція відновлюваних джерел енергії, таких як сонячні панелі та вітрові турбіни, в САЕЕС також отримує значну увагу з глобальною метою зменшення залежності від викопного палива та мінімізації викидів [7].

Інтерес до використання ІІІ для вирішення різних завдань у морській індустрії швидко зростає. У навігації ІІІ розглядається як інструмент для розробки автономних суден із системами підтримки прийняття рішень для екіпажу. Наприклад, система SeaPod AI від Orca AI може виконувати функції автоматизованого спостерігача на містку, підвищуючи ситуаційну обізнаність та запобігаючи зіткненням. ІІІ використовується для діагностики обладнання та прогнозування технічного стану систем та вузлів, дозволяючи здійснювати прогнозоване технічне обслуговування та запобігати надзвичайним ситуаціям.

Особливу увагу заслуговують дослідження, що поєднують управління енергоспоживанням із моніторингом стану обладнання. Tsoumpis та Theotokatos [2] розробили підхід health-aware енергоменеджменту для гібридних суден, що враховує стан основних компонентів системи.

Однак кількість публікацій, безпосередньо присвячених інтеграції ІІІ з системами моніторингу надійності для управління енергоспоживанням, залишається обмеженою, що підтверджує актуальність подальших досліджень у цьому напрямку.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми

Грунтовний аналіз сучасних наукових публікацій у сфері управління судовими автоматизованими електроенергетичними системами (САЕЕС) дозволяє ідентифікувати низку критичних прогалин, які потребують подальшого дослідження та інноваційних рішень, що є ключовим для створення по-справжньому автономних, ефективних та надійних морських енергетичних

комплексів. Насамперед, незважаючи на значні успіхи у розробці стратегій енергоменеджменту (як-от MPC та ECMS), домінуючі методи часто ігнорують поточний фізичний стан (здоров'я) компонентів суднової енергоустановки; управління зазвичай зосереджене лише на миттєвій ефективності (мінімізації споживання палива або викидів), без врахування довгострокових наслідків обраного режиму роботи для життєвого циклу обладнання, що призводить до обмеженого врахування стану компонентів САЕЕС у процесі прийняття рішень. Додатковою проблемою є те, що існуючі моделі надійності та ризику, хоча й є потужними інструментами для аналізу, рідко інтегруються безпосередньо у стратегії енергоменеджменту автономних систем, створюючи значний виклик, оскільки існує складність інтеграції метрик здоров'я, таких як надійність та ризик, у системи керування; для критичних морських застосувань необхідна розробка методологій, які дозволять системі не лише досягати оптимальної продуктивності, але й динамічно мінімізувати ймовірність відмови критичних вузлів в режимі реального часу. Більше того, оскільки сучасні підходи до діагностики та прогнозування часто покладаються на статичні або дискретні моделі деградації, це призводить до обмеженого розвитку підходів до моніторингу стану, які динамічно оцінюють здоров'я складних судових систем, а для забезпечення health-aware управління необхідно розробити та впровадити інтелектуальні алгоритми, що здатні безперервно оцінювати ступінь деградації та прогнозувати час до відмови, використовуючи фактичні вимірювання датчиків та історію експлуатаційних режимів. Нарешті, впровадження систем на основі ШІ у САЕЕС, які активно обмінюються даними з береговими центрами та використовують сенсорну інформацію, виносить на передній план питання безпеки, оскільки виявлено недостатню увагу до питань кібербезпеки та стандартизації даних при впровадженні систем на основі ШІ в морській індустрії; необхідна розробка надійних протоколів, стійких до кібератак, а також уніфікація форматів збору, обробки та обміну великими масивами даних (Big Data) для забезпечення надійності та масштабованості інтелектуальних рішень.

Мета дослідження. Метою цієї роботи є аналіз перспектив симбіозу штучного інтелекту та систем керування енергоспоживанням судових енергоустановок.

Конкретні завдання дослідження включають:

1. Огляд принципів роботи та типових проблем судових енергосистем.
2. Аналіз сучасних підходів до управління енергопостачанням на судах, включаючи традиційні методи та нові технології.
3. Дослідження впровадження технологій ШІ в морську індустрію, зокрема в навігації, діагностиці та оптимізації маршрутів.
4. Ідентифікація потенційних переваг від інтеграції ШІ в САЕЕС, таких як підвищення енергоефективності, екологічності та безпеки.
5. Розгляд основних проблем та викликів, пов'язаних із поєднанням ШІ та САЕЕС, зосереджуючись на питаннях безпеки, кібербезпеки та кваліфікації екіпажу.
6. Окреслення майбутніх тенденцій та напрямків інтеграції ШІ із системами керування САЕЕС.

Виклад основного матеріалу. Сучасні САЕЕС є складними системами, що включають різні джерела енергії, розподільні мережі та численні електричних споживачів. Для гібридних енергоустановок, які поєднують дизельні генератори, електричні машини та системи накопичення енергії (батареї, суперконденсатори), розроблено різні стратегії управління.

Централізовані системи забезпечують координоване керування всіма компонентами з єдиного центру. Такий підхід дозволяє досягти глобальної оптимізації, але створює єдину точку відмови та вимагає високої обчислювальної потужності.

Децентралізовані системи розподіляють функції керування між локальними контролерами, що підвищує стабільність та масштабованість. Однак це ускладнює досягнення глобальної оптимізації [1].

Ієрархічні методології поєднують переваги обох підходів, розділяючи керування на рівні: оперативний (регулювання напруги/частоти), тактичний (управління потужністю) та стратегічний (планування).

Модельне прогнозує керування (MPC) виконує оптимізацію в ковзному горизонті з явною обробкою обмежень. MPC дозволяє враховувати нелінійну динаміку системи та множинні експлуатаційні обмеження, забезпечуючи проактивне керування [7].

Агентно-орієнтовані системи керування (АОС) використовують автономних агентів для координації різних компонентів САЕЕС, підвищуючи живучість системи та забезпечуючи високу стійкість до відмов [4].

Системи енергоменеджменту (EMS) інтегрують кілька джерел енергії та комплектів накопичення з метою оптимізації загального енергоспоживання на судні [5]. Однією з найпоширеніших стратегій є стратегія мінімізації еквівалентного споживання (ECMS), яка трансформує глобальну задачу оптимізації споживання палива в миттєву оптимізацію еквівалентного споживання палива.

Для забезпечення автономних операцій критично важливо не лише оптимізувати енергоефективність, але й постійно моніторити стан обладнання та оцінювати надійність системи. Динамічні Байєсівські мережі (DBN) є потужним інструментом для фіксації залежностей між компонентами системи та оцінки їх надійності в наступному часовому зрізі з урахуванням експлуатаційних параметрів у поточному зрізі. Також для діагностики та прогнозування стану компонентів суднових енергоустановок застосовують імовірнісні методи, зокрема ланцюги Маркова, які дозволяють моделювати послідовність станів обладнання на основі вимірюваних параметрів і оцінювати його технічний стан у реальному часі [8].

Модель процесу Вінера (WPM) використовується для оновлення інтенсивностей відмов з урахуванням випадкових ефектів та історії експлуатаційних режимів компонентів. Процес Вінера широко застосовується для моделювання механізмів деградації, оскільки він відображає траєкторію деградації, пов'язану з випадковим шумом.

Базова модель процесу Вінера описується рівнянням:

$$D(t) = D(0) + \mu t + \sigma B(t) \quad (1)$$

де $D(0)$ — початковий стан здоров'я, μ та σ — параметри, що представляють коефіцієнти дрейфу та дифузії відповідно, $B(t)$ — стандартний броунівський рух.

Для врахування експлуатаційного профілю модель WPM розширюється:

$$D(t) = D(0) + \mu t + \sum Z(A_i) + \sigma B(t) \quad (2)$$

де $Z(A_i)$ — функція змін навантаження, що враховує вплив експлуатаційних умов на деградацію компонента.

На основі оціненого індексу здоров'я (HI) розраховується інтенсивність відмов:

$$\lambda(t) = \frac{\lambda_0}{HI(t)} \quad (3)$$

що забезпечує постійно зростаючий тренд інтенсивності відмов, відображаючи деградацію компонента при наближенні до кінця терміну служби [8].

Health-aware управління енергоспоживанням

Інтеграція моніторингу стану з енергоменеджментом дозволяє створити систему health-aware управління, яка оптимізує не лише споживання палива, але й враховує поточний стан обладнання та його надійність.

Основні принципи health-aware ECMS:

1. Адаптивний еквівалентний фактор — замість використання константного або функції лише від SOC батареї, еквівалентний фактор адаптується з урахуванням стану компонентів системи.

2. Інтеграція з DBN — надійність компонентів, розрахована через DBN, використовується для коригування стратегії керування, уникаючи режимів, що призводять до прискореної деградації критичних компонентів.

3. Динамічне оновлення інтенсивностей відмов — WPM забезпечує постійне оновлення інтенсивностей відмов на основі історії експлуатаційних параметрів (тиск наддуву, пікове тиск у циліндрі, температура вихлопних газів тощо).

4. Критичність компонентів — DBN розраховує не лише надійність, але й критичність компонентів, що дозволяє ранжувати їх за відносним впливом на надійність системи.

Навігація та автономні судна. Системи на основі ШІ, такі як SeaPod AI від Orca AI, виконують функції автоматизованого спостерігача на містку, підвищуючи ситуаційну обізнаність та запобігаючи зіткненням. Алгоритми комп'ютерного зору аналізують відеопотік у реальному часі для виявлення перешкод.

Діагностика та прогнозоване обслуговування. ШІ використовується для ранньої діагностики несправностей обладнання та прогнозування технічного стану систем, дозволяючи здійснювати прогнозоване технічне обслуговування та запобігати аваріям. Нейронні мережі навчаються розпізнавати патерни, що передують відмовам, на основі історичних даних моніторингу.

Оптимізація маршрутів. Алгоритми ШІ аналізують метеорологічні дані, океанічні течії та інші фактори для оптимізації маршрутів судна з метою мінімізації витрат палива та часу подорожі.

Управління вантажними операціями. ШІ допомагає в управлінні вантажними операціями в портах та на судах, оптимізуючи розташування вантажу та послідовність завантаження/розвантаження.

Переваги інтеграції ШІ в САЕЕС

Підвищення енергоефективності. Алгоритми машинного навчання можуть ідентифікувати оптимальні режими роботи обладнання, враховуючи складні нелінійні залежності між параметрами системи. Дослідження показують можливість зниження споживання палива на 5-12% порівняно з традиційними методами.

Прогнозування навантаження. Нейронні мережі та методи часових рядів дозволяють прогнозувати майбутнє навантаження з високою точністю, що критично важливо для МРС-стратегій.

Рання діагностика несправностей. Алгоритми аномального виявлення на основі ШІ можуть ідентифікувати відхилення від нормальної роботи на ранніх стадіях, запобігаючи серйозним поломкам та аваріям.

Адаптивне керування. Системи на основі ШІ можуть адаптуватися до змінних умов експлуатації без необхідності перепрограмування, використовуючи методи навчання з підкріпленням.

Оптимізація життєвого циклу обладнання. Враховуючи деградацію компонентів, ШІ може оптимізувати режими роботи для збалансування між енергоефективністю та терміном служби обладнання.

Безпека та кібербезпека. Системи на основі ШІ вразливі до кібератак, включаючи атаки на дані навчання (data poisoning) та змагальні атаки (adversarial attacks). Необхідна розробка методів забезпечення кібербезпеки, специфічних для морських застосувань.

Кваліфікація персоналу. Впровадження систем на основі ШІ вимагає високої кваліфікації персоналу як для експлуатації, так і для технічного обслуговування. Необхідні програми навчання екіпажів.

Складність інтеграції. Інтеграція ШІ з існуючими системами може бути технічно складною та коштовною, особливо для модернізації існуючих суден.

Стабільність та передбачуваність. Алгоритми ШІ, особливо глибокі нейронні мережі, часто є «чорними скриньками», що ускладнює розуміння логіки їх рішень. Для критичних застосувань необхідні методи пояснювального ШІ (Explainable AI).

Якість та стандартизація даних. Ефективність алгоритмів ШІ залежить від якості та повноти даних навчання. Необхідна стандартизація форматів даних та протоколів обміну інформацією.

Регуляторні та етичні аспекти. Відсутність чітких регуляторних рамок для застосування ШІ в морській індустрії створює невизначеність. Необхідна розробка стандартів та керівних принципів класифікаційними товариствами та ІМО.

Майбутні напрямки розвитку

Повна автоматизація САЕЕС. Розвиток автономних суден вимагає створення повністю автоматизованих систем управління енергоспоживанням, здатних функціонувати без втручання екіпажу протягом тривалих періодів (до 500 годин згідно з проектом MUNIN).

Інтеграція з новими джерелами енергії. ШІ може оптимізувати використання альтернативних джерел енергії, таких як паливні елементи на водні або аміаку, вітрові турбіни та сонячні панелі.

Цифрові двійники. Розвиток цифрових двійників судових енергоустановок дозволить моделювати та оптимізувати роботу систем у віртуальному середовищі перед впровадженням змін на фізичному об'єкті.

Федеративне навчання. Для подолання обмежень, пов'язаних із конфіденційністю даних, може використовуватися федеративне навчання, що дозволяє тренувати моделі на розподілених даних без їх централізованого зберігання.

Інтеграція з берегом. Розвиток систем shore-to-ship та обмін даними між судном та береговими центрами дозволить використовувати більш потужні обчислювальні ресурси для складних завдань ШІ.

Перспективи подальших досліджень включають розробку та тестування прототипів інтелектуальних систем управління на реальних судах, створення стандартизованих наборів даних для навчання та валідації алгоритмів ШІ, дослідження методів пояснювального ШІ для критичних морських застосувань, а також розробку рекомендацій щодо кібербезпеки та регуляторних аспектів впровадження ШІ в морську індустрію.

Висновки. За результатами проведеного аналізу встановлено, що інтеграція штучного інтелекту (ШІ) в системи управління енергоспоживанням гібридних суднових енергоустановок є надзвичайно перспективним стратегічним напрямком, який має потенціал значно підвищити їхню енергоефективність, надійність та загальну безпеку експлуатації. Ключовим досягненням є можливість поєднання стратегій енергоменеджменту (зокрема, мінімізації еквівалентного споживання (ECMS) та модельного прогнозуючого керування (MPC)) з передовими методами моніторингу стану та аналізу надійності (такими як Динамічні Байєсівські мережі (DBN) та моделі процесів Вінера (WPM)). Таке поєднання дозволяє створити health-aware системи керування, здатні оптимізувати не лише миттєве споживання палива, але й довгостроковий термін служби обладнання. Крім того, практичні застосування ШІ в морській індустрії (включаючи автономну навігацію, діагностику несправностей та оптимізацію маршрутів) вже сьогодні демонструють значний потенціал технології, підтверджений реальними проектами та економічною ефективністю. Водночас, основними викликами, що стримують повномасштабне впровадження, залишаються питання кібербезпеки, кваліфікації обслуговуючого персоналу, стандартизації великих обсягів даних та розробки чітких регуляторних аспектів, які вимагають подальших наукових досліджень та розробки відповідних керівних документів. Майбутній розвиток симбіозу ШІ та CAEES нерозривно пов'язаний із повною автоматизацією суднових процесів, інтеграцією з новими альтернативними джерелами енергії, активним розвитком цифрових двійників суднових систем та ефективним обміном даними між судном і береговими центрами.

Bazhak O., Hatsenko L

INTELLIGENT ENERGY MANAGEMENT FOR HYBRID SHIP POWER PLANTS

The article addresses the issues of improving the efficiency and reliability of hybrid ship power plants through the integration of artificial intelligence technologies into energy consumption management systems. Maritime transport provides a significant share of international trade, but the shipbuilding industry remains one of the largest sources of CO₂ emissions, which necessitates the improvement of energy efficiency and environmental sustainability of maritime operations. The evolution of the architecture of ship automated electrical power systems and the main energy management strategies are analyzed: centralized and decentralized control systems, hierarchical methodologies, model predictive control, and agent-oriented systems. A detailed analysis of the advantages and disadvantages of each approach is presented, taking into account the parameters of efficiency, stability, implementation and operational costs, environmental impact, complexity and scalability of systems. Practical examples of artificial intelligence applications in the maritime industry are considered, particularly in autonomous navigation, decision support systems, equipment diagnostics, predictive maintenance, and shipping route optimization. Special attention is paid to the integration of artificial intelligence with equipment condition monitoring systems and reliability analysis based on dynamic Bayesian networks and Wiener process models. A methodology for health-aware energy management is presented, which combines the strategy of minimizing equivalent fuel consumption with dynamic assessment of component reliability, taking into account the history of operational modes and equipment degradation. Mathematical models of degradation processes and methods for calculating failure rates of ship power plant components are considered. The main challenges and limitations associated with safety and cybersecurity issues of artificial intelligence-based systems, personnel qualifications, complexity of integration with existing systems,

ensuring stability and predictability of algorithms, data quality and standardization of information exchange formats, regulatory and ethical aspects of implementing autonomous systems are identified. Promising directions for the development of the symbiosis of artificial intelligence and ship electrical power control systems are outlined, including full automation, integration with alternative energy sources, development of digital twins, and ship-to-shore data exchange systems.

Keywords: *ship power systems, energy efficiency, optimization, machine learning, artificial intelligence, maritime transport, environmental impact, maritime safety, cybersecurity.*

ЛІТЕРАТУРА

1. Guo X., Lang X., Yuan Y., Tong L., Shen B., Long T., Mao W. Energy management system for hybrid ship: status and perspectives. *Ocean Engineering*. 2024. Vol. 310(P1). 118638. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.118638>
2. Tsoumpris C., Theotokatos G. A decision-making approach for the health-aware energy management of ship hybrid power plants. *Reliability Engineering & System Safety*. 2023. Vol. 235. 109263. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ress.2023.109263>
3. Ge Y., Zhang J., Zhou K., Zhu J., Wang Y. Research on energy management for ship hybrid power system based on adaptive equivalent consumption minimization strategy. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2023. Vol. 11(7). 1271. DOI: <https://doi.org/10.3390/jmse11071271>
4. Choi E., Kim H. Advanced energy management system for generator–battery hybrid power system in ships: a novel approach with optimal control algorithms. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2024. Vol. 12(10). 1755. DOI: <https://doi.org/10.3390/jmse12101755>
5. Tarnapowicz D., German-Galkin S., Nerc A., Jaskiewicz M. Improving the energy efficiency of a ship's power plant by using an autonomous hybrid system with a PMSG. *Energies*. 2023. Vol. 16(7). 3158. DOI: <https://doi.org/10.3390/en16073158>
6. Tsoumpris C., Theotokatos G. Energy management and health monitoring for hybrid ship power plants. *Journal of Marine Engineering & Technology*. 2025. Vol. 24(4). P. 320-337. DOI <https://doi.org/10.1080/20464177.2025.2518782>
7. Antonopoulos S., Visser K., Kalikatzarakis M., Reppa V. MPC framework for the energy management of hybrid ships with an energy storage system. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2021. Vol. 9(9). 993. DOI: <https://doi.org/10.3390/jmse9090993>
8. Sharko O., Yanenko A. Modeling of intelligent software for the diagnosis and monitoring of ship power plant components using Markov chains. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2023. DOI: <https://doi.org/10.18372/2310-5461.59.17946>
9. Choi M., Choi J., Sung D., Jung W. Energy Management Strategies for Hybrid Propulsion Ferry with Different Battery System Capacities. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2024. Vol. 12(12). 2165. DOI: <https://doi.org/10.3390/jmse12122165>
10. Nivolianiti E., Karnavas Y.L., Charpentier J.-F. Fuzzy Logic-Based Energy Management Strategy for Hybrid Fuel Cell Electric Ship Power and Propulsion System. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2024. Vol. 12(10). 1813. DOI: <https://doi.org/10.3390/jmse12101813>

Стаття прийнята 15.08.2025

© Куропятник О.А.

КОМПЛЕКСНА ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ СИСТЕМ УПРАВЛІННЯ ВИПУСКНИМИ ГАЗАМИ СУДНОВИХ ДИЗЕЛІВ ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕКОЛОГІЧНОЇ ЕКСПЛУАТАЦІЇ СУДЕН МОРСЬКОГО ТРАНСПОРТУ

Наведені результати досліджень щодо комплексної оцінки ефективності використання систем управління випускними газами суднових дизелів для забезпечення екологічної експлуатації суден морського транспорту. Як метод, що сприяє досягненню цього завдання, розглянута низькоемісійна технологія рециркуляції випускних газів суднових дизелів. Наведені результати досліджень, що виконувались на судновому дизелі 8G60ME фірми MAN Diesel (обладнаному системою рециркуляції високого тиску) та на судновому дизелі 7UEC60LS фірми Mitsubishi (обладнаному системою рециркуляції низького тиску). Дослідження виконувались в діапазоні експлуатаційних навантажень на дизелі 60...90 % з попеременною зміною ступеню рециркуляції в діапазоні 5...20 %. Експериментально доведено, що обидві системи односпрямоване діють на екологічність суден морського транспорту. При цьому обидві схеми забезпечують виконання вимог Annex VI MARPOL щодо емісії оксидів азоту з випускними газами суднових дизелів. Встановлено, що залежно від ступеню рециркуляції та експлуатаційного навантаження на дизель обидві системи забезпечують 30...35 % зниження емісії оксидів азоту з випускними газами. Водночас з цим шляхом аналітичних розрахунків та експериментальних досліджень встановлено, що під час використання систем рециркуляції погіршуються енергетичні та економічні показники роботи суднових дизелів, що відображається на відповідних характеристиках морського судна. При цьому для досліджуваного діапазону зміни ступеню рециркуляції спостерігається відносне збільшення питомої витрати палива на 0,57...3,72 %; відносне збільшення годинної витрати палива на 0,68...3,78 %; відносне зменшення індикаторного тиску на 0,22...2,97 %; відносне зменшення ефективної потужності дизеля на 0,23...3,26 %. Зазначене викликає необхідність комплексної оцінки зміни екологічних, енергетичних та економічних показників роботи дизелів під час забезпечення екологічної експлуатації суден морського транспорту.

Ключові слова: екологічна безпека, екологічні показники, емісія оксидів азоту, ефективна потужність дизеля, морський транспорт, питома витрата палива, система рециркуляції випускних газів, судновий дизель

Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями. Експлуатація засобів морського транспорту характеризується деякими принциповими відмінностями від експлуатації інших видів транспорту – авіаційного, автомобільного та залізничного [1-3]. Перш за все це пов'язане з об'ємами вантажу, що транспортується суднами морського транспорту, а також відстанями, на які ці перевезення можливі [4-6]. Також необхідно визначити, що в деяких випадках морські перевезення поглинають у себе перевезення, що виконуються залізничними та автомобільними засобами транспорту [7-9]. Підтвердженням цього є залізничні та автомобільні пороми, що транспортують потяги та вантажні автомобілі від одного морського порту до іншого. У тому числі через це, до складу морського транспорту входять судна різного призначення, водотоннажності, потужності головної та допоміжної енергетичних установок, швидкості та району плавання [10-12].

Водночас з комерційними перевагами, які забезпечують судна морського транспорту, під час їх експлуатації здійснюється постійний негативний вплив на довкілля. Перш за все це пов'язано з емісією оксидів вуглецю CO та CO₂, оксидів сірки SO_x, а також оксидів азоту NO_x які є невід'ємною складовою випускних газів суднових дизелів – найбільш розповсюдженого типу теплових двигунів, що встановлюються та використовуються на морських судах [13-15]. Викиди оксидів азоту NO_x, а також

вміст сірки S у судовому паливі (яка є джерелом подальшого утворення оксидів сірки SO_x) регламентується з боку міжнародних організацій та класифікаційних товариств та повинні відповідати вимогами Annex VI MARPOL [16-18]. Забезпечення необхідного рівню емісії вказаних шкідливих речовин є актуальним завданням, на розв'язання якого вже багато років спрямована увага проектних та науково-дослідницьких організацій, а також провідних дизелебудівних фірм та концернів, які виробляють та постачають двигуни внутрішнього згоряння різного призначення та потужності як для судової, також і для стаціонарної енергетики [19-22].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. До одного з найбільш важливих компонентів випускних газів судових дизелів, значення якого регламентується Annex VI MARPOL, відносяться оксиди азоту NO_x . Джерелами утворення NO_x є азот, що знаходиться в повітрі, та азот, що знаходиться в паливі [23-26]. Під час згоряння паливоповітряної суміші, з азоту, що знаходиться в повітрі, утворюються термічні NO_x та швидкі NO_x ; з азоту, що входить до складу палива, – паливні NO_x . За температур вище ніж $1500\text{ }^{\circ}\text{C}$ відбувається ланцюгова реакція утворення оксидів азоту [27-29]. Тому всі методи та технології, які забезпечують зменшення емісії NO_x , спрямовані на зниження максимальної температури в циліндрі дизеля [30-32].

Відповідно до вимог Annex VI MARPOL встановлено три рівні викидів оксидів азоту – Tier I, Tier II, Tier III, які встановлюють максимальний рівень емісії оксидів азоту залежно від року побудови судна та частоти обертання дизеля [33-35].

Сучасні судна (термін експлуатації яких не перебільшує 10 років) відносяться до Tier III вимог Annex VI MARPOL. Підтримання необхідного рівня емісії оксидів азоту для подібних суден можливо лише за умовою використання додаткових методів очищення випускних газів, які поділяються на первинні та вторинні [36-38]. Первинні забезпечують створення сприятливих умов, які перешкоджають ланцюговій реакції утворення оксидів азоту під час згоряння палива [39-41]. Перш за все вони спрямовані на зниження максимальної температури згоряння в циліндрі дизеля. Найбільш розповсюдженими з первинних методів є зволоження наддувного повітря, використання водопаливних емульсій, безпосереднє впорскування води в циліндр дизеля, рециркуляція випускних газів. Найбільш поширеним серед вторинних методів зниження емісії оксидів азоту є селективне каталітичне відновлення [42-44].

Системи рециркуляції випускних газів судових дизелів відносяться до одних з найбільш розповсюджених технологій забезпечення екологічної експлуатації суден морського транспорту [45-47]. У залежності від технологічної схеми, за якою виконується рециркуляція газів, їх можливе поділити на лінійні та комплексні. У лінійних системах забезпечується однорівнева рециркуляція – в цих випадках частина випускних газів повертаються до циліндрів дизеля завдяки системи рециркуляції високого або низького тиску. До однорівневого способу управління емісією випускних газів дизелів морських суден також можливо віднести системи перепуску газів повз газотурбонагнітача.

У комплексних системах забезпечується двохрівнева рециркуляція – як правило, почергово у системі високого та після цього у системі низького тиску. Таки схеми використовуються під час двохступеневого наддуву судових дизелів – способу забезпечення повітропостачання дизеля та видалення випускних газів, що знаходить широке розповсюдження для сучасних двигунів внутрішнього згоряння високої потужності [48-50]. Також комплексні системи поєднують два способи управління випускними газами – рециркуляцію (високого або низького тиску) та перепуск газів повз газотурбонагнітача.

Під час використання технологій, що забезпечують екологічну експлуатацію суден морського транспорту щодо емісії оксидів азоту, виникає протиріччя між екологічністю та енергетичністю, а також між екологічністю та економічністю [51, 52]. Збільшення екологічності роботи суден морського транспорту (а саме зниження емісії оксидів азоту) призводить до підвищення питомої витрати палива (що знижує економічність роботи судових дизелів), а в деяких випадках – сприяє зниженню ефективної потужності судових дизелів (що знижує його енергетичні показники). Через це, під час використання технологій, що забезпечують зниження емісії оксидів азоту, виникає необхідність розв'язання дилеми, іншим завданням якої є мінімізація енергетичних та економічних втрат, пов'язаних з експлуатацією суден та їх енергетичних установок.

Формулювання цілей статті. Ціллю статті була комплексна оцінка ефективності використання систем управління випускними газами суднових дизелів для забезпечення екологічної експлуатації суден морського транспорту. При цьому враховувались екологічні, енергетичні та економічні показники роботи суднових дизелів під час використання різних систем рециркуляції випускних газів.

Виклад основного матеріалу. Дослідження виконувались на морських судах класу Gas Carrier. Як головний двигун на одному з суден використовувався судновий малообертовий дизель 8G60ME фірми MAN Diesel (обладнаний системою рециркуляції газів високого тиску – HP-EGR) та на іншому – судновий малообертовий дизель 7UEC60LS фірми Mitsubishi (обладнаний системою рециркуляції випускних газів низького тиску – LP-EGR). Під час використання системи високого тиску частина випускних газів повертається до циліндрів до потрапляння на лопатки газової турбіни газотурбонагнітача, під час використання системи низького тиску частина випускних газів повертається до циліндрів дизеля після виходу з газотурбонагнітача.

Принципова схема системи рециркуляції випускних газів HP-EGR суднового малообертового дизеля 8G60ME фірми MAN Diesel надана на рис. 1, а. Принципова схема системи рециркуляції випускних газів низького тиску LP-EGR суднового малообертового дизеля 7UEC60LS фірми Mitsubishi з показана рис. 1, б. Компоновка та функціонування обох схем зрозуміла та не викликає додаткового пояснення.

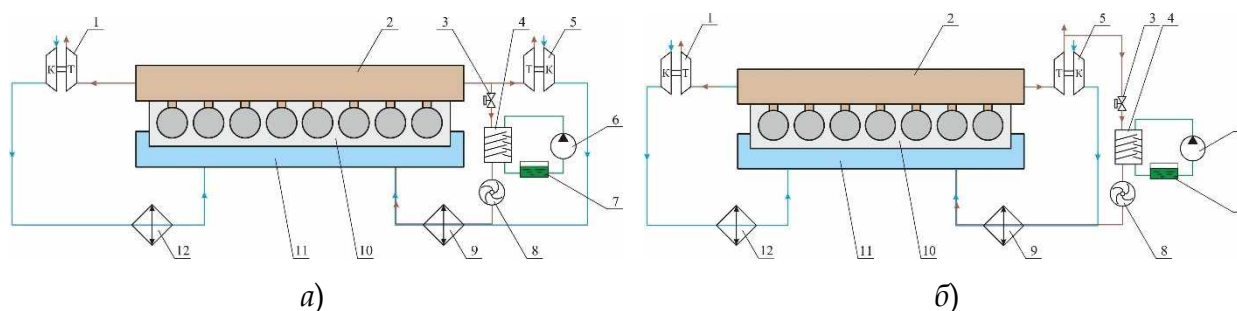


Рисунок 1 – Принципові схеми систем рециркуляції випускних газів:

а – HP-EGR, судновий дизель 8G60ME; б – LP-EGR, судновий дизель 7UEC60LS;

1, 5 – газотурбонагнітач; 2 – випускний колектор; 3 – керуючий клапан системи рециркуляції випускних газів; 4 – скруббер; 6 – насос подачі прісної води в систему очищення та охолодження випускних газів; 7 – цистерна прісної води системи очищення та охолодження випускних газів; 9, 12 – охолоджувач наддувального повітря; 10 – судновий дизель; 11 – ресивер наддувального повітря; Т, К – газова турбіна та повітряний компресор газотурбонагнітачів

Вимірювання виконувались на лише на сталих режимах роботи, що відповідали 60 %, 70 %, 80 % та 90 % від номінального навантаження. При цьому на кожному з режимах ступень рециркуляції поступово змінювався та складав 5 %, 10 %, 15 % та 20 %. На кожному з режимів дослідження починались з вимірювання концентрації NO_x за умовою роботи дизеля без використання системи рециркуляції – HP-EGR або LP-EGR (EGR=0 %). В подальшому ступень рециркуляції EGR ступеневе змінювався від 5 % до 20 %. Після завершення циклу досліджень на одному навантаженні (наприклад 90 % від номінального) за різних ступенів рециркуляції, дизель відключався від системи HP-EGR або LP-EGR та поступово переводився на інше навантаження (яке для визначеного випадку складало 80 %). Далі цикл вимірювань повторювався. Навігаційні переходи дозволяли виконувати дослідження на кожному з режимів на протязі 1,5...2,0 годин, що забезпечувало стабільність всіх контрольованих показників – частоти обертання та потужності дизеля; питомої витрати палива; концентрації оксидів азоту.

Випробування проводилися під час зниження потужності дизеля, починаючи з максимально можливої за умови чистого корпусу судна. Зниження частоти обертання здійснювалося приблизно на один оберт кожні п'ять хвилин, що забезпечувало рівномірну зміну теплового режиму роботи дизеля. При цьому на кожному з досліджуваних режимів дизель попередньо працював протягом

30...45 хвилин, що гарантувало рівномірний розподіл теплових і масових потоків, після чого виконувалася фіксація необхідних параметрів. Під час дослідження на кожному з режимів підтримувались постійними значення температури охолоджуючої води та змащувального мастила, а також фази паливоподачі та випуску газів [104, 105].

Результати досліджень узагальнені та надані на рис. 2.

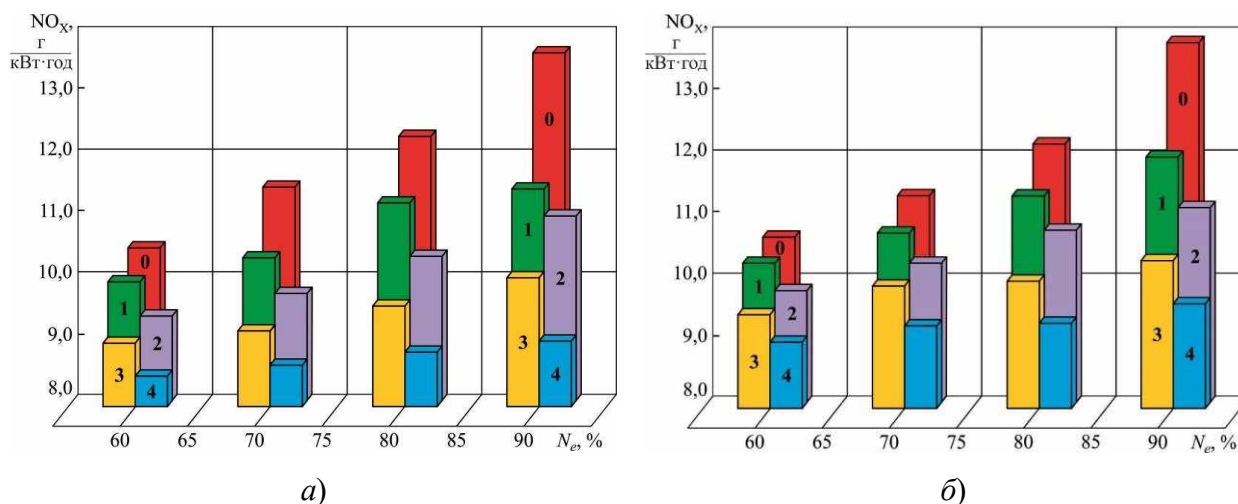


Рисунок 2 – Зміна емісії оксидів азоту NO_x, г/(кВт·год), з випускними газами для різного ступеня рециркуляції: а – дизель 8G60ME з HP-EGR; б – дизель 7UEC60LS з LP-EGR: 0 – робота без рециркуляції, EGR=0 %; 1 – EGR=5 %; 2 – EGR=10 %; 3 – EGR=15 %; 4 – EGR=20 %

Відносне зменшення емісії оксидів азоту ΔNO_x може бути визначено за виразом

$$\Delta NO_x = \frac{NO_x^0 - NO_x^i}{NO_x^0} \cdot 100, \% \quad (1)$$

де NO_x⁰ – концентрація оксидів азоту у випадку, коли EGR=0 %.

NO_xⁱ – концентрація оксидів азоту для інших значень ступеню рециркуляції EGR (5 %, 10 %, 15 %, 20 %).

Результати з визначення відносного зменшення емісії оксидів азоту ΔNO_x, виконаного за виразом (1), узагальнені та надані на рис. 3.

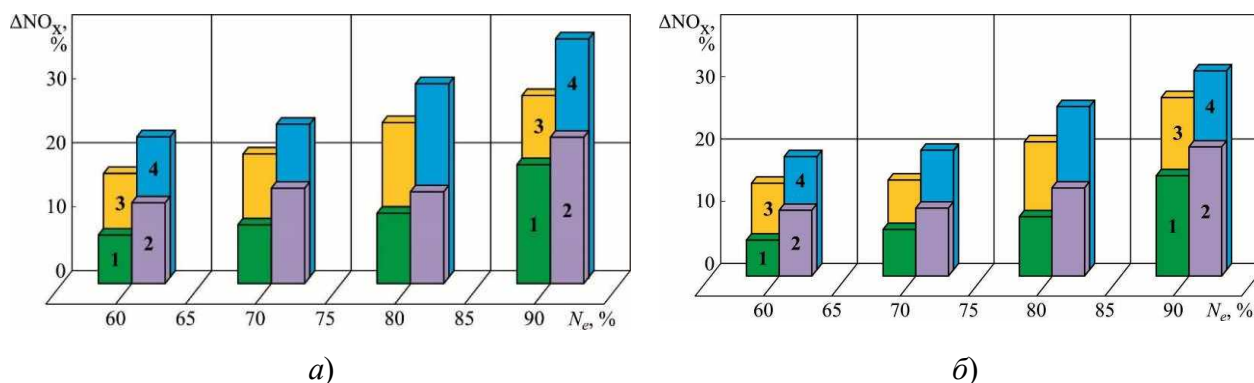


Рисунок 3 – Відносне зменшення емісії оксидів азоту ΔNO_x, %, для різного ступеня рециркуляції: а – дизель 8G60ME з HP-EGR; б – дизель 7UEC60LS з LP-EGR: 1 – EGR=5 %; 2 – EGR=10 %; 3 – EGR=15 %; 4 – EGR=20 %

Повернення випускних газів у циліндри дизеля, що забезпечується під час їх рециркуляції системами HP-EGR або LP-EGR, призводить до зміни складу повітряно-газової суміші, яка у подальшому використовується як окислювач для палива, що впорскується у циліндр. Перш за все це виявляється у збільшенні кількості газів, що знаходяться у циліндрі. Це стає причиною збільшення коефіцієнту остаточних газів та зменшенню коефіцієнта наповнення та подальшого збільшення значення питомої витрати палива. Збільшенні кількості газів, що знаходяться у циліндрі, та відповідно зменшення кількості кисню призводить до зменшення утворення нових продуктів згоряння палива. Це знижує їх кінетичну енергію та призводить до зменшення індикаторного тиску та ефективної потужності дизеля.

Дослідження з визначення зміни енергетичних показників дизелів суден морського та внутрішнього водного транспорту під час використання системи рециркуляції випускних газів виконувались для всіх без виключення випадків випробувань, технологічні схеми та результати яких наведені на рис. 1, 2. При цьому ці показники визначались безпосередньо під час експлуатації дизелів – за допомогою систем діагностування та контролю, а також через використання суднового вимірювального обладнання. Як системи діагностування та контролю використовувались системи ProPower (для дизеля 8G60ME фірми MAN Diesel) та Engine Power Diagnostic (для дизеля 7UEC60LS фірми Mitsubishi). Як суднове вимірювальне обладнання – електроні мультіфункціональні витратоміри газів, повітря, рідини та вимірювачі рівню, а також газоаналізатори, що поєднані зі системою діагностики, електроні ватметри, цифрові тахометри.

Відносна зміна економічних та енергетичних показників під час використання системи EGR визначалась за виразами:

- відносне збільшення питомої витрати палива

$$\Delta b_e = \frac{b_e^{\text{EGR}} - b_e^0}{b_e^0} \cdot 100\%; \quad (2)$$

- відносне збільшення годинної витрати палива

$$\Delta B_{\text{год}} = \frac{B_{\text{год}}^{\text{EGR}} - B_{\text{год}}^0}{B_{\text{год}}^0} \cdot 100\%; \quad (3)$$

- відносне зменшення індикаторного тиску

$$\Delta p_i = \frac{p_i^0 - p_i^{\text{EGR}}}{p_i^0} \cdot 100\%; \quad (4)$$

- відносне зменшення ефективної потужності

$$\Delta N_e = \frac{N_e^0 - N_e^{\text{EGR}}}{N_e^0} \cdot 100\%; \quad (5)$$

в яких $b_e^0, B_{\text{год}}^0, p_i^0, N_e^0$ – питома витрата палива, годинна витрата палива, індикаторний тиск, ефективна потужність під час роботи дизеля без використання системи EGR;

$b_e^{\text{EGR}}, B_{\text{год}}^{\text{EGR}}, p_i^{\text{EGR}}, N_e^{\text{EGR}}$ – ці ж показники під час роботи дизеля з використання системи EGR.

Результати визначення зміни енергетичних та економічних показників дизелів суден морського транспорту за виразами (2)-(5) з одночасним сумісним їх визначенням за допомогою суднових засобів діагностування та контролю, узагальнені та надані на рис. 4.

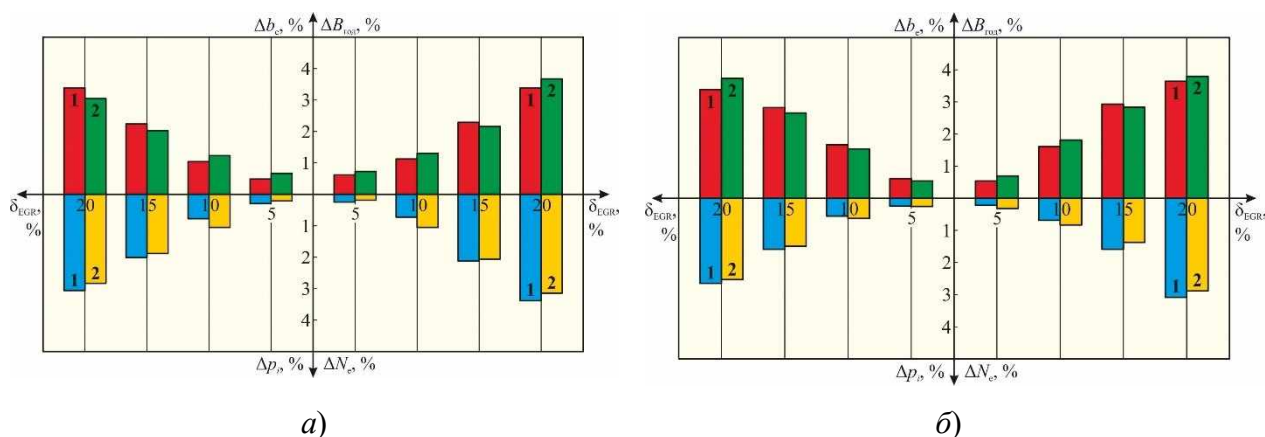


Рисунок 4 – Зміна енергетичних та економічних показників суднового дизеля 8G60ME фірми MAN Diesel під час використання системи HP-EGR (а) та суднового дизеля 7UEC60LS Mitsubishi під час використання системи LP-EGR (б):
1 – експериментальне визначення; 2 – аналітичне визначення

Під час дослідження також контролювались та підтримувались в рекомендованому фірмою-виробником діапазоні всі основні показники роботи дизелів 8G60ME фірми MAN Diesel та 7UEC60LS Mitsubishi, а також систем, що забезпечують їх функціонування.

Висновки. Наведені результати досліджень дозволяють зробити наступні висновки.

1. Одним з показників, що визначає екологічність роботи суден морського та внутрішнього водного транспорту, є емісія оксидів азоту NO_x з випускними газами судових дизелів. Важливість підтримання необхідного рівню емісії оксидів азоту підтверджується вимогами Annex VI MARPOL. Одним з методів, що забезпечує зниження емісії оксидів азоту NO_x , та через це сприяє підвищенню екологічної експлуатації суден морського транспорту, є рециркуляція випускних газів. Залежно від параметрів випускних газів, з якими вони переспрямовується з випускної системи до циліндрів дизеля, системи рециркуляції поділяються на високого HP-EGR та LP-EGR низького типу.

2. Експериментальними дослідженнями, що використовувались на судових дизелях 8G60ME MAN Diesel (обладнаному системою HP-EGR) та 7UEC60LS Mitsubishi (обладнаному системою LP-EGR) встановлено, що в діапазоні експлуатаційних навантажень 60...90 % під час зміни ступеню рециркуляції в діапазоні 5...20 % системи HP-EGR та LP-EGR утворюють односпрямований позитивний вплив на екологічні показники роботи судових дизелів, при цьому

- система HP-EGR забезпечує зниження емісії оксиду азоту NO_x зі значень 10,42...13,62 г/(кВт·год) (що відповідає експлуатації дизеля 8G60ME MAN Diesel без використання системи рециркуляції) до значень 8,28...11,35 г/(кВт·год); у відсотковому діапазоні це зниження складає 5,37...35,54 %;

- система LP-EGR забезпечує зниження емісії оксиду азоту NO_x зі значень 10,56...13,74 г/(кВт·год) (що відповідає експлуатації дизеля 7UEC60LS Mitsubishi без використання системи рециркуляції) до значень 8,82...11,85 г/(кВт·год); у відсотковому діапазоні це зниження складає 3,79...30,71 %;

3. Водночас з цим шляхом аналітичних розрахунків та експериментальних досліджень встановлено, що під час використання систем рециркуляції погіршуються енергетичні та економічні показники роботи судових дизелів, що відображається на відповідних характеристиках морського судна. При цьому для досліджуваного діапазону зміни ступеню рециркуляції спостерігається відносне збільшення питомої витрати палива на 0,57...3,72 %; відносне збільшення годинної витрати палива на 0,68...3,78 %; відносне зменшення індикаторного тиску на 0,22...2,97 %; відносне зменшення ефективної потужності дизеля на 0,23...3,26 %.

4. Зазначене викликає необхідність комплексної оцінки зміни екологічних, енергетичних та економічних показників роботи дизелів під час забезпечення екологічної експлуатації суден морського транспорту

ЛІТЕРАТУРА

1. Сагін С.В., Сагін А.С. Контроль та діагностування надійності та економічності дизелів морських та річкових засобів транспорту // Суднові енергетичні установки: наук.-техн. зб. – 2023. – Вип. 46. – С. 118-131. doi: 10.31653/smf46.2023.118-131.
2. Левченко О.В., Двуліт З.П., Козленко О.В. Особливості управління персоналом підприємств залізничного транспорту // Ефективна економіка. – 2020. – № 6. – С. 1-7. <http://www.economy.nayka.com.ua/?op=1&z=7985>. DOI: 10.32702/2307-2105-2020.6.72
3. Kurdiuk S., Dremluk V., Melnyk O., Onishchenko O., Fomin O., Píštěk V., Kučera P. Development of a High-Reliability Hybrid Data Transmission System for Unmanned Surface Vehicles Under Interference Conditions // Drones. – 2025. – № 9 (3). – Р. 174. <https://doi.org/10.3390/drones9030174>.
4. 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. 208-220. doi.org/10.33298/2226-8553.2024.3.41.21.
5. 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.org/10.33298/2226-8553.2025.1.42.04.
6. 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.
7. 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.
8. Двуліт З.П., Тимошук О.М., Левченко О.В. Вдосконалення бізнес-процесів сучасних судноплавних компаній в сфері міжнародних морських вантажних перевезень // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Серія: Проблеми економіки та управління. – 2021. – № 1. – С. 1-12. <https://ena.lpnu.ua/items/c18bd237-03e6-4ae1-947c-6a2300e013e2>.
9. Левченко О.В. Сутність і зміст організаційно-економічного механізму управління логістичним потенціалом підприємств залізничного транспорту // Збірник наукових праць Державного економіко-технологічного університету транспорту. Серія: Економіка і управління. – 2014. – Вип. 29. – С. 148-155.
10. 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.
11. 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.
12. Двуліт З.П., Левченко О.В., Деркач Д.М. Формування маркетингових рішень у системі управління підприємством // Менеджмент та підприємництво в Україні: етапи становлення та проблеми розвитку. – 2020. – Вип. 2(1). – С. 21-28. <https://science.lpnu.ua/sites/default/files/journal-paper/2020/jun/21855/st3.pdf>
13. 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. – Р. 96-106. <https://doi.org/10.32703/2617-9059-2023-41-8>.
14. Сагін С.В. Зниження енергетичних втрат в прецизійних парах паливної апаратури судових дизелів // Суднові енергетичні установки : наук.-техн. зб. – 2018. – Вип. 38. – С. 132-142.
15. Сагін С.В. Зниження механічних втрат у судових 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.
16. 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. – Р. 589. <https://doi.org/10.3390/jmse1303058924>.

17. Сагін С.В., Куропятник О.А. Визначення оптимальних режимів експлуатації суднових двигунів внутрішнього згоряння під час використання біодизельного палива // Суднові енергетичні установки : наук.-техн. зб. – 2024. – Вип. 48. – С. 100-113. doi: 10.31653/smf48.2024.100-113.
18. Сагін С.В., Бондар С.А., Столярик Т.О. Оцінка безвідмовності суднових 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.
19. Мацкевич Д.В., Сагін С.В., Ханмамедов С.А. Изменение реологических характеристик смазочных материалов в циркуляционной масляной системе в процессе эксплуатации среднеоборотного двигателя // Судовые энергетические установки: науч.-техн. сб. – 2010. – Вип. 25. – С.109-118.
20. Сагін С.В., Поповский Ю.М., Гребенюк М.Н. Влияние ориентационной упорядоченности в граничных смазочных слоях на триботехнические характеристики узлов трения // Судовые энергетические установки: науч.-техн. сб. – 1998. – Вип. 1. – С.102-104.
21. Сагін С.В. Реология моторных масел при режимах пуска и реверса судовых малооборотных дизелей // Universum: Технические науки. – 2018. – Вип. 3(48). – С. 67-71.
22. Сагін С.В., Мацкевич Д.В. Оптические характеристики граничных смазочных слоев масел, применяемых в циркуляционных системах судовых дизелей // Судовые энергетические установки: науч.-техн.сб. – 2011. – № 26. – С.116-125.
23. Побережний Р.В., Сагін С.В. Забезпечення екологічних показників дизелів суден річкового та морського транспорту // Суднові енергетичні установки: наук. -техн. зб. – 2020. – Вип. 41. – С. 5-9. DOI: 10.31653/smf340.2020.5-9.
24. Petrychenko O., Levynskyi M. Trends and preconditions for widespread adoption of liquefied natural gas in maritime transport // Transport systems and technologies. – 2024. – № 43. – С. 21-36. DOI:10.32703/2617-9059-2024-43-2.
25. Заблоцький Ю.В., Сагін А.С. Визначення динамічних навантажень під час зміни режимів мащення прецизійних пар паливної апаратури суднових дизелів // Суднові енергетичні установки: наук.-техн. зб. – 2022. – Вип. 44. – С. 121-131. doi: 10.31653/smf44.2022.121-131.
26. Сагін С.В., Заблоцький Ю.В. Влияние анизотропных жидкостей на работу узлов трения судовых дизелей // Проблемы техники: наук.-виробн. журнал. – 2012. – № 4. – С. 68-81.
27. Сагін С.В., Куропятник О.А. Аналіз впливу біодизельного палива на екологічні та економічні показники роботи суднових дизелів // Водний транспорт. Збірник наукових праць. – 2025. – Вип. 1(42). – С. 180-194. doi.org/10.33298/2226-8553.2025.1.42.21.
28. 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>
29. 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.org/10.33298/2226-8553.2024.1.39.20.
30. Заблоцький Ю.В., Солодовников В.Г. Снижение энергетических потерь в топливной аппаратуре судовых дизелей // Проблемы техники: наук.-виробн. журнал. – 2013. – № 3. – С. 46-56.
31. Зверьков Д.О., Сагін С.В. Зниження механічних втрат у суднових дизелях // Суднові енергетичні установки: наук.-техн. зб. – 2020. – Вип. 40. – С. 20-25. DOI : 10.31653/smf341.2020.20-25.
32. 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.org/10.33298/2226-8553.2024.1.39.21.
33. 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.
34. Sagin S.V., Kuropyatnyk O.O., Tkachenko I.V Ensuring the environmental friendliness of marine diesel engines of specialized ships // Суднові енергетичні установки: науково-технічний збірник. – 2022. – Вип. 45. – С. 5-16. doi: 10.31653/smf45.2022.5-16.
35. Sagin S.V. Decrease in mechanical losses in high-pressure fuel equipment of marine diesel engines // Materials of the International Conference “Scientific research of the SCO countries: synergy and integration” – 2019. – P. 139–145. DOI: 10.34660/INF.2019.15.36258.
36. 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.

37. Sagin S.V., Kuropyatnyk O.A. Using exhaust gas bypass for achieving the environmental performance of marine diesel engines // *Austrian Journal of Technical and Natural Sciences. Scientific journal.* – 2021. – № 7-8 – P. 36-43. <https://doi.org/10.29013/AJT-21-7.8-36-43>.
38. Сагін С.В., Куропятник О.А. Визначення оптимальних режимів процесів управління випускними газами суднових дизелів // *Водний транспорт: Збірник наукових праць.* – 2024. – Вип. 2(40). – С. 173-185. doi.org/10.33298/2226-8553.2024.2.40.16.
39. Сагін С.В., Куропятник А.А. Оптимизация режимов работы системы перепуска выпускных газов судовых среднеоборотных дизелей // *Автоматизация судовых технических средств: науч.-техн. сб.* – 2019. – Вип. 25. – С. 79-89.
40. Сагін С.В., Столярик Т.О. Аналіз експлуатаційних характеристик моторних мастил суднових дизелів // *Суднові енергетичні установки: наук.-техн. зб.* – 2021. – Вип. 43. – С. 69-80. [doi: 10.31653/smf343.2021.69-80](https://doi.org/10.31653/smf343.2021.69-80).
41. Levinskyi M. Automatic diagnostic of marine diesel generator lubricating oil condition // *Автоматизация судовых технических средств: науч.-техн. зб.* – 2023. – Вип. 28. – С. 106-120. DOI: 10.31653/1819-3293-2023-1-28-106-120.
42. Заблоцкий Ю. В. Исследование влияния органических покрытий на работу элементов топливной аппаратуры высокого давления судовых дизелей // *Судовые энергетические установки: науч.-техн. сб.* – 2015. – № 35. – С. 83-92.
43. Сагін С. В. Определение диапазона стратификации вязкости смазочного материала в трибологических системах судовых дизелей // *Вісник Одеськ. нац. мор. ун-ту.* – 2019. – Вип. 1(58). – С. 89-100.
44. Руснак Д.Ю., Сагін С.В. Забезпечення екологічних вимог при ультразвуковій десульфурізації вуглеводних палив // *Суднові енергетичні установки: наук.-техн. зб.* – 2020. – Вип. 40. – С. 49-54. DOI: 10.31653/smf340.2020.49-54.
45. Поповский А.Ю., Сагін С.В. Комплексная оценка эксплуатационных характеристик смазочных углеводородных жидкостей // *Автоматизация судовых технических средств : науч.-техн. сборник.* – 2014. – Вип. 20. – С. 74-83.
46. Сагін С.В., Заблоцкий Ю.В. Діагностування технічного стану суднових енергетичних установок засобів водного транспорту // *Водний транспорт. Збірник наукових праць.* – 2023. – № 2(38). – С. 164-175. doi.org/10.33298/2226-8553.2023.2.38.18.
47. 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>.
48. Сагін С.В. Зниження механічних втрат у суднових середньооборотних дизелях // *Суднові енергетичні установки: наук.-техн. зб.* – 2020. – Вип. 40. – С. 5-11. DOI : 10.31653/smf340.2020.5-11.
49. Марченко О.О., Сагін С.В. Вдосконалення процесу очищення суднових важких палив // *Суднові енергетичні установки: наук.-техн. зб.* – 2020. – Вип. 41. – С. 10-14. DOI: 10.31653/smf341.2020.10-14.
50. Сагін С.В., Заблоцкий Ю.В. Определение триботехнических характеристик поверхностей по степени упорядоченности пристенных слоев углеводородных жидкостей // *Проблемы техники: науч.-виробн. журнал.* – 2011. – № 3. – С. 78-88.
51. Сагін С.В., Сагін А.С. Контроль та діагностування надійності та економічності дизелів морських та річкових засобів транспорту // *Суднові енергетичні установки : наук.-техн. зб.* – 2023. – Вип. 46. – С. 118-131. [doi: 10.31653/smf46.2023.118-131](https://doi.org/10.31653/smf46.2023.118-131).
52. Сагін С.В., Заблоцкий Ю.В., Сагін А.С. Підвищення економічності роботи суднових середньооборотних дизелів // *Водний транспорт. Збірник наукових праць.* – 2025. – Вип. 1(42). – С. 166-179. doi.org/10.33298/2226-8553.2025.1.42.20.

REFERENCES

1. Sagin S.V., Sagin A.S. Control and diagnostics of the 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](https://doi.org/10.31653/smf46.2023.118-131).
2. Levchenko O.V., Dvulit Z.P., Kozlenko O.V. Features of Human Resource Management at Railway Transport Enterprises // *Efektivna ekonomika.* – 2020. – Vol. 6. – P. 1-7 <http://www.economy.nayka.com.ua/?op=1&z=7985>. DOI: 10.32702/2307-2105-2020.6.72.
3. Kurdiuk S., Dremliuk V., Melnyk O., Onishchenko O., Fomin O., Pištěk V., Kučera P. Development of a High-Reliability Hybrid Data Transmission System for Unmanned Surface Vehicles Under Interference Conditions // *Drones.* – 2025. – № 9 (3). – P. 174. <https://doi.org/10.3390/drones9030174>.

4. Sagin S.S., Sagin S.V. Ensuring the safe maneuvering of large-tonnage vessels in confined port waters // *Water transport*. – 2024. – № 3(41). – С. 208-220. doi.org/10.33298/2226-8553.2024.3.41.21.
5. 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.
6. 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.
7. 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. – № 2(38). – С. 187-198. doi.org/10.33298/2226-8553/2023.2.38.20.
8. 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. – № 1. – P. 1-12. <https://ena.lpnu.ua/items/c18bd237-03e6-4ae1-947c-6a2300e013e2>.
9. Levchenko O. Tature and content organizational-economic mechanism of logistics potential railway undertakings // *Herald of the State Economic and Technological University of Transport. Series: Economics and Management*. – 2014. – №. 29. – P. 148–155.
10. 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.
11. 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.
12. Dvulit Z.P., Levchenko O.V., Derkach D.M. Formation of marketing decisions in the enterprise management system // *Menedzhment ta pidpriemnytstvo v Ukraini: etapy stanovlennia ta problemy rozvytku*. – 2020 – Vol. 2(1). – P. 21–28. <https://science.lpnu.ua/sites/default/files/journal-paper/2020/jun/21855/st3.pdf>
13. Petrychenko O. Levynskyi 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>.
14. Sagin S.V. Reducing energy losses in precision steam of fuel equipment of marine diesel engines // *Ship power plants*. – 2018. – Vol. 38. – P. 132-142
15. Sagin S.V. Reducing mechanical losses in medium-speed marine diesel engines by optimizing the operation of circulating lubrication systems // *Herald of the Odessa Maritime University*. – 2020. – Vol. 1(61). – P. 87-96. doi.org/10.47049/2226-1893-2020-1-87-96.
16. 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>.
17. Sagin S.V., Kuropyatnyk O.A. Determining the optimal operating modes of marine internal combustion engines when using biodiesel fuel // *Ship power plants*. – 2011. – Vol. 48. – P. 100-113. doi: 10.31653/smf48.2024.100-113.
18. 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.
19. Matskevych D.V., Sagin S.V., Hanmamedov S.A. Changes in the rheological characteristics of lubricants in the circulating oil system during operation of a medium-speed engine // *Ship power plants*. – 2010. – Vol. 25. – P. 109-118.
20. Sagin S.V., Popovskii Y.M., Grebenuk M.N. The influence of orientation ordering in boundary lubricant layers on the tribological characteristics of friction units // *Ship power plants*. – 1998. – Vol. 1. – P. 102-104.
21. Sagin S.V. Rheology of motor oils in start-up and reverse modes of marine low-speed diesel engines // *Universum: Technical sciences*. – 2018. – № 3(48). – P. 67-71.
22. Sagin S.V., Matskevych D.V. Optical characteristics of boundary lubricating layers of oils used in circulation systems of marine diesel engines // *Ship power plants*. – 2011. – Vol. 26. – P. 116-125.
23. Poberezhniy R.V., Sagin S.V. Ensuring the environmental performance of diesel engines in river and sea transport vessels // *Ship power plants*. – 2020. – Vol. 41. – P. 5-9. DOI: 10.31653/smf340.2020.5-9.
24. Petrychenko O., Levynskyi M. Trends and preconditions for widespread adoption of liquefied natural gas in maritime transport // *Transport systems and technologies*. – 2024. – № 43. – С. 21-36. DOI:10.32703/2617-9059-2024-43-2.
25. Zablotskyi Yu.V., Sagin A.S. Determination of dynamic loads during the change of lubrication modes of precision pairs of fuel equipment of marine diesel engines // *Ship power plants*. – 2022. – Vol. 44. – P. 121-131. doi: 10.31653/smf44.2022.121-131.

26. Sagin S.V., Zablotsky Yu.V. The influence of anisotropic fluids on the operation of friction units of marine diesel engines // Problems of technical. – 2012. – Vol. 4. – P. 68-81.
27. Sagin S.V., Kuropyatnyk O.A. Analysis of the impact of biodiesel fuel on the environmental and economic performance of marine diesel engines // Water transport. – 2025. – Вип. 1(42). – С. 180-194. doi.org/10.33298/2226-8553.2025.1.42.21.
28. 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
29. 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.
30. Zablotskyi Yu.V., Solodovnikov V.G. Reducing energy losses in fuel equipment of marine diesel engines // Problems of technical. – 2012. – Vol. 3. – P. 46-56.
31. Zverkov D.O., Sagin S.V. Reduction of mechanical losses in marine diesel engines // Ship power plants. – 2020. – № 41. – P. 20–25. DOI: 10.31653/smf341.2020.20-25.
32. 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.
33. 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.
34. Sagin S.V., Kuropyatnyk O.O., Tkachenko I.V. Ensuring the environmental friendliness of marine diesel engines of specialized ships // Ship power plants. – 2022. – № 45. – P. 5–16. doi: 10.31653/smf45.2022.5-16.
35. Sagin S.V. Decrease in mechanical losses in high-pressure fuel equipment of marine diesel engines // Materials of the International Conference “Scientific research of the SCO countries: synergy and integration” – 2019. – P. 139–145. DOI: 10.34660/INF.2019.15.36258.
36. 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.
37. Sagin S.V., Kuropyatnyk O.A. Using exhaust gas bypass for achieving the environmental performance of marine diesel engines // Austrian Journal of Technical and Natural Sciences. Scientific journal. – 2021. – № 7-8 – P. 36-43. https://doi.org/10.29013/AJT-21-7.8-36-43.
38. Sagin S.V., Kuropyatnyk O.A. Determination of optimal modes of exhaust gas control processes for marine diesel engines // Water transport. – 2024. – № 1(39). – P. 173–185. doi.org/10.33298/2226-8553.2024.2.40.16.
39. Sagin S.V., Kuropyatnyk O.A. Optimization of operating modes of the exhaust gas bypass system of marine medium-speed diesel engines // Automation of ship facilities. – 2019. – № 25. – P. 79-89.
40. Sagin S.V., Stoliaryk T.O. Analysis of operational characteristics of motor oils of marine diesels // Ship plants. – 2021. – Vol. 43. – P. 69-80. doi: 10.31653/smf343.2021.69-80.
41. Levinskyi M. Automatic diagnostic of marine diesel generator lubricating oil condition // Automation of ship technical facilities. – 2023. – № 28. – P. 106-120. DOI: 10.31653/1819-3293-2023-1-28-106-120
42. Zablotskyi Yu.V. A study of the influence of organic coatings on the operation of high-pressure fuel system components of marine diesel engines // Ship power plants. – 2015. – Vol. 35. – P. 83-92.
43. Sagin S.V. Determination of the range of lubricant viscosity stratification in tribological systems of marine diesel engines // Herald of the Odessa National Maritime University. – 2019. – № 1(58). – P. 89–100.
44. Rusnak D.Y., Sagin S.V. Ensuring environmental requirements during ultrasonic desulfurization of hydrocarbon fuels // Ship power plants. – 2020. – Vol. 40. – P. 49-54. DOI: 10.31653/smf340.2020.49-54.
45. Popovskii A.Y., Sagin S.V. Complex assessment of operational characteristics of lubricating hydrocarbon liquids // Automation of ship facilities. – 2014. – № 20. – P. 74-83.
46. 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.
47. 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.
48. Sagin S.V. Reducing mechanical losses in marine medium-speed diesel engines // Ship power plants. – 2020. – Vol. 40. – P. 5-11. DOI : 10.31653/smf340.2020.5-11.
49. Marchenko O.O., Sagin S.V. Improving the process of cleaning marine heavy fuels // Ship power plants. – 2020. – Vol. 41. – P. 10-14. DOI: 10.31653/smf340.2020.10-14.

50. Sagin S.V., Zablotskyi Y.V. Determination of tribological characteristics of surfaces by the degree of ordering of wall layers of hydrocarbon liquids // Problems of technical. – 2011. – Vol. 3. – P. 78-88.
51. 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.
52. 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.

Kuropyatnyk O.A.

COMPREHENSIVE ASSESSMENT OF THE EFFECTIVENESS OF USING MARINE DIESEL ENGINE EXHAUST GAS MANAGEMENT SYSTEMS TO ENSURE THE ENVIRONMENTAL OPERATION OF MARINE TRANSPORT VESSELS

The results of research on the comprehensive assessment of the effectiveness of using marine diesel engine exhaust gas management systems to ensure the environmental operation of marine transport vessels are presented. As a method that contributes to achieving this task, the low-emission technology of marine diesel engine exhaust gas recirculation is considered. The results of research carried out on the 8G60ME marine diesel engine from MAN Diesel (equipped with a high-pressure recirculation system) and on the 7UEC60LS marine diesel engine from Mitsubishi (equipped with a low-pressure recirculation system) are presented. The research was carried out in the range of operational loads on the diesel engine 60–90 % with an alternating change in the degree of recirculation in the range of 5–20 %. It has been experimentally proven that both systems have a unidirectional effect on the environmental friendliness of marine transport vessels. At the same time, both schemes ensure compliance with the requirements of Annex VI MARPOL regarding the emission of nitrogen oxides with the exhaust gases of marine diesel engines. It was established that, depending on the degree of recirculation and the operational load on the diesel, both systems provide a 30–35 % reduction in nitrogen oxide emissions with exhaust gases. At the same time, through analytical calculations and experimental studies, it was established that when using recirculation systems, the energy and economic performance of marine diesel engines deteriorates, which is reflected in the corresponding characteristics of the seagoing vessel. At the same time, for the studied range of changes in the degree of recirculation, a relative increase in specific fuel consumption is observed by 0.57–3.72 %; a relative increase in hourly fuel consumption by 0.68–3.78 %; a relative decrease in indicator pressure by 0.22–2.97 %; a relative decrease in effective diesel power by 0.23–3.26 %. The above necessitates a comprehensive assessment of changes in the environmental, energy and economic performance of diesel engines while ensuring the environmental operation of marine transport vessels.

Keywords: *environmental safety, environmental performance, nitrogen oxide emissions, effective diesel engine power, marine transport, specific fuel consumption, exhaust gas recirculation system, marine diesel*

© Кирилаха С.В., Капустян О.Є.

ВЛАСТИВОСТІ ТИТАНОВИХ СПЛАВІВ, ОТРИМАНИХ АДИТИВНИМИ ТЕХНОЛОГІЯМИ, ДЛЯ ДЕТАЛЕЙ ВОДНОГО ТРАНСПОРТУ

У статті проаналізовано сучасні наукові підходи до дослідження корозійної поведінки титанових сплавів, отриманих методом адитивного виробництва, зокрема за технологією осадження дроту під дуговим нагрівом (Wire Arc Additive Manufacturing, WAAM), в умовах морського середовища. Особливу увагу приділено впливу технологічних параметрів WAAM на мікроструктуру матеріалу, формування пасивних плівок та рівень корозійної стійкості, що визначає доцільність використання таких виробів у суднобудуванні та суміжних галузях. Високий рівень питомої міцності, низька щільність та добрі антикорозійні властивості обумовлюють активне впровадження титанових матеріалів у конструкції морського та авіаційного призначення. Проте структура та властивості виробів, одержаних різними адитивними технологіями (WAAM, SLM, EBM), суттєво відрізняються від традиційно оброблених матеріалів. У статті систематизовано експериментальні дані щодо впливу мікроструктури, орієнтації зразків, температурних режимів та параметрів друку на корозійну поведінку Ti-6Al-4V у розчині NaCl. Особливу увагу приділено порівнянню електрохімічних характеристик WAAM-деталей із кованими аналогами, а також моделюванню імпедансних параметрів за допомогою еквівалентних електричних схем. Окреслено основні механізми деградації пасивного шару, пов'язані з неоднорідністю структури та наявністю зон повторного нагріву. Також представлено приклади деталей, які можуть виготовлятися з титану для морського транспорту, зокрема фланці, корпусні елементи, гвинтові вузли, насоси. Зроблено акцент на актуальності розроблення оптимізованих режимів WAAM-друку для забезпечення довговічності титанових виробів у солоній воді. Отримані результати можуть бути використані для підвищення корозійної стійкості морських конструкцій, виготовлених з адитивних титанових сплавів, шляхом контролю технологічних параметрів та подальшої термічної обробки. Проведений порівняльний аналіз результатів поляризаційних та імпедансних досліджень показав, що WAAM-зразки поступаються кованим за корозійною стійкістю через мікроструктурні особливості. Разом з тим, оптимізація параметрів процесу дозволяє знизити швидкість корозії у понад 3 рази порівняно з гарячекатаними аналогами.

Ключові слова: титанові сплави; WAAM; адитивне виробництво; корозійна стійкість; морське середовище; електрохімічні властивості; мікроструктура; SLM; EBM; імпедансна спектроскопія.

Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями. У сучасних умовах експлуатації елементів морських і річкових суден зростають вимоги до структурних матеріалів, що застосовуються для виготовлення корпусних конструкцій, трубопроводних систем, вузлів і з'єднань. Ці елементи працюють в умовах агресивного морського середовища, під впливом змін температури, механічних навантажень та електрохімічної корозії, що обумовлює необхідність забезпечення їх довготривалої корозійної стійкості. Агресивна дія солоної води, змін температури та механічних навантажень значно знижують довговічність і надійність традиційних конструкційних матеріалів, спричиняючи прискорену корозію, мікротріщини та втрату функціональних властивостей. Зниження ресурсу таких елементів призводить до зростання витрат на ремонт, простоїв, а у деяких випадках — до аварійних ситуацій із ризиками для довкілля [1, 2], що обумовлює необхідність забезпечення їх довготривалої корозійної стійкості.

Одним із найперспективніших матеріалів у цьому контексті залишається титан і його сплави, зокрема Ti6Al4V (Grade 5), завдяки поєднанню високої питомої міцності, виняткової корозійної стійкості, біосумісності та доведеної експлуатаційної надійності у морських конструкціях; збалансованим механічним властивостям, термостійкості та високій здатності до пасивації. Його

стійкість до точкової, щілинної та міжкристалітної корозії робить його пріоритетним для застосування в морській інженерії [3, 4, 5, 15, 16, 17] у конструкційних елементах підводного й надводного флоту, включно з корпусами апаратів, гвинтами, насосами та елементами теплообмінників. У порівнянні з нержавіючими сталями та алюмінієвими сплавами, титанові сплави забезпечують кращу довговічність за умов багаторічного контакту з морським середовищем [1, 6, 7, 8, 14].

Аддитивні технології, зокрема WAAM, відкривають перспективи щодо створення корозійностійких відповідальних великогабаритних, і високотехнологічних конструкцій з покращеною геометричною складністю або критично навантажених деталей з титану та зниженням ваги при збереженні або підвищенні експлуатаційних властивостей [9, 10, 11, 20, 21, 22]. До таких деталей належать кріпильні гвинти, корпусні елементи насосів, фланці трубопроводів, а також складні корпуси насосів і клапанів [12, 13, 16, 19].

Інтеграція адитивних технологій у виробництво компонентів морського транспорту зумовлює підвищені вимоги до матеріалів, здатних витримувати агресивні умови морського середовища. Проте поширення 3D-друку у судновій галузі стримується недостатньою вивченістю поведінки надрукованих матеріалів у морському середовищі, особливо в аспекті локальної та міжфазної корозії, що може виникати через специфічну мікроструктуру виробів, виготовлених методом WAAM, SLM або EBM. Мікроструктурні особливості матеріалів, сформованих унаслідок пошарового наплавлення, значною мірою впливають на їхню корозійну поведінку, що потребує детального дослідження та обґрунтування технологічних рішень щодо підвищення їх експлуатаційної стійкості. Необхідність розуміння корозійних механізмів, впливу умов і можливих шляхів покращення стійкості таких матеріалів набуває практичного значення для підвищення надійності конструкцій, зниження вартості технічного обслуговування, продовження ресурсу суднових систем і зменшення кількості аварійних відмов [3, 4, 14, 15].

Також незважаючи на значний обсяг публікацій, залишається недостатньо розробленим комплексний аналіз ефекту технологічних параметрів адитивних технологій на корозійну поведінку деталей у морському середовищі. Зокрема, недостатньо систематизовано вплив таких параметрів, як швидкість подачі дроту та струм дуги у WAAM, енергія лазера, швидкість сканування та крок шару у SLM, а також густина електронного пучка та швидкість плавлення у EBM, на формування мікроструктури та, відповідно, на корозійну стійкість. Означена робота спрямована на аналіз цих взаємозв'язків та формування практичних настанов для підвищення корозійної стійкості адитивно виготовлених титанових сплавів у суднобудівній галузі.

Широке впровадження адитивних технологій у судновій галузі обмежується недостатньою вивченістю корозійної поведінки адитивно виготовлених матеріалів у морському середовищі, зокрема процесів локальної та міжфазної корозії, зумовлених характерною для технологій WAAM, SLM і EBM мікроструктурною неоднорідністю. Специфічні особливості фазового складу, текстури та термічної історії таких матеріалів можуть призводити до формування електрохімічно активних ділянок, що підвищує їхню схильність до деградаційних процесів в умовах морської експлуатації. У зв'язку з цим поглиблене розуміння механізмів корозії, впливу морських факторів та ефективних підходів до підвищення корозійної стійкості адитивно виготовлених титанових сплавів набуває істотного практичного значення для забезпечення довговічності та експлуатаційної надійності суднових конструкцій, зменшення витрат на технічне обслуговування та подовження їхнього ресурсу.

Таким чином, дослідження корозійної стійкості титанових сплавів, виготовлених із використанням технологій 3D-друку, має безпосередній зв'язок із вирішенням актуальних практичних завдань морського і річкового транспорту, відповідає вимогам екологічної безпеки та енергоефективності і є актуальним напрямом наукових розвідок у галузі транспортного матеріалознавства [5, 6].

Актуальність дослідження. Проблема забезпечення довготривалої надійності та корозійної стійкості матеріалів конструкцій морського і річкового транспорту залишається актуальною, особливо з урахуванням розвитку технологій адитивного виробництва. Таким чином, дослідження корозійної стійкості титанових сплавів, виготовлених із використанням технологій 3D-друку, має безпосередній зв'язок із вирішенням актуальних практичних завдань морського і річкового транспорту, відповідає

вимогам екологічної безпеки та енергоефективності і є актуальним напрямом наукових розвідок у галузі транспортного матеріалознавства [5, 6, 16, 17].

Використання титанових сплавів, зокрема отриманих методами адитивного виробництва, відкриває нові можливості щодо створення корозійностійких і високотехнологічних конструкцій. Проте мікроструктурні особливості матеріалів, сформованих унаслідок пошарового наплавлення, значною мірою впливають на їхню корозійну поведінку, що потребує детального дослідження та обґрунтування технологічних рішень щодо підвищення їх експлуатаційної стійкості.

У даній роботі проаналізовано чинники, що визначають корозійну стійкість 3D-друкованих титанових сплавів в умовах морського середовища, з урахуванням технологічних параметрів виготовлення та експлуатаційних навантажень. Результати дослідження дозволяють сформулювати рекомендації щодо підвищення ефективності та надійності таких матеріалів у суднобудівній галузі.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблема забезпечення довготривалої корозійної стійкості матеріалів у морському середовищі залишається актуальною в сучасному матеріалознавстві, особливо з урахуванням розвитку технологій адитивного виробництва. Дослідження [1-3] свідчать про те, що титанові сплави, зокрема Ti-6Al-4V, характеризуються високою корозійною тривкістю в агресивних умовах, однак мікроструктурні особливості, зумовлені пошаровим нарощуванням, можуть призводити до неоднорідності структури та появи дефектів, що впливають на експлуатаційні властивості.

У роботах [4, 5] проаналізовано вплив параметрів адитивного виготовлення, зокрема швидкості подачі дроту, температурного поля та режимів охолодження, на фазовий склад та морфологію $\alpha+\beta$ -структури, що, у свою чергу, впливає на стійкість до пітингової та щільної корозії. У публікації [6] автори розглядають ефективність термомеханічної обробки для зменшення залишкових напружень та стабілізації структури титанових деталей, виготовлених WAAM-методом, з метою покращення довговічності в морських умовах. Новітні дослідження [7-11] висвітлюють перспективні підходи для підвищення корозійної стійкості титанових сплавів, отриманих методом адитивного виробництва.

Зокрема, у роботі Yadav S. [7] вперше запропоновано метод оптимізації теплового режиму WAAM, що забезпечує більш однорідну мікроструктуру без внутрішніх дефектів, що позитивно впливає на корозійну поведінку. Автори здійснили комплексний аналіз впливу параметрів процесу, таких як швидкість подачі дроту, швидкість руху та тепловий режим, на геометрію та морфологію осаджених матеріалів.

Особливу увагу приділено постпроцесним термічним обробкам, які оптимізують мікроструктуру та покращують механічні властивості осаджених матеріалів. Ці результати є важливими для покращення корозійної стійкості титанових сплавів, виготовлених за допомогою WAAM, що є критичним для їх застосування в морських конструкціях.

У дослідженнях останніх років підтверджено, що мікроструктура, дефекти та оксидоутворення в Ti-6Al-4V, виготовленому WAAM, безпосередньо впливають на корозійну поведінку у морських середовищах. Зокрема, Bermingham та ін. [8] показали, що термічна обробка сприяє формуванню більш однорідної β -фази та зниженню кількості дефектів, що в свою чергу забезпечує кращу стабільність пасивної плівки на поверхні сплаву. Подібні результати отримані й у роботі Hemmasian Ettefagh [25, 27], де підкреслюється ключова роль морфології оксидного шару у захисті від пітингової корозії.

Дослідження Hemmasian Ettefagh (2021) [25, 27] показало, що оптимізація параметрів адитивного виробництва може знизити швидкість корозії титанових сплавів у солоній воді приблизно на 30–50 %, що підтверджує їхню придатність для морських конструкцій.

У дослідженні Hemmasian Ettefagh (2021) [25] оцінено корозійну стійкість титанових сплавів Ti-6Al-4V, виготовлених методом лазерного порошкового спікання (LPBF), до та після термічної обробки. Виявлено, що швидкість корозії якості сплавів у солоній воді була майже в 16 разів гіршою порівняно з комерційними зразками. Це пов'язано з наявністю нееквілібріумної мартенситної фази α' , що утворюється через швидке охолодження під час процесу АМ.

Після термічної обробки при 800 °C протягом 2 годин спостерігалось значне покращення корозійної стійкості, що робило її порівнянною з комерційними сплавами завдяки зняттю залишкових

напруг та утворенню β -фази з більшою корозійною стійкістю. Ці результати підтверджують доцільність використання адитивно виготовлених титанових сплавів у морських конструкціях за умови застосування відповідної термічної обробки для покращення їх корозійної стійкості.

У статті Fernandez L., Martinez J. (2023) [9] досліджено комбінований вплив лазерної обробки поверхні та анодування на корозійну стійкість адитивно виготовлених титанових сплавів Ti-6Al-4V. Цей підхід спрямований на покращення експлуатаційних характеристик матеріалів для морських конструкцій, де корозія є критичним фактором. Основні результати: Корозійна стійкість: Комбіноване застосування лазерної обробки та анодування призвело до значного зниження швидкості корозії у солоній воді, що підтверджує ефективність цього підходу для морських конструкцій. Механічні властивості:

Після комбінованої обробки спостерігалось значне покращення мікротвердості поверхні, що свідчить про підвищення механічної міцності матеріалу. Мікроструктура: Лазерна обробка сприяла утворенню більш однорідної структури поверхневого шару, що зменшило кількість дефектів та підвищило стабільність пасивної плівки. Це дослідження є першим, яке комбінує лазерну обробку та анодування для покращення корозійної стійкості адитивно виготовлених титанових сплавів, і його результати можуть бути корисними для подальших розробок у галузі матеріалознавства та інженерії.

Дослідження [10, 11] демонструють застосування новітніх електрохімічних методів для прискореного моделювання корозійної поведінки, що сприяє оперативному коригуванню технологічних параметрів для підвищення експлуатаційної стійкості.

У дослідженні (Wang & Li, 2020) [10] оцінено корозійну стійкість титанових сплавів, виготовлених адитивним методом, у симульованих морських умовах (3,5 % NaCl). Використання електрохімічних методів, зокрема потенціостатичного вимірювання та кривих поляризації, дозволило визначити потенціал корозії та щільність корозійного струму, що сприяє оперативному коригуванню технологічних параметрів для підвищення експлуатаційної стійкості. Дослідження показало, що адитивно виготовлені титанові сплави мають специфічну мікроструктуру з дрібнозернистими колоноподібними зернами, що значною мірою визначає швидкість корозії та ефективність пасиваційного шару в морських умовах.

У дослідженні (Kim & Choi, 2019) [11] застосовано прискорене корозійне тестування титанових сплавів Ti-6Al-4V, виготовлених методом WAAM, за допомогою спектроскопії електрохімічної імпедансії (EIS). Цей підхід дозволяє ефективно оцінювати корозійну поведінку матеріалів, зокрема визначати резистивні та ємнісні характеристики пасиваційного шару, що є критично важливим для оптимізації технологічних параметрів процесу WAAM і підвищення експлуатаційної надійності.

Особливо цінним є те, що прискорене тестування дає змогу швидко порівнювати вплив різних параметрів наплавлення на корозійну стійкість, що робить його ефективним інструментом для аналізу публікацій і розробки нових технологічних підходів. Дослідження підтверджують ефективність сучасних електрохімічних методів, зокрема EIS, для швидкої та кількісної оцінки корозійної поведінки адитивно виготовлених титанових сплавів та оптимізації технологічних параметрів для підвищення їх експлуатаційної стійкості.

Одним із перших прикладів цілеспрямованого управління корозійною поведінкою адитивно виготовленого Ti-6Al-4V через модифікацію процесу WAAM є робота [12]. У дослідженні Shao Z. та ін. (2023) [12] запропоновано підхід до оптимізації корозійних властивостей сплаву Ti-6Al-4V шляхом застосування магнітної осциляції дуги у процесі WAAM. Показано, що такий технологічний прийом сприяє впорядкуванню α -зернистої структури, підвищенню їхньої кількості та формуванню більш однорідного приповерхневого шару, що прискорює утворення стабільної пасивної оксидної плівки, стійкої до хлорид-індукованої локалізованої корозії. Запропоноване рішення є особливо релевантним для промислового виготовлення великогабаритних титанових компонентів, де однорідність мікроструктури та прогнозована корозійна поведінка мають вирішальне значення.

У дослідженні Yu та ін. (2022) [13] проведено порівняльний аналіз мікроструктури та електрохімічної поведінки титанових сплавів Ti-6Al-4V, виготовлених методами селективного лазерного плавлення (SLM), електронно-променевого плавлення (EBM) та ізотермічного формування (ISF) у розчині 3,5 % NaCl, що імітує морське середовище.

Результати показали суттєву різницю в корозійній поведінці зразків залежно від технології: ISF-зразки продемонстрували найвищу корозійну стійкість (низьку густину пасиваційного струму та високий опір поляризації), тоді як SLM-зразки мали найгірші показники, а EBM займали проміжне положення. Це свідчить, що щільність і стабільність пасиваційного шару значною мірою визначаються мікроструктурою, сформованою під час друку. Автори підкреслюють, що контроль морфології α - та β -фаз є ключовим чинником підвищення корозійної стійкості адитивно виготовлених сплавів Ti-6Al-4V у хлоридовмісних середовищах, що має особливе значення для застосувань у морських конструкціях та елементах водного транспорту.

Дослідження Alvarez та ін. (2017) [14] показало, що термічна обробка та хімічне перетворення титанового сплаву Ti6Al4V суттєво підвищують його корозійну стійкість. Застосування електрохімічної імпедансної спектроскопії (EIS) та потенціостатичного вимірювання дозволило встановити, що модифікація сприяє формуванню щільного оксидного шару, який ефективно захищає матеріал у агресивному середовищі (3,5% NaCl). Результати підтверджують ефективність подібних підходів для підвищення експлуатаційної надійності титанових сплавів.

У роботі Lin та співавторів (2021) [21] здійснено систематичний огляд сучасного стану розробки технології WAAM (Wire and Arc Additive Manufacturing) із позиції її застосування до титанових сплавів, насамперед Ti-6Al-4V. Автори детально аналізують технологічні аспекти процесу, серед яких особливу увагу приділено типам джерел енергії (GTAW, PAW, GMAW) і типу використовуваного дроту. Встановлено, що контроль над теплонадходженням, швидкістю подачі дроту та режимами переміщення є критично важливими для забезпечення стабільності процесу та якості сформованих шарів. Огляд також підкреслює, що стабільність процесу та контроль теплонадходження безпосередньо впливають на формування однорідної мікроструктури, яка визначає подальшу корозійну поведінку титанових сплавів.

З точки зору мікроструктурних і фазових особливостей WAAM-заготовки з титанових сплавів характеризуються анізотропною мікроструктурою, зокрема формуванням колоноподібних β -зерен, витягнутих у напрямку нарощування шару, а також появою зон повторного термічного впливу (heat-affected bands). Такі особливості істотно впливають як на механічні властивості, так і на корозійну стійкість, про що свідчить значна кількість експериментальних робіт, проаналізованих у публікації [15-22].

Важливо, що Lin та співавтори [21] наголошують на перевагах WAAM для виробництва великогабаритних, геометрично складних або критично навантажених деталей з титану, зокрема у галузях авіації та морської інженерії, де необхідне поєднання високої міцності, корозійної стійкості та малої питомої маси. Визначено також, що потенціал WAAM найбільш повно розкривається за умов застосування гібридних підходів, зокрема поєднання адитивного формування з термомеханічною постобробкою або легуванням у процесі осадження. Таким чином, робота [21] надає вичерпне уявлення про поточні досягнення, проблеми та перспективи розвитку WAAM-технології щодо титанових сплавів, а також визначає стратегічні напрями подальших досліджень у цьому напрямі.

У роботі [23] за допомогою електрохімічної імпедансної спектроскопії досліджено формування пасивних плівок на титанових сплавах, отриманих адитивними технологіями, що дозволило кількісно оцінити опір переносу заряду та захисні властивості оксидного шару. У публікації [24] показано, що пасивні плівки на 3D-друкованих Ti-сплавах відрізняються меншою товщиною та однорідністю порівняно з традиційно обробленими матеріалами, проте термічна обробка після друку сприяє підвищенню їхньої корозійної стійкості.

У дослідженні Yang та ін. (2017) [1] було оцінено корозійну поведінку титанових сплавів Ti-6Al-4V, виготовлених методом WAAM, у 3,5% розчині NaCl. Показано, що зразки WAAM мають задовільний пасивний потенціал – 0,34 В та Ag/AgCl та щільність корозійного струму 0,45 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$, що свідчить про прийнятну корозійну стійкість порівняно з кованими аналогами (пасивний потенціал – 0,36 В, щільність струму 0,42 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$). Водночас підвищена пористість і неоднорідність мікроструктури спричиняють локальні активні ділянки [1].

У роботі Qiu та інші (2021) [29] досліджено корозійну поведінку Ti-6Al-4V, виготовленого методами SLM, EBM та SPS, у 10% розчині сульфаміду. Виявлено, що фракція β -фази становила 11,8%

у SPS-зразках, 5,3% у SLM та 2,6% у EBM. Найкращу корозійну стійкість продемонстрували SPS-зразки завдяки високій щільності зерен та β -фази, SLM-зразки мали найгіршу стійкість, а EBM виявився найбільш вразливим [29].

У дослідженні Н.М.-Sanchez та співавторів (2024) [30] порівнювалась корозійна поведінка Ti-6Al-4V, виготовленого методом лазерного плавлення порошкового шару (LPBF) та литтям, у 3,5% NaCl. LPBF-зразки показали більш негативний корозійний потенціал $-0,52$ В vs Ag/AgCl та щільність корозійного струму $1,12$ $\mu\text{A}/\text{cm}^2$, тоді як литі зразки мали $-0,48$ В і $0,95$ $\mu\text{A}/\text{cm}^2$. Автори відзначили, що підвищена дислокаційна щільність і внутрішні напруження LPBF-зразків сприяють локальній корозії [30].

Узагальнюючи наведені дані, сучасні адитивні технології (WAAM, SLM, EBM, SPS) забезпечують різну корозійну стійкість Ti-6Al-4V, що безпосередньо залежить від мікроструктури, щільності зерен, пористості та β -фази. Найстійкіші зразки – із високим вмістом β -фази та щільною мікроструктурою (SPS), тоді як методи із підвищеною внутрішньою напруженістю (SLM, LPBF) демонструють більшу локальну корозію.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття. Незважаючи на значний обсяг публікацій, залишається недостатньо розробленим комплексний аналіз ефекту технологічних параметрів адитивних технологій на корозійну поведінку деталей у морському середовищі, що включає як іонову агресію, так і температурно-вологісні коливання. Зокрема, недостатньо систематизовано вплив таких параметрів, як швидкість подачі дроту та струм дуги у WAAM, енергія лазера, швидкість сканування та крок шару у SLM, а також густина електронного пучка та швидкість плавлення у EBM, на формування мікроструктури та, відповідно, на корозійну стійкість. Означена робота спрямована на аналіз цих взаємозв'язків та формування практичних настанов для підвищення корозійної стійкості адитивно виготовлених титанових сплавів у суднобудівній галузі.

Наукова новизна даної роботи полягає у комплексному узагальненні сучасних матеріалознавчих знань щодо корозійної стійкості 3D-друкованих титанових сплавів, виготовлених різними адитивними технологіями, із особливим акцентом на вплив конкретних технологічних параметрів виробництва та мікроструктурних особливостей на поведінку матеріалів у морському середовищі.

Вперше систематизовано результати експериментальних досліджень, що демонструють взаємозв'язок між режимами адитивного виготовлення, типом мікроструктури та корозійною тривкістю, а також окреслено практичні рекомендації щодо підвищення експлуатаційних характеристик титанових виробів у суднобудівній галузі.

Формулювання цілей статті (постановка завдання)

Метою даної роботи є комплексний аналіз корозійної стійкості 3D-друкованих титанових сплавів у морському середовищі з урахуванням впливу технологічних параметрів виготовлення. Для досягнення цієї мети поставлено завдання: - проаналізувати особливості мікроструктури адитивно виготовлених титанових сплавів; – оцінити корозійну поведінку зразків у штучних морських розчинах; - запропонувати рекомендації щодо підвищення корозійної тривкості матеріалів для застосування у суднобудуванні. Для досягнення цієї мети поставлено завдання:

- проаналізувати особливості мікроструктури адитивно виготовлених титанових сплавів та їх вплив на корозійну поведінку зразків у штучних морських розчинах;

Систематизувати вплив таких параметрів, як швидкість подачі дроту та струм дуги у WAAM, енергія лазера, швидкість сканування та крок шару у SLM, а також густина електронного пучка та швидкість плавлення у EBM, на формування мікроструктури та, відповідно, на корозійну стійкість

- запропонувати рекомендації щодо підвищення корозійної тривкості матеріалів для застосування у суднобудуванні.

Матеріали та методи дослідження. У дослідженнях, розглянутих у цій роботі, використовувалися різні методи оцінки мікроструктурних і корозійних характеристик титанових сплавів, виготовлених за допомогою адитивних технологій. Зокрема, застосовувалися оптична металографія, сканувальна електронна мікроскопія (SEM), рентгенівська дифрактометрія (XRD) для аналізу фазового складу, а також методи вимірювання твердості для оцінки механічних властивостей.

Основний акцент зроблено на електрохімічних дослідженнях, що проводилися у 3,5% розчині NaCl для імітації морського середовища. Вимірювання електрохімічних характеристик зразків здійснювалися методом потенціодинамічної поляризації та методом електрохімічної імпедансної спектроскопії (EIS). Останній дозволив оцінити ємнісні та дифузійні властивості оксидної плівки, утвореної на поверхні титанових сплавів, та встановити ступінь захисної дії пасивного шару. Дані EIS були проаналізовані з використанням еквівалентних електричних схем для моделювання процесів на межі поділу метал/електроліт.

Оцінка впливу орієнтації виготовлення, мікроструктури та залишкових напружень проводилася шляхом порівняння результатів для зразків, отриманих методами WAAM, SLM, EBM і кування, згідно з опублікованими літературними даними [1–4, 13].

У дослідженні [14] для модифікації титанових сплавів Ti6Al4V застосовували комбіновану обробку, що включала термічну обробку та хімічне перетворення поверхні. Зразки піддавали нагріванню до температур 700 °C та 800 °C із подальшим охолодженням у печі, що забезпечувало формування термічно стабільної мікроструктури сплаву.

Паралельно проводили хімічну обробку з використанням церійсульфату (CeCCT), яка сприяла утворенню щільного оксидного шару на поверхні матеріалу. Поєднання цих методів дозволяло підвищити корозійну стійкість титанових сплавів та створювало передумови для подальшого дослідження їхньої електрохімічної поведінки в агресивних середовищах.

Вибір методів WAAM, SLM, EBM і кування обумовлений їхньою порівняльною цінністю для оцінки впливу різних адитивних та традиційних технологій на мікроструктуру і корозійну поведінку титанових сплавів. Використання еквівалентних електричних схем дозволяє кількісно оцінити характеристики пасивного шару та захисні властивості матеріалу, що забезпечує більш точне моделювання процесів на межі поділу метал/електроліт.

Виклад основного матеріалу дослідження з повним обґрунтуванням отриманих наукових результатів.

1.1 Порівняння орієнтації виготовлення зразків методами SLM, EBM та кування.

Орієнтація побудови зразків Ti-6Al-4V при адитивному виробництві є критичною для морського застосування, оскільки вона визначає формування текстури, напрямку росту кристалів та залишкові напруження, що безпосередньо впливають на механічні властивості та корозійну стійкість. У порівнянні з традиційними методами, такими як кування, адитивні технології, зокрема SLM та EBM, забезпечують високу точність виготовлення, але можуть призводити до значної анізотропії властивостей залежно від орієнтації зразка [6, 20, 18; 26].

Згідно з дослідженням X. Zhao [26], зразки Ti-6Al-4V, виготовлені методом SLM, демонструють вищу межу текучості (UTS) порівняно з EBM, але мають нижчу пластичність. Зокрема, UTS для SLM зразків становить близько 1100 МПа, тоді як для EBM — близько 950 МПа. Однак пластичність у SLM зразків значно нижча, що може обмежувати їх застосування в умовах, де важлива висока пластичність матеріалу.

Ці відмінності обумовлені різними механізмами охолодження та швидкостями охолодження в процесах SLM та EBM, що впливає на мікроструктуру та розподіл залишкових напружень у матеріалі. Наприклад, у SLM процесі швидке охолодження може призводити до утворення дрібнозернистої структури, що сприяє підвищенню міцності, але знижує пластичність. У свою чергу, EBM процес з більш повільним охолодженням може сприяти утворенню більш крупнозернистої структури з кращими механічними властивостями в умовах навантаження.

Таким чином, вибір орієнтації побудови зразка та технології виготовлення є важливими факторами, що впливають на кінцеві механічні властивості та корозійну стійкість виробів з Ti-6Al-4V, особливо в умовах морського застосування, де ці характеристики є критичними.

Для наочності та порівняння впливу орієнтації побудови на мікроструктуру та механічні властивості, на схемі зображено (рис. 1) орієнтацію побудови зразків Ti-6Al-4V при адитивному виготовленні за технологіями SLM (Selective Laser Melting) та EBM (Electron Beam Melting). Напрямок нашарування є вертикальним щодо платформи побудови, що безпосередньо впливає на формування структури з аксіально орієнтованою текстурою та анізотропією механічних властивостей.

Найбільший інтерес для порівняння становлять зразки, виготовлені методами SLM та електронно-променевого плавлення ЕВМ, оскільки вони демонструють принципово різні фазові стани при друці Ti-6Al-4V, тоді як ковани зразки виступають еталоном.

Вертикальна орієнтація побудови зразків зумовлює формування спрямованого теплового потоку вздовж осі нашарування, що сприяє росту витягнутих первинних β -зерен та розвитку аксіально орієнтованої кристалографічної текстури. У випадку SLM це призводить до переважного формування мартенситної α' -фази внаслідок високих швидкостей охолодження, тоді як для ЕВМ характерне формування рівноважної ламелярної $\alpha+\beta$ -мікроструктури через підвищену температуру робочої камери та знижену швидкість кристалізації. Така відмінність у фазовому стані є визначальним чинником анізотропії механічних властивостей, зокрема різниці у межі міцності та пластичності залежно від напрямку навантаження відносно осі побудови.

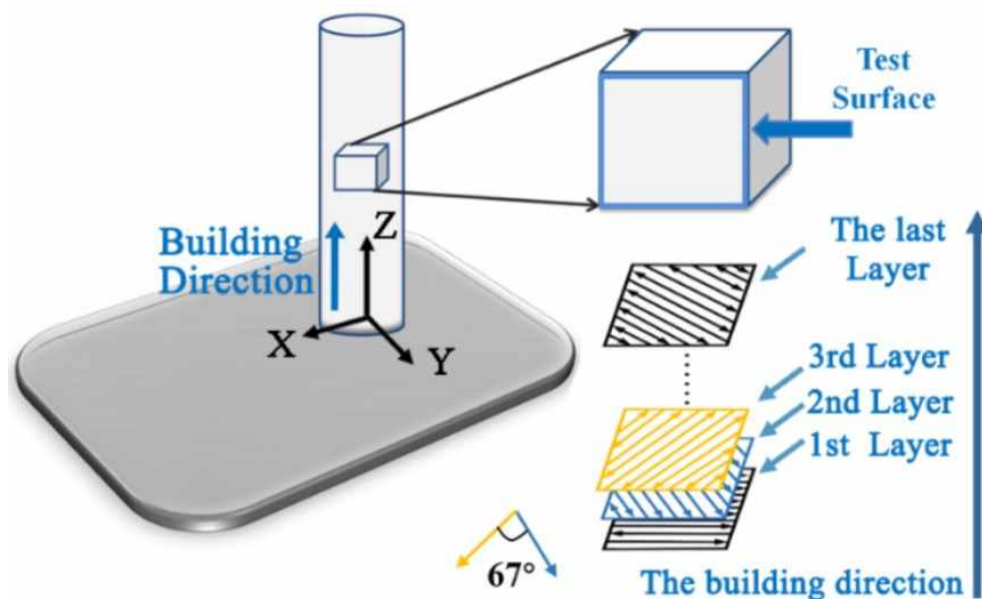


Рисунок 1 – Схематичне зображення зразків Ti-6Al-4V, виготовлених методами SLM та ЕВМ у вертикальному напрямку [1]

У таблиці 1 узагальнено основні орієнтаційні підходи до виготовлення зразків титанових сплавів методами SLM, ЕВМ та кування, що впливають на мікроструктуру та, відповідно, на корозійну поведінку у морському середовищі.

Таблиця 1 – Характеристика орієнтації виготовлення зразків титанових сплавів методами SLM, ЕВМ та кування [1-4]

Метод	Орієнтація будування	Типова структура	Корозійна поведінка
SLM	вертикальна	колоноподібні β -зерна, залишкова напруга	підвищена локальна корозійна активність
ЕВМ	горизонтальна	рівномірні $\alpha+\beta$ фази, менше напружень	краща стабільність та нижча щільність корозійного струму
Кування	ізотропна структура	рекристалізована $\alpha+\beta$ структура	найвища корозійна стійкість

Такий підхід дозволяє встановити зв'язок між орієтацією побудови, структурною неоднорідністю та електрохімічними характеристиками зразків. Зокрема, орієтація, що зумовлює формування колоноподібних зерен і залишкових напружень, сприяє утворенню мікропотенцій, які активізують локальні корозійні процеси. Натомість рекристалізована структура, характерна для кованих зразків, має підвищену стабільність у морському середовищі.

1.2. Фазовий склад та електрохімічна поведінка зразків Ti-6Al-4V, виготовлених різними методами

1.2.1 Фазовий склад: результати XRD-аналізу. У дослідженні [13] проведено рентгеноструктурний аналіз зразків сплаву Ti-6Al-4V, виготовлених за допомогою SLM, EBM і традиційного кування (ISF). Отримані дифрактограми (рис. 2, а) демонструють помітні відмінності у фазовому складі в залежності від технології обробки.

Зокрема, у SLM-зразку виявлено зсув піків у бік більших дифракційних кутів (рис. 2, b), що свідчить про наявність залишкової β -фази та внутрішніх напружень, зумовлених швидким охолодженням. Для зразка, виготовленого методом EBM, характерною є присутність α' -мартенситної фази, що формується в умовах помірного градієнта температур. У той час як кований зразок має стабільну двофазну структуру $\alpha+\beta$, типову для рівноважних умов охолодження. Таким чином, за результатами XRD-аналізу встановлено, що швидкість охолодження та теплова історія при адитивному виробництві значно впливають на фазовий склад і залишкові напруження [13].

Найбільший інтерес для порівняння становлять SLM та EBM, оскільки вони демонструють принципово різні фазові стани при друці Ti-6Al-4V, тоді як ковані зразки виступають еталоном.

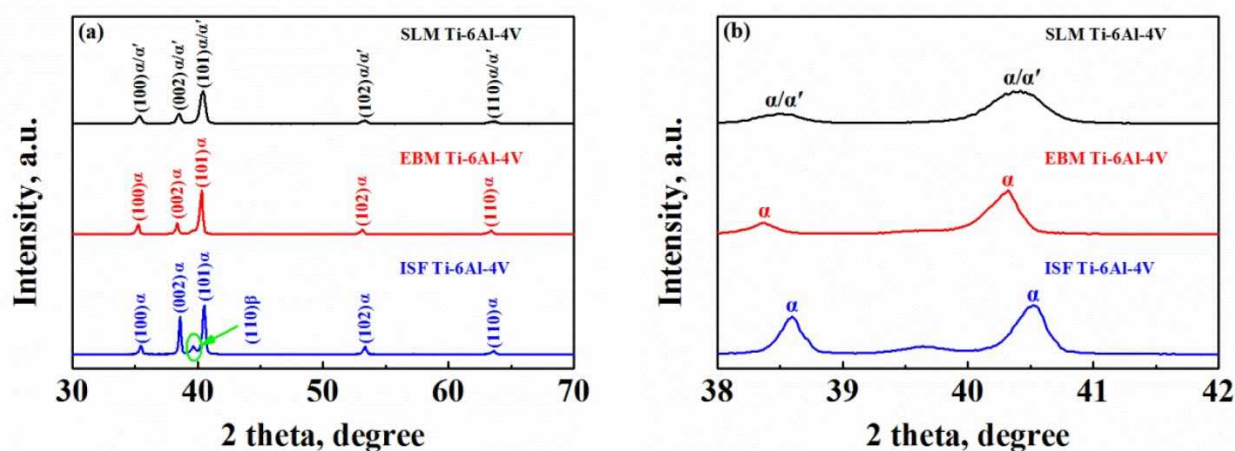


Рисунок 2 – (а) Дифрактограми зразків Ti-6Al-4V, виготовлених методами SLM, EBM і кування; (b) збільшений фрагмент ділянки кутів 38° – 42° з ідентифікованими фазовими відмінностями [13]

1.2.2 Аналіз методом електрохімічної імпедансної спектроскопії (EIS)

Метод електрохімічної імпедансної спектроскопії (EIS) є одним із найбільш інформативних способів дослідження корозійних процесів та характеристик пасивних плівок на поверхні металів і сплавів. У контексті досліджень корозійної стійкості 3D-друкованих титанових сплавів метод EIS дозволяє кількісно оцінити електрохімічні параметри, такі як опір заряду, ємність подвійного шару та властивості дифузії в оксидному шарі.

Проведені вимірювання в 3,5% розчині NaCl показали, що еквівалентні електричні схеми для аналізу імпедансних спектрів зазвичай містять послідовно-паралельні ланцюги резисторів та ємностей, що моделюють оксидний шар, електроліт та процеси на межі поділу фаз. Найчастіше використовуються схеми $R(QR)$ або $R(Q(R(QR)))$ залежно від складності пасивної плівки та наявності дифузійних обмежень.

Порівняння спектрів EIS для зразків, виготовлених методами WAAM, SLM та кування, свідчить про різний рівень захисної дії пасивних плівок. Зразки кованих титанових сплавів демонструють найвищий опір заряду (R_{ct}), що відповідає більш стабільній і щільній пасиваційній плівці, тоді як SLM-зразки мають найнижчий R_{ct} , що свідчить про більшу проникність плівки і вищу корозійну активність [11, 22, 23]. Таким чином, метод EIS дозволяє кількісно порівняти стабільність пасивного шару для різних технологій виробництва, що є критично важливим для морських умов експлуатації.

Додатково було виявлено, що термічна обробка WAAM-зразків сприяє збільшенню опору заряду та зниженню ємності оксидної плівки, що пов'язано з ущільненням структури та зменшенням дефектності оксидного шару.

Таким чином, метод EIS надає детальну інформацію про механізми корозії та якість захисних плівок на 3D-друкованих титанових сплавах, що є важливим для оптимізації технологічних режимів виготовлення та подальшої експлуатації виробів у морському середовищі.

1.3. Результати імпедансної спектроскопії (EIS)

Електрохімічна імпедансна спектроскопія (EIS) дозволяє глибше дослідити механізми захисту металу на межі поділу метал/електроліт, надаючи інформацію про електрохімічні процеси у пасивному стані. Аналіз Nyquist- та Bode-діаграм зразків Ti-6Al-4V, виготовлених методами SLM, EBM та кування, показав різну імпедансну поведінку у 3,5% розчині NaCl.

Згідно з даними Kim & Choi (2019) [11], максимальний опір заряду спостерігається у кованих зразків, що свідчить про найстабільніший пасивний шар. Зразки, виготовлені методом EBM, демонструють проміжні значення, тоді як найнижчі значення імпедансу характерні для SLM-зразків, що вказує на вищу проникність оксидного шару та наявність дефектів.

Подібні результати підтверджено також у дослідженнях A.S Kannan та ін. (2019) [23] та C.R. Clayton та ін. (2020) [24], де показано вплив мікроструктурних особливостей, зумовлених технологією виготовлення, на смісні та резистивні характеристики пасивного шару. Вплив мікроструктури на властивості пасивного шару особливо критичний для морських застосувань, де він визначає довговічність і надійність конструкцій. Таким чином, EIS-аналіз дозволяє не лише кількісно оцінити корозійну стійкість, а й виявити специфічні відмінності у поведінці пасивного шару залежно від методу адитивного виробництва.

1.4 Електрохімічні характеристики: аналіз потенціодинамічних кривих

Графіки потенціодинамічного поляризаційного тестування (рис. 3) в 3,5% розчині NaCl демонструють відмінності в корозійній поведінці залежно від методу виготовлення. Згідно з аналізом, SLM-зразок виявив найвищу корозійну активність, що проявляється в максимальному значенні струму корозії I_{cor} та найменшій стабільності пасивної плівки.

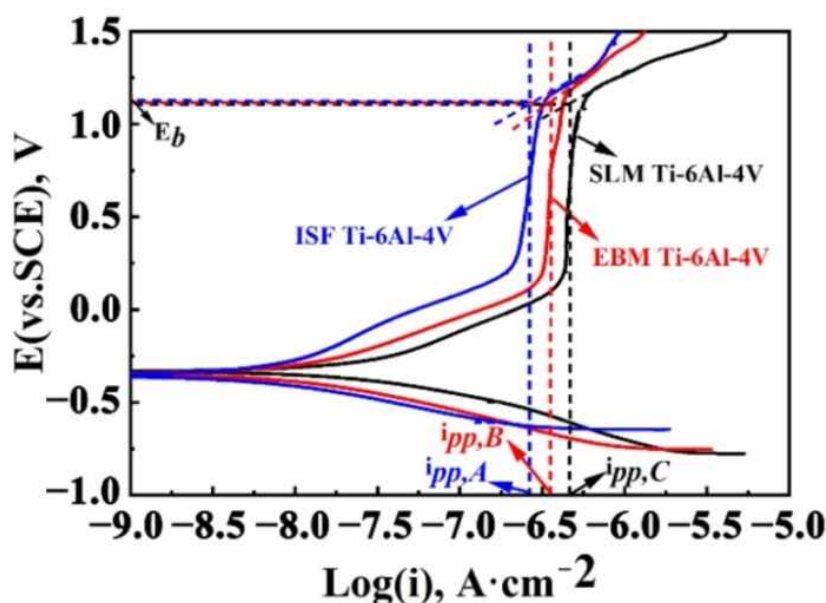


Рисунок 3 – Потенціодинамічні криві зразків Ti-6Al-4V, виготовлених методами SLM, EBM і кування, у 3,5% розчині NaCl [13]

Для зразка, отриманого методом електронно-променевого плавлення (EBM), значення I_{cor} є проміжним, що свідчить про часткове зниження дефектності порівняно з SLM, але все ще нижчу ефективність пасивації, ніж у кованого зразка.

Найкращу корозійну стійкість демонструє кований зразок (ISF), який має найнижчий рівень корозійного струму та ширший пасивний інтервал. Це вказує на однорідну мікроструктуру, знижену

пористість і більш стабільну оксидну плівку, що формується на поверхні в умовах морського середовища [13].

1.5. Порівняльна електрохімічна характеристика зразків у морському середовищі

Для оцінки впливу методу виготовлення на електрохімічні властивості сплаву Ti-6Al-4V у 3,5% розчині NaCl в табл. 2 систематизовано порівняльні показники потенціалу корозії, щільності корозійного струму та ширини пасивного діапазону. Було встановлено, що найвищу корозійну стійкість демонструє кований зразок, що зумовлено ефективнішою пасивацією поверхні та нижчим рівнем мікроструктурної гетерогенності [13].

Таблиця 2 – Електрохімічні характеристики зразків Ti-6Al-4V у 3.5% NaCl [13]

Метод виготовлення	Потенціал корозії (E_{corr}), мВ	Струм корозії (i_{corr}), $\mu\text{A}/\text{cm}^2$	Пасивний діапазон
SLM	-379	0.96	вузький
EBM	-316	0.58	середній
ISF (ковка)	-232	0.36	широкий

Згідно з даними таблиці, ковані зразки мають найменшу щільність корозійного струму та найбільш позитивний корозійний потенціал, що вказує на кращу здатність до пасивації. Зразки, виготовлені методом EBM, демонструють проміжні значення, а SLM-зразки — найгірші показники, що пов'язано з вищою дефектністю структури та залишковими напруженнями, які інтенсифікують корозійні процеси.

У рамках дослідження Yu Z. та ін. [13] було здійснено комплексне порівняння мікроструктури та електрохімічних характеристик зразків сплаву Ti-6Al-4V, виготовлених методом SLM, EBM та куванням. За допомогою SEM-аналізу встановлено відмінності у морфології зерен, фазовому складі та наявності дефектів поверхні, що суттєво впливають на формування пасивної плівки.

Зокрема, виявлено, що SLM-зразки характеризуються дрібнозернистою α -фазою з великою щільністю меж, тоді як у зразках, отриманих EBM, спостерігається грубозерниста колоноподібна структура з вираженою текстурою. Для кованих зразків притаманна рівноважна, пластинчаста структура з мінімальною пористістю. Ці структурні особливості було зіставлено з результатами електрохімічного тестування в 3.5% розчині NaCl, що дозволило виявити чітку кореляцію між мікроструктурою та корозійною стійкістю. Таким чином, результати дослідження [13] засвідчили чіткий зв'язок між технологією виготовлення сплаву Ti-6Al-4V та його електрохімічною поведінкою в умовах хлоридного середовища.

Зразки, отримані методом SLM, характеризувалися підвищеним струмом корозії та вузьким пасивним діапазоном, що свідчить про нестабільність пасивної плівки внаслідок наявності залишкових напружень, пористості та дрібнозернистої β -фази. Водночас EBM-зразки демонстрували помірну стійкість, що пов'язано з грубішою колоноподібною структурою та меншою кількістю дефектів.

Найвищу корозійну стійкість виявлено у кованих зразках, для яких притаманна рівномірна, збалансована мікроструктура з низьким рівнем мікрODEфектів і стабільною пасивною плівкою. Узагальнення показників потенціалу та струму корозії, а також ширини пасивного діапазону дозволяє дійти висновку, що саме мікроструктурна однорідність і якість поверхні відіграють ключову роль у формуванні антикорозійної поведінки титанових сплавів, незалежно від номінального хімічного складу [13].

1.6 Огляд корозійної поведінки Ti-6Al-4V, виготовленого методом WAAM

У дослідженні Marques та ін. (2023) [18] проведено комплексний огляд корозійної поведінки матеріалів, виготовлених методом Wire and Arc Additive Manufacturing (WAAM), із особливим акцентом на титановий сплав Ti-6Al-4V. Автори узагальнили дані щодо впливу технологічних параметрів WAAM на формування мікроструктури та її подальший вплив на електрохімічні властивості сплаву. Зазначено, що процес WAAM забезпечує формування мікроструктурного стану, що відрізняється від традиційних методів обробки, зокрема, характерним розподілом α - та β -фаз, текстурою зерен і розміром кристалітів.

Ці мікроструктурні особливості істотно впливають на корозійну поведінку сплаву в агресивних середовищах, зокрема в 3.5% розчині NaCl, моделюючому морські умови [18].

Поляризаційні дослідження свідчать, що зразки, виготовлені методом WAAM, демонструють задовільний пасивний діапазон і потенціал корозії, який порівнянний з традиційними кованими аналогами. Водночас відзначається підвищена корозійна активність у випадках дефектів, пор, і неоднорідностей мікроструктури, характерних для адитивного виробництва [18]. Імпедансні спектри (EIS) дозволяють розмежувати процеси пасивації та локальної корозії, демонструючи, що пасивний шар на WAAM-зразках має достатню стабільність і електрохімічну інертність у морському середовищі.

Узагальнено, що основними факторами, що визначають корозійну стійкість WAAM-деталей Ti-6Al-4V, є мікроструктурна гетерогенність, наявність технологічних дефектів, а також ефективність формування пасивного оксидного шару. Ці фактори у сукупності з контролем технологічних параметрів WAAM дозволяють оптимізувати експлуатаційні характеристики сплаву в агресивних середовищах [19].

1.7 Потенційні застосування деталей із титану та корозійна поведінка WAAM-деталей Ti-6Al-4V

1.7.1 Потенційні деталі з титанових сплавів у морській індустрії

Титанові сплави, зокрема Ti-6Al-4V, завдяки їхній високій міцності, легкості та відмінній корозійній стійкості, широко застосовуються для виготовлення різних конструктивних елементів у морській, авіаційній та водній транспортній галузях. До таких деталей належать кріпильні гвинти, корпусні елементи насосів, фланці трубопроводів, а також складні корпуси насосів і клапанів [18, 19]. Адитивні технології, зокрема WAAM, дозволяють виготовляти компоненти складної геометрії з меншою вагою та покращеними експлуатаційними властивостями, зокрема корозійною стійкістю при застосуванні відповідної післяобробки [20-22].

1.7.2 Огляд графічних результатів корозійних випробувань WAAM виготовлених титанових виробів

Для комплексного аналізу корозійних властивостей та мікроструктури деталей із титанових сплавів, виготовлених методом WAAM, у дослідженні [18] наведено тривимірну діаграму орієнтації зразків WAAM-фабрикованої стінки Ti-6Al-4V, поляризаційні криві та імпедансні спектри (Nyquist і Bode) для оцінки електрохімічної поведінки, а також порівняння корозійної стійкості WAAM-деталей із кованими зразками у розчині 3,5 % NaCl.

Ці матеріали дозволяють всебічно оцінити вплив технології WAAM на корозійну поведінку титанових сплавів, з урахуванням мікроструктурної анізотропії, орієнтації зерен, наявності технологічних дефектів та особливостей електрохімічної взаємодії з хлоридвмісним середовищем, що має принципове значення для прогнозування довговічності конструкцій у морських умовах.

Показано тривимірну модель стінки (рис. 4), виготовленої методом WAAM із сплаву Ti-6Al-4V, з позначенням орієнтації зразків, що використовувалися для корозійних випробувань. Визначення площин зразків (вертикальна, горизонтальна, та нормальна до шару) є критичним для оцінки анізотропії корозійної поведінки, зумовленої напрямком наростання швів та зерновою структурою. Такий підхід забезпечує більш комплексну оцінку впливу мікроструктурних особливостей WAAM на електрохімічні характеристики.

Аналіз поляризаційних кривих та імпедансних діаграм

Для оцінки електрохімічної поведінки зразків застосовано метод електрохімічної імпедансної спектроскопії (EIS) — неруйнівний метод, що дозволяє аналізувати опір пасивного шару та внутрішні електрохімічні процеси за допомогою імпедансних діаграм (Nyquist, Bode).

Автори виявили, що поляризаційні криві зразків Ti-6Al-4V, виготовлених WAAM, у 3.5% розчині NaCl демонструють стабільну пасивацію, проте з різницею у потенціалі корозії залежно від орієнтації зразка (рис. 5, а). Імпедансні дані (Nyquist та Bode діаграми, (рис. 5, b і рис. 5, c) і (рис. 6) підтверджують формування стійкого пасивного шару. Еквівалентна електрична схема (ЕЕС), застосована для моделювання імпедансних характеристик, показує відмінності у товщині та щільності пасивної плівки, що корелює з мікроструктурною неоднорідністю.

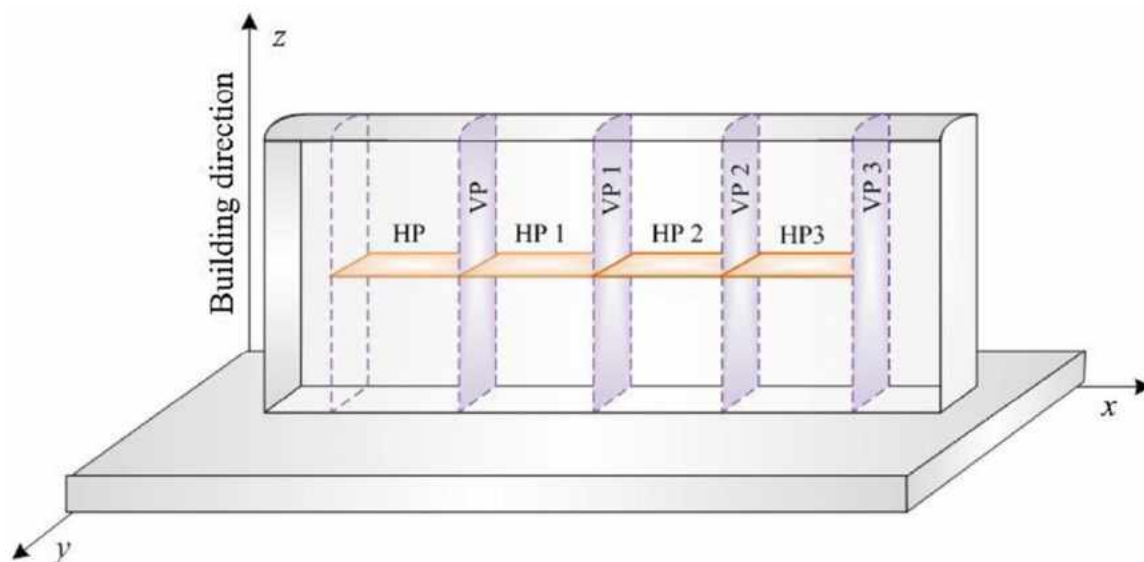
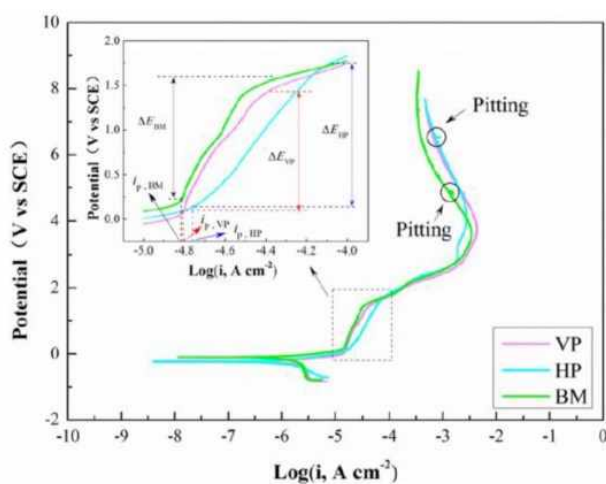
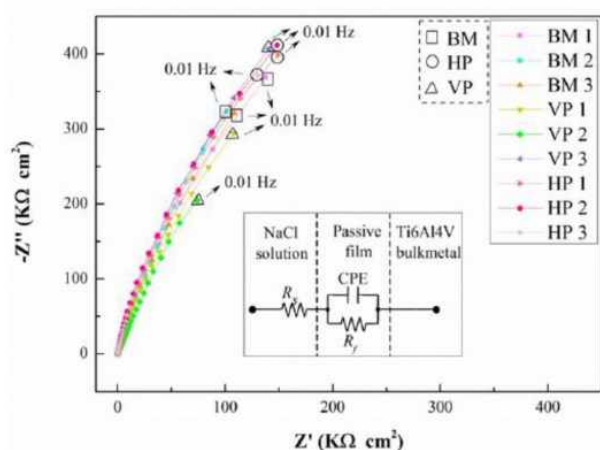


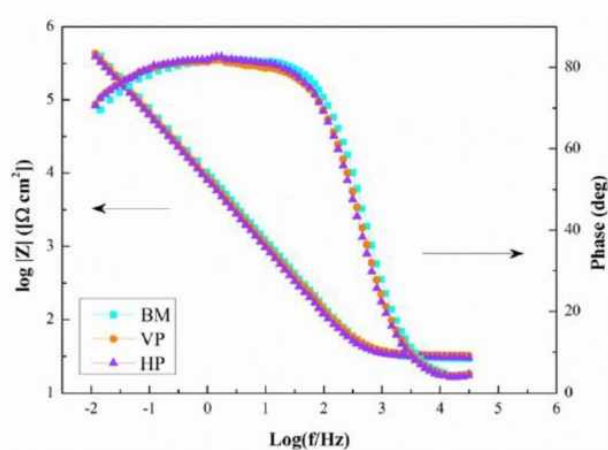
Рисунок 4 – Схематичне зображення орієнтації зразків WAAM [18, 19]



(a)



(b)



(c)

Рисунок 5 – Аналіз поляризаційних кривих та імпедансних діаграм [18, 19]

Результати порівняльного аналізу корозійної стійкості зразків сплаву Ti-6Al-4V, виготовлених методом WAAM, та кованих зразків у 3,5 % розчині NaCl наведені на рис. 6. Отримані дані свідчать про дещо нижчу корозійну стійкість WAAM-деталей, що обумовлено особливостями їхньої мікроструктури,

зокрема збільшеним розміром зерен, наявністю зон повторного термічного впливу між шарами, а також підвищеною кількістю структурних дефектів.

Наведені результати демонструють визначальний вплив термічного циклу процесу WAAM на корозійну поведінку матеріалу в агресивному середовищі. Показано, що просторово-часовий розподіл температури під час адитивного нарощування формує мікроструктурну неоднорідність, зокрема варіації розміру зерен, фазового складу та стану міжшарових зон, які безпосередньо відображаються на електрохімічній активності сплаву. Водночас встановлено, що оптимізація технологічних параметрів WAAM, зокрема регулювання тепловкладення, швидкості наплавлення та міжшарових термічних умов, дозволяє знизити інтенсивність корозійних процесів і суттєво підвищити корозійну стійкість адитивно виготовлених деталей, наближаючи її до рівня традиційно деформованих титанових сплавів.

Таким чином, корозійна поведінка адитивно виготовленого сплаву Ti-6Al-4V визначається не лише хімічним складом, а й ієрархією мікроструктурних чинників, сформованих у процесі WAAM, включаючи розмір первинних β -зерен, морфологію α -фази та неоднорідність термічної історії між шарами. Це підтверджує ключову роль керування мікроструктурою як інструменту підвищення експлуатаційної надійності адитивних титанових деталей у корозійно активних середовищах.

1.8 Висновки щодо впливу мікроструктури і технології WAAM на корозійну поведінку

Проведений аналіз підтверджує, що корозійна поведінка WAAM-деталей Ti-6Al-4V істотно залежить від орієнтації зразків відносно напрямку наростання швів, а також від параметрів формування мікроструктури, зокрема зернової морфології та гомогенності пасивного шару. Визначення оптимальних умов друку та подальша постобробка є ключовими для досягнення конкурентоспроможної корозійної стійкості таких виробів.

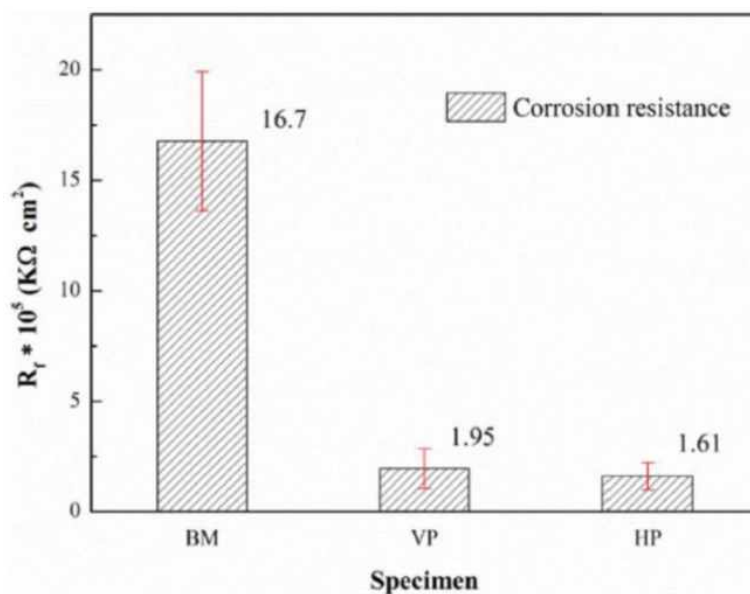


Рисунок 6 – Аналіз поляризаційних кривих та імпедансних діаграм [19]

Згідно з даними, наведеними у дослідженні Wu та ін. [19], зразки Ti-6Al-4V, виготовлені методом WAAM, продемонстрували кращі корозійні характеристики у 3,5 % розчині NaCl порівняно з гарячекатаними аналогами. Зокрема, щільність корозійного струму I_{corr} ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$) для WAAM-зразків становила $154,12 \text{ мкА}/\text{см}^2$, тоді як для гарячекатаних — $611,62 \text{ мкА}/\text{см}^2$. Швидкість корозії R_{corr} (mm/year) відповідно становила $3,43 \text{ мм}/\text{рік}$ та $13,62 \text{ мм}/\text{рік}$, що свідчить про понад чотириразове зменшення швидкості корозії у WAAM-зразків. Незначне зниження потенціалу корозії E_{corr} (V) для WAAM-зразків ($-1,60 \text{ В}$ проти $-1,56 \text{ В}$) не нівелює загальної переваги в корозійній стійкості. Крім того, Wu та ін. [19] відзначили анізотропію корозійної поведінки залежно від орієнтації побудови шарів: поверхні, перпендикулярні напрямку нарощування, демонстрували на 15–20 % нижчу щільність корозійного струму. Автори пояснюють це різною щільністю зерен α -фази та орієнтацією β -фазових

меж, що впливають на формування пасивного шару. Також встановлено, що зони плавлення, утворені між шарами, мають більш однорідний оксидний шар, що сприяє підвищенню бар'єрних властивостей поверхні.

Отримані результати узгоджуються з аналізом мікроструктури, де WAAM-зразки демонстрували більш щільний та однорідний пасивний шар. Автори (Fang, X.), [20] також узагальнили вплив технологічних параметрів WAAM на схильність до корозії (табл. 3), де систематизовано ефекти струму, напруги, швидкості подачі дроту, швидкості переміщення та післяобробки. Таке узагальнення дозволяє підбирати режими на основі їх впливу на формування мікроструктури й дефектності, що сприяє підвищенню стійкості титанових виробів у морському середовищі.

Таблиця 3 – Розраховані корозійні параметри з поляризаційних кривих [20]

Зразок	I_{corr} ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	E_{corr} (V)	R_{corr} (mm/year)
Гарячекатаний	611,62	-1,56	13,62
WAAM	154,12	-1,60	3,43

Згідно з узагальненими положеннями Lin та ін. (2021), WAAM-технологія має значний потенціал для виготовлення відповідальних титанових конструкцій, що збігається з даними експериментальних досліджень корозійної поведінки [21], підтверджуючи актуальність подальших досліджень з оптимізації структури WAAM-виробів.

1.10 Експериментальна оцінка пасиваційних плівок на адитивно виготовлених титанових сплавах

Результати досліджень Kannan A.S., Clayton C.R. [23, 24] показали, що характеристики пасивних оксидних плівок є ключовим фактором, який формує корозійну стійкість титанових сплавів, отриманих адитивним виробництвом. За даними [23], застосування електрохімічної імпедансної спектроскопії дозволило встановити зростання опору переносу заряду у зразках з більш щільною мікроструктурою, що свідчить про ефективнішу пасивацію. Водночас, робота [24] показала, що оксидні плівки на поверхні адитивно виготовлених Ti-сплавів характеризуються меншою товщиною та неоднорідністю порівняно з традиційними аналогами, що обумовлює їх нижчу захисну здатність. Важливим практичним результатом є підтвердження позитивного впливу термічної обробки після друку, яка сприяє ущільненню структури оксидного шару та підвищенню його бар'єрних властивостей. Це дозволяє розглядати оптимізацію режимів друку та постобробки як ключовий інструмент для забезпечення стабільної корозійної поведінки титанових сплавів у морських умовах експлуатації.

За результатами електрохімічних випробувань [23], опір переносу заряду адитивно виготовлених Ti-сплавів зростав у 1,5–2 рази після оптимізації параметрів процесу, що свідчить про суттєве покращення пасиваційних властивостей оксидного шару. Узагальнені дані [24] підтверджують, що товщина та однорідність пасивних плівок у 3D-друкованих зразків є гіршими порівняно з традиційними матеріалами, однак проведення термічної обробки забезпечує підвищення корозійної стійкості на 25–40 %.

1.11 Аналіз сучасних експериментальних підходів

У ряді сучасних досліджень [1–3] було проведено порівняння корозійної поведінки титанових сплавів Ti-6Al-4V, виготовлених методами WAAM, SLM та традиційної обробки. Встановлено, що корозійна стійкість матеріалу значною мірою визначається мікроструктурою та рівнем дефектності, які залежать від технології виробництва та умов термічної обробки. Зразки, виготовлені методом WAAM, зазвичай демонструють прийнятну корозійну стійкість, тоді як SLM-зразки можуть мати більш високу дислокаційну щільність та внутрішні напруження, що впливає на електрохімічну поведінку. Оптимізація режимів друку та постобробки є ключовим фактором підвищення стійкості Ti-6Al-4V у морських умовах [Dai, 2016; Yang, 2017; Savchuk, 2020; Romero Reséndiz, 2024] [1, 2, 3, 28].

Поряд із механічними характеристиками важливо враховувати й корозійну поведінку матеріалу. У ряді сучасних досліджень проведено порівняння корозійної стійкості титанових сплавів Ti-6Al-4V, виготовлених методами електронно-променевого плавлення (EBM) та селективного лазерного плавлення (SLM) після обробки гарячим ізостатичним пресуванням (HIP).

Зокрема, у роботі Reséndiz та ін. (2024) [28] показано, що зразки, отримані методом EBM, демонструють вищу корозійну стійкість порівняно з SLM-зразками. Це пояснюється більш однорідною

мікроструктурою та меншою кількістю дефектів у зразках EBM. Автори відзначають, що SLM-зразки мають більшу пористість та внутрішні напруження, що сприяють підвищеній корозійній активності.

Узагальнюючи наведені результати, можна зазначити, що метод EBM забезпечує кращу корозійну стійкість за умов оптимізації процесу виготовлення та післяобробки. Водночас метод SLM може демонструвати вищу або нижчу стійкість залежно від мікроструктурних особливостей та рівня дефектності.

Подібні результати підтверджують інші дослідження, де показано, що корозійна стійкість титанових сплавів Ti-6Al-4V значною мірою залежить від технології адитивного виробництва, умов термообробки та рівня внутрішніх дефектів [1, 2, 3, 28]. Зокрема, зразки, виготовлені методом WAAM або EBM з подальшою оптимізованою термообробкою, демонструють більш однорідну мікроструктуру та зменшені внутрішні напруження, що сприяє підвищенню корозійної стійкості у морському середовищі.

Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямку. У результаті проведеного аналізу встановлено, що технологія дрово-дугового адитивного виробництва (WAAM) титанових сплавів, зокрема Ti-6Al-4V, відкриває значні можливості для виготовлення великогабаритних конструкцій з підвищеною геометричною складністю для використання у морській галузі. Однак специфіка термічного циклу процесу зумовлює формування анізотропної мікроструктури, наявність зон повторного нагріву та дефектів, що безпосередньо впливає на електрохімічну поведінку матеріалу в умовах хлоридвмісного середовища.

Аналіз сучасних публікацій свідчить про підвищений науковий інтерес до питання корозійної стійкості WAAM-виробів. Дослідження поляризаційних характеристик, імпедансної відповіді та мікроструктури показують, що за належного добору параметрів процесу можливо досягти електрохімічних властивостей, порівнянних із традиційно обробленими сплавами. Перспективним напрямом є впровадження цілеспрямованих методів управління мікроструктурою шляхом термомеханічної або локалізованої термообробки, а також використання легуючих добавок для покращення пасиваційних властивостей поверхні.

Особливу увагу приділено порівнянню WAAM із іншими поширеними методами адитивного виробництва, зокрема селективним лазерним плавленням (SLM) та електронно-променевим плавленням (EBM). Установлено, що WAAM забезпечує вищу продуктивність і придатність для виготовлення великогабаритних конструкцій, проте поступається за точністю та щільністю сформованої структури. Водночас зразки, виготовлені методами SLM і EBM, демонструють кращу однорідність і вищу корозійну стійкість унаслідок дрібнозернистої структури, але менш придатні для морської важкої інженерії через обмеження за розмірами. Це порівняння дозволяє визначити доцільність застосування WAAM саме для суднобудівної галузі, за умов оптимізації процесу з урахуванням його специфіки.

У результаті огляду літературних джерел встановлено, що мікроструктура титанових сплавів, сформована під час адитивного виготовлення, значною мірою визначає їхню корозійну поведінку в умовах морського середовища. Зокрема, WAAM-технологія дозволяє отримати достатньо стійкі до корозії зразки, особливо після проведення термічної обробки. SLM-зразки демонструють вищу активність корозійних процесів через напруження та дефекти структури.

З метою покращення експлуатаційних характеристик титанових виробів, що застосовуються у суднобудуванні, доцільним є:

- оптимізація режимів термічної обробки після адитивного виготовлення;
- впровадження технологій легування для зменшення щільності корозійного струму;
- врахування особливостей структури, притаманних кожному з методів 3D-друку, при проектуванні відповідальних конструкцій.

Таким чином, результати аналізу підтверджують перспективність застосування адитивних технологій для виготовлення титанових деталей, що працюють у морському середовищі, за умов грамотного контролю структури та постобробки.

Подальші дослідження доцільно зосередити на розробці уніфікованих критеріїв оцінювання корозійної стійкості WAAM-деталей, з урахуванням умов морської експлуатації, впливу гідродинамічного навантаження, біозабруднення та дії перемінних потенціалів. Важливим також є вдосконалення технологій постобробки поверхні, зокрема використання лазерної обробки, механічного шліфування та покриттів, що підвищують довговічність конструкцій на водному транспорті.

ЛІТЕРАТУРА

1. Dai N., Zhang L.-C., Zhang J., Chen Q., Wu M. Corrosion behavior of selective laser melted Ti 6Al 4V alloy in NaCl solution // *Corrosion Science*. – 2016. – Vol. 102. – P. 484–489. – DOI: 10.1016/j.corsci.2015.10.041. [in English]
2. Yang J., Yang H., Yu H., Wang Z., Zeng X. Corrosion behavior of additively manufactured Ti 6Al 4V alloy in NaCl solution // *Metallurgical and Materials Transactions A*. – 2017. – Vol. 48. – P. 3583–3593. – DOI: 10.1007/s11661-017-4087-9. [in English]
3. Савчук В.В., Петренко І.М., Іваненко Л.П. Корозійна стійкість титанових сплавів у морському середовищі: монографія. – Київ : Наукова думка, 2020. – 256 с.
4. Шевчук І.В., Петренко О.М., Коваленко С.П. Матеріалознавство суднобудування: проблеми корозії та зносостійкості // *Вісник суднобудування*. – 2020. – № 3. – С. 45–52.
5. Тараненко С.В., Кириченко О.С., Колесник В.В., Костюченко В.І., Пріступа С.В., Пастух О.В., Голубєва С.М. Моделювання стаціонарного теплового поля струмопровідних шин судових ГРЩ // *Водний транспорт*. – 2021. – № 3 (34). – С. 13–21.
6. 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*. – 2023. – Т. 34 (73). – № 1. – С. 256–263. – DOI: <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.1/39>.
7. Yadav S., Mukherjee M., Singh D. Review of current challenges in the implementation of WAAM for Ti-6Al-4V alloys // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2024. – 133. – P. 2103–2130, DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-024-13958-1>.
8. Bermingham M.J., Nicastro L., Kent D., Chen Y., and Dargusch M.S. Optimising the mechanical properties of Ti-6Al-4V components produced by wire + arc additive manufacturing with post-process heat treatments // *Journal of Alloys and Compounds*. 2018. – 753, 15 July. – P. 247–255 <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.04.158> [in English].
9. Fernandez L., and Martinez J. Laser surface treatment combined with anodizing for enhanced corrosion resistance of additively manufactured titanium alloys // *Corrosion Engineering, Science and Technology*. – 2023. – Vol. 58, № 3. – P. 245–256. – DOI: <https://doi.org/10.1080/1478422X.2023.2177461>. [in English].
10. Wang, Z., and Li, Q. Electrochemical evaluation of corrosion resistance in AM titanium alloys under simulated marine conditions // *Electrochimica Acta*, 2020. – 337, 135710. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2020.135710> [in English].
11. Kim, Y., and Choi, S. Accelerated corrosion testing of WAAM Ti-6Al-4V using electrochemical impedance spectroscopy // *Materials and Design*. 2019. – 180, 107947. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.107947> [in English].
12. Shao, Z., Wu, B., Li, P., Ma, W., Tan, H., & Li, H. Mechanism of corrosion protection in reinforced Ti-6Al-4V alloy by wire arc additive manufacturing using magnetic arc oscillation // *Materials Characterization*. 2023. 199 – 112844. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2023.112844> [in English].
13. Yu, Z., Chen, Z., Qu, D., Qu, S., Wang, H., Zhao, F., Zhang, C., Feng, A., and Chen, D. (2022). Microstructure and electrochemical behavior of a 3D-printed Ti-6Al-4V alloy. *Materials*, 15(13), 4473. <https://doi.org/10.3390/ma15134473> [in English].
14. Alvarez, J.F.F., Gomez, F.J.R., Bustamante, E.O., and Llongueras, J.G. Study of the electrochemical behavior of a Ti6Al4V alloy modified by heat treatment and chemical conversion // *Surface and Coatings Technology*. – 2017. 315, 498–508. [in English].
15. Longhitano G.A., Arenas M.A., Conde A., Larosa M.A., Jardini A.L., Zavaglia C.A. de C. and Damborenea J.J. Heat treatments effects on functionalization and corrosion behavior of Ti-6Al-4V ELI alloy made by additive manufacturing // *Journal of Alloys and Compounds*, 2018. – 765, P. 961–968; <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.06.319> [in English].
16. Yun Bai, Xin Gai, Shujun Li, Lai-Chang Zhang, Yujing Liu, Yulin Hao, Xing Zhang, Rui Yang, and Yongbo Gao Improved corrosion behaviour of electron beam melted Ti-6Al-4V alloy in phosphate buffered saline // *Corrosion Science*. 2017. – 123, 15, P. 289–296, <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2017.05.003> [in English].
17. Zhan Z., Zhang Q., Wang S., Liu X., Zhang H., Sun Z., Ge Y. and Du N., Comparison on the Electrochemical Corrosion Behavior of Ti-6Al-4V Alloys Fabricated by Laser Powder Bed Fusion and Casting // *Materials*, 2024. – 17(13), 3322; <https://doi.org/10.3390/ma17133322> [in English].
18. Marques, D. A., Oliveira, J. P., and Baptista, A. C. A short review on the corrosion behaviour of wire and arc additive manufactured materials // *Metals*, 2023. – 13(4), 641. <https://doi.org/10.3390/met13040641> [in English].
19. Wu B., Pan Z., Li S., Cuiuri D., Ding D., and Li H. The anisotropic corrosion behaviour of wire arc additive manufactured Ti-6Al-4V alloy in 3.5% NaCl solution // *Corrosion Science*, 2018. – 137, 176–183. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2018.03.047> [in English].

20. Fang, X., Yang, J.-N., Wang, S., Wang, C., Huang, K., Li, H., and Lu, B. Additive manufacturing of high performance AZ31 magnesium alloy with full equiaxed grains: Microstructure, mechanical property, and electromechanical corrosion performance // *Journal of Materials Processing Technology*, 2022. – 200, 117430. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2021.117430> [in English].
21. Lin, Z., Song K., and Yu X. A review on wire and arc additive manufacturing of titanium alloy // *Journal of Manufacturing Processes* (2021). – 70(3), 24–45 DOI:10.1016/j.jmapro.2021.08.018 [in English].
22. Jin, B., Wang, Q., Zhao, L., Pan, A., Ding, X., Gao, W., Song, Y., and Zhang, X. A review of additive manufacturing techniques and post-processing for high-temperature titanium alloys // *Metals*, 2023. – 13(8), 1327. <https://doi.org/10.3390/met13081327>[in English].
23. Kannan A.S., Gopi D., Kavitha L., and Surendiran M. Electrochemical impedance spectroscopic analysis of passive films formed on titanium alloys processed by additive manufacturing // *Journal of Electrochemical Science and Technology*. 2019. - 10(2), 123–132. <https://doi.org/10.5229/JECST.2019.10.2.123>[in English].
24. Clayton C.R., Lu Y., and Rao G. Passive film structure and its relationship to corrosion resistance of Ti alloys fabricated by 3D printing technologies // *Corrosion Reviews*, (2020). - 38(4), 365–378. <https://doi.org/10.1515/corrrev-2020-0024>[in English].
25. Hemmasian Etefagh, Ali, Corrosion Performance of Additively Manufactured Alloys and Hot Corrosion (2021). LSU Doctoral Dissertations. 5452. https://digitalcommons.lsu.edu/gradschool_dissertations/5452[in English].
26. Zhao X., Li S., Zhang M., Liu Y., Sercombe T., Wang S., Hao Y., Yang R., and Murr L.E. Comparison of the microstructures and mechanical properties of Ti-6Al-4V fabricated by selective laser melting and electron beam melting, *Materials and Design*, 2016. - 95, no 11. - P. 21–31 <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.12.135>[in English].
27. Ali Hemmasian Etefagh Corrosion behavior of Additively Manufactured Ti-6Al-4V parts and the effect of post. 18th MIE Graduate Student Conference April 6, 2019. P. 21–22.
28. Liliana Romero Reséndiz, Tonantzin Sánchez Cano, Muhammad Naeem, Asif Ur Rehman, Elmas Salamci, Vianey Torres Mendoza, Eduardo Degalez Duran, Lourdes Bazán Díaz & Metin U. Salamci Mechanical and Electrochemical Properties Comparison of Additively Manufactured Ti-6Al-4V Alloys by Electron Beam Melting and Selective Laser Melting // *Journal of Materials Engineering and Performanc.* 2024 Volume 33. – P. 9028–9038, <https://doi.org/10.1007/s11665-024-09486-4>[in English].
29. Wenbin Qiu, Yongqiang Wei Aijun Chen, Hao Deng, Lvjun Zhou, Hanyang Zuo, Longqing Chen, Zuxi Xia, Hui Wangd and Jun Tang Corrosion behavior of additive manufactured Ti-6Al-4V in sulfamic acid cleaning solution // *New Journal of Chemistry*, 2025 45, 12345–12356. <https://doi.org/10.1039/D5NJ02817E>[in English].
30. Hugo Mora-Sanchez, Miguel Collado-Vian, Marta Mohedano, Raúl Arrabal and Endzhe Matykina Corrosion of an Additively Manufactured Ti6Al4V Alloy in Saline and Acidic // *Media Materials* 2024, 17(3), 712. <https://doi.org/10.3390/ma17030712>[in English].

REFERENCES

1. Dai, N., Zhang, L.-C., Zhang, J., Chen, Q., and Wu, M. (2016). Corrosion behavior of selective laser melted Ti-6Al-4V alloy in NaCl solution. *Corrosion Science*, 102, 484–489. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2015.10.041>[in English].
2. Yang, J., Yang, H., Yu, H., Wang, Z., and Zeng, X. (2017). Corrosion behavior of additively manufactured Ti-6Al-4V alloy in NaCl solution. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 48, 3583–3593. <https://doi.org/10.1007/s11661-017-4087-9>[in English].
3. Savchuk, V. V., Petrenko, I. M., and Ivanenko, L. P. (2020). Koroziynna stijkist' tytanovykh splaviv u mors'komu seredovyshchi [Corrosion resistance of titanium alloys in the marine environment]. Kyiv: *Naukova Dumka*, 2020. – 256 p. [in Ukrainian].
4. Shevchuk, I. V., Petrenko, O. M., and Kovalenko, S. P. (2020). Materialoznavstvo sudnobuduvannia: problemy koroziiji ta znosostijkosti [Materials Science in Shipbuilding: Problems of Corrosion and Wear Resistance]. *Visnyk Sudnobuduvannia* (Bulletin of Shipbuilding), (3), 45–52. [in Ukrainian].
5. Taranenko, S. V., Kyrychenko, O. S., Kolesnyk, V. V., Kostiuchenko, V. I., Prystupa, S. V., Pastukh, O. V., and Holubieva, S. M. (2021). Modeliuvannia statsionarnoho teplovoho polia strumoprovodnykh shyn sudnovykh HRSH [Modeling of the stationary thermal field of current-carrying busbars of shipboard main switchboards]. *Vodnyi Transport*, (3)34, 13–21. [in Ukrainian].
6. Kyrychenko, O. S. (2023). Porivnialnyi analiz kharakterystyk termoelektrychnykh moduliv z riznymi heometrychnymi formamy napivprovodnykiv dlia elektroobladnannia transportu [Comparative analysis of characteristics of thermoelectric modules with different geometric shapes of semiconductors for transport electrical equipment]. *Scientific*

Notes of V. I. Vernadsky Taurida National University. Series: Technical Sciences, 34(73)1, 256–263. <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.1/39> [in Ukrainian].

7. Yadav S., Mukherjee M. and Singh D. (2024). Review of current challenges in the implementation of WAAM for Ti-6Al-4 V alloys. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 133, P. 2103–2130, DOI <https://doi.org/10.1007/s00170-024-13958-1> [in English].

8. Bermingham M.J., Nicastro L., Kent D., Chen Y., and Dargusch M.S. (2018). Optimising the mechanical properties of Ti-6Al-4V components produced by wire + arc additive manufacturing with post-process heat treatments. *Journal of Alloys and Compounds*, 753, 15, P. 247–255 <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.04.158> [in English].

9. Fernandez L., and Martinez J. (2023). Laser surface treatment combined with anodizing for enhanced corrosion resistance of additively manufactured titanium alloys *Corrosion Engineering. Science and Technology*. Vol. 58, no 3. P. 245–256. <https://doi.org/10.1080/1478422X.2023.2177461>. [in English].

10. Wang, Z., and Li, Q. (2020). Electrochemical evaluation of corrosion resistance in AM titanium alloys under simulated marine conditions. *Electrochimica Acta*, 337, 135710. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2020.135710> [in English].

11. Kim, Y., and Choi, S. (2019). Accelerated corrosion testing of WAAM Ti-6Al-4V using electrochemical impedance spectroscopy. *Materials and Design*, 180, 107947. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.107947> [in English].

12. Shao, Z., Wu, B., Li, P., Ma, W., Tan, H., & Li, H. (2023). Mechanism of corrosion protection in reinforced Ti-6Al-4V alloy by wire arc additive manufacturing using magnetic arc oscillation. *Materials Characterization*, 199, 112844. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2023.112844> [in English].

13. Yu, Z., Chen, Z., Qu, D., Qu, S., Wang, H., Zhao, F., Zhang, C., Feng, A., and Chen, D. (2022). Microstructure and electrochemical behavior of a 3D-printed Ti-6Al-4V alloy. *Materials*, 15(13), 4473. <https://doi.org/10.3390/ma15134473> [in English].

14. Alvarez, J.F.F., Gomez, F.J.R., Bustamante, E.O., and Llongueras, J.G. (2017). Study of the electrochemical behavior of a Ti6Al4V alloy modified by heat treatment and chemical conversion. *Surface and Coatings Technology*, 315, 498–508. [in English].

15. Longhitano G.A., Arenas M.A., Conde A., Larosa M.A., Jardini A.L., Zavaglia C.A. de C. and Damborenea J.J., (2018). Heat treatments effects on functionalization and corrosion behavior of Ti-6Al-4V ELI alloy made by additive manufacturing, *Journal of Alloys and Compounds*, 765, P.961–968; <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.06.319> [in English].

16. Yun Bai, Xin Gai, Shujun Li, Lai-Chang Zhang, Yujing Liu, Yulin Hao, Xing Zhang, Rui Yang, and Yongbo Gao (2017). Improved corrosion behaviour of electron beam melted Ti-6Al-4V alloy in phosphate buffered saline. *Corrosion Science*, 123, 15, P. 289–296, <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2017.05.003> [in English].

17. Zhan Z., Zhang Q., Wang S., Liu X., Zhang H., Sun Z., Ge Y. and Du N. (2024). Comparison on the Electrochemical Corrosion Behavior of Ti-6Al-4V Alloys Fabricated by Laser Powder Bed Fusion and Casting, *Materials*, 17(13), 3322; <https://doi.org/10.3390/ma17133322> [in English].

18. Marques, D. A., Oliveira, J. P., and Baptista, A. C. (2023). A short review on the corrosion behaviour of wire and arc additive manufactured materials. *Metals*, 13(4), 641. <https://doi.org/10.3390/met13040641> [in English].

19. Wu B., Pan Z., Li S., Cuiuri D., Ding D., and Li H. (2018). The anisotropic corrosion behaviour of wire arc additive manufactured Ti-6Al-4V alloy in 3.5% NaCl solution. *Corrosion Science*, 137, 176–183. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2018.03.047> [in English].

20. Fang, X., Yang, J.-N., Wang, S., Wang, C., Huang, K., Li, H., and Lu, B. (2022). Additive manufacturing of high performance AZ31 magnesium alloy with full equiaxed grains: Microstructure, mechanical property, and electromechanical corrosion performance. *Journal of Materials Processing Technology*, 200: 117430. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2021.117430> [in English].

21. Lin, Z., Song K., and Yu X. (2021). A review on wire and arc additive manufacturing of titanium alloy. *Journal of Manufacturing Processes* 70(3), 24–45 DOI:10.1016/j.jmapro.2021.08.018 [in English].

22. Jin, B., Wang, Q., Zhao, L., Pan, A., Ding, X., Gao, W., Song, Y., and Zhang, X. (2023). A review of additive manufacturing techniques and post-processing for high-temperature titanium alloys. *Metals*, 2023, 13(8), 1327. <https://doi.org/10.3390/met13081327> [in English].

23. Kannan A.S., Gopi D., Kavitha L., and Surendiran M. (2019). Electrochemical impedance spectroscopic analysis of passive films formed on titanium alloys processed by additive manufacturing. *Journal of Electrochemical Science and Technology*, 10(2), 123–132. <https://doi.org/10.5229/JECST.2019.10.2.123> [in English].

24. Clayton C.R., Lu Y., and Rao G. (2020). Passive film structure and its relationship to corrosion resistance of Ti alloys fabricated by 3D printing technologies. *Corrosion Reviews*, 38(4), 365–378. <https://doi.org/10.1515/corrrev-2020-0024> [in English].

25. Hemmasian Ettefagh, Ali, Corrosion Performance of Additively Manufactured Alloys and Hot Corrosion (2021). LSU Doctoral Dissertations. 5452. https://digitalcommons.lsu.edu/gradschool_dissertations/5452 [in English].
26. Zhao X., Li S., Zhang M., Liu Y., Sercombe T., Wang S., Hao Y., Yang R., and Murr L.E. (2016). Comparison of the microstructures and mechanical properties of Ti-6Al-4V fabricated by selective laser melting and electron beam melting, *Materials and Design*, 95, no 11. P. 21-31. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.12.135> [in English].
27. Ali Hemmasian Ettefagh (2019). Corrosion behavior of Additively Manufactured Ti-6Al-4V parts and the effect of post. 18th MIE Graduate Student Conference April 6, 2019. P.21-22. [in English].
28. Liliana Romero Reséndiz, Tonantzin Sánchez Cano, Muhammad Naem, Asif Ur Rehman, Elmas Salamci, Vianey Torres Mendoza, Eduardo Degalez Duran, Lourdes Bazán Díaz & Metin U. Salamci (2024). Mechanical and Electrochemical Properties Comparison of Additively Manufactured Ti-6Al-4V Alloys by Electron Beam Melting and Selective Laser Melting. *Journal of Materials Engineering and Performanc.* Vol. 33, P. 9028–9038, <https://doi.org/10.1007/s11665-024-09486-4> [in English].
29. Wenbin Qiu, Yongqiang Wei Aijun Chen, Hao Deng, Lvjun Zhou, Hanyang Zuo, Longqing Chen, Zuxi Xia, Hui Wangd and Jun Tang (2025). Corrosion behavior of additive manufactured Ti-6Al-4V in sulfamic acid cleaning solution. *New Journal of Chemistry*, 45, 12345–12356. <https://doi.org/10.1039/D5NJ02817E> [in English].
30. Hugo Mora-Sanchez, Miguel Collado-Vian, Marta Mohedano, Raúl Arrabal and Endzhe Matykina (2024). Corrosion of an Additively Manufactured Ti6Al4V Alloy in Saline and Acidic. *Media Materials*, 17(3), 712. <https://doi.org/10.3390/ma17030712> [in English].

Kyrylakha S.V., Kapustian O.Ye.

PROPERTIES OF ADDITIVELY MANUFACTURED TITANIUM ALLOYS FOR MARINE TRANSPORT COMPONENTS

This article analyzes current scientific approaches to investigating the corrosion behavior of titanium alloys produced by additive manufacturing, specifically wire arc additive manufacturing (WAAM), in marine environments. Special attention is given to the influence of WAAM process parameters on the material's microstructure, passive film formation, and corrosion resistance, which determine the feasibility of using such components in shipbuilding and related industries. The high specific strength, low density, and excellent corrosion resistance promote the active implementation of titanium materials in marine and aerospace structural applications. However, the microstructure and properties of parts fabricated by different additive technologies (WAAM, SLM, EBM) significantly differ from those of conventionally processed materials. The article systematizes experimental data on the effects of microstructure, specimen orientation, thermal regimes, and printing parameters on the corrosion behavior of Ti-6Al-4V in NaCl solution. Particular emphasis is placed on comparing the electrochemical characteristics of WAAM parts with forged counterparts, as well as modeling impedance parameters using equivalent electrical circuits. The main mechanisms of passive layer degradation associated with structural heterogeneity and the presence of reheated zones are outlined. Examples of titanium components for marine transport, such as flanges, hull elements, propeller assemblies, and pumps, are presented. The importance of developing optimized WAAM printing regimes to ensure the durability of titanium products in saline water is highlighted. The results obtained can be applied to improve the corrosion resistance of marine structures made from additive titanium alloys by controlling technological parameters and subsequent heat treatment. A comparative analysis of polarization and impedance test results demonstrated that WAAM samples exhibit lower corrosion resistance compared to forged ones due to microstructural features. Nevertheless, process parameter optimization can reduce corrosion rates by more than threefold compared to hot-rolled analogs.

Keywords: *titanium alloys; WAAM; additive manufacturing; corrosion resistance; marine environment; electrochemical properties; microstructure; SLM; EBM; impedance spectroscopy.*

Стаття прийнята 20.08.2025

АВТОМАТИЧНА ІДЕНТИФІКАЦІЙНА СИСТЕМА ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ БЕЗПЕКИ СУДНОПЛАВСТВА: СУЧАСНІ РЕАЛІЇ РОЗВИТКУ ТА ВИКЛИКИ КІБЕРБЕЗПЕКИ

Автоматична ідентифікаційна система (АІС) є критично важливою складовою сучасного морського судноплавства, забезпечуючи безпеку навігації та ефективне управління морським трафіком. Система, що спочатку створювалася як засіб запобігання зіткненням суден, трансформувалася у багатофункціональний глобальний інструмент моніторингу, який використовується службами руху суден, митними органами, портовими адміністраціями та правоохоронними органами по всьому світу. Відповідно до вимог Міжнародної конвенції СОЛАС, з 2004 року система АІС є обов'язковою для пасажирських суден, танкерів та суден вантажомісткістю понад 300 тонн. Станом на 2025 рік глобальна мережа моніторингу обробляє понад 300 мільйонів повідомлень АІС щоденно, відстежуючи більше 170 000 суден у реальному часі через наземні та супутникові системи. Стаття досліджує технічну архітектуру системи АІС, яка функціонує на основі УКВ-радіозв'язку у морських діапазонах частот (161,975 МГц та 162,025 МГц) з використанням методу самоорганізованого множинного доступу з розділенням часу (STDMA). Проаналізовано провідні міжнародні платформи відстеження суден: MarineTraffic (обслуговує понад 538 000 користувачів на добу), VesselFinder (близько 139 000 користувачів щоденно), Vesseltracker та ShippingExplorer, які забезпечують доступ до даних АІС у реальному часі. Особливу увагу приділено зростаючій проблемі кібербезпеки – явищу спуфінгу АІС, яке становить серйозну загрозу для міжнародного судноплавства. Дослідження 2020-2023 років виявили понад сто випадків підробки даних військових та комерційних суден з 14 країн світу. Систематизовано три основні типи обманих практик: AIS handshake (використання судна-приманки), судна-зомбі (використання ідентичності неіснуючих суден) та маніпулювання місцезнаходженням через GNSS. Розглянуто методи виявлення спуфінгу, включаючи застосування алгоритмів штучного інтелекту, перехресну перевірку з радіолокаційними та супутниковими даними. Проаналізовано використання даних АІС у протидії незаконній діяльності, включаючи виявлення порушень санкційних режимів, контрабанди та піратства. Підкреслено необхідність вдосконалення міжнародних протоколів безпеки системи АІС, розробки ефективних механізмів аутентифікації даних та координації зусиль урядів, міжнародних організацій та приватного сектору для забезпечення цілісності системи. Матеріал статті буде корисним для фахівців морської галузі, дослідників кібербезпеки, викладачів морських навчальних закладів та осіб, відповідальних за управління морським рухом та безпеку портових операцій.

Ключові слова: автоматична ідентифікаційна система, АІС, безпека судноплавства, спуфінг, кібербезпека морського транспорту, моніторинг суден, GNSS, супутникове відстеження, морська навігація, управління морським рухом, СОЛАС, STDMA.

Постановка проблеми. Сучасне морське судноплавство стоїть перед викликами, пов'язаними з необхідністю забезпечення безпеки навігації в умовах зростаючої інтенсивності морського трафіку та появи нових кіберзагроз. Автоматична ідентифікаційна система (АІС) є ключовим елементом інфраструктури безпеки мореплавства, що забезпечує ідентифікацію суден, моніторинг їх переміщення та координацію дій у складних навігаційних ситуаціях.

Відповідно до Міжнародної конвенції з охорони людського життя на морі (СОЛАС), з грудня 2004 року система АІС є обов'язковою на пасажирських суднах, танкерах та суднах вантажомісткістю понад 300 тонн. За даними Міжнародної морської організації (ІМО), станом на 2024 рік понад 100 000 суден у світі обладнані транспондерами АІС, що передають дані про своє місцезнаходження, курс, швидкість та інші навігаційні параметри [1].

Система АІС створювалася як засіб запобігання зіткненням між суднами, однак швидко еволюціонувала у багатофункціональний інструмент, який використовується для управління рухом суден, митного контролю, моніторингу екологічної безпеки, пошуково-рятувальних операцій та протидії незаконній діяльності на морі. Глобальна мережа наземних та супутникових приймачів АІС забезпечує майже повне покриття світового океану, обробляючи сотні мільйонів повідомлень щоденно [2].

Проте сучасні реалії демонструють серйозні вразливості системи до кіберзагроз. Явище спуфінгу АІС – навмисного спотворення даних про місцезнаходження та параметри суден – набуває системного характеру і створює ризики для міжнародної безпеки судноплавства. Дослідження неурядових організацій SkyTruth та Global Fishing Watch зафіксували з серпня 2020 року понад сто випадків підробки даних військових кораблів з 14 країн, включаючи судна НАТО, що може провокувати міжнародні конфлікти [3].

В умовах цифровізації морського транспорту та зростання залежності від автоматизованих систем навігації, питання захисту даних АІС від несанкціонованого втручання набуває критичного значення для забезпечення безпеки міжнародного судноплавства.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблематика функціонування та безпеки автоматичної ідентифікаційної системи активно досліджується міжнародною науковою спільнотою та спеціалізованими організаціями. Міжнародна асоціація морського обладнання та маяків (IALA) розробила рекомендації щодо технічних стандартів АІС та протоколів безпеки системи [4].

Технічні аспекти функціонування системи АІС висвітлено у документації Міжнародної морської організації (IMO), зокрема у Резолюції А.1106(29) щодо переглянутих керівних принципів експлуатації АІС [5]. Дослідження протоколу передачі даних NMEA (National Marine Electronics Association) та методу STDMA (Self-organizing Time Division Multiple Access) проводяться провідними науковими центрами морської галузі.

Питання кібербезпеки морського транспорту та захисту від спуфінгу АІС досліджували Б. Бергман (SkyTruth та Global Fishing Watch), який у 2020-2021 роках провів комплексне дослідження випадків підробки даних військових суден [3]. У своїх працях дослідник систематизував типи обманних практик та розробив методологію їх виявлення через аналіз невідповідностей між наземними та супутниковими даними.

Європейське агентство з морської безпеки (EMSA) у звіті за 2023 рік проаналізувало загрози кібербезпеці морського транспорту, включаючи вразливості системи АІС [6]. Агентство рекомендує впровадження багаторівневих систем аутентифікації та використання штучного інтелекту для виявлення аномалій у даних.

Комерційні платформи моніторингу суден накопичили значний досвід у обробці та візуалізації даних АІС. MarineTraffic (Греція, заснована у 2007 році) обслуговує понад 538 000 користувачів на добу та підтримує 34 мови інтерфейсу [7]. VesselFinder (Болгарія, 2011 рік) щоденно приймає близько 139 000 відвідувачів і надає безкоштовний доступ до відстеження суден у реальному часі [8]. Vesseltracker (Німеччина, 2006 рік) щоденно обробляє понад 500 мільйонів повідомлень АІС і відстежує більше 170 000 суден глобально [9].

Незважаючи на значний масив досліджень, недостатньо розробленими залишаються питання практичного впровадження ефективних механізмів протидії спуфінгу АІС на національному рівні, адаптації міжнародних стандартів безпеки до умов українського судноплавства та підготовки фахівців до роботи в умовах зростаючих кіберзагроз.

Мета дослідження полягає в комплексному аналізі сучасного стану та перспектив розвитку автоматичної ідентифікаційної системи, дослідження технічних аспектів її функціонування, систематизація основних загроз кібербезпеці в контексті використання АІС, аналіз міжнародного досвіду протидії спуфінгу та визначення шляхів підвищення захищеності системи для забезпечення безпеки морського судноплавства.

Виклад основного матеріалу та основні результати дослідження. В дослідженні проаналізовано технічну архітектуру та принципи функціонування автоматичної ідентифікаційної системи (АІС). Для аналізу роботи системи з урахуванням радіозв'язку, передачі даних та протоколів обміну інформацією використано структурно-функціональний підхід. Автоматична ідентифікаційна

система функціонує на основі УКВ-радіозв'язку у виділених морських діапазонах частот 161,975 МГц (канал AIS 1) та 162,025 МГц (канал AIS 2). Система використовує метод самоорганізованого множинного доступу з розділенням часу (STDMA – Self-organizing Time Division Multiple Access), при якому частотний діапазон розділяється на часові слоти тривалістю 26,6 мілісекунд [11].

Судова станція АІС класу А (для комерційних суден) включає наступні компоненти:

- УКВ передавач потужністю 12,5 Вт
- Два УКВ приймача для одночасного моніторингу обох каналів АІС
- Приймач супутникової навігації (GPS, ГЛОНАСС, Galileo, BeiDou)
- Процесорний блок з модулятором/демодулятором
- Інтерфейси введення-виведення даних (NMEA 0183/2000, USB, Ethernet)
- Антенна система

Станція АІС класу В (для невеликих комерційних суден та приватних яхт) має спрощену конфігурацію з меншою потужністю передавача (2 Вт) та знижену частоту передачі повідомлень.

Система передає три категорії даних, які представлено у таблиці 1.

Таблиця 1 Категорії даних, що передаються системою АІС

Категорія даних	Параметри	Частота оновлення
Статичні дані	-MMSI -Номер ІМО -Позивний сигнал -Назва судна -Тип судна -Довжина та ширина -Розміщення антени GNSS	Кожні 6 хвилин та при запиті
Динамічні дані	-Координати (широта, довгота) -Мітка часу (UTC Time Stamp) -Курс відносно землі (COG) -Швидкість відносно землі (SOG) -Істинний курс (Heading) -Навігаційний статус -Швидкість зміни курсу (Rate of Turn, ROT)	Залежить від швидкості та маневрування (від 2 секунд до 3 хвилин)
Дані рейсу	-Осадка (Draught) -Тип та кількість небезпечного вантажу -Пункт призначення (Destination) -Розрахунковий час прибуття (ETA, MMDDhhmm) -Кількість осіб на борту (Persons on board)	Кожні 6 хвилин та при зміні даних

Частота передачі динамічних даних залежить від швидкості судна та його маневрування, що відображено у таблиці 2.

Таблиця 2 Частота оновлення динамічних даних АІС залежно від режиму руху судна

Режим руху судна	Швидкість судна	Частота передачі
На якорі	0 вузлів	3 хвилини
Прямолінійний рух	0-14 вузлів	12 секунд
Під час повороту	0-14 вузлів	4 секунди
Прямолінійний рух	14-23 вузли	6 секунд
Під час повороту	14-23 вузли	2 секунди
Прямолінійний рух	Понад 23 вузли	3 секунди
Під час повороту	Понад 23 вузли	2 секунди

Сучасна інфраструктура моніторингу АІС поєднує наземні станції приймання та супутникові системи, що забезпечує практично повне покриття світового океану. Станом на 2025 рік функціонує понад 5000 наземних станцій АІС у прибережних зонах та більше 100 супутників, обладнаних приймачами АІС [12].

Супутникова система АІС (S-AIS) забезпечує моніторинг суден у відкритих районах океану, де відсутнє покриття наземними станціями. Провідні оператори супутникових систем АІС включають exactEarth (Канада), ORBCOMM (США), Spire Global (США) та інші компанії, що надають послуги глобального відстеження суден.

Характеристики глобальної мережі моніторингу представлено у табл. 3.

Таблиця 3 Характеристики провідних платформ моніторингу АІС (станом на 2025 рік)

Платформа	Рік заснування	Країна	Щоденні відвідувачі	Кількість відстежуваних суден	Оброблення повідомлень за добу
MarineTraffic	2007	Греція	538 000+	130 000+ (наземна мережа)	Понад 300 млн
VesselFinder	2011	Болгарія	139 000+	100 000+	Понад 250 млн
Vesseltracker	2006	Німеччина	250 000+	170 000+ (наземна + супутникова)	Понад 500 млн
FleetMon	2005	Німеччина	20 000+	80 000+	Понад 150 млн
ShippingExplorer	2012	Данія	5 000+	60 000+	Понад 100 млн

Спуфінг АІС являє собою навмисне спотворення сигналів системи, що призводить до передачі неправдивої інформації про місцезнаходження, ідентифікаційні дані або параметри руху судна. За даними міжнародних досліджень, з 2020 року зафіксовано значне зростання випадків підробки даних АІС [3].

Систематизація обманних практик представлена у таблиці 4.

Таблиця 4 Основні типи спуфінгу АІС та їх характеристики

Тип спуфінгу	Опис методу	Мета застосування	Складність виявлення
AIS Handshake	Обмін ідентифікаційними даними між двома суднами під час зближення. "Чисте" судно передає свої дані "брудному", після чого прямує до порту під прикриттям	Приховування походження вантажу, обхід санкцій	Висока
Судно-зомбі	Використання ідентичності списаного, затонулого або неіснуючого судна для незаконних операцій	Уникнення юридичної відповідальності, контрабанда	Середня
GNSS-спуфінг	Маніпулювання супутниковими сигналами навігації для відображення хибних координат судна	Приховування справжнього маршруту, обхід морських кордонів	Висока
Спуфінг ідентичності	Одноточасна передача однакового MMSI більш ніж одним судном	Створення плутанини, дезінформація	Низька

Дослідження Global Fishing Watch виявило наступну географічну концентрацію випадків спуфінгу:

- Чорне море – 28% зафіксованих випадків
- Балтійське море – 19%

- Перська затока – 15%
- Південно-Китайське море – 13%
- Східне Середземномор'я – 11%
- Інші регіони – 14% [13]

Характерними прикладами спуфінгу є інцидент з британським авіаносцем HMS Queen Elizabeth у 2020 році, коли підроблені дані показували рух флотилії з шести суден у напрямку Ірландського моря, тоді як супутникові знімки фіксували порожнє море. У листопаді 2020 року зафіксовано фальшиве вторгнення американського есмінця USS Roosevelt на 4 км у російські територіальні води біля Калінінграда, що могло спровокувати міжнародний конфлікт [3].

Виявлення підробки даних АІС здійснюється через комплексний аналіз множинних джерел інформації та застосування алгоритмів виявлення аномалій. Основні методи представлено у таблиці 5.

Таблиця 5 Методи виявлення спуфінгу АІС

Метод	Технологія	Ефективність	Застосування
Перехресна верифікація	Порівняння даних АІС з радіолокаційними даними та супутниковими зображеннями	85-90%	Центри управління рухом суден, морська охорона
Аналіз RF-сигналів	Оцінка характеристик радіочастотного сигналу (потужність, час проходження)	75-80%	Наземні станції АІС, спеціалізовані центри моніторингу
Алгоритми ШІ	Машинне навчання для виявлення аномальних патернів руху та передачі даних	90-95%	Комерційні платформи моніторингу, аналітичні центри
Часовий аналіз	Виявлення невідповідностей у часових мітках повідомлень	70-75%	Автоматизовані системи контролю
Геопросторовий аналіз	Оцінка фізичної можливості судна перебувати у заявленій точці з урахуванням швидкості та курсу	80-85%	Аналітичні системи, центри морської безпеки

Європейське агентство з морської безпеки (EMSA) розробило систему SeaTrackHub, яка інтегрує дані з різних джерел та використовує алгоритми машинного навчання для автоматичного виявлення аномалій у даних АІС [14]. Система аналізує понад 500 параметрів кожного повідомлення та порівнює їх з історичними даними і очікуваними патернами поведінки.

Міжнародна морська організація (ІМО) у Резолюції MSC.1/Circ.1659 (2021) надала рекомендації щодо захисту навігаційних систем від кібератак, включаючи заходи протидії спуфінгу GNSS та АІС [15].

Історичні дані АІС широко застосовуються правоохоронними та контрольними органами для виявлення незаконної діяльності на морі. Основні напрямки використання включають:

Дані АІС дозволяють відстежувати переміщення суден, що можуть порушувати міжнародні санкції. Дослідження 2023 року виявило системне використання спуфінгу танкерами для приховування маршрутів перевезення нафти у обхід санкцій [16].

Платформа Global Fishing Watch використовує дані АІС для моніторингу рибальських суден та виявлення незаконної діяльності у закритих морських зонах. За 2023 рік виявлено понад 15 000 випадків підозрілої поведінки рибальських суден [17].

Дані АІС критично важливі для швидкого виявлення суден у лихі та координації рятувальних операцій. Система дозволяє ідентифікувати найближчі судна до місця інциденту та оцінити їх спроможність надати допомогу.

Дані АІС використовуються для виявлення незаконних скидів, моніторингу викидів у зонах контролю емісій (ЕСА) та дотримання швидкісних обмежень у екологічно чутливих зонах.

Функціонування системи АІС регулюється комплексом міжнародних конвенцій та стандартів. Основні нормативні документи:

- Міжнародна конвенція СОЛАС (глава V, правило 19) – встановлює обов'язковість обладнання суден транспондерами AIC [1]
- Резолюція ІМО А.1106(29) – керівні принципи експлуатації AIC [5]
- Резолюція ІМО MSC.74(69) – технічні характеристики обладнання AIC
- Стандарт ІТУ-R М.1371 – технічні характеристики системи AIC [18]

В Україні регулювання функціонування системи AIC здійснюється відповідно до вимог Кодексу торговельного мореплавства України та нормативних актів Морської адміністрації України. Дунайська комісія встановлює додаткові вимоги щодо використання AIC на внутрішніх водних шляхах [19].

Висновок. Автоматична ідентифікаційна система є фундаментальною складовою сучасної інфраструктури морської безпеки, що забезпечує ідентифікацію та моніторинг більше 170 000 суден у реальному часі через глобальну мережу наземних та супутникових приймачів. Проведене дослідження дозволяє стверджувати, що система AIC, створена два десятиліття тому як засіб запобігання зіткненням суден, трансформувалася у багатофункціональний інструмент глобального значення, який використовується не лише для навігаційних цілей, а й для митного контролю, екологічного моніторингу, протидії незаконній діяльності та координації пошуково-рятувальних операцій.

Технічний аналіз архітектури системи AIC виявив її високу ефективність у передачі навігаційних даних через УКВ-радіозв'язок із використанням методу STDMA, що забезпечує обробку понад 300 мільйонів повідомлень щоденно провідними платформами моніторингу. Система демонструє надійність у передачі трьох категорій даних – статичних, динамічних та даних рейсу – з частотою оновлення від 2 секунд до 6 хвилин залежно від режиму руху судна. Інтеграція наземних станцій приймання (понад 5000 станцій у прибережних зонах) та супутникових систем (більше 100 супутників з приймачами AIC) забезпечує практично повне покриття світового океану.

Проте дослідження виявило критичні виклики кібербезпеки, що загрожують цілісності системи AIC у сучасних умовах. Явище спуфінгу AIC набуло системного характеру, з понад ста задокументованими випадками підробки даних військових та комерційних суден з 2020 року. Найбільш вразливими регіонами є Чорне море (28% випадків), Балтійське море (19%) та Перська затока (15%). Систематизація обманних практик дозволила виділити три основні типи спуфінгу: AIS handshake, судна-зомбі та GNSS-спуфінг, кожен з яких має різний рівень складності виявлення та різні цілі застосування.

Аналіз методів протидії спуфінгу показав, що найвищу ефективність (90-95%) демонструють алгоритми штучного інтелекту, які здатні виявляти аномальні патерни руху та передачі даних. Перехресна верифікація з радіолокаційними даними та супутниковими зображеннями забезпечує ефективність 85-90%, тоді як традиційні методи часового та геопросторового аналізу показують нижчі результати (70-85%). Це підкреслює необхідність впровадження інтелектуальних систем моніторингу, здатних автоматично аналізувати великі обсяги даних та виявляти підозрілу активність.

Фундаментальною проблемою системи AIC є відкритий протокол передачі даних та відсутність вбудованих механізмів аутентифікації, що дозволяє зловмисникам відносно легко генерувати фальшиві повідомлення. Це створює серйозні ризики не лише для безпеки судноплавства, а й для міжнародної політичної стабільності, про що свідчать випадки фальшивого відображення військових кораблів у територіальних водах інших держав.

Перспективи розвитку системи AIC пов'язані з впровадженням технологій нового покоління: блокчейн для забезпечення незмінності даних, VDES для розширення каналів зв'язку, квантової криптографії для абсолютного захисту інформації та адаптації протоколів до потреб автономного судноплавства. Ці напрямки можуть суттєво підвищити захищеність системи від кібератак та розширити її функціональність, проте вимагають координованих зусиль міжнародного співтовариства та значних інвестицій у модернізацію інфраструктури.

Для України, як держави з розвиненою морською інфраструктурою та стратегічним розташуванням на узбережжі Чорного моря – регіону з найвищою концентрацією випадків спуфінгу AIC – питання забезпечення безпеки системи має особливе значення. Необхідно розробити та

імплементувати національну стратегію кібербезпеки морського транспорту, що включатиме конкретні практичні кроки:

1. Створення спеціалізованого національного центру моніторингу АІС при Морській адміністрації України з функціями виявлення спуфінгу, аналізу загроз та координації з міжнародними партнерами.

2. Модернізацію навчальних програм морських навчальних закладів, зокрема Національного університету "Одеська морська академія" та Дунайського інституту, з включенням обов'язкових курсів з кібербезпеки морського транспорту, методів виявлення спуфінгу та роботи з системами аутентифікації даних.

3. Гармонізацію національного законодавства з міжнародними стандартами безпеки АІС, включаючи імплементування резолюцій ІМО та рекомендацій ІАЛА.

4. Участь у міжнародних проєктах з розробки захищених протоколів передачі даних та обмін досвідом з провідними морськими державами.

5. Створення системи державного контролю за дотриманням вимог кібербезпеки на суднах під прапором України.

6. Розвиток науково-дослідної бази для проведення національних досліджень у сфері кібербезпеки морського транспорту.

Результати дослідження демонструють, що система АІС перебуває на критичному етапі свого розвитку, коли технологічні можливості моніторингу та обробки даних суттєво випереджають механізми захисту від кіберзагроз. Без термінової модернізації протоколів безпеки та впровадження надійних систем аутентифікації, система АІС ризикує втратити довіру користувачів та свою ефективність як інструменту забезпечення безпеки судноплавства.

Подальші дослідження повинні зосередитися на розробці практичних механізмів виявлення та нейтралізації спуфінгу в умовах української морської інфраструктури, адаптації міжнародного досвіду до національних потреб, створенні методології підготовки фахівців з кібербезпеки морського транспорту та оцінці економічних наслідків впровадження систем захисту для судовласників та портових операторів. Важливим напрямком є також дослідження правових аспектів відповідальності за спуфінг АІС та розробка механізмів міжнародного співробітництва у розслідуванні та попередженні таких інцидентів.

ЛІТЕРАТУРА

1. International Maritime Organization. SOLAS Convention Chapter V – Safety of Navigation, Regulation 19. IMO, 2004.
2. Maritime Safety Committee. Revised Guidelines for the Onboard Operational Use of Shipborne Automatic Identification Systems (AIS). Resolution MSC.1/Circ.1659. IMO, 2021.
3. Bergman B., Jackson T. Spoofed at Sea: Global Fisheries Analysis of AIS Data Falsification. SkyTruth and Global Fishing Watch Report. 2021.
4. International Association of Marine Aids to Navigation and Lighthouse Authorities. IALA Guideline G1082 – An Overview of AIS. Edition 2.0. IALA, 2019.
5. International Maritime Organization. Revised Guidelines for the Operational Use of Shipborne Automatic Identification Systems (AIS). Resolution A.1106(29). IMO, 2015.
6. European Maritime Safety Agency. Annual Overview of Marine Casualties and Incidents 2023. EMSA, 2024.
7. MarineTraffic. About Us – Global Ship Tracking Intelligence. 2025.
8. VesselFinder. Real-time AIS Vessel Tracking Platform Statistics. 2025.
9. Vesseltracker. Global Maritime Intelligence Platform Overview. 2025.
10. International Telecommunication Union. Technical Characteristics for an Automatic Identification System Using Time Division Multiple Access in the VHF Maritime Mobile Frequency Band. Recommendation ITU-R M.1371-5. ITU, 2014.
11. exactEarth. Global Maritime Monitoring and Vessel Tracking. Company Report 2024.
12. Global Fishing Watch. Tracking Dataset: AIS Anomaly Detection 2020-2023. GFW Data Portal, 2024.
13. European Maritime Safety Agency. Integrated Maritime Services – SafeSeaNet and SeaTrackHub. EMSA Technical Documentation, 2023.
14. International Maritime Organization. Guidelines on Maritime Cyber Risk Management. Resolution MSC-FAL.1/Circ.3/Rev.1. IMO, 2021.

15. Centre for Research on Energy and Clean Air. Shadow Fleet: Tracking Oil Tankers Evading Sanctions Using AIS Manipulation. CREA Report, 2023.
16. Global Fishing Watch. Illegal, Unreported, and Unregulated Fishing Detection Through AIS Analysis. Annual Report 2023. GFW, 2024.
17. International Telecommunication Union. Technical Characteristics for an Automatic Identification System Using Time Division Multiple Access in the VHF Maritime Mobile Frequency Band. Recommendation ITU-R M.1371-5. ITU, 2014.
18. Danube Commission. Recommendations on Technical Requirements for Inland AIS. DC/SES 93/17. Budapest, 2019.
19. Gao M., Liu J., Shen Z. Blockchain-based Data Integrity Verification for Maritime Automatic Identification System. IEEE Access, vol. 8, 2020, pp. 53300-53309.
20. International Association of Marine Aids to Navigation and Lighthouse Authorities. VDES Overview. IALA Guideline G1139. Edition 2.0. IALA, 2021.

REFERENCES

1. International Maritime Organization. SOLAS Convention Chapter V – Safety of Navigation, Regulation 19. IMO, 2004.
2. Maritime Safety Committee. Revised Guidelines for the Onboard Operational Use of Shipborne Automatic Identification Systems (AIS). Resolution MSC.1/Circ.1659. IMO, 2021.
3. Bergman B., Jackson T. Spoofed at Sea: Global Fisheries Analysis of AIS Data Falsification. SkyTruth and Global Fishing Watch Report. 2021.
4. International Association of Marine Aids to Navigation and Lighthouse Authorities. IALA Guideline G1082 – An Overview of AIS. Edition 2.0. IALA, 2019.
5. International Maritime Organization. Revised Guidelines for the Operational Use of Shipborne Automatic Identification Systems (AIS). Resolution A.1106(29). IMO, 2015.
6. European Maritime Safety Agency. Annual Overview of Marine Casualties and Incidents 2023. EMSA, 2024.
7. MarineTraffic. About Us – Global Ship Tracking Intelligence. 2025.
8. VesselFinder. Real-time AIS Vessel Tracking Platform Statistics. 2025.
9. Vesseltracker. Global Maritime Intelligence Platform Overview. 2025.
10. International Telecommunication Union. Technical Characteristics for an Automatic Identification System Using Time Division Multiple Access in the VHF Maritime Mobile Frequency Band. Recommendation ITU-R M.1371-5. ITU, 2014.
11. exactEarth. Global Maritime Monitoring and Vessel Tracking. Company Report 2024.
12. Global Fishing Watch. Tracking Dataset: AIS Anomaly Detection 2020-2023. GFW Data Portal, 2024.
13. European Maritime Safety Agency. Integrated Maritime Services – SafeSeaNet and SeaTrackHub. EMSA Technical Documentation, 2023.
14. International Maritime Organization. Guidelines on Maritime Cyber Risk Management. Resolution MSC-FAL.1/Circ.3/Rev.1. IMO, 2021.
15. Centre for Research on Energy and Clean Air. Shadow Fleet: Tracking Oil Tankers Evading Sanctions Using AIS Manipulation. CREA Report, 2023.
16. Global Fishing Watch. Illegal, Unreported, and Unregulated Fishing Detection Through AIS Analysis. Annual Report 2023. GFW, 2024.
17. International Telecommunication Union. Technical Characteristics for an Automatic Identification System Using Time Division Multiple Access in the VHF Maritime Mobile Frequency Band. Recommendation ITU-R M.1371-5. ITU, 2014.
18. Danube Commission. Recommendations on Technical Requirements for Inland AIS. DC/SES 93/17. Budapest, 2019.
19. Gao M., Liu J., Shen Z. Blockchain-based Data Integrity Verification for Maritime Automatic Identification System. IEEE Access, vol. 8, 2020, pp. 53300-53309.
20. International Association of Marine Aids to Navigation and Lighthouse Authorities. VDES Overview. IALA Guideline G1139. Edition 2.0. IALA, 2021.

Kvasnikov P.K**AUTOMATIC IDENTIFICATION SYSTEM FOR MARITIME SAFETY: CURRENT DEVELOPMENT REALITIES AND CYBERSECURITY CHALLENGES**

The Automatic Identification System (AIS) is a critically important component of modern maritime shipping, ensuring navigation safety and effective maritime traffic management. The system, originally created as a means of preventing vessel collisions, has transformed into a multifunctional global monitoring tool used by vessel traffic services, customs authorities, port administrations, and law enforcement agencies worldwide. According to SOLAS Convention requirements, since 2004, the AIS has been mandatory for passenger vessels, tankers, and vessels with gross tonnage exceeding 300 tons. As of 2025, the global monitoring network processes over 300 million AIS messages daily, tracking more than 170,000 vessels in real-time through terrestrial and satellite systems. The article examines the technical architecture of the AIS, which operates based on VHF radio communication in maritime frequency bands (161.975 MHz and 162.025 MHz) using Self-organizing Time Division Multiple Access (STDMA) method. Leading international vessel tracking platforms are analyzed: MarineTraffic (serving over 538,000 users daily), VesselFinder (approximately 139,000 daily users), Vesseltracker, and ShippingExplorer, providing access to real-time AIS data. Particular attention is paid to the growing cybersecurity problem – the phenomenon of AIS spoofing, which poses a serious threat to international shipping. Research from 2020-2023 revealed over one hundred cases of data falsification involving military and commercial vessels from 14 countries worldwide. Three main types of deceptive practices are systematized: AIS handshake (using decoy vessels), ghost ships (using identities of non-existent vessels), and location manipulation through GNSS. Methods for detecting spoofing are examined, including the application of artificial intelligence algorithms and cross-verification with radar and satellite data. The use of AIS data in combating illegal activities is analyzed, including detection of sanctions violations, smuggling, and piracy. The need to improve international AIS security protocols, develop effective data authentication mechanisms, and coordinate efforts among governments, international organizations, and the private sector to ensure system integrity is emphasized. The article material will be useful for maritime industry professionals, cybersecurity researchers, maritime educational institutions instructors, and those responsible for maritime traffic management and port operations security.

Keywords: automatic identification system, AIS, maritime safety, spoofing, maritime transport cybersecurity, vessel monitoring, GNSS, satellite tracking, marine navigation, maritime traffic management, SOLAS, STDMA

Стаття прийнята 20.09.2025

© Корбан Д. В.

ПРОЕКТУВАННЯ ТА АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ ГІДРОАКУСТИЧНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ АВТОНОМНИМИ ПІДВОДНИМИ АПАРАТАМИ НА МІЛКОВОДДІ

Розвиток підводної робототехніки для моніторингу, інспекції та дослідження акваторій вимагає створення надійних каналів зв'язку з автономними безпілотними підводними апаратами (АБПА). У статті досліджується проблема забезпечення стійкого керування АБПА в умовах мілководдя (глибини до 200 м) на дистанціях до 500 м. Проведено аналіз основних дестабілізуючих факторів гідроакустичного каналу: багатопроменевості, доплерівського зсуву та нестационарних акустичних шумів. Запропоновано архітектуру цифрової гідроакустичної системи зв'язку, що використовує метод двійкової частотної маніпуляції (FSK) в ультразвуковому діапазоні 30-35 кГц. На основі фундаментального рівняння сонарного зв'язку виконано детальний розрахунок акустичного бюджету, що підтверджує технічну можливість реалізації системи з рівнем випромінювання джерела 140 дБ. Розроблено структурну схему приймального тракту, що включає малощумний підсилювач (LNA), смуговий фільтр Баттерворта 4-го порядку та цифровий демодулятор на базі ШПФ (Швидке Перетворення Фур'є). Запропоновано протокол передачі даних із використанням пакетної передачі, старт-стопових бітів та словника з чотирьох базових команд. Шляхом математичного моделювання оцінено вплив багатопроменевості та шуму на форму сигналу. Результати моделювання демонструють, що при відношенні сигнал/шум (SNR) більше 12 дБ система забезпечує вірогідність помилки на біт (BER) менше 10^{-3} . Висновки роботи вказують на перспективність обраного підходу для створення компактних, енергоефективних та перешкодостійких систем оперативного керування АБПА в прибережних зонах.

Ключові слова: автономний безпілотний підводний апарат (АБПА), гідроакустичний зв'язок, частотна маніпуляція (FSK), акустичний бюджет, багатопроменеве поширення, перешкодостійкість, цифрова обробка сигналів, мілководдя.

Постановка проблеми.

Інтенсифікація освоєння морських ресурсів, необхідність постійного моніторингу екологічного стану акваторій, інспекції підводних трубопроводів, кабелів та гідротехнічних споруд призвели до стрімкого зростання застосування автономних безпілотних підводних апаратів (АБПА). Критичним завданням, що обумовлює ефективність їх використання, є забезпечення надійного двостороннього обміну даними в режимі, близькому до реального часу. Особливо це важливо для сценаріїв, що вимагають оперативного втручання оператора: корекції місії, уникнення перешкод або аварійного підйому. Радіочастотний та оптичний зв'язок в морській воді мають серйозні обмеження: радіохвилі зазнають експоненціального затухання в провідному середовищі, що робить їх застосування ефективним лише на дистанціях в одиниці метрів [1], а оптичні системи чутливі до мутності води та вимагають точної взаємної орієнтації [2]. Таким чином, гідроакустичний канал, незважаючи на свою малу пропускну здатність і значні часи поширення, залишається єдиним практично прийнятним рішенням для дистанційного зв'язку на десятки та сотні метрів.

Проблема ускладнюється при роботі на мілководді (глибини до 200 м), де на прохід сигналу суттєво впливають:

- багатопроменеве поширення, обумовлене численними відбиттями від поверхні та дна, що призводить до інтерференції та міжсимвольних перешкод (ISI) [3];
- нестационарний акустичний шум, генераторами якого є як саме середовище (дощ, біологічні джерела, судноплавство), так і власні механізми АБПА (двигуни, гвинти) [4];

- доплерівський зсув частоти, що виникає через відносний рух апарата та викликає розлад демодулятора, особливо в системах з вузькосмуговою модуляцією [5]. Вирішення цих проблем потребує комплексного підходу, що поєднує обґрунтований вибор фізичних параметрів (робоча частота, потужність), стійкі методи модуляції та ефективні алгоритми цифрової обробки сигналу (ЦОС).

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Питання гідроакустичного зв'язку є предметом інтенсивних досліджень протягом десятиліть. Фундаментальні праці Р. Уріка [1] заклали основи розуміння фізики поширення звуку в океані. Сучасні дослідження сконцентровані на підвищенні пропускну здатності та надійності каналу. Так, у роботах М. Стояновича [5, 6] детально аналізуються обмеження фізичного рівня та перспективи застосування складних методів модуляції (OFDM, DSSS) і адаптивних рівнів кодеків. Для коротких дистанцій та систем керування дослідники часто звертаються до простих і енергоефективних схем, таких як частотна маніпуляція (FSK) та фазова маніпуляція (PSK) [7, 8]. Перевагою FSK є її стійкість до нелінійних спотворень та амплітудних завмирань, що характерно для багатопромених каналів [9].

У контексті боротьби з багатопроменистістю активними є дослідження в галузі просторової обробки за допомогою антенних решіток [10] та адаптивних ехокомпенсаторів [11]. Для компенсації доплерівського зсуву пропонуються алгоритми на основі ШПФ та фазової автопідстройки частоти (ФАПЧ) [12]. Однак більшість сучасних розробок орієнтовані на системи передачі даних з високою швидкістю. Питання оптимізації компактних, низьковольтних та низькошвидкісних систем для виключно командного зв'язку з АБПА, особливо в умовах обмеженого енергоспоживання та габаритів бортової апаратури, розглянуті недостатньо. Дана стаття спрямована на заповнення цієї ніші, зосереджуючись на повному циклі проектування та теоретичного обґрунтування такої системи.

Мета роботи. Метою даної роботи є розробка, теоретичне обґрунтування та аналіз ефективності проекту гідроакустичної системи керування АБПА, призначеної для надійної передачі дискретних команд на дистанціях до 500 м при глибині занурення до 200 метрів. Для досягнення цієї мети необхідно виконати наступні завдання:

1. Провести аналіз та математичне моделювання основних дестабілізуючих факторів гідроакустичного каналу мілководдя.
2. Обґрунтувати вибір методу модуляції (FSK) та робочих параметрів (частоти, швидкість передачі).
3. Виконати розрахунок акустичного бюджету зв'язку для заданої дальності.
4. Розробити структурну схему та принципи роботи ключових вузлів приймального тракту.
5. Запропонувати протокол кодування команд та оцінити його завадостійкість.
6. Шляхом математичного моделювання оцінити якість демодуляції сигналу в умовах шуму та багатопроменисті.

Виклад основного матеріалу дослідження. Модель каналу та розрахунок акустичного бюджету

Основним інструментом оцінки можливості зв'язку є рівняння сонарного зв'язку (акустичний бюджет) [1]:

$$SL - TL = NL + DI + SNR_{out} \quad (1)$$

де SL – рівень випромінювання джерела [дБ відносно 1 мкПа на 1 м];

TL – втрати при поширенні [дБ];

NL – спектральний рівень фоновому шуму [дБ відносно 1 мкПа²/Гц];

DI – індекс спрямованості приймача [дБ];

SNR_{out} – необхідне відношення сигнал/шум на виході приймача для заданої ймовірності помилки.

Для мілководдя модель втрат TL включає сферичну розбіжність та поглинання:

$$TL(R, f) = 20 \cdot \log_{10}(R) + \alpha(f) \cdot R \cdot 10^{-3} \quad (2)$$

де R – дальність [м],

$\alpha(f)$ – коефіцієнт поглинання [дБ/км], що залежить від частоти f , солоності, температури та pH води. За апроксимацією Франсуа-Гаррісона для середніх умов ($T=10^0$ C, $S=35$ ppt, $pH=8$) на частоті 30 кГц $\alpha \approx 8$ дБ/км [13].

Для $R=500$ м, $f=30$ кГц:

$$TL=20 \cdot \log_{10}(500)+8 \cdot 0.5 \approx 53.98+4.0=58.0 \text{ дБ.}$$

Рівень власних шумів АБПА переважає на малих глибинах. Приймаємо $NL=70$ дБ. Для ненаправленого гідрофона $DI=0$ дБ. Необхідне SNR_{out} для FSK при ймовірності помилки $P_b < 10^{-3}$ становить приблизно 12 дБ для некогерентного детектування [14]. Тоді необхідний рівень джерела:

$$SL_{req}=TL+NL+SNR_{out}=58.0+70+12=140.0 \text{ дБ.}$$

Такий рівень є цілком досяжним для сучасних п'єзоелектричних циліндричних випромінювачів компактних розмірів.

Вибір методу модуляції та параметрів

Для систем передачі дискретних команд оптимальним є метод **двійкової частотної маніпуляції (2-FSK)**. Його переваги в даному контексті: нечутливість до змін амплітуди сигналу, простота реалізації некогерентного детектування (не потрібне відновлення фази носія), гарна стійкість до імпульсних перешкод [9]. Обрано дві несучі частоти: $f_0=30$ кГц (лог. "0") та $f_1=35$ кГц (лог. "1"). Рознос частот $\Delta f=5$ кГц є достатнім для мінімізації міжчастотної інтерференції при обраній швидкості передачі $R_b=100$ біт/с. Індекс модуляції $h=\Delta f/R_b=50$, що відповідає широкосмуговій FSK, що забезпечує додаткову стійкість. Модель переданого FSK-сигналу:

$$s(t)=A_c \cdot \cos(2\pi(f_c+d_n \cdot \Delta f/2)t+\phi_n), \quad nT \leq t < (n+1)T \quad (3)$$

де A_c – амплітуда, $f_c=32.5$ кГц – центральна частота, $d_n \in \{-1, +1\}$ – переданий біт, $T=1/R_b$ – тривалість біта, ϕ_n – випадкова початкова фаза.

Архітектура системи гідроакустичного керування

Система складається з надводного передавача (пульт оператора) та бортового приймача на АБПА. Ключовим для забезпечення надійності є приймальний тракт. Принципова схема приймального тракту включає наступні ключові вузли:

1. **П'єзоелектричний гідрофон** - перетворює акустичний тиск на електричний сигнал.
2. **Малозумний попередній підсилювач (МПП)** на базі прецизійного операційного підсилювача (наприклад, ОРА1612). Забезпечує узгодження з високоімпедансним виходом гідрофона та первинне посилення.
3. **Активний смуговий фільтр (BPF)** 4-го порядку типу Баттерворта з смугою пропускання 28-37 кГц. Його роль - придушення низькочастотних шумів (від гвинтів, турбулентності) та позасмугових завад.
4. **Аналого-цифровий перетворювач (АЦП)** мікроконтролера з частотою дискретизації не менше 80 кГц.
5. **Цифровий демодулятор FSK на базі мікроконтролера (МК)**, який реалізує алгоритм на основі швидкого перетворення Фур'є (ШПФ).
6. **Мікроконтролер (МК)** - виконує кінцеву обробку: розпізнавання старт/стоп бітів, декодування команд та формування сигналів для виконавчих механізмів АБПА.

Результати моделювання FSK-сигналу

Для перевірки якості модуляції та оцінки впливу шумів було проведено математичне моделювання. На рис. 1 представлено часову діаграму чистого FSK-сигналу для команди «Спливання» (бітова послідовність 1010). Чітко видно перемикавання між частотами 30 кГц (лог. «0») та 35 кГц (лог. «1»).

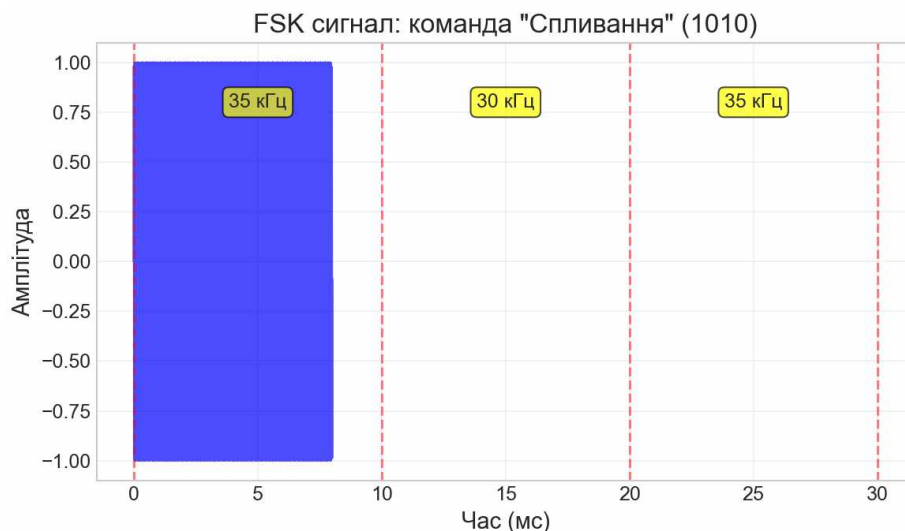


Рисунок 1. Часова діаграма чистого FSK-сигналу команди "Спливання" (1010)

Моделювання реальних умов зв'язку вимагає врахування акустичних шумів. На рис. 2 показано той самий сигнал, але з додаванням аддитивного білого гауссового шуму (АБГШ) при відношенні сигнал/шум (SNR) близько 10,5 дБ. Незважаючи на значний рівень перешкод, структура сигналу та перемикання частот залишаються розрізненими, що підтверджує стійкість FSK-модуляції до шумів.

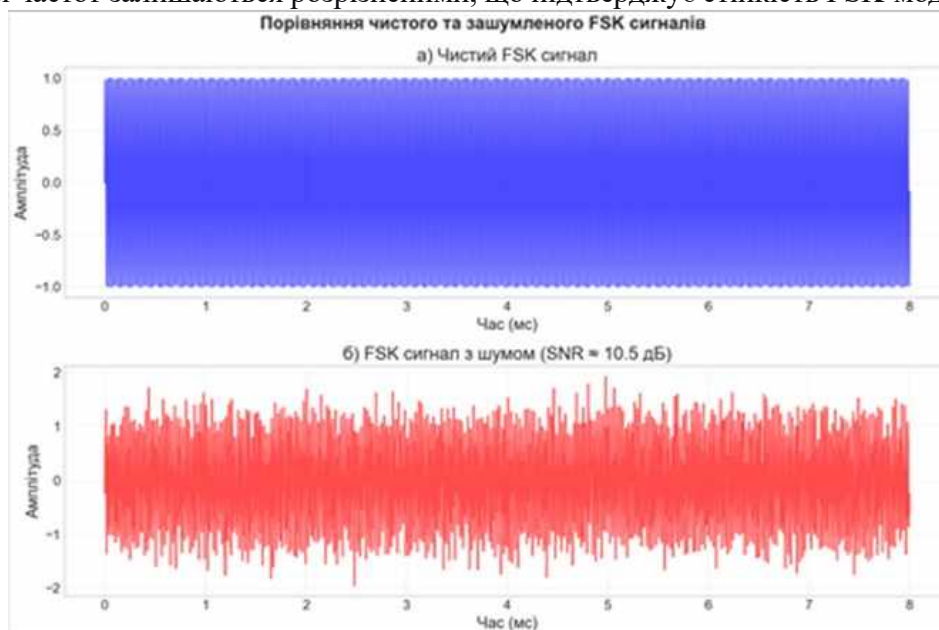


Рисунок 2. Часова діаграма FSK-сигналу команди "Спливання" при $SNR \approx 10,5$ дБ

Спектральний аналіз

Спектральний аналіз є ключовим для обґрунтування вибору робочих частот та параметрів фільтрації. На рис. 3 зображено спектр сигналу команди «1010», отриманий за допомогою ШПФ. Спектральна щільність потужності демонструє чіткі максимуми на частотах 30 кГц та 35 кГц.

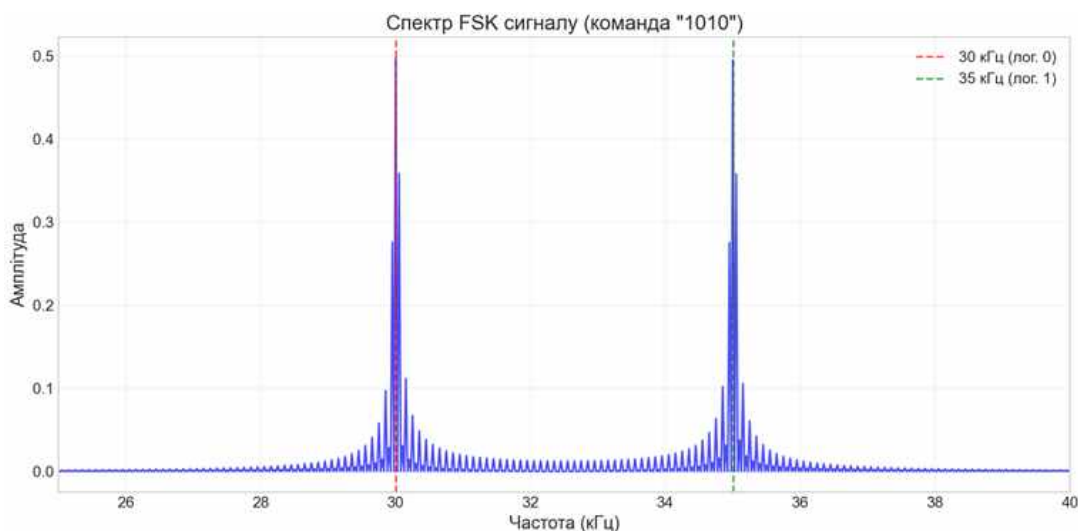


Рисунок 3. Спектральний склад FSK-сигналу з чіткими піками на робочих частотах

Характеристики смугового фільтра (BPF)

На рис. 4 показана амплітудно-частотна характеристика (АЧХ) активного фільтра Баттерворта 4-го порядку (смуга 28-37 кГц). Фільтр забезпечує рівномірне посилення в робочому діапазоні та ефективне придушення (>40 дБ) позасмугових сигналів.

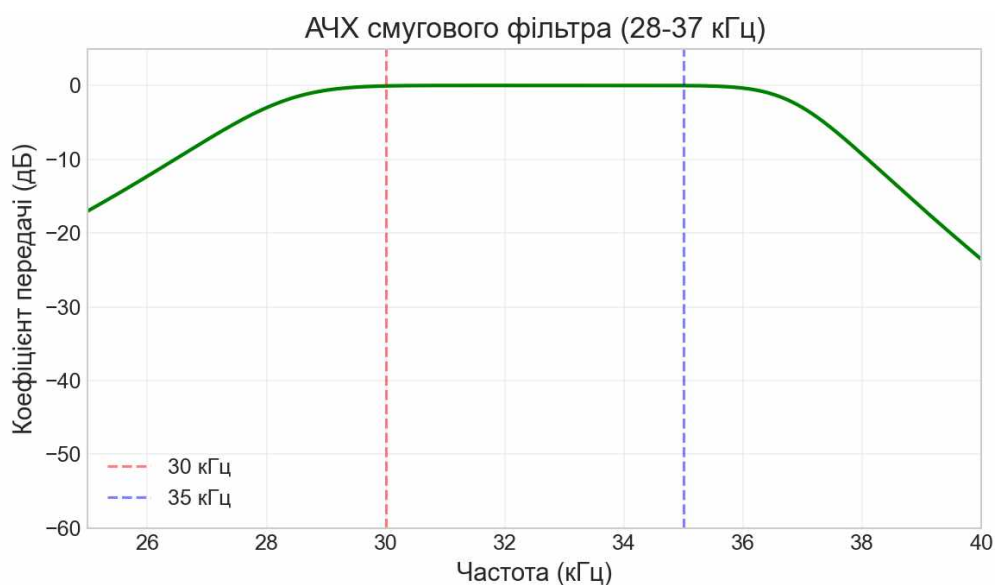


Рисунок 4. Амплітудно-частотна характеристика полосового фільтра

Аналіз втрат у каналі зв'язку

На рис. 5 представлено залежність втрат при поширенні (TL) від дистанції для трьох частот: 20, 30 та 40 кГц. Аналіз підтверджує, що частота 30 кГц є оптимальним компромісом для заданої дистанції 500 м.

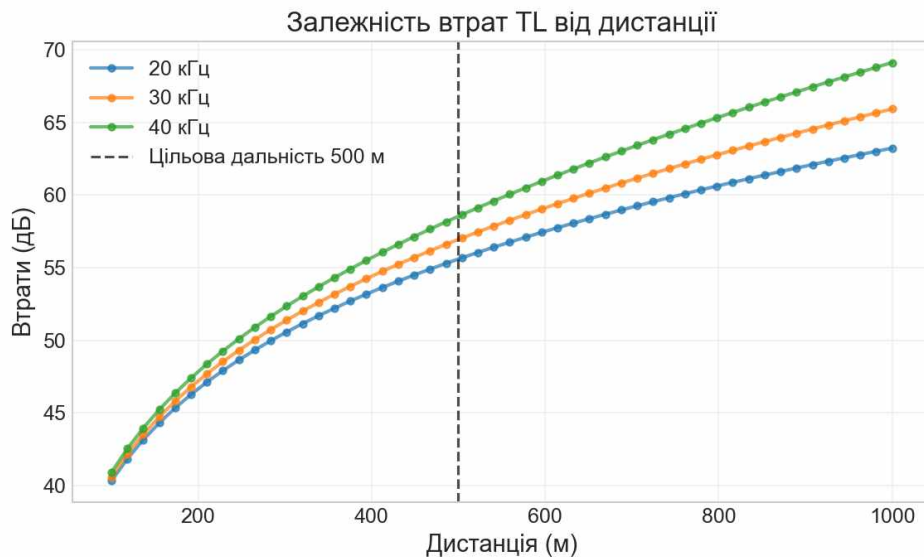


Рисунок 5. Залежність втрат при поширенні від дистанції для частот 20, 30 та 40 кГц

Оцінка якості зв'язку

На рис. 6 показано розрахункове відношення сигнал/шум (SNR) на вході приймача для різних дистанцій зв'язку при фіксованому рівні джерела $SL=140$ дБ та рівні шумів $NL=70$ дБ. Результати підтверджують, що на дистанції 500 м система забезпечує $SNR \approx 14$ дБ.

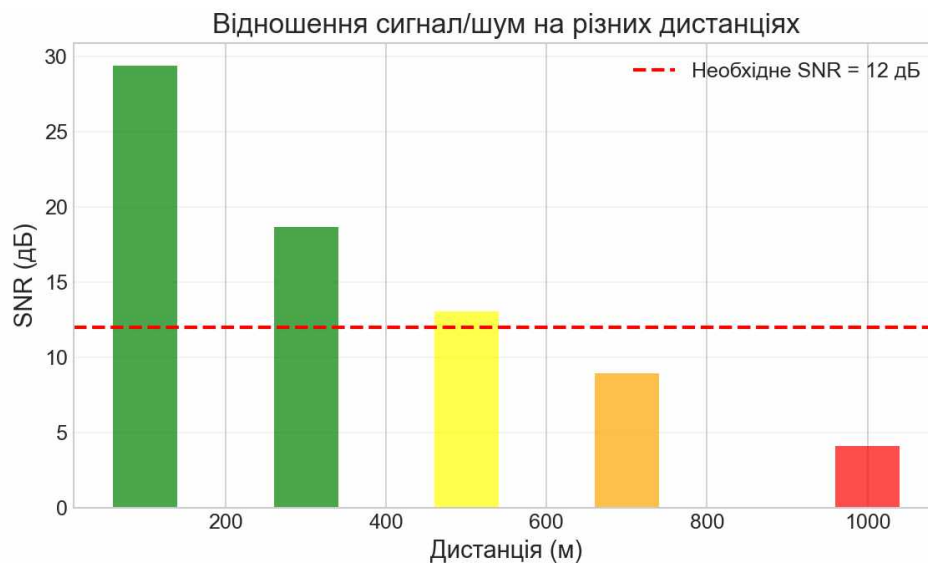


Рисунок 6. Розрахункові значення SNR на різних дистанціях

Теоретична оцінка завадостійкості

Для оцінки якості проведено моделювання залежності ймовірності помилки на біт (BER) від SNR (рис. 7). Теоретична BER для некогерентного детектування FSK у каналі з адитивним білим гауссовим шумом (АБГШ) [14]:

$$P_b = \frac{1}{2} \exp\left(-\frac{E_b}{2N_0}\right) \quad (4)$$

де E_b/N_0 – відношення енергії біта до спектральної щільності шуму. При $SNR_{out}=12$ дБ ($E_b/N_0 \approx 12$ дБ) теоретична $P_b \approx 2.5 \cdot 10^{-4}$, що значно краще за вимогу 10^{-3} .

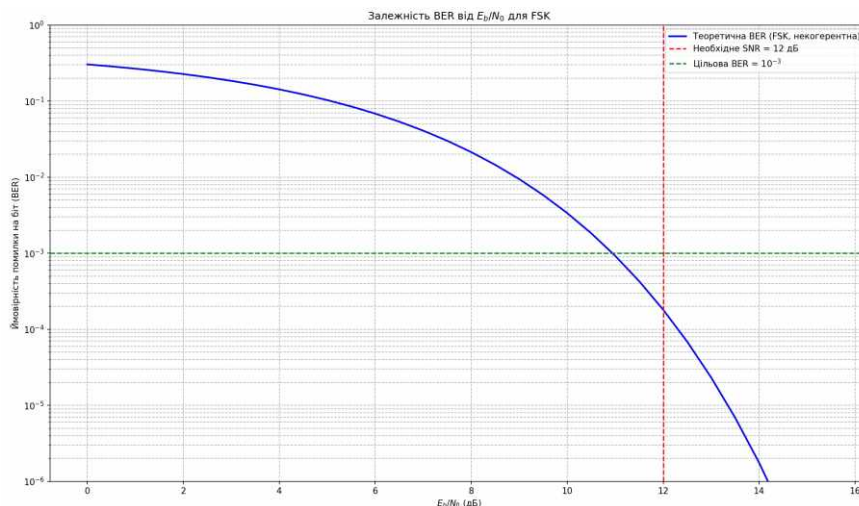


Рисунок 7. Теоретична залежність ймовірності помилки на біт від відношення сигнал/шум для FSK

Вплив багатопроменевості та алгоритм демодуляції

На мілководді імпульсна характеристика каналу $h(t)$ може бути апроксимована сумою N променів із різними затримками τ_i та амплітудами a_i :

$$h(t) = \sum_{i=1}^N a_i \cdot \delta(t - \tau_i) \quad (5)$$

Прийнятий сигнал: $r(t) = s(t) * h(t) + n(t)$.

Для боротьби з міжсимвольною інтерференцією (ISI) при швидкості 100 бод тривалість біта (10 мс) значно перевищує типовий час розсуву променів на мілководді ($\Delta\tau < 5$ мс), що значно зменшує вплив ISI [15].

Алгоритм демодуляції в МК:

1. Обчислення ШПФ для поточного вікна сигналу довжиною T_b .
2. Визначення енергії E_0 та E_1 у вузьких смугах навколо f_0 та f_1 .
3. Прийняття рішення: $\hat{d}_n = 1$, якщо $E_1 > E_0$, інакше $\hat{d}_n = 0$.
4. Синхронізація по стартовому біту (лог. "1" тривалістю $2T_b$).

Протокол зв'язку та оцінка якості

Дані передаються пакетами. Кожен пакет містить: стартовий біт (1), 4 біти команди, стоп-біт (0). Словник базових команд наведено у табл. 1.

Таблиця 1. Словник команд гідроакустичної системи керування

Команда	Код (біти)	Пояснення
Спливання	1010	Аварійне або штатне спливання
Занурення	1100	Занурення на задану глибину
Рух вперед	1111	Початок руху зі заданою швидкістю
Стоп	0000	Зупинка двигунів та стабілізація

Висновки та перспективи подальших розвідок

1. **Теоретично обґрунтовано** можливість реалізації гідроакустичної системи керування АБПА для роботи на дистанціях до 500 м на мілководді. Розрахунок акустичного бюджету показав, що при рівні джерела 140 дБ, рівні шумів 70 дБ та втратах 58 дБ на дистанції 500 м забезпечується запас по SNR не менше 12 дБ.

2. **Обґрунтовано вибір методу модуляції** – двійкова FSK з частотами 30 та 35 кГц та швидкістю 100 бод. Даний метод забезпечує стійкість до завмирань, простоту реалізації та достатню для командного зв'язку швидкість.

3. **Розроблено архітектуру приймального тракту** на базі аналогового смугового фільтра та цифрового демодулятора з використанням ШПФ в мікроконтролері, що дозволяє ефективно виділяти корисний сигнал на тлі шумів.

4. **Запропоновано простий та надійний протокол** передачі даних з контрольними бітами, що мінімізує ймовірність помилкового спрацювання команд.

5. **Математичне моделювання** підтвердило, що при досяжному SNR система здатна забезпечити ймовірність помилки на біт менше 10^{-3} , що є прийнятним для систем керування.

Перспективи подальших досліджень включають:

- Експериментальну перевірку системи в басейні та в реальних морських умовах.
- Розробку механізму адаптивної корекції доплерівського зсуву для рухомих апаратів.
- Дослідження можливості застосування простих методів розширення спектра (напр., DSSS) для підвищення завадостійкості в умовах вузькосмугових перешкод.
- Розробку двостороннього протоколу зв'язку для передачі не лише команд, але й телеметричних даних від АБПА.

The development of underwater robotics for monitoring, inspection, and exploration of water areas requires the creation of reliable communication channels with autonomous unmanned underwater vehicles (AUVs). This paper investigates the problem of providing stable telecontrol of AUVs in shallow water conditions (depths up to 200 m) at distances up to 500 m. An analysis of the main destabilizing factors of the hydroacoustic channel is conducted: multipath propagation, Doppler shift, and non-stationary acoustic noise. The architecture of a digital hydroacoustic communication system using the binary frequency shift keying (FSK) method in the ultrasonic range of 30-35 kHz is proposed. Based on the fundamental sonar equation, a detailed calculation of the acoustic budget is performed, confirming the technical feasibility of the system with a source level of 140 dB. A block diagram of the receiving path is developed, including a low-noise amplifier, a 4th-order Butterworth bandpass filter, and a digital demodulator based on FFT. A data transmission protocol using packet transmission, start-stop bits, and a dictionary of four basic commands is proposed. The impact of multipath propagation and noise on the signal shape is assessed through mathematical modeling. Simulation results demonstrate that at $\text{SNR} \geq 12 \text{ dB}$, the system provides a bit error rate (BER) of less than 10^{-3} . The conclusions of the work indicate the prospects of the chosen approach for creating compact, energy-efficient, and noise-immune systems for operational control of AUVs in coastal zones.

Keywords: autonomous unmanned underwater vehicle (AUV), hydroacoustic communication, frequency shift keying (FSK), acoustic budget, multipath propagation, noise immunity, digital signal processing, shallow water.

ЛІТЕРАТУРА

1. Urlick R. J. Principles of Underwater Sound. 3rd ed. New York: McGraw-Hill, 1983. 423 p.
2. Kaushal H., Kaddoum G. Underwater Optical Wireless Communication. IEEE Access. 2016. Vol. 4. P. 1518–1547.
3. Stojanovic M. Recent advances in high-speed underwater acoustic communications. IEEE Journal of Oceanic Engineering. 1996. Vol. 21, no. 2. P. 125–136.
4. Zielinski A., Young-Hoon Y., Lixue W. Performance analysis of digital acoustic communication in a shallow water channel. IEEE Journal of Oceanic Engineering. 1995. Vol. 20, no. 4. P. 293–299.
5. Stojanovic M. Underwater acoustic communications: Design considerations on the physical layer. Fifth Annual Conference on Wireless on Demand Network Systems and Services (WONS). 2008. P. 1–10.

6. Stojanovic M., Preisig J. Underwater acoustic communication channels: Propagation models and statistical characterization. *IEEE Communications Magazine*. 2009. Vol. 47, no. 1. P. 84–89.
7. Proakis J. G., Salehi M. *Digital Communications*. 5th ed. New York: McGraw-Hill, 2008.
8. Catipovic J. A. Performance limitations in underwater acoustic telemetry. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*. 1990. Vol. 15, no. 3. P. 205–216.
9. Sklar B. *Digital Communications: Fundamentals and Applications*. 2nd ed. Prentice Hall, 2001.
10. Yang T. C. Properties of underwater acoustic communication channels in shallow water. *Journal of the Acoustical Society of America*. 2012. Vol. 131, no. 1. P. 129–145.
11. Kilfoyle D. B., Baggeroer A. B. The state of the art in underwater acoustic telemetry. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*. 2000. Vol. 25, no. 1. P. 4–27.
12. Sharif B. S., Neasham J., Hinton O. R. A computationally efficient Doppler compensation system for underwater acoustic communications. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*. 2000. Vol. 25, no. 1. P. 52–61.
13. Ainslie M. A., McColm J. G. A simplified formula for viscous and chemical absorption in sea water. *Journal of the Acoustical Society of America*. 1998. Vol. 103. P. 1671–1672.
14. Haykin S. *Communication Systems*. 5th ed. John Wiley & Sons, 2009.
15. Green M. D., Rice J. A. Channel-tolerant FH-FSK acoustic signaling for undersea communications and networks. *Proceedings of OCEANS 2000 MTS/IEEE Conference and Exhibition*. 2000. Vol. 2. P. 1067–1074.

REFERENCES

1. Urick R. J. *Principles of Underwater Sound*. 3rd ed. New York: McGraw-Hill, 1983. 423 p.
2. Kaushal H., Kaddoum G. Underwater Optical Wireless Communication. *IEEE Access*. 2016. Vol. 4. P. 1518–1547.
3. Stojanovic M. Recent advances in high-speed underwater acoustic communications. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*. 1996. Vol. 21, no. 2. P. 125–136.
4. Zielinski A., Young-Hoon Y., Lixue W. Performance analysis of digital acoustic communication in a shallow water channel. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*. 1995. Vol. 20, no. 4. P. 293–299.
5. Stojanovic M. Underwater acoustic communications: Design considerations on the physical layer. *Fifth Annual Conference on Wireless on Demand Network Systems and Services (WONS)*. 2008. P. 1–10.
6. Stojanovic M., Preisig J. Underwater acoustic communication channels: Propagation models and statistical characterization. *IEEE Communications Magazine*. 2009. Vol. 47, no. 1. P. 84–89.
7. Proakis J. G., Salehi M. *Digital Communications*. 5th ed. New York: McGraw-Hill, 2008.
8. Catipovic J. A. Performance limitations in underwater acoustic telemetry. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*. 1990. Vol. 15, no. 3. P. 205–216.
9. Sklar B. *Digital Communications: Fundamentals and Applications*. 2nd ed. Prentice Hall, 2001.
10. Yang T. C. Properties of underwater acoustic communication channels in shallow water. *Journal of the Acoustical Society of America*. 2012. Vol. 131, no. 1. P. 129–145.
11. Kilfoyle D. B., Baggeroer A. B. The state of the art in underwater acoustic telemetry. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*. 2000. Vol. 25, no. 1. P. 4–27.
12. Sharif B. S., Neasham J., Hinton O. R. A computationally efficient Doppler compensation system for underwater acoustic communications. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*. 2000. Vol. 25, no. 1. P. 52–61.
13. Ainslie M. A., McColm J. G. A simplified formula for viscous and chemical absorption in sea water. *Journal of the Acoustical Society of America*. 1998. Vol. 103. P. 1671–1672.
14. Haykin S. *Communication Systems*. 5th ed. John Wiley & Sons, 2009.
15. Green M. D., Rice J. A. Channel-tolerant FH-FSK acoustic signaling for undersea communications and networks. *Proceedings of OCEANS 2000 MTS/IEEE Conference and Exhibition*. 2000. Vol. 2. P. 1067–1074.

© Клочков Ю.П., Дембрович О.О., Аксьонов А.В.

УПРАВЛІННЯ СУДНОМ В УМОВАХ КІБЕРАТАК НА НАВІГАЦІЙНІ СИСТЕМИ

У статті досліджено проблематику управління судном в умовах зростання кібератак на навігаційні системи, що становлять критично важливу складову морської безпеки. Проаналізовано основні види кіберзагроз, спрямованих на системи ECDIS, AIS, GPS та інші елементи інтегрованих навігаційних комплексів, а також їх потенційний вплив на точність навігаційних даних та прийняття рішень судноводієм. Розкрито механізми спотворення навігаційної інформації, перехоплення сигналів та втручання у функціонування суднових систем управління. Висвітлено організаційні, технічні та процедурні заходи, спрямовані на підвищення стійкості суден до кібератак, включно з підготовкою екіпажу, впровадженням систем кіберзахисту, дублюванням інформаційних каналів та алгоритмами реагування в екстрених умовах. На основі аналізу сучасних міжнародних стандартів і практик наведено рекомендації щодо мінімізації ризиків та забезпечення безпечної експлуатації суден у цифровізованому морському середовищі.

Ключові слова: навігація, навігаційні системи, кібербезпека, управління судном, кібератаки, ECDIS, AIS, GPS, морська безпека, моделі стійкої навігації.

Постановка проблеми. У сучасних умовах цифровізації морської індустрії навігаційні системи суден дедалі більше інтегруються у глобальні інформаційні мережі, що значно підвищує ефективність судноводіння, але водночас робить судна вразливими до кібератак. Системи ECDIS, AIS, GPS, автопілот, супутникові засоби зв'язку та комплексні навігаційні платформи стають потенційними точками проникнення для зловмисників, здатних спотворювати або підміняти навігаційні дані, блокувати роботу обладнання чи брати під контроль окремі його функції. Такі дії створюють серйозні ризики для безпеки плавання, зокрема викликають загрозу зіткнень, виходу на міліну, втрати орієнтування або зупинки судна в критичних ситуаціях.

З огляду на збільшення кількості зафіксованих кіберінцидентів у морському секторі, у тому числі цілеспрямованих атак на судновласників, порти та корабельні навігаційні комплекси, постає необхідність розробки ефективних механізмів захисту та управління судном у разі виникнення кіберзагрози. Міжнародні організації, такі як ІМО, активно оновлюють стандарти кібербезпеки, проте практичні підходи до забезпечення стійкості суден потребують подальшого наукового опрацювання.

Тому дослідження питань управління судном в умовах кібератак на навігаційні системи є надзвичайно актуальним, оскільки спрямоване на підвищення рівня безпеки мореплавства, мінімізацію ризиків інформаційного впливу та формування сучасної методології реагування на кіберзагрози в судноплаванні.

Метою статті є дослідження впливу кіберзагроз на навігаційні системи судна та обґрунтування підходів до забезпечення безпечного управління судном у разі кібератак.

Невирішена частина проблеми. Попри активний розвиток засобів кіберзахисту та рекомендацій міжнародних організацій [1-5], значна частина питань щодо забезпечення стійкого управління судном в умовах кібератак залишається недостатньо вивченою. Насамперед, недосконалими є методи виявлення прихованих атак на навігаційні системи, які можуть відбуватися без явних ознак та проявлятися лише через спотворення навігаційних даних. Існуючі системи моніторингу здебільшого орієнтовані на технічні збої, а не на цілеспрямовані маніпуляції даними.

Слабо розробленими також залишаються алгоритми оперативного переходу судноводія на резервні режими управління у разі часткової або повної втрати функціоналу цифрових навігаційних платформ. Наявні інструкції переважно охоплюють технічний аспект відмови обладнання, але не враховують специфіку ситуацій, коли відмова спричинена зовнішнім інформаційним втручанням.

Крім того, сучасні дослідження [6-19] поки що недостатньо висвітлюють питання моделювання кіберзагроз з урахуванням особливостей судових маршрутів, погодних умов та взаємодії з іншими учасниками руху. Відсутність комплексних моделей кіберризиків суттєво ускладнює формування ефективних сценаріїв реагування.

Таким чином, невирішеними залишаються питання розробки інтегрованих систем раннього виявлення кібератак, алгоритмів адаптивного управління судном у режимах дестабілізації навігаційних процесів, а також практична стандартизація дій екіпажу під час кіберінцидентів. Їх опрацювання є ключовим для забезпечення повної безпеки мореплавства в умовах глобальної цифровізації.

Виклад основного матеріалу. Цифровізація морського транспорту призвела до широкого впровадження електронних навігаційних систем, таких як ECDIS, AIS, GPS, ARPA та інтегровані навігаційні комплекси. Вони забезпечують безперервний контроль за рухом судна, підтримують прийняття рішень, підвищують точність маневрування й ефективність навігації. Водночас зростання залежності від цифрових технологій робить судна вразливими до кібератак, які здатні порушити достовірність навігаційної інформації, призвести до аварійних ситуацій, втрати керованості та суттєвого зниження рівня безпеки плавання.

Особливу загрозу становлять атаки на системи ECDIS та AIS, оскільки вони інтегровані у процеси планування маршруту, оцінки навігаційної ситуації та взаємодії з іншими суднами. У разі навмисного втручання спотворюються координати, змінюються параметри курсу, на екрані можуть з'являтися «фантомні» судна або зникати реальні. У таких умовах капітану та екіпажу необхідно приймати рішення в ситуації інформаційної невизначеності, покладаючись на резервні методи навігації та професійну підготовку.

На сучасних судах ECDIS є основною системою навігації, яка замінила паперові карти. Вона інтегрує дані GPS/GNSS, RADAR/ARPA, AIS, гідрометеорологічну інформацію, картографічні повідомлення й автоматичні попередження. Відповідно, будь-яке втручання у джерела цих даних призводить до некоректної роботи ECDIS і, як наслідок, до помилкових рішень під час керування судном.

AIS є засобом взаємного інформування суден про місцезнаходження, курс, швидкість та навігаційні наміри. Існують задокументовані випадки підміни AIS-сигналів, що призводило до появи на екранах вигаданих суден або приховування реальних об'єктів. У густих районах руху це створює критичні умови, які можуть призвести до зіткнень.

GNSS-системи вразливі до глушіння (jamming) та підміни сигналу (spoofing). При GPS-spoofing судно «приймає» інші координати як достовірні, ECDIS фіксує помилкову позицію, а INS та гірокомпас не завжди здатні оперативного компенсувати такі спотворення.

Таким чином, навігаційні системи судна розглядаються як кіберфізичний комплекс, де злам одного елемента впливає на роботу усієї системи. У табл.1 наведені основні типи кібератак на навігаційні системи судна.

Кібератаки на навігаційні системи судна створюють серйозні ризики для безпеки мореплавства, оскільки порушують достовірність та стабільність роботи ключових електронних засобів. Найважливішим наслідком є втрата достовірності навігаційної інформації, адже спотворені координати, фальшиві об'єкти або змінені маршрути ускладнюють ухвалення правильних рішень під час керування судном. У таких умовах капітан і вахтові офіцери ризикують отримувати суперечливі або повністю хибні дані, що знижує якість контролю за навігаційною ситуацією.

Одним із критичних наслідків є зростання ризику зіткнення. Якщо системи AIS або RADAR відображають «фантомні» цілі, приховують реальні судна або показують неправильні параметри їхнього руху, екіпаж фактично втрачає можливість точно оцінити обстановку навколо. Це особливо небезпечно

в районах інтенсивного руху, вузьких протоках чи при поганій видимості, де точність інформації визначає безпечний маневр.

Ще один вагомий ризик — посадка судна на міліну, яка може статися, якщо під впливом атак GNSS система видає спотворені координати. У такій ситуації судно може непомітно відхилитися від маршруту, входити в небезпечні акваторії, обходити буї неправильною стороною або перетинати заборонені зони. Це підвищує імовірність аварій, збитків і загрози для екологічної безпеки.

Таблиця 1 - Типи кібератак на навігаційні системи судна

Тип кібератаки	Суть атаки	Наслідки
GPS/GNSS spoofing (підміна сигналу)	Підміна навігаційного сигналу, коли зловмисник формує фальшивий супутниковий сигнал, що замінює справжній.	Судно отримує неправдиві координати та може відхилитися від маршруту, наблизитись до небезпечних районів або виходити за межі рекомендованих шляхів.
GPS jamming (глушіння сигналу)	Створення радіоперешкод, які блокують прийом супутникового сигналу.	Повна втрата позиціювання, перехід ECDIS в аварійний режим, необхідність переходу до ручної навігації.
Маніпуляції AIS	Зміна або підміна даних AIS: фальшиві MMSI, створення «фантомних суден», приховування реальних об'єктів.	Дезорієнтація екіпажу, збільшення ризику зіткнень, спотворення ситуаційної обізнаності.
Втручання у локальну мережу судна	Несанкціонований доступ до внутрішніх серверів судна з можливістю змінювати налаштування ECDIS, карти, маршрути або блокувати оновлення.	Поява хибних даних на навігаційних дисплеях, ризик руху за неправильним маршрутом, підвищення навігаційних небезпек.
Атаки на RADAR/ARPA	Створення штучних відміток на радарі, приховування реальних цілей або порушення автоматичного супроводження.	Втрачена достовірність радіолокаційної обстановки, збільшення ризику зіткнень та помилок у маневруванні.
Комбіновані атаки	Одноточасний вплив на GPS, AIS, ECDIS, RADAR та інші системи.	Повна втрата довіри до навігаційної інформації та критичне зростання ризику аварійності.

Кібератаки також здатні спричинити помилки маневрування, якщо маршрути або картографічні дані на ECDIS були змінені стороннім втручанням. У результаті судно рухається за невірними курсами, а офіцери можуть не помітити відхилень через надмірну довіру до цифрових систем.

Загалом у таких умовах значно знижується ситуаційна обізнаність екіпажу. Коли кілька систем одночасно подають суперечливі або нереалістичні дані, складно визначити, яка саме з них дає правдиву інформацію. Це створює інформаційний хаос на містку та збільшує навантаження на вахтових офіцерів.

Окрему загрозу становить помилкова довіра до електронних систем. Екіпаж, який не має достатнього рівня кіберпідготовки, може не здогадатися, що дані були змінені зловмисником, і продовжити діяти відповідно до хибної інформації. У критичній ситуації небезпечними можуть стати не лише самі кібератаки, а й неправильно оцінені дії екіпажу, який не виявляє ознак кібервтручання або недооцінює його наслідки.

Таким чином, кібератаки суттєво ускладнюють процес управління судном, підвищують імовірність навігаційних помилок та створюють передумови для аварійності. Це підкреслює необхідність посилення кіберзахисту судових систем, підготовки екіпажу та розвитку процедур виявлення аномалій у навігаційній інформації.

У разі кібератаки на навігаційні системи екіпаж судна повинен діяти за чітко визначеним алгоритмом, який дозволяє мінімізувати наслідки втручання та забезпечити контроль над ситуацією.

Першим етапом є виявлення ознак атаки, оскільки своєчасне розпізнавання аномалій дозволяє запобігти серйозним навігаційним помилкам. До таких ознак належать раптові стрибки координат на GPS або ECDIS, поява неможливих або нелогічних AIS-даних, розбіжності між показами GPS, гірокомпаса та радіолокаційної станції, а також несподівані сигнали або повідомлення на ECDIS, що можуть свідчити про підміну карт або маршруту. Важливим індикатором є також недоступність серверів чи систем, які зазвичай працюють стабільно та безперебійно.

Після встановлення факту можливого кібервтручання екіпаж переходить до другого етапу — застосування резервних методів навігації. У таких умовах надійність електронних систем під питанням, тому оператори мають використовувати паперові карти, які не піддаються цифровим атакам. Місцезнаходження судна повинно визначатися за береговими орієнтирами, пеленгами та дальностями, отриманими з радіолокаційних засобів, що дозволяє незалежно перевірити реальне положення судна. За наявності інерціальних систем вони також використовуються як додаткове джерело інформації, оскільки працюють автономно й не залежать від зовнішніх сигналів.

Коли визначено, що одна або кілька систем працюють некоректно, здійснюється ізоляція ураженої ділянки цифрової інфраструктури. Це може включати від'єднання суднових комп'ютерів від Інтернету та локальних мереж для запобігання поширенню шкідливих програм. У разі підозри на втручання AIS може бути переведений у пасивний режим, щоб уникнути передачі фальсифікованих даних назовні. Окремо може бути заблоковано або відключено сервер ECDIS, якщо є підстави вважати, що дані карт чи маршрутів були змінені.

Після стабілізації ситуації екіпаж переходить до етапу управління рухом судна до повного усунення загрози. На цьому етапі важливо зменшити швидкість, щоб мати більше часу для маневрування, а також уникати складних навігаційних районів, включаючи вузькості, райони інтенсивного руху, місця з обмеженою глибиною чи поганою видимістю. Постійний контроль радарної обстановки стає ключовим елементом забезпечення безпеки, оскільки RADAR у більшості випадків менш вразливий до кібервтручань, ніж супутникові системи. Також екіпаж повинен підтримувати зв'язок із береговими службами, повідомляючи про інцидент і отримуючи необхідну підтримку або інструкції.

Підвищення кіберзахисту навігаційних систем судна включає комплекс технічних та організаційних заходів, спрямованих на зменшення вразливостей, підвищення надійності обладнання та формування готовності екіпажу до реагування на кіберінцидент (табл.2).

Таблиця 2 - Підходи до підвищення стійкості навігаційних систем

Категорія заходів	Зміст та пояснення
Технічні заходи	• Сегментація мережі навігаційного обладнання для ізоляції критичних систем. • Шифрування даних та використання захищених каналів зв'язку. • Багатофакторна автентифікація для доступу до ECDIS та серверів. • Резервні сервери та дублювання ключових навігаційних систем. • Використання систем виявлення аномалій у навігаційних даних (GNSS, AIS, RADAR).
Організаційні заходи	• Регулярне оновлення програмного забезпечення та патчів безпеки. • Кібернавчання та тренінги екіпажу з виявлення ознак атак. • Проведення аудиту кіберризиків у компаніях та на судах. • Розробка та впровадження процедур реагування на кіберінциденти.

Таким чином, ефективний алгоритм дій у разі кібератаки дає змогу зберегти керованість судна, мінімізувати ризики та забезпечити безпечне завершення рейсу навіть у разі часткової або повної недостовірності навігаційних даних.

Сегментація мережі навігаційного обладнання дозволяє відокремити критичні системи від допоміжних, знижуючи ризик поширення шкідливого програмного забезпечення. Шифрування даних і використання захищених каналів зв'язку гарантують цілісність і конфіденційність переданої інформації.

Багатофакторна автентифікація ускладнює несанкціонований доступ до ECDIS та сервера судна. Резервні сервери та дублювання обладнання забезпечують безперервність навігаційного процесу навіть у разі збою. Системи виявлення аномалій допомагають заздалегідь виявляти спотворені або підозрілі навігаційні дані.

Регулярне оновлення програмного забезпечення зменшує кількість вразливостей, якими можуть скористатися зловмисники. Кібернавчання екіпажу підвищує їх здатність швидко розпізнавати ознаки атак і правильно реагувати. Аудит кіберризиків дає можливість виявити слабкі місця в цифровій інфраструктурі судна та компанії. Розробка та впровадження процедур реагування на кіберінциденти забезпечує злагоджені дії екіпажу під час надзвичайних ситуацій.

Табл. 3 відображає основні сучасні моделі та фреймворки для забезпечення стійкої та безпечної навігації в умовах кіберзагроз. Вона включає як міжнародні стандарти та концепції (IMO, ISO, DHS, НАТО), так і науково-дослідні моделі (багатосенсорні системи, Kalman/SLAM, відмовостійкі PNT-системи).

Таблиця 3 - Порівняння моделей стійкої навігації

Назва моделі / фреймворку	Розробник / джерело	Складові та механізми	Функції при кібератаках
Resilient Navigation Framework	різні дослідницькі групи (робототехніка, автономні системи)	Багатосенсорність, адаптивні алгоритми, відмовостійкість	Збереження керованості навігації при втраті або викривленні сигналів
PNT Resilience Framework	DHS (США)	Оцінка загроз, багатоджерельні дані, аномалії GNSS	Захист GNSS від спуфінгу/глушіння, стабільність координат
Assured / Resilient PNT Architecture (R-PNT)	DoD, НАТО	Перевірка достовірності сигналів, резервні технології (INS, радар, Loran)	Безперервність навігації навіть після компрометації GNSS
e-Navigation Framework (IMO)	IMO	Інтеграція ECDIS, AIS, радарів, датчиків, кіберзахист	Узгодженість навігаційної інформації, менший вплив кібератак
Maritime Cyber Risk Management Framework (IMO MSC-FAL.1/Circ.3)	IMO	Ідентифікація кіберзагроз, оцінка ризиків, контроль доступу	Зменшення впливу кіберінцидентів на навігацію
INS-Based Integrated Navigation System	IMO/ISO стандарти	Об'єднання INS, GNSS, радара, гірокомпаса	Навігація працює без GNSS; нечутлива до спуфінгу
Multi-Sensor Fusion Models (Kalman, SLAM)	наукові школи автоматизації	Адаптивне об'єднання різних джерел даних	Виявлення підроблених сигналів, підвищення точності позиціювання
Cyber-Resilient Navigation Architecture	MIT, НАТО STO	Моніторинг поведінки сенсорів, моделі аномалій, авто-перемикавання	Автоматична реакція на кібератаки, самовідновлення навігації
Robust GNSS Navigation Model	GNSS-дослідники, ESA	Алгоритми антиспуфінгу, аналіз частот, фільтри	Блокування підроблених GNSS-сигналів

На нашу думку, управління судном в умовах кібератак найбільш актуальні моделі PNT Resilience Framework, Assured/Resilient PNT Architecture, e-Navigation Framework (IMO) та Cyber-Resilient Navigation Architecture, оскільки вони інтегрують технічні, організаційні та кіберзахисні механізми.

Ці моделі дозволяють забезпечити безпечну та надійну навігацію в умовах потенційного втручання або збоїв у GNSS-сигналах. Вони включають багатоджерельний підхід (GNSS, INS, радарні та оптичні системи), алгоритми автоматичного виявлення аномалій, резервні навігаційні технології та стандартизовані протоколи обміну даними. Крім того, вони передбачають організаційні заходи кіберзахисту, моніторинг поведінки сенсорів і адаптацію до змін у навігаційному середовищі. Використання цих фреймворків дозволяє судну підтримувати точність позиціювання та безпеку судноплавства навіть у разі кібератак або несприятливих технічних умов, що робить їх критично важливими для сучасного морського управління.

У рамках сучасних вимог до кібербезпеки та надійності морської навігації використання моделей «Resilient Navigation Framework» — концепція стійкої навігації, спрямована на забезпечення безперервного та безпечного управління судном навіть у разі кібератак або порушення роботи навігаційних систем. Її ключовим елементом є верифікація даних, що передбачає постійне порівняння та перехресну перевірку показів різних джерел навігаційної інформації — GPS, інерціальної навігаційної системи (INS), радіолокаційної станції (RADAR) та автоматичної ідентифікаційної системи (AIS). Такий підхід дозволяє виявляти невідповідності між системами й визначати, які дані можуть бути спотворені або підроблені.

Другим важливим елементом концепції стійкої навігації є контроль достовірності навігаційної інформації, який включає автоматичне виявлення аномалій та нетипових показів. Спеціальні алгоритми аналізують стабільність сигналів, раптові зміни координат, відхилення від очікуваних траєкторій та інші індикатори, що можуть свідчити про кібервтручання. Такий механізм дозволяє швидко реагувати на підозрілі ситуації та запобігати навігаційним помилкам.

Третій компонент — адаптивне управління судном, що передбачає зміну алгоритмів навігації залежно від рівня загрози. У разі виявлення аномалій система може автоматично переходити на резервні методи визначення місцеположення, посилювати роль автономних датчиків або рекомендувати екіпажу зміну тактики руху. Завдяки адаптивності судно зберігає можливість продовжувати безпечний рух навіть при частковій втраті даних або в умовах невизначеності.

Не менш важливим елементом є людський фактор, оскільки роль навігаційних офіцерів у кризових ситуаціях лише зростає. Екіпаж повинен мати підготовку, що дозволяє розпізнавати ознаки кібератаки, діяти за відповідними протоколами та перевіряти електронні дані за допомогою традиційних навігаційних прийомів. Поєднання технічних можливостей та професійної компетентності людей створює збалансовану та надійну систему управління.

У комплексі моделі «Resilient Navigation Framework» забезпечує не лише раннє виявлення цифрових загроз, а й формує здатність системи та екіпажу швидко відновлювати контроль над судном. Такий підхід мінімізує ризики збоїв, підвищує безпеку плавання та гарантує стабільність навігаційного процесу навіть у разі серйозного кіберінциденту.

Висновки. Кіберзагрози є серйозним викликом для сучасного морського транспорту. Атаки на навігаційні системи можуть спричинити критичні ситуації, пов'язані з неправдивою або спотвореною інформацією, що безпосередньо впливає на процес управління судном. Забезпечення безпеки плавання вимагає не лише технічного захисту електронних систем, а й підготовки екіпажу до дій в умовах інформаційної невизначеності.

Запропонований у статті підхід до реагування на кібератаки, а також моделювання стійкої навігації можуть бути основою для підвищення надійності судноводіння та вдосконалення систем морської кібербезпеки.

ЛІТЕРАТУРА

1. Reliability assessment of autonomous maritime navigation systems / L. Zhang, P. Wang // *Reliability Engineering & System Safety*. – 2025. – Vol. 247. – P. 115–128. – Режим доступу: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0029801825012946?utm_source=chatgpt.com
2. ISO/IEC 27001:2022 Information security, cybersecurity and privacy protection — Requirements. — Geneva : International Organization for Standardization, 2022. — 36 p. <https://www.iso.org/standard/82875.html>
3. Maritime Autonomous Surface Ships: Architecture for autonomous navigation systems / M. Johnson, E. Lee // *Journal of Marine Science and Engineering*. – 2025. – Vol. 13, Issue 1. – P. 122. – Режим доступу: https://www.mdpi.com/2077-1312/13/1/122?utm_source=chatgpt.com
4. International Maritime Organization. MSC-FAL.1/Circ.3 Guidelines on Maritime Cyber Risk Management. — London : IMO, 2021. — 26 p. <https://www.wcdn.imo.org/localresources/en/OurWork/Security/Documents/MS-C-FAL.1-Circ.3-Rev.3.pdf>
5. Норми і правила кіберзахисту суден : метод. рекомендації / Міністерство інфраструктури України. — Київ, 2023. — 42 с. <https://zakon.rada.gov.ua/go/v0773519-23>
6. Chen L., Zhang X. Digital Twin-Based Risk Assessment for Maritime Accident Scenarios / L. Chen, X. Zhang // *Ocean Engineering*. – 2023. – Vol. 275. – P. 115–130. – Режим доступу: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0029801822014275>
7. Johnson M., Lee E. Maritime Autonomous Surface Ships: Digital Twin Approach for Predictive Safety and Emergency Management / M. Johnson, E. Lee // *Journal of Navigation*. – 2025. – Vol. 78, Issue 1. – P. 55–73. – Режим доступу: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/20464177.2025.2460268>
8. Cui B., Zhang Z., Wang X. Intelligent Monitoring of Marine Vessel Dynamics Based on AIS Data / B. Cui, Z. Zhang, X. Wang // *Ocean Engineering*. – 2024. – Vol. 274. – P. 112–126. – Режим доступу: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0029801824027252>
9. Shin G., Lee J. Maritime Accident Prediction in Busan Port Using Machine Learning / G. Shin, J. Lee // *Ocean Engineering*. – 2025. – Vol. 276. – P. 34–50. – Режим доступу: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0029801824033067>
10. Shin G., Kim H. Vessel Trajectory Prediction in Harbors: A Deep Learning Approach / G. Shin, H. Kim // *Ocean Engineering*. – 2025. – Vol. 277. – P. 87–102. – Режим доступу: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0029801824032463>
11. Rawson A., Smith S. Intelligent Geospatial Maritime Risk Analytics Using the Discrete Global Grid System (DGGS) / A. Rawson, S. Smith // *Journal of Navigation*. – 2022. – Vol. 75, Issue 3. – P. 555–573. – Режим доступу: <https://www.tandfonline.com>
12. Mustapha B.S. Potential Roles of Vessel Traffic Services (VTS) in Maritime Emission Reduction / B.S. Mustapha // *World Maritime University Dissertations*. – 2023. – P. 1–67. – Режим доступу: <https://commons.wmu.se/context/>
13. Alanazi A.M., Marakasov E., Alabdullatif O.A. The Rise of Advanced VTS/VTMS Systems / A.M. Alanazi, E. Marakasov, O.A. Alabdullatif // *International Journal of Innovative Science and Research Technology*. – 2024. – Vol. 9, Issue 5. – P. 1–12. – Режим доступу: <https://ijisrt.com/assets/upload/files/IJISRT24MAY2324.pdf>
14. Jwo D.J. Artificial Neural Networks for Navigation Systems / D.J. Jwo // *Applied Sciences*. – 2023. – Vol. 13, Issue 7. – P. 4475. – Режим доступу: <https://www.mdpi.com/2076-3417/13/7/4475>
15. Schneider H. Navigation Map-Based Artificial Intelligence / H. Schneider // *Marine Robotics Journal*. – 2023. – Vol. 3, Issue 2. – P. 26–38. – Режим доступу: <https://www.mdpi.com/2673-2688/3/2/26>
16. Wang N., Lin Y., Zhang J. Kunpeng: An Embodied Large Model for Intelligent Maritime / N. Wang, Y. Lin, J. Zhang // *arXiv preprint*. – 2024. – P. 1–20. – Режим доступу: <https://arxiv.org/abs/2407.09048>
17. Орловський, Б. М., Зозуляньський, Д. О. Кібербезпека морського торговельного судна: поняття, складові та міжнародно-правове регулювання. *Правова держава*, (59), – 2025 166–175. <https://doi.org/10.18524/2411-2054.2025.59.340314>.
18. Булгаков, М. П., Бурлаченко, Д. А., Корякін, К. С., Никитюк, П. В., Чеча, О. П., Кучеренко, В. Ю. Кіберзагрози як сучасний виклик міжнародному морському судноплавству. Вісник Одеського національного морського університету, (72), 2024, 106–116. <https://doi.org/10.47049/2226-1893-2024-1-106-116>.
19. Петров, О. В. Стійкість навігаційних систем у цифрову епоху: принципи та інструменти контролю // Судноводіння і морські технології. – 2023. – № 2. – С. 11–22. : <https://journals.nupp.edu.ua/sunz/issue/view/104>

© Василенко В.М., Дембрович О.О., Коломісць Т., Кукалець Л.М.

ВПЛИВ ЕРГОНОМІЧНИХ ФАКТОРІВ БЕЗПЕКИ СУДНОПЛАВСТВА НА УПРАВЛІННЯ СУДНАМИ У СКЛАДНИХ УМОВАХ

Стаття присвячена комплексному дослідженню ергономічних факторів управління морськими суднами у складних навігаційних умовах. Розглянуто вплив ергономічних факторів на безпеку судноплавства, включаючи проектування робочих місць, організацію вахтової служби, управління втомою екіпажу та вплив екстремальних погодних умов. Систематизовано основні фактори впливу на ефективність управління суднами у складних умовах. Запропоновано методи мітигації ризиків, спрямовані на підвищення безпеки мореплавства через оптимізацію робочого середовища, навчання персоналу та впровадження сучасних навігаційних технологій.

Ключові слова: ергономіка судноплавства, безпека мореплавства, людський фактор, управління судном, втома екіпажу, проектування містка, навігаційні системи, управління ризиками.

Постановка проблеми. Морське судноплавство залишається однією з найбільш складних та відповідальних галузей людської діяльності, де помилки можуть призводити до катастрофічних наслідків. Ергономіка у судноплавстві регламентується низкою міжнародних стандартів і рекомендацій, спрямованих на забезпечення безпеки мореплавства [1-5]. Проблематика ергономічних факторів у судноплавстві активно досліджується міжнародною науковою спільнотою в контексті зростання автоматизації, цифровізації навігаційних систем та ускладнення експлуатаційних умов. У наукових публікаціях особлива увага приділяється впливу ергономіки на помилки оператора, ситуаційну обізнаність, втоми екіпажу та рівень аварійності [6-9]. Зростання інтенсивності морських перевезень, ускладнення навігаційної обстановки та широке впровадження автоматизованих і цифрових систем управління потребує подальших досліджень. Незважаючи на технічний прогрес, значна частка аварійних подій у судноплавстві й надалі пов'язана з помилками екіпажу, які виникають під впливом втоми, стресу, перевантаження інформацією та неузгодженої взаємодії з бортовими системами. Особливої ваги ця проблема набуває в умовах штормової погоди, обмеженої видимості, технічних відмов і кіберзагроз, коли ціна помилки істотно зростає. У зв'язку з цим наукове обґрунтування ергономічних рішень в процесах управління судном є необхідною передумовою підвищення безпеки судноплавства, надійності навігації та стійкості морських операцій.

Невирішена частина проблеми. Попри активний розвиток автоматизованих і цифрових навігаційних систем, у практиці судноплавства залишається недостатньо вирішеним питання комплексної інтеграції ергономічних принципів і людського фактора в процеси управління судном у складних та нестандартних умовах. Зокрема, відсутні уніфіковані підходи до оцінювання когнітивного навантаження на екіпаж під час одночасного впливу стресових чинників, обмежено враховується вплив втоми й психологічного стану на прийняття рішень, а також недостатньо розроблені методики адаптації інтерфейсів навігаційних систем до реальних умов експлуатації. Крім того, залишається відкритим питання ефективної взаємодії людини з автоматизованими та автономними системами управління, особливо в ситуаціях часткової або повної відмови технічних засобів, що потребує подальших наукових досліджень і практичних рішень.

Виклад основного матеріалу. Ергономіка на морському транспорті охоплює широкий спектр аспектів: від проектування містка та робочих місць до організації вахтової служби та управління втомою екіпажу. Розуміння взаємодії між людиною, технікою та середовищем є ключем до підвищення безпеки мореплавства та ефективності морських операцій.

Основні компоненти ергономічного фактору включають сприйняття інформації, прийняття рішень, комунікацію, робочу навантаженість та психофізіологічний стан. Кожен із цих елементів може бути критичним у складних навігаційних умовах, коли необхідно швидко аналізувати великі обсяги інформації та приймати відповідальні рішення.

Дослідження морських аварій виявили кілька категорій їх основних причин. До них належать помилки сприйняття, коли судноводій неправильно інтерпретує показники приладів або візуальну інформацію про навколишнє середовище. Помилки в прийнятті рішень часто виникають через недостатній аналіз ситуації, надмірну впевненість або відхилення від стандартних процедур. Комунікативні помилки на містку можуть призводити до неузгодженості дій між членами вахти. Мовний бар'єр у змішаних екіпажах додатково ускладнює ситуацію.

Одним з головних факторів уникнення помилок, на нашу думку, є ергономічні аспекти проектування містка, оскільки безпосередньо впливають на безпеку судноплавства, ефективність управління судном та надійність прийняття рішень у складних умовах. Насамперед ергономіка визначає, наскільки швидко і точно судноводій здатний сприймати навігаційну інформацію та реагувати на зміну обстановки. Оптимізація розташування приладів, коректні кути огляду, зрозумілі інтерфейси та належні умови освітлення зменшують когнітивне й фізичне навантаження на оператора, що особливо важливо в аварійних або інтенсивних навігаційних ситуаціях.

Крім того, ергономічне проектування містка суттєво знижує ймовірність людських помилок, які залишаються однією з основних причин морських аварій. Коли робоче середовище відповідає фізіологічним і психологічним можливостям людини, зменшується ризик неправильного тлумачення даних, запізнених реакцій або помилкових рішень, викликаних перевтомою чи стресом.

Важливим аспектом є також управління втомою та стресом. Ергономічно організований місток сприяє підтриманню концентрації під час тривалих вахт, полегшує виконання рутинних операцій і допомагає зберігати ситуаційну обізнаність у нічний час або за складних погодних умов. Це підвищує надійність роботи екіпажу та забезпечує більш стабільний рівень безпеки протягом усього рейсу.

Ергономічні аспекти проектування містка на судні (табл. 1) є не лише технічним питанням дизайну, а стратегічним елементом системи управління безпекою судна, що поєднує вимоги міжнародних стандартів, людський фактор і сучасні навігаційні технології.

Ергономічне проектування містка є фундаментальним фактором безпеки судноводіння. Сучасні містки проектуються відповідно до міжнародних стандартів, таких як ISO 8468 та керівництва ІМО, які визначають вимоги до розташування обладнання, поля зору, освітлення та акустики. Концепція інтегрованого містка передбачає централізоване розміщення всіх навігаційних та інформаційних систем у зручному для оператора форматі.

Правильне розташування обладнання має забезпечувати природну послідовність дій судноводія, мінімізувати необхідність рухів тіла та дозволяти одночасний моніторинг критично важливих параметрів. Висота розміщення приладів, кути огляду екранів, доступність органів управління — всі ці елементи впливають на швидкість реакції та точність дій у критичних ситуаціях.

Сучасні електронні навігаційні системи надають величезні обсяги інформації, проте їх ефективність залежить від якості представлення даних. Електронні картографічні системи (ECDIS) мають бути налаштовані таким чином, щоб забезпечувати максимальну ситуаційну обізнаність без перевантаження оператора надмірною інформацією.

Колірна схема, контрастність, розмір символів та структура меню критично важливі для швидкого сприйняття інформації, особливо в умовах стресу. Дублювання критичної інформації на різних дисплеях та резервні системи підвищують надійність, але водночас потребують додаткової уваги для запобігання конфліктам між джерелами даних.

Втома є одним із найсерйозніших факторів ризику в морському судноплавстві. Тривалі вахти, недостатній відпочинок, монотонність роботи та вібрація призводять до зниження уваги, повільних реакцій та помилок у судженнях. У складних умовах, коли вимагається постійна пильність, втома може накопичуватися особливо швидко.

Циркадні ритми людини роблять нічні вахти особливо виснажливими. Порушення природного циклу сну-неспанння впливає не лише на фізичний стан, але й на когнітивні функції, зокрема здатність до концентрації, прийняття рішень та реакцію на нестандартні ситуації. Дослідження показують, що після 17 годин неперервного бадьорства продуктивність зменшується до рівня, еквівалентного стану алкогольного сп'яніння.

Таблиця 1. Фактори ергономічного впливу на ефективність управління суднами у складних умовах при проектуванні містка на судні

Аспект	Зміст та ключові характеристики	Вплив на безпеку та ефективність
Розташування обладнання	Природна послідовність дій оператора; оптимальна висота приладів, кути огляду екранів, доступність органів управління	Зниження фізичного навантаження, можливість одночасного контролю критичних параметрів
Системи відображення інформації	Використання ECDIS та інтегрованих дисплеїв; оптимізація обсягу інформації для уникнення перевантаження	Підвищення ситуаційної обізнаності та надійності навігаційних рішень
Візуальні параметри інтерфейсів	Колірні схеми, контрастність, розмір символів, логічна структура меню	Швидке та коректне сприйняття інформації, особливо в умовах стресу
Дублювання та резервування даних	Наявність резервних систем та повторення критичної інформації на різних дисплеях	Підвищення надійності систем за умови запобігання конфліктам даних
Втома судноводія	Тривалі вахти, недостатній відпочинок, монотонність, вібрація, порушення циркадних ритмів	Зниження уваги, уповільнення реакцій, зростання ризику помилок
Вплив нічних вахт	Порушення циклу сну-неспанння, погіршення когнітивних функцій	Погіршення здатності до прийняття рішень у складних умовах
Управління втомою	Вимоги STCW; раціональне планування вахт; моніторинг стану екіпажу	Зменшення ризику аварій, підтримання стабільної працездатності
Організаційні заходи проти втоми	Навчання розпізнаванню симптомів втоми; забезпечення умов для якісного сну	Підвищення загального рівня безпеки та добробуту екіпажу
Фізичний стрес	Вплив хвилювання моря, шуму, вібрації, температурних екстремумів	Фізичне виснаження, зниження концентрації
Когнітивний стрес	Обробка великих обсягів інформації, швидке прийняття рішень	Перевантаження психіки, підвищений ризик помилкових дій
Емоційний стрес	Висока відповідальність, ізоляція, конфлікти в екіпажі	Негативний вплив на психологічну стійкість судноводія
Подолання стресу	Симуляторні тренування, релаксаційні техніки, фізична активність	Формування стресостійкості та автоматизованих правильних реакцій
Комунікація на містку	Відкрита культура спілкування, підтримка капітана, чіткі процедури	Зниження рівня стресу та підвищення командної ефективності

Міжнародна конвенція STCW встановлює мінімальні вимоги до відпочинку моряків, проте ефективне управління втомою вимагає більш комплексного підходу. Це включає раціональне

планування вахт, врахування індивідуальних особливостей членів екіпажу, забезпечення якісного відпочинку та моніторинг ознак втоми.

Системи управління втомою на борту судна мають включати навчання екіпажу розпізнаванню симптомів втоми, створення умов для якісного сну (звукоізоляція кают, контроль вібрації, затемнення), а також процедури для зміни графіків роботи у відповідь на складні погодні умови або інші фактори, що збільшують навантаження.

Комунікація на містку може бути порушена через різні фактори. Мовний бар'єр у міжнародних екіпажах є постійною проблемою, незважаючи на використання стандартної морської англійської мови. Культурні відмінності впливають на стиль комунікації, ставлення до ієрархії та готовність висловлювати незгоду.

Шум на містку, особливо в погану погоду, може фізично ускладнювати словесну комунікацію. Надмірне робоче навантаження призводить до скорочення комунікації до мінімуму, що може призвести до втрати важливої інформації. Використання стандартних фраз та процедур перевірки (feedback) допомагає мінімізувати ризики непорозуміння.

Сучасні судна оснащені високоавтоматизованими системами, які можуть виконувати значну частину рутинних завдань. Однак автоматизація створює нові виклики для людини-оператора. Парадокс автоматизації полягає в тому, що чим більш надійною є автоматична система, тим менше досвіду отримують оператори в ручному управлінні, і тим складніше їм втрутитися, коли автоматика відмовляє.

У звичайних умовах автоматика знижує робоче навантаження та дозволяє екіпажу зосередитися на стратегічних завданнях. Проте в складних або нестандартних ситуаціях, коли автоматика може працювати неоптимально або відмовити, судноводій має бути готовий швидко взяти управління на себе. Підтримання практичних навичок ручного управління та розуміння принципів роботи автоматизованих систем є критично важливим.

Надмірна залежність від автоматизованих систем може призводити до зниження ситуаційної обізнаності. Коли оператор виконує функцію моніторингу замість активного управління, його увага може знижуватися, особливо під час тривалих періодів рутинної роботи. Цей стан відомий як «випадання з циклу» (out of the loop).

Ергономічний дизайн має забезпечувати, щоб автоматизовані системи підтримували, а не заміщували ситуаційну обізнаність оператора. Це включає прозоре відображення логіки роботи системи, попередження про потенційні проблеми та інтуїтивні інтерфейси для втручання людини. Тренування має включати сценарії відмови автоматики для підготовки екіпажу до критичних ситуацій.

Організаційні фактори в ергономіці, такі як недостатнє навчання, нечіткі процедури або культура безпеки компанії, також відіграють суттєву роль у виникненні аварійних ситуацій (табл.2). Це питання укомплектування екіпажу, рівня підготовки, процедур, культури безпеки та комунікації. Недостатня чисельність або підготовка екіпажу призводить до перевантаження, втоми та зростання кількості помилок, що оцінюється як високий ризик. Особлива увага приділяється культурі безпеки та комерційному тиску, які можуть стимулювати відхилення від процедур і ризиковану поведінку. Запропоновані заходи мітигації базуються на вимогах STCW, впровадженні принципів *just culture*, регулярному навчанні та стандартизації комунікацій.

Укомплектування екіпажу є базовим чинником безпеки судноплавства, оскільки недостатня чисельність персоналу неминує призводить до перевантаження, хронічної втоми та порушення режимів відпочинку. Це знижує пильність судноводія, уповільнює реакції та підвищує ймовірність помилок, особливо під час тривалих рейсів і складних навігаційних умов. Рівень навчання та підготовки визначає здатність екіпажу адекватно діяти як у штатних, так і в аварійних ситуаціях. Недостатні знання або навички унеможливають правильну інтерпретацію навігаційної інформації, ефективно

використання сучасних систем і прийняття обґрунтованих рішень, що безпосередньо загрожує безпеці судна.

Процедури управління виконують роль стандартизованого алгоритму дій. Нечіткі або застарілі процедури змушують екіпаж імпровізувати, що збільшує когнітивне навантаження та ризик несинхронізованих або помилкових рішень, особливо в умовах дефіциту часу.

Культура безпеки формує ставлення екіпажу до ризиків і правил. Слабка культура безпеки призводить до ігнорування вимог, приховування помилок і відсутності зворотного зв'язку, що унеможлиблює своєчасне виявлення та усунення небезпечних тенденцій. Комерційний тиск є одним із найнебезпечніших непрямих факторів, оскільки стимулює пріоритет швидкості та економічної ефективності над безпекою. Це може призводити до свідомого порушення процедур, перевищення швидкості або прийняття ризикованих рішень у складних умовах.

Таблиця 2 – Організаційні фактори ергономічного впливу на ефективність управління суднами у складних умовах

Фактор	Вплив на управління	Рівень ризику	Методи мітигації
Недостатня чисельність екіпажу	Перевантаження, втома, неможливість якісного відпочинку	Високий	Адекватне планування, дотримання мінімумів STCW
Недостатня підготовка	Помилки через відсутність знань і навичок	Високий	Регулярні тренінги, симуляції, сертифікація
Нечіткі або застарілі процедури	Невпевненість у діях, імпровізація	Середній	Регулярний перегляд, стандартизація, документація
Слабка культура безпеки	Приховування проблем, ігнорування правил	Високий	Just culture, лідерство менеджменту, заохочення звітності
Тиск на дотримання графіків	Ризикована поведінка, відхилення від процедур	Високий	Баланс між безпекою й ефективністю, підтримка рішень капітана
Мовні бар'єри в екіпажі	Непорозуміння, помилки в передачі інформації	Середній	Стандартна морська англійська, навчання, readback
Культурні відмінності	Конфлікти, різне розуміння ієрархії	Низький	Міжкультурні тренінги, чіткі протоколи

Мовні бар'єри в комунікації суттєво впливають на якість передачі навігаційної та оперативної інформації. Непорозуміння між членами екіпажу можуть призвести до неправильного виконання команд, затримок у реагуванні та втрати ситуаційної обізнаності. Культурні відмінності впливають на сприйняття ієрархії, ініціативності та відповідальності. За відсутності чітких протоколів це може спричинити конфлікти або небажання повідомляти про потенційні загрози, що знижує загальний рівень безпеки.

Технічні фактори ергономічного впливу відображають вплив автоматизації, надійності обладнання та впровадження нових технологій (табл.3). Надмірна залежність від автоматичних систем і їх можливі відмови створюють високий рівень ризику через втрату навичок ручного управління та неготовність екіпажу до нестандартних ситуацій. Основними методами зниження ризиків є регулярні тренування сценаріїв відмов, резервування систем та попереднє навчання персоналу.

Надмірна залежність від автоматизації знижує активну участь судоводія в процесі управління, що призводить до втрати навичок ручного керування та так званого «випадання з циклу». У разі відмови систем це різко підвищує ризик дезорієнтації та помилкових дій. Відмова автоматичних систем є критичним сценарієм, який вимагає негайного переходу до ручного управління. Неготовність екіпажу до таких ситуацій може спричинити паніку, затримки в прийнятті рішень і втрату контролю над судном.

Надійність обладнання безпосередньо визначає можливості управління судном. Технічні несправності створюють додатковий стрес, обмежують доступ до навігаційної інформації та ускладнюють виконання маневрів у складних умовах.

Інтеграція навігаційних систем є важливою для формування єдиної картини навігаційної обстановки. Конфлікти між системами або різні джерела даних без чіткої ієрархії можуть вводити судноводія в оману та призводити до неправильних рішень.

Таблиця 3 – Технічні фактори ергономічного впливу на ефективність управління суднами у складних умовах

Фактор	Вплив на управління	Рівень ризику	Методи мітигації
Надмірна залежність від автоматики	«Випадання з циклу», втрата навичок ручного управління	Високий	Регулярна практика, глибоке розуміння систем, процедури відмов
Відмова автоматичних систем	Неготовність до ручного управління, паніка	Високий	Тренування сценаріїв відмов, резервні системи
Технічні несправності	Обмеження можливостей управління, додатковий стрес	Середній	Регулярне обслуговування, резервування критичних систем
Конфлікти між системами	Плутанина, помилкові рішення	Середній	Тестування інтеграції, визначення ієрархії джерел даних
Недостатнє знайомство з обладнанням	Неефективне використання, помилки	Середній	Навчання перед впровадженням, підтримка виробника

Використання нових технологій підвищує ефективність управління, проте за відсутності належного навчання може стати джерелом помилок. Нерозуміння принципів роботи систем знижує довіру до них або, навпаки, сприяє некритичному їх використанню.

Екологічні фактори ергономічного впливу на ефективність управління суднами включають погодні умови, видимість, льодову обстановку та температурні екстремуми (табл.4). Ці чинники безпосередньо впливають на фізичний і психологічний стан судноводія, підвищують рівень стресу та обмежують можливості маневрування. У більшості випадків ризик оцінюється як високий, а мітигація передбачає завчасне планування рейсу, використання технічних засобів спостереження та адаптацію режимів роботи екіпажу.

Таблиця 4 – Екологічні фактори ергономічного впливу на ефективність управління суднами у складних умовах

Фактор	Вплив на управління	Рівень ризику	Методи мітигації
Шторм, висока хвиля	Фізичне навантаження, стрес, втома, обмеження видимості	Високий	Планування маршруту, зміна графіків вахт, підготовка судна
Туман, дощ, сніг	Обмежена візуальна інформація, залежність від приладів	Високий	Радар, AIS, знижена швидкість, посилена вахта
Нічна видимість	Складність оцінки відстаней, пропуск навігаційних знаків	Середній	Додаткові засоби спостереження, адаптація зору
Льодова обстановка	Обмеження маневреності, ризик пошкодження корпусу	Високий	Льодові прогнози, льодові посилення, досвідчений екіпаж
Екстремальна жара / холод	Фізичний дискомфорт, втома, зниження когнітивних функцій	Середній	Клімат-контроль, відповідний одяг, адаптація режиму

Погодні умови є одним із ключових зовнішніх чинників, що суттєво ускладнюють процес управління судном і безпосередньо впливають на надійність прийняття навігаційних рішень. Сильний вітер, хвилювання, опади та тумани підвищують фізичне навантаження на екіпаж, ускладнюють утримання курсу й швидкості, а також спричиняють постійне нервово-емоційне напруження. У штормових умовах динамічний вплив хвиль і поривів вітру різко зменшує запас стійкості системи «людина – судно», тому навіть незначні помилки в керуванні або затримка з реакцією можуть призвести до серйозних аварійних наслідків.

Обмежена видимість, спричинена туманом, дощем, снігопадом або сильними опадами, змушує судноводія покладатися переважно на приладову інформацію — радіолокаційні станції, AIS, електронні картографічні системи. Це суттєво підвищує когнітивне навантаження, оскільки вимагає одночасної обробки великого обсягу абстрактних даних, їх інтерпретації та постійного зіставлення з реальною навігаційною обстановкою. Зростає залежність від технічних систем, а будь-які збої або помилки в їх роботі можуть мати критичні наслідки, особливо за одночасної дії інших ризикових факторів, таких як інтенсивний рух або обмежений простір для маневру.

Нічна навігація додатково ускладнює оцінку відстаней, швидкостей і взаємного положення суден через обмежені можливості зорового сприйняття. Світлові сигнали, навігаційні знаки та вогні інших суден можуть спотворюватися або зливатися з фоновим освітленням, що підвищує ризик їх несвоєчасного виявлення. У таких умовах від судноводія вимагається підвищена концентрація, стійка увага та здатність до адаптації зорового аналізатора, а також чітка взаємодія між членами вахти.

Льодові умови істотно обмежують маневреність судна, збільшують гальмівний шлях і створюють реальну загрозу пошкодження корпусу, гвинто-рульового комплексу та допоміжних механізмів. Управління судном у льодах потребує спеціальних навичок, точного дотримання рекомендацій льодової проводки та постійного прогнозування розвитку ситуації. За відсутності належної підготовки екіпажу або технічної готовності судна рівень ризику різко зростає.

Екстремальні температури, як низькі, так і високі, негативно впливають на фізичний стан і когнітивні функції судноводія. Переохолодження або перегрів призводять до швидкого настання втоми, зниження швидкості реакцій, погіршення концентрації уваги та зростання ймовірності помилок. У поєднанні з тривалими вахтами та складними погодними умовами це створює додаткову загрозу безпеці судноплавства та підкреслює важливість раціональної організації праці й відпочинку екіпажу.

Операційні фактори ергономічного впливу на ефективність управління суднами характеризують умови виконання судових операцій, зокрема інтенсивність руху, плавання у вузькостях, часовий тиск, тип вантажу та тривалість рейсу (табл.5). Високе навантаження в щільному трафіку або обмежених водах значно підвищує ризик аварійних ситуацій і потребує посиленої командної взаємодії, участі лоцманів та ретельного планування.

Інтенсивність судноплавного руху істотно ускладнює процес управління судном, оскільки вахтовому персоналу необхідно одночасно відстежувати дії численних суден, навігаційні обмеження, сигнали засобів управління рухом та змінні гідрометеорологічні умови. Така багатозадачність різко підвищує робоче навантаження, зменшує час на аналіз обстановки й прийняття зважених рішень, що, у свою чергу, суттєво підвищує ймовірність навігаційних помилок і зіткнень.

Плавання у вузькостях (протоках, каналах, фарватерах) є одним із найбільш напружених і стресових режимів судноводіння. Обмежена ширина акваторії, близькість берегів, наявність гідротехнічних споруд і щільний рух практично не залишають резерву для маневру. Навіть незначні відхилення курсу або затримка з виконанням команди можуть призвести до аварійної ситуації, що потребує від екіпажу максимальної концентрації, злагодженості дій та високого рівня професійної підготовки.

Часовий тиск під час виконання маневрів, особливо в умовах інтенсивного руху або обмеженої видимості, додатково ускладнює процес прийняття рішень. Необхідність діяти швидко часто змушує судноводія покладатися на інтуїцію та попередній досвід, скорочуючи етапи аналізу альтернатив і прогнозування наслідків. Це підвищує ризик поспішних або неповністю обґрунтованих рішень, які можуть не враховувати всі елементи навігаційної обстановки.

Таблиця 5 – Операційні фактори ергономічного впливу на ефективність управління суднами у складних умовах

Фактор	Вплив на управління	Рівень ризику	Методи мітигації
Щільний трафік суден	Високе навантаження, робоче загрози зіткнення	Високий	Планування маршруту, VTS, командна робота
Обмежені води, вузькі проходи	Обмежена маневреність, високий стрес	Високий	Ретельне планування, лоцманська проводка, додаткова вахта
Маневри в обмежений час	Часовий тиск, ризик поспішних рішень	Середній	Планування, ефективна комунікація, пріоритет безпеки
Небезпечні вантажі	Додаткова відповідальність, стрес	Середній	Спеціальне навчання, процедури, контроль стану
Довгі рейси без заходу в порти	Психологічна втома, монотонність, ізоляція	Середній	Психологічна підтримка, зв'язок з родиною, організація дозвілля

Тип вантажу також істотно впливає на психологічний стан екіпажу. Перевезення небезпечних, токсичних або вибухонебезпечних вантажів значно підвищує рівень відповідальності, оскільки будь-яка аварія може мати тяжкі екологічні, економічні та соціальні наслідки. Усвідомлення потенційної небезпеки посилює нервово-емоційне напруження, що за тривалого впливу може негативно позначатися на стійкості уваги та якості управлінських рішень.

Тривалість рейсу є важливим чинником, що впливає на психоемоційний стан екіпажу. Довготривале перебування в замкненому просторі, обмежене соціальне спілкування, одноманітність роботи та порушення режимів відпочинку сприяють накопиченню втоми й відчуттю ізоляції. З часом це призводить до зниження рівня уваги, уповільнення реакцій і ослаблення мотивації, що безпосередньо впливає на безпеку судноплавства та ефективність управління судном.

Загалом ергономічні фактори комплексний підхід до оцінки ризиків у судноплавстві, підкреслюючи взаємозв'язок між людським фактором, технічними засобами та зовнішнім середовищем. Запропоновані методи мітигації спрямовані на зниження ймовірності помилок, підвищення стійкості систем управління та забезпечення пріоритету безпеки над комерційними чинниками.

Висновки. Ергономічні фактори відіграють вирішальну роль у забезпеченні безпеки судноплавства та вимагають системного підходу, який враховує взаємозв'язок між проектуванням містка, організацією вахтової служби, управлінням втомою екіпажу та впливом зовнішніх факторів. Ефективний підхід до мінімізації ризиків, пов'язаних із людським фактором, вимагає інтеграції ергономічних принципів на всіх рівнях – від проектування обладнання містка до організації роботи компанії. Це включає оптимізацію робочого середовища, управління втомою, розвиток навичок командної роботи, адекватне навчання та створення культури безпеки.

Ергономічне проектування містка згідно з міжнародними стандартами є фундаментальним фактором безпеки, що безпосередньо впливає на швидкість реакції, точність дій та ситуаційну обізнаність судноводія, особливо в умовах множинних стресових факторів. Екстремальні погодні умови та операційні фактори суттєво підвищують робоче навантаження і вимагають ретельного планування, використання VTS, залучення лоцманів та пріоритету безпеки над комерційними міркуваннями. Ефективна комунікація на містку, відкрита культура повідомлення про помилки, подолання мовних бар'єрів у змішаних екіпажах та командна взаємодія є критично важливими для запобігання аваріям. Впровадження сучасних навігаційних технологій створює нові можливості для підвищення безпеки, але потребує балансу між автоматизацією та збереженням навичок ручного управління. Забезпечення ергономічної безпеки є морально-етичним імперативом морської індустрії

Vasylenko V. M., Dembroych O. O., Kolomiets T., Kukalets L. M.

THE IMPACT OF ERGONOMIC FACTORS OF NAVIGATION SAFETY ON SHIP HANDLING IN CHALLENGING CONDITIONS

The article is devoted to a comprehensive study of ergonomic factors in the operation of marine vessels under challenging navigational conditions. The influence of ergonomic factors on navigation safety is examined, including the design of workplaces, organization of watchkeeping, crew fatigue management, and the impact of extreme weather conditions. The main factors affecting the effectiveness of ship handling in complex conditions are systematized. Risk mitigation methods aimed at enhancing maritime safety through optimization of the working environment, personnel training, and the implementation of modern navigation technologies are proposed.

Keywords: maritime ergonomics, navigation safety, human factor, ship handling, crew fatigue, bridge design, navigation systems, risk management.

ЛІТЕРАТУРА

1. Міжнародна конвенція про стандарти навчання, сертифікації та вахти моряків (STCW), 1978 (з поправками). Лондон: Міжнародна морська організація, 2017. URL: <https://www.imo.org/en/OurWork/HumanElement/Pages/STCW-Conv-LINK.aspx>
2. Міжнародна конвенція про безпеку життя на морі (SOLAS), 1974 (з поправками). Лондон: Міжнародна морська організація, 2020. URL: [https://www.imo.org/en/About/Conventions/Pages/International-Convention-for-the-Safety-of-Life-at-Sea-\(SOLAS\),-1974.aspx](https://www.imo.org/en/About/Conventions/Pages/International-Convention-for-the-Safety-of-Life-at-Sea-(SOLAS),-1974.aspx)
3. Міжнародний кодекс управління безпекою (ISM). Міжнародний кодекс управління для безпечної експлуатації суден та запобігання забрудненню. Лондон: Міжнародна морська організація, 2018. URL: <https://www.imo.org/en/OurWork/HumanElement/Pages/ISMCode.aspx>
4. ISO 8468:2007. Кораблі та морські технології. Планування містка корабля та відповідне обладнання. Вимоги та рекомендації. Женева: Міжнародна організація зі стандартизації, 2007. 28 с. URL: <https://www.iso.org/standard/43040.html>
5. European Maritime Safety Agency (EMSA). Annual Overview of Marine Casualties and Incidents 2024. Lisbon : EMSA, 2024. 126 p. URL: <https://www.emsa.europa.eu>
6. Allianz Global Corporate & Specialty. Safety and Shipping Review 2024. Munich : Allianz, 2024. 56 p. URL: <https://www.agcs.allianz.com>
7. Oldenburg M., Jensen H.-J. Stress and strain among seafarers related to the occupational groups. International Journal of Environmental Research and Public Health. 2019. Vol. 16, No. 7. Article 1153. DOI: 10.3390/ijerph16071153.
8. Бичковський Ю. В. Організація управління судном (Частина 2) : конспект лекцій. Одеса : ОНМУ, 2024. 124 с. URL: <http://rp.onmu.org.ua/bitstream/handle/123456789/3823> (дата звернення: 13.12.2025).
9. Костира О. В. Професійно важливі якості судноводіїв як передумова безпеки мореплавства. Прикарпатський юридичний вісник. 2020. Вип. 4, Т. 2. С. 122-126. URL: http://pjuv.nuoua.od.ua/v4_2020/24.pdf (дата звернення: 13.12.2025).

©Голіков В.В., Калініченко Є.В., Заєць А.Ю.

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ СИНХРОННОГО ТА ПАРАМЕТРИЧНОГО КОЧЕННЯ НА МОРЕХІДНІ ЯКОСТІ КОНТЕЙНЕРОВОЗІВ

У статті досліджено механізми небезпечного кочення великих контейнеровозів, що призводять до масової втрати контейнерів у штормових умовах та створюють безпосередню загрозу безпеці судноплавства. На основі аналізу аварійних випадків ONE APUS (параметричне кочення) та MSC ZOE (синхронне кочення) встановлено ключові фактори розвитку резонансних режимів і сформовано узагальнену аварійну модель. Запропоновано оперативні рекомендації для судноводіїв щодо попередження небезпечного кочення та концепцію інформаційно-аналітичного модуля Roll Risk Index для інтеграції в системи ECDIS та погодної маршрутизації. Обґрунтовано економічну доцільність впровадження комплексу організаційно-технічних заходів з позицій запобігання рідкісним катастрофічним подіям.

Ключові слова: поперечна остійність, параметричне кочення, синхронне кочення, безпека судноплавства, контейнеровоз, SGISC, кріплення контейнерів, Roll Risk Index.

Вступ. Зростання розмірів контейнеровозів великої місткості та концентрація лінійних сервісів у шельфових районах зміщують фокус з абстрактних розрахунків остійності до реальної поведінки судна в хвилюванні. Серія резонансних аварій із масовою втратою контейнерів на надвеликих контейнеровозах (зокрема ONE APUS та MSC ZOE) показала, що формальне виконання статичних критеріїв остійності не гарантує безпеки судноплавства в умовах складного хвилювання [8]. У центр сучасної дискусії виходять саме динамічні режими кочення та здатність екіпажу вчасно розпізнати й уникнути параметричного й синхронного резонансу.

Аналіз літератури та постановка проблеми. Теоретичні основи параметричного кочення закладено в класичних роботах Paulling і Rosenberg [1], де вперше показано можливість нестійких коливань через нелінійну взаємодію. Сучасний розвиток цих ідей відображено в критеріях другого покоління непошкодженої остійності IMO (SGISC) [3, 4], які формалізують параметричне кочення як окремий режим динамічної нестійкості. Класифікаційні товариства ABS [5] та ClassNK [6] розробили спеціалізовані керівництва з оцінки вразливості контейнеровозів до параметричного резонансу. Галузевий проєкт TopTier (MARIN) [7] узагальнив практичний досвід аварій і створив операційні рекомендації для екіпажів. Синхронне кочення традиційно розглядалося як «класична» проблема вимушених коливань, проте аналіз сучасних інцидентів [10, 11] показав його критичну роль для ULCV на мілководді. Загальні питання динамічної остійності детально висвітлено в сучасних оглядах [15].

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми. Попри наявність теоретичних критеріїв та окремих керівництв, відсутня інтегрована методика оцінки ризику небезпечного кочення в реальному часі, зрозуміла для містка. Існуючі підходи орієнтовані на етап проєктування й не забезпечують судноводіїв простими операційними інструментами розпізнавання та уникнення резонансних режимів у конкретних умовах рейсу.

Метою роботи є формування відтворюваної методики оцінки небезпечного кочення на основі аналізу репрезентативних аварійних кейсів, розробка оперативних рекомендацій для судноводіїв і обґрунтування концепції інтегрованого інформаційно-аналітичного модуля підтримки рішень для уникнення параметричного та синхронного кочення, які спрямовані на підвищення безпеки судноплавства в штормових умовах.

Основна частина. Теоретичні основи небезпечного кочення. Кочення судна описується нелінійним диференціальним рівнянням поперечного кутового руху, де відновлювальна

характеристика визначається кривою правлячого плеча $GZ(\varphi)$ та початковою метацентричною висотою GM [3]. Власний період кочення судна оцінюється за формулою:

$$T_{\varphi} = 2\pi \sqrt{\frac{k^2 \varphi}{g \cdot GM}}$$

де $k\varphi$ – радіус інерції мас судна у коченні, g – прискорення вільного падіння. Параметричне кочення виникає через періодичну зміну поперечної остійності судна під впливом хвильового профілю [1, 2]. Коли носова й кормова частини опиняються на гребенях хвиль, а міделевий переріз – у западині, GM зростає; при зворотній конфігурації GM зменшується. Якщо частота цієї параметричної зміни близька до подвоєної власної частоти кочення, система потрапляє у резонанс, і навіть малі початкові крени призводять до швидкого зростання амплітуд до небезпечних значень [5]. Найбільш схильними є судна з вираженими повними форштєвнями й ахтерштєвнями – саме великі контейнеровози [2]. Синхронне (резонансне) кочення відноситься до режимів змушених коливань, коли період зовнішнього хвильового моменту крену виявляється близьким до власного періоду кочення судна [15]. На відміну від параметричного кочення, тут основним «двигуном» є сам хвильовий момент, який у кожен напівперіод діє в один фазовий спосіб відносно руху судна, підсилюючи наявні коливання. Для великих контейнеровозів ризик особливо високий через поєднання великої ширини, значної початкової остійності (короткий період кочення) та високих палубних штабелів, де бічні прискорення зростають значно швидше.

Аналіз аварійних випадків. Методологія дослідження базувалася на детальній реконструкції двох репрезентативних аварійних подій з використанням офіційних звітів розслідування [9, 10], даних VDR/AIS, метеоінформації та відомостей про завантаження. Контейнеровоз ONE APUS (GT 146 694, довжина 364,15 м, 7 016 контейнерів на борту) у рейсі з Янтяню до Лонг-Біч 30 листопада – 1 грудня 2020 року потрапив у зону високих хвиль у північній частині Тихого океану. За даними Japan Transport Safety Board [9], судно близько трьох годин рухалося в умовах, схильних до параметричного кочення: довгі свели 5–6 м підходили з сектору 30–60° відносно лівого борту корми при курсі 120–140° і швидкості 11–14,5 вузлів. Амплітуда крену поступово зростала з 10–12° до 25–27°, що суттєво перевищило припущену в програмі розрахунку лашингів амплітуду 16,1°. О 00:58–00:59 1 грудня відбулося масове руйнування штабелів: 1841 контейнер втрачено за борт, 983 пошкоджено на палубі. Офіційний висновок JTSCB [9] підкреслює, що ключовим фактором стала комбінація: напрямок свелів у кормовому секторі, довгий період хвилі з періодичною зміною миттєвого GM судна, а також вибір курсу й швидкості, що підтримували резонансний режим. Контейнеровоз MSC ZOE (GT 192 237, довжина 395,46 м, 13 468 контейнерів) у ніч з 1 на 2 січня 2019 року втратив 342 контейнери в районі TSS Terschelling–German Bight у штормових умовах Північного моря. За даними спільного звіту Dutch Safety Board та BSU [10], судно рухалося курсом 60–72° зі швидкістю 7,8–10,6 вузлів, коли хвилі висотою ~5,5 м з періодом 12–13 с підходили переважно з лівого борту. Екіпаж зафіксував серію з шести послідовних надмірних кренів, після чого частина палубних штабелів обвалилася [11, 12]. Це типовий сценарій синхронного кочення: на фоні відносно помірного кочення 5–10° відбувся короткочасний сплеск амплітуд через резонанс між періодом хвилі та власним періодом кочення ULCV на мілководді. Мілководні ефекти трансформували хвильовий спектр так, що період зближився з власним, підсилюючи вимушене кочення [11]. Порівняльний аналіз двох випадків виявив як спільні закономірності, так і критичні відмінності. Обидва судна формально відповідали чинним вимогам остійності [3] й використовували сертифіковані програми розрахунку лашингів відповідно до CSS Code [13]. В обох випадках критичну роль відіграли не екстремальні висоти хвиль (5–6 м), а специфічні комбінації курсу, швидкості, періоду хвилі та особливостей акваторії. Для ONE APUS домінував механізм параметричного кочення в попутно-косих хвилях із поступовим наростанням амплітуд протягом кількох годин [9]. Для MSC ZOE – синхронне кочення в бортових хвилях із раптовими серіями надмірних кренів на мілководді [10, 11]. В обох випадках екіпаж намагався змінювати курс і швидкість, але ці зміни були недостатньо радикальними й не виводили судно з резонансної зони.

Проаналізувавши окремо випадки ONE APUS та MSC ZOE, доцільно сформувані інтегровану аналітичну структуру для систематичного порівняння інцидентів за комплексом показників: гідрометеорологічна обстановка, динамічні характеристики кочення, параметри завантаження та системи кріплення, цифрові дані для реконструкції події (таблиця 1). Комплексне застосування інформаційних технологій – записів систем реєстрації даних рейсу (VDR), треків автоматичних ідентифікаційних систем (AIS), електронних картографічних навігаційних систем (ECDIS), численних метеомоделей, спеціалізованого ПЗ для розрахунку кріплення вантажів та програм моделювання динаміки судна – забезпечує перехід від описової характеристики подій до об'єктивного кількісного аналізу механізмів параметричного та синхронного кочення.

Таблиця 1 – Цифрові джерела та ІТ-інструменти, задіяні/потенційно доступні при аналізі інцидентів

Аспект	ONE APUS	MSC ZOE
Суднові записи	VDR (курс, швидкість, крен, прискорення, переговори, сигнали), ECDIS-трек, журнали ГД, баластні операції	VDR (навігаційні параметри, кочення, переговори), AIS-дані, ECDIS-трек
Зовнішні дані	Погодна маршрутизація (WRS), прогноз та hindcast хвиль (WW3/ECMWF), карти ізобар	Гідрометеорологічні дані Пн. моря, моделі хвиль з урахуванням мілководдя, припливів і течій
Моделювання руху	Чисельні 6-DOF моделі (параметричне кочення) на основі гідродинамічних коефіцієнтів; моделювання NMRI за дорученням JTSB APUS Full Report	Чисельні моделі кочення на мілководді, які замовлялися BSU/TUHH та MARIN для оцінки ймовірних кутів крену й прискорень ZOE Interim_Investigation_Repor...
Програми кріплення	Lashing software, сертифікована LR 2016, з припущенням макс. амплітуди кочення $\sim 16^\circ$ (design roll) APUS Full Report	Розрахунки лашингів відповідно до правил класу й CSM (інформація частково в проміжних звітах)
Аналітика після інциденту	Детальний JTSB-репорт із прив'язкою крену, швидкості, курсу, хвиль; частина аналізу увійшла в роботу MARIN TopTier	Спільні дослідження BSU, Dutch Safety Board, MARIN, Deltares, TUHH; фокус на зв'язку «мілководдя – хвиля – кочення» ZOE Interim Investigation Repor...

Значення цифрових даних для відтворення аварійних сценаріїв. Обидва інциденти відбулися в умовах сучасного цифрового мореплавства, де кожен елемент рейсу документується електронними системами: від навігаційних треків та реєстраторів даних до журналів маршрутною оптимізації та протоколів програм кріплення.

Аналіз динамічних режимів через призму цифрових параметрів. Застосування комплексного ІТ-підходу уможливило систематизацію різноманітних інцидентів у єдиній аналітичній площині: замість якісних описів надмірного кочення аналізуються кореляційні залежності між курсом, швидкістю, креном, періодом хвилі та глибиною акваторії. Ключові параметри систематизовано в порівняльній формі (таблиця 2).

Застосування інформаційних технологій продемонструвало, що номінально прийнятні для ультравеликих контейнеровозів висоти хвиль (H_s близько 5–6 м) в обох ситуаціях трансформувалися у критичні режими кочення. Ключовим фактором стала не абсолютна величина хвилювання, а синергетична дія періоду, напрямку та глибини поширення хвиль у поєднанні з параметрами руху судна, що створило резонансні умови.

Таблиця 2 – Узагальнене порівняння динамічних характеристик кочення

Параметр	ONE APUS (параметричне кочення)	MSC ZOE (синхронне кочення)
Район	Північний Тихий океан, глибоководний сектор NW від Гаваїв	Північне море, мілководний район TSS Terschelling–German Bight
Характер хвиль	Довгі свели 5–6 м, напрямом 30–60° від корми лівого борту	Штормові хвилі $H_s \sim 5,5$ м з лівого борту (N–NNW), період 12–13 с
Режим руху	Курс $\sim 120\text{--}140^\circ$, швидкість 11–14,5 вуз; зміни курсу не виводили з резонансної зони	Курс $\sim 60\text{--}72^\circ$ через TSS, швидкість 7,5–10,5 вуз; курс обмежений схемою руху
Тип резонансу	Параметричний: періодична зміна GM і кривої GZ у такт із хвилями	Вимушений: період хвилі $\approx$ власний період кочення ULCV на мілководді
Характер кренів	Повільне наростання до $20\text{--}27^\circ$, майже симетричне «борт–борт»	Серії раптових сильних кренів (6 послідовних), суперпозиція на «звичайне» кочення $5\text{--}10^\circ$
Зв'язок із ІТ	Детальний аналіз VDR, чисельне моделювання NMRI, зіставлення з прогнозом/маршрутизацією	Аналіз VDR/AIS, моделі хвиль на мілководді (MARIN, Deltares, TUHH), оцінка прискорень та кренів

Цифровий аналіз випадку ONE APUS виявив чіткий причинно-наслідковий зв'язок між моментом екстремального крену та сукупністю параметрів: напрямом руху 120° , швидкість близько 11,7 вузла, довгохвильові свели висотою 5–6 м з кормового лівобортного сектора, початкова метацентрична висота 1,6 м – за наявності циклічної модуляції остійності, типової для параметричного кочення.

Для MSC ZOE числове моделювання хвильових процесів та аналіз маршруту в межах системи розділення руху виявили механізм розвитку аварії: при русі курсом $60\text{--}72^\circ$ в умовах мілководдя відбулася видозміна характеристик хвилювання, внаслідок чого період хвилі наближався до власної частоти кочення судна, що інтенсифікувало вимушені коливання та призвело до повторюваних епізодів критичних кренів.

Застосування цифрових технологій на різних стадіях та системні вразливості. Компаративний аналіз також охоплює використання інформаційних систем у темпоральній послідовності подій. Для обох об'єктів дослідження ідентифіковано три функціональні стадії:

1. *Превентивна стадія* – прогностичне планування рейсу (сервіси оптимізації маршруту за метеоумовами, складання плану переходу, комп'ютерні розрахунки систем кріплення).

2. *Реактивна стадія* – безперервний моніторинг та оперативне реагування (навігаційна сенсорика, вимірювачі крену, електронні картографічні системи, радіолокаційне спостереження, людський фактор інтерпретації).

3. *Аналітично-коригувальна стадія* – постінцидентне дослідження та моделювання (державні та незалежні розслідування, комп'ютерне відтворення події науково-дослідними організаціями, галузева аналітика в межах спеціалізованих програм).

Функціональна роль цифрових технологій на кожній стадії представлена в табличній формі (таблиця 3).

Компаративний аналіз демонструє, що критичні вразливості зосереджені не в дефіциті інформації, а в неефективності її трансформації у практичні індикатори ризику для судноводіїв. Обидва судна були обладнані сучасними навігаційними комплексами, системами метеопрогнозування та програмним забезпеченням розрахунку кріплення вантажів, однак відсутня була «інформаційно-аналітична надбудова», яка б забезпечила практичне застосування теорії динамічної остійності на ходовому містку через зрозумілі сигнали:

- «Актуальна конфігурація курс/швидкість/хвилювання знаходиться в зоні критичного ризику параметричного кочення»;

- «Поточні навігаційні параметри на обмеженій глибині наближаються до резонансного режиму кочення».

Таблиця 3 – Роль інформаційних технологій на етапах «до – під час – після» інцидентів

Етап	ONE APUS	MSC ZOE
До інциденту	Погодний маршрутизатор (WRS) пропонував обхід найбільш несприятливих зон, але неявно враховував ризик параметричного кочення; лашинг-програма оперувала фіксованою design roll amplitude ($\sim 16^\circ$), без динамічного перерахунку при зміні маршруту	Рейсове планування з урахуванням TSS; обмежена свобода вибору курсу через схему руху; ризики резонансного кочення на мілководді явно не відображалися в стандартній метеоінформації
Під час інциденту	Дані VDR, ECDIS, креноміри були доступні, але не агреговані в «індикатор параметричного кочення»; капітан візуально не міг визначити напрямок хвиль у темряві, а система підтримки рішень не пропонувала «заборонені» поєднання курс/швидкість	Екіпаж мав доступ до креномірів та метеоданих, але не мав розрахунку «resonant speed/heading» для конкретних хвильових умов у TSS; рішення змінити швидкість і курс не виводили судно з резонансу
Після інциденту	Глибока цифрова реконструкція (NMRI, JTSB) стала базою для оновлення рекомендацій щодо параметричного кочення; дані рейсу використані в TopTier як референтний кейс	Чисельні дослідження MARIN, Deltares, TUNH лягли в основу рекомендацій щодо TSS, глибин, обмежень для ULCV у штормових умовах, а також у перегляд оцінок ризику резонансного кочення на мілководді

Подібні інформаційні рішення наразі перебувають у стадії розробки та апробації в межах галузевих програм (зокрема, TopTier) та проєктів класифікаційних організацій, де інтеграція масивів даних AIS/VDR, метеорологічних моделей та цифрових описів геометрії корпусу дозволяє формувати прогностичні моделі вразливості судна до різних типів небезпечного кочення.

Концептуальні висновки для подальшого дослідження. Порівняльний аналіз інцидентів ONE APUS та MSC ZOE з позицій інформаційних технологій обґрунтовує наступні концептуальні положення:

Перше положення: детальна цифрова документація процесів не гарантує запобігання аварійних ситуацій за відсутності інтеграції даних у прості для інтерпретації екіпажем індикатори ризику та їх врахування в алгоритмах оптимізації маршруту й системах розрахунку кріплення.

Друге положення: обидва кейси ілюструють обмеженість традиційних статичних методів (фіксовані розрахункові амплітуди кочення, оцінка лише висоти хвилі без аналізу періоду зустрічі) для ультравеликих контейнеровозів; актуальною є потреба в динамічних, інформаційно-підтримуваних моделях, що враховують реальний спектр кочення в змінних умовах експлуатації.

Третє положення: цифровий підхід до аналізу створює методологічну основу для інтегрованих систем підтримки судноводійних рішень, що в режимі реального часу (використовуючи VDR-подібну сенсоріку, метеорологічні моделі та прецедентну базу даних) ідентифікуватимуть ризикові комбінації навігаційних параметрів та генеруватимуть рекомендації щодо превентивних маневрів.

Сформульовані положення деталізуються у формі пропозицій щодо архітектури інформаційно-аналітичного модуля для оцінки ризику кочення з інтеграцією в ECDIS та системи погодної маршрутизації, а також у вигляді рекомендацій з актуалізації нормативної бази з урахуванням потенціалу сучасних інформаційних технологій.

Оперативні рекомендації та організаційно-технічні заходи. На основі аналізу механізмів небезпечного кочення та реконструкції аварійних випадків розроблено комплекс оперативних рекомендацій для судноводіїв, побудований на чотирьох принципах:

- ризико-орієнтованість (уникати специфічних комбінацій курс/швидкість/хвиля);
- судно-специфічність (враховувати власний період кочення та завантажувальний стан);
- динамічність (оцінка ризику в реальному часі);
- людино-центричність (прості інструкції замість складних розрахунків).

Цей підхід узгоджується з рекомендаціями ClassNK [6] та результатами проєкту TopTier [7].

Для параметричного кочення алгоритм дій включає:

- визначення типу кочення за напрямком хвиль (head/following, $\pm 30\text{--}45^\circ$ від діаметра) та характером «накачування» амплітуд [5, 6];
- оцінку поточної комбінації курс/швидкість відносно періоду хвилі; зміну режиму руху достатньо різко ($\geq 20\text{--}30\%$ швидкості та/або $\geq 30^\circ$ курсу) для зриву резонансу;
- уникнення одночасного надмірного зменшення швидкості й повороту на попутні хвилі (ризик surf-riding) [4];
- документування параметрів для подальшого аналізу.

Для синхронного кочення рекомендації акцентують:

- аналіз курсу відносно бортових/косих хвиль та періоду хвилі щодо власного періоду кочення;
- вихід із небезпечного сектору курсів (перехід від beam seas до quartering або head/following);
- суттєву зміну швидкості для порушення резонансу; мінімізацію тривалості руху в beam seas, особливо на мілководді [11];
- узгодження дій з обмеженнями TSS при необхідності відхилення від рекомендованої лінії [10].

Організаційно-технічні заходи охоплюють три рівні. Нормативно-управлінський: актуалізація Cargo Securing Manual із включенням динамічних обмежень по коченню; вбудування вимог CSS Code [13] і CTU Code [14] у систему управління безпекою; систематичний моніторинг випадків втрати контейнерів. Такий підхід дозволяє розглядати контроль динамічної остійності як невід’ємну складову загальної культури безпеки судноплавства компанії-оператора. Технічне оснащення: модернізація систем стовцювання й закріплення контейнерів [13, 14]; системи зниження амплітуди кочення (анти-ролл танки, фін-стабілізатори) [6]; конструктивні зміни корпусу для зменшення вразливості до резонансних режимів [2, 5]. Цифрові системи: встановлення датчиків крену, прискорень і лашингових зусиль; інтеграція з ECDIS і погодною маршрутизацією [7]; автоматичне попередження при досягненні критичних порогів. Центральним елементом запропоновано концепцію інформаційно-аналітичного модуля Roll Risk Index (RRI), який поєднує дані про власний період кочення судна в поточному завантажувальному стані, прогноз хвильового спектра (період, напрямок, трансформація на мілководді), критерії вразливості SGISC [4] та фактичні записи хитамиці. Модуль видає містку інтуїтивно зрозумілий індикатор ризику («зелена/жовта/червона» зони) та рекомендовані дії при підвищенні ризику [7]. RRI інтегрується в існуючі системи ECDIS та погодної маршрутизації, доповнюючи традиційні показники (Hs, напрямок вітру) оцінкою специфічних ризиків кочення для конкретного судна.

Економічне обґрунтування. Аналіз показав, що навіть при статистично малій частці втрачених контейнерів (576 з 250 млн перевезених у 2024 році, або 0,0002%) [8] один великий інцидент здатен створити збитки порядку 150–200 млн дол. США (прямі втрати вантажу, ремонт, простої, страхові вимоги) [9] плюс екологічні витрати, які є безповоротними для унікальних екосистем [11, 12]. Сукупні витрати на впровадження комплексу організаційних, технічних та ІТ-заходів (оновлена SMS, тренажерні програми, інформаційний модуль RRI, базовий моніторинг лашингів) оцінюються як 1–2% капітальних витрат на новобудову або співставні з вартістю декількох портових ремонтів, що істотно менше потенційних збитків від навіть одного великомасштабного інциденту за життєвий цикл судна.

Висновки. Дослідження показало, що забезпечення безпеки судноплавства для контейнеровозів великої місткості неможливе без врахування динамічних режимів, а саме небезпечне кочення слід розглядати як ризик, що безпосередньо впливає на безпеку судноплавства. Сформовано узагальнену аварійну модель розвитку параметричного та синхронного кочення на основі реконструкції випадків

ONE APUS [9] і MSC ZOE [10, 11] з урахуванням гідрометеорологічних, експлуатаційних та лашингових факторів. Запропоновано структурований комплекс оперативних рекомендацій для містка, побудований на принципах ризик-орієнтованості, судно-специфічності, динамічності та людино-центричності, що узгоджується з найкращими практиками галузі [6, 7]. Розроблено концепцію інформаційно-аналітичного модуля Roll Risk Index для інтеграції в системи ECDIS та погодної маршрутизації на основі критеріїв SGISC [4]. Впровадження цього модуля суттєво посилює безпеку судноплавства, забезпечуючи перехід від реактивних дій після інциденту до превентивного уникнення резонансних зон. Обґрунтовано економічну доцільність впровадження комплексу заходів з позицій запобігання рідкісним катастрофічним подіям [8, 9] та мінімізації екологічних збитків [12].

Встановлено, що інтеграція запропонованого модуля RRI безпосередньо підвищує рівень безпеки судноплавства, оскільки надає судноводію інструмент проактивного виявлення загроз, нівелюючи розрив між формальними вимогами остійності та реальними штормовими умовами.

Перспективи подальших досліджень полягають у валідації запропонованого модуля RRI на основі даних реальних рейсів, розробці стандартизованих тренажерних сценаріїв і інтеграції критеріїв ризику кочення в системи погодної маршрутизації нового покоління.

REFERENCES

1. Paulling, J. R., & Rosenberg, R. M. (1959). On unstable ship motions resulting from nonlinear coupling. *Journal of Ship Research*, 3, 36–46.
2. Shin, Y. S., Belenky, V. L., Paulling, J. R., Weems, K. M., & Lin, W. M. (2004). Criteria for parametric roll of large containerhips in longitudinal seas. *Transactions of the Society of Naval Architects and Marine Engineers*, 112, 14–47.
3. International Maritime Organization. (2020). International code on intact stability, 2008 (2008 IS Code) (2020 ed.). London: IMO.
4. International Maritime Organization. (2020). MSC.1/Circ.1627: Interim guidelines on the second generation intact stability criteria. London: IMO.
5. American Bureau of Shipping. (2004). Guide for the assessment of parametric roll resonance in the design of container carriers (with amendments). Houston, TX: ABS.
6. ClassNK. (2023). Guidelines on preventive measures against parametric rolling (Ed. 1.0). Tokyo: Nippon Kaiji Kyokai.
7. Maritime Research Institute Netherlands. (n.d.). TopTier – Joint industry project on container loss. Retrieved December 10, 2025, from <https://www.marin.nl/en/toptier>
8. World Shipping Council. (2023). Containers lost at sea – 2023 update. Washington, DC: WSC.
9. Japan Transport Safety Board. (2024). Marine accident investigation report: Container ship ONE APUS (MA2024-02). Tokyo: JTSB. Retrieved from https://jtsb.mlit.go.jp/eng-mar_report/2024/2022tk0001e.pdf
10. Bundesstelle für Seeunfalluntersuchung, & Dutch Safety Board. (2019). Joint interim investigation report on very serious marine casualty 3/19: Loss of containers on board MSC ZOE. Hamburg–The Hague: BSU & DSB.
11. Dutch Safety Board. (2020). Safe container transport north of the Wadden Islands: Lessons learned following the loss of containers from MSC ZOE. The Hague: DSB.
12. Cedre. (n.d.). MSC ZOE spill. Retrieved December 10, 2025, from <https://wwz.cedre.fr/en/Our-resources/Spills/Spills/MSC-Zoe>
13. International Maritime Organization. (2011). Code of safe practice for cargo stowage and securing (CSS Code) (consolidated ed.). London: IMO.
14. International Maritime Organization, International Labour Organization, & United Nations Economic Commission for Europe. (2014). Code of practice for packing of cargo transport units (CTU Code). Geneva–London: IMO/ILO/UNECE.
15. Spyrou, K. J., Belenky, V. L., Katayama, T., Bačkalov, I., & Francescutto, A. (Eds.). (2023). Contemporary ideas on ship stability. Cham: Springer.

Golikov V.V., Kalinichenko Ye. V., Zaiets A.Yu.

RESEARCH ON THE IMPACT OF SYNCHRONOUS AND PARAMETRIC ROLLING ON THE SEAWORTHINESS OF CONTAINER SHIPS

The article investigates dangerous rolling mechanisms of large container ships leading to massive container losses in storm conditions. Based on analysis of ONE APUS (parametric rolling) and MSC ZOE (synchronous rolling) casualties, key factors of resonant regime development were identified and a generalized accident model was formed. Operational guidance for navigators on dangerous rolling prevention and the concept of Roll Risk Index information-analytical module for integration into ECDIS and weather routing systems are proposed. Economic feasibility of implementing organizational and technical measures is justified from the perspective of preventing rare catastrophic events.

Keywords: transverse stability, parametric rolling, synchronous rolling, shipping safety, container vessel, SGISC, container securing, Roll Risk Index.

Стаття прийнята 14.10.2025

ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ РЕСУРСОЗБЕРІГАЮЧОЇ ЕКСПЛУАТАЦІЇ СУДНОВИХ ДИЗЕЛІВ ШЛЯХОМ ДІАГНОСТУВАННЯ МОТОРНОГО МАСТИЛА

Наведені результати досліджень щодо визначення методу, який сприяє ресурсозберігаючій експлуатації суднових дизелів. Зазначено, що під час експлуатації суден морського та внутрішнього водного транспорту постійне стає завдання забезпечення ресурсозберігаючої експлуатації дизелів, що на них встановлені та виконують функції головних та допоміжних двигунів. Виникнення цього завдання зумовлюється процесами тертя та зношування, що виникають та відбуваються під час зворотно-поступального руху поршня у циліндрі дизеля та обертального руху колінчатого валу. У першому випадку відбувається знос у трибологічній системі поршневі кільця – втулка циліндра, у другому – у трибологічній системі колінчатий вал – вкладиш підшипника ковзання. Найбільш зручним та ефективним методом контролю стану поверхонь тертя, що входять до складу вищевказаних трибологічних систем, є аналіз та діагностування моторного мастила, яке використовуються у циркуляційній системі мащення. З метою повного аналізу хімічних елементів, що знаходяться у мастилі, виконують його аналіз у берегових дослідницьких лабораторіях, для цього, як правило, використовується спектральний аналіз. Недоліком контролю показників у береговій дослідницькій лабораторії є певна затримка у отриманні його результатів. В деяких випадках це може сприяти несвоєчасному прийняттю управлінських рішень або виконанню відповідних технологічних операцій. Через це, як додатковий спосіб контролю експлуатаційних характеристик мастила безпосередньо на судні та, відповідно, більш швидкого отримання результатів, виконувався аналіз спектрів горіння моторного мастила. З цією метою використовувався спектральний газовий аналізатор FlirX6530sc з вбудованою інфрачервоною камерою контролю. При цьому забезпечувався контроль так самих характеристик (Wear Elements та Contaminant Elements), визначення яких виконувалось у береговій дослідницькій лабораторії. Збіг результатів діагностування стану моторного мастила, що виконувався за допомогою запропонованого спектральний газового аналізатору та результатів, що були отримані під час досліджень у береговій лабораторії, дозволяє рекомендувати метод визначення експлуатаційних характеристики моторного мастила за допомогою судового спектральний газового аналізатору як метод попереднього аналізу. Результати, які при цьому можуть бути отримані, з високою точністю характеризують показники моторного мастила. Безпосередньо метод діагностування моторного мастила за допомогою газового аналізу сприяє забезпеченню ресурсозберігаючої експлуатації суднових дизелів.

Ключові слова: діагностування, знос, контактні поверхні, мащення, морський транспорт, моторне мастило, система мащення, судовий дизель, тертя, технічний стан

Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями. Експлуатація суден морського та внутрішнього водного транспорту нерозривно пов'язана з забезпеченням надійності роботи судової енергетичної установки та, насамперед, суднових дизелів – головного, що забезпечує рух судна, та допоміжних, завдяки яким механічна енергія, що генерується двигуном внутрішнього згорання, перетворюється в електричну та далі забезпечує роботу суднових машин, механізмів та іншого обладнання [1-3]. З надійністю та ефективністю роботи суднових дизелів також визначає живучість судна, його морехідні якості та ходові характеристики [4-6]. Разом з забезпеченням надійності суднових дизелів виникає завдання забезпечення їх ресурсозберігаючої експлуатації [7-9]. При цьому під ресурсозбереженням розуміють не лише зниження витрати палива та мастила, але також зменшення незворотних витрат енергії та збільшення тривалості знаходження суднових дизелів у належному технічному стані [10-12]. Через це

контроль та діагностування технічного стану суднових дизелів (як головного, також і допоміжних) є актуальним завданням, розв'язання якого забезпечується представниками суднової машинної команди та гарантується рівнем їх професіональної кваліфікації. Автономність плавання морських суден накладає додаткові вимоги до надійності суднових дизелів та іншого суднового обладнання, що суттєво відрізняє умови експлуатації засобів морського транспорту від інших, в першу чергу залізничного та автомобільного [13-15].

Під час експлуатації суднових дизелів, як головної складової енергетичної установки, виникають дефекти їх основних вузлів. При цьому основну небезпеку представляють дефекти циліндрової групи та підшипників руху [16-18].

Типовими дефектами циліндрових втулок суднових дизелів є підвищений або нерівномірний знос та задири її поверхні. Через підвищені температурні напруги в поверхнях циліндрових втулок також можуть виникати тріщини, найбільш характерним місцем утворення яких є її верхня частина.

Основною причиною підвищеного зносу циліндрових втулок є розрив або порушення цілісності плівки мастила на відносно невеликій площі дзеркала циліндра, які виникають як результат окислення мастила у тонкому шарі. Крім цього, мастильна плівка піддається дії випускних газів та твердих продуктів неповного згоряння палива.

До основних можливих причин задири, що виникають на поверхнях циліндрових втулок, відносять порушення режимів мащення, невідповідність структури металу поршневих кілець та втулки, зміна геометрії головки поршня, несправності паливної апаратури та пов'язані з цим порушення у впорскуванні палива в циліндр [19-21].

Зі всіх деталей циліндрової групи аварійні пошкодження, дефекти та відмови поршнів є найбільш небезпечними, через те, що у більшості випадків призводять до важких аварій всього двигуна. До характерних дефектів поршневої групи суднових дизелів відносяться: вигорання денця поршню та утворення тріщин, знос та пошкодження поршневих кілець, відкладення нагарів у поршневих канавках, на поверхні поршневих кілець та на головці поршню.

На інтенсивні зноси та поломки поршневих кілець приходиться найбільша кількість несправностей циліндрової групи суднових дизелів. Працездатність верхнього поршневого кільця визначає наработку циліндра до чергового вскриття та освідчення. За умовою гарного прилягання кільця до відповідної поршневої канавки під роботи дизеля нагрівання кільця є незначне. Його перегрів виникає під час прориву випускних газів скрізь зазори, що виникають у сполученнях кільця зі поршнем та циліндрової втулкою. При цьому існують постійні зазори між головкою поршня та втулкою циліндра, у замку кільця, а також між кільцем та поршневою канавкою. Найбільшому зносу піддаються кромки поршневих кілець та зазор у замку кільця [22-24].

Підшипники у суднових дизелях відносяться до найбільш відповідальним вузлам. Їх несправність або дефекти призводять до раптової відмови всього двигуна. Під час експлуатації дизелів більшому навантаженню піддаються рамові підшипники, але більша кількість пошкоджень припадає на головні / крейцкопфні підшипники для двотактних двигунів та трибосполученню поршневий палець – верхня голівка шатуна для чотиритактних двигунів. Для цих з'єднань характерні такі дефекти як розтріскування шару антифрикційного матеріалу, відшаровування однієї поверхні антифрикційного матеріалу від іншої, вичавлювання антифрикційного матеріалу з трибосполучення. Вказані підшипникові вузли працюють у важких умовах, які додатково ускладнюються під час зміни зовнішніх збурень [25-28]. Качувальний характер їх переміщень щодо цапфи на невеликий кут і малі окружні швидкості не дозволяють забезпечити гідродинамічні умови мащення [29-31]. Крім того, у більшості суднових дизелів сила тиску газів на поршень на всіх кутах повороту колінчатого валу залишається більшою ніж сили інерції, що ускладнює подачу мастила під шийку крейцкопфа або під поршневий палець. Особливо важки умови під час роботи цих підшипникових вузлів виникають під час реверсу та пуску двигуна.

До основних пошкоджень мотильових та рамових підшипників суднових дизелів відносяться пошкодження антифрикційного шару їх тонкостінних вкладишів (розтріскування, відшаровування, вичавлювання), потрапляння та залишення у зазорі між вкладишем та валом дрібних металевих домішок та продуктів нагару, повертання вкладишів підшипників [32-34]. Основною причиною цих

дефектів стає порушення режимів мащення – раптовий або поступовий перехід від гідродинамічного тертя до граничного (під час якого контактні поверхні поділені між собою кількома молекулярними шарами мастильного матеріалу) або сухого (в разі виникнення якого між поверхнями повністю відсутній шар мастила).

Деякі вказані дефекти також характерні колінчатому валу дизеля – найбільш відповідальному та самому дорогому елементу судового дизеля. Також до несправностей колінчатого валу відносяться втомні тріщини, повертання шийок валу у місцях їх запресування, подряпини, натири або задири шийок. Втомні тріщини є самим розповсюдженим та небезпечним видом пошкодження колінчатих валів. Більша частина поломки колінчатих валів відбувається як результат деформації фундаментних рам або нерівномірного зносу мотильових та рамових підшипників. Несправності, поломки або дефекти колінчатого валу призводять до аварійної зупинки дизеля, що стає причиною втрати ходу судна або тимчасового чи тривалого знеструмлення. Обидва явища сприяють виводу судна з експлуатації. Виникнення подібних аварійних випадків в районах інтенсивного судноплавства погрожує навігаційної безпеки. Додаткові природні перешкоди, що можуть виникнути та співпасти з ситуацією втрати руху та управління судном (наприклад, підвищені прибережні течії, поривчатий вітер, зміна ландшафту морського дна) наносять ще одну негативну дію та разом з відмовою головного двигуна та втратою маневреності судна можуть призвести до посадки судна на міліну або навалюванню судна на берегову лінію чи портові споруди [35-37].

Виявлення цих дефектів не може бути здійснено візуальним шляхом. Єдиним варіантів їх визначення є виконання безперервного моніторингу або періодичного діагностування експлуатаційних характеристик моторного мастила, що використовується у циліндрових, або циркуляційних системах мащення.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Функціональним призначенням систем мащення дизелів суден морського та внутрішнього водного транспорту є зниження теплових та механічних напружень між контактуючими поверхнями, а також видалення продуктів зносу, нагароутворення та інших забруднень із зони контакту. Саме потрапляння цих речовин до вузького зазору між контактними парами тертя призводить до погіршення їх геометрії, збільшенню площі контакту та відповідному підвищенню коефіцієнту тертя, температури та зносу поверхонь. Вказані послідовності характерні для всіх основних контактних вузлів судових дизелів та їх пар тертя: трибосполучень поршневе кільце – канавка поршню, поршневе кільце – втулка циліндра, вкладиш підшипника – колінчатий вал [38-40].

Вивченню контактних взаємодій, що виникають під час експлуатації дизелів суден морського та внутрішнього водного транспорту, присвячено багато досліджень. Перш за все це пов'язано зі взаємозв'язком процесів мащення та тертя з надійністю роботи всіх без виключення судових машин та механізмів. Зміна процесів мащення та тертя у трибологічних системах судових дизелів призводить до зміни (у більшості випадків підвищення) градієнтів температури, а також підвищенню інтенсивності зношування та безпосередньому зносу контактних поверхонь [41-43].

Експериментально встановлено, що для матеріалів, що мають порівняно досконалі пружні властивості і в умовах, коли температура їх істотно не змінюється, коефіцієнт тертя не залежить від швидкості. У цьому випадку досконала пружність виключає гістерезисні втрати та забезпечує незалежність від швидкості деформаційної компоненти коефіцієнта тертя. Одночасно з цим, висока теплостійкість забезпечує незалежність адгезійної взаємодії [44, 45]. У випадку недосконалого пружного контактування зі зростанням швидкості коефіцієнт тертя переходить через максимум і може мати другий екстремум – мінімум. Максимум коефіцієнта тертя розміщений у зоні швидкостей, що забезпечують найбільші втрати гістерезу. За умовою малих швидкостей деформації релаксаційні процеси звужують гістерезисну петлю, через це коефіцієнт тертя знижується. У разі великих швидкостей температура, що виникає у зоні контакту, зменшує адгезійну взаємодію і гістерезисні втрати через скорочення часу релаксації. Внаслідок цього знижується коефіцієнт тертя. Подальше підвищення швидкості ковзання призводить до нового підвищення температури матеріалів, що труться, зниження їх твердості, зростання впровадження і деформаційної компоненти сили тертя: коефіцієнт тертя знову може зростати. При порівняно високих тисках, коли

під час малих швидкостей можливе суттєве підвищення температури, зона максимуму коефіцієнта тертя може бути відсутньою [46, 47].

В разі пластичного контакту швидкість ковзання може впливати на тертя через швидкість поширення пластичної деформації. Під час збільшення швидкості ковзання пластична деформація локалізується у меншому приповерхневому обсязі та коефіцієнт тертя знижується.

Внаслідок підвищення температури під час зростання швидкості ковзання змінюються міцність та характер адгезійних зв'язків у мастильному матеріалі, який подається до зони тертя. Зі збільшенням температури змінюється міцність, товщина та природа захисної контактної плівки мастильного матеріалу. У зоні малих швидкостей достатня захисна мастильна плівка не встигає утворюватися і передеформування перетворюється на мікрорізання, що відповідає зростаючій складової залежності коефіцієнт тертя – швидкість. При подальшому підвищенні швидкості (отже температури) зниження адгезійної міцності фрикційних зв'язків призводить до зменшення висоти нерівностей і вигладжування поверхні тертя. Внаслідок цього зі зростанням швидкості ковзання шорсткість переходить через максимум, відповідно впливаючи на коефіцієнт тертя. При малих значеннях швидкості ковзання її вплив чинника, що змінює міцність матеріалу, незначно [48, 49].

Складний комплекс процесів, що перебігають на фрикційному контакті, призводить до складної та неоднозначної залежності коефіцієнта тертя та інтенсивності зношування від швидкості ковзання, яка по суті є їх залежністю від температури. Великий вплив на тертя і знос оказує градієнт механічних властивостей і конструкція фрикційного з'єднання. Роль конструкції фрикційного з'єднання під час тертя настільки велика, що конструктивні параметри вузла тертя (площа тертя, взаємне перекриття, форма і розміри контактуючих елементів, жорсткість конструкції та інші) виділяються в число основних визначальних факторів поряд з параметрами режиму тертя і властивостями матеріалів, що труться. Вплив конструктивних параметрів вузла тертя на фрикційні характеристики опосередковано і виявляється головним чином через зміну площі фактичного контакту, вплив на утворення і вміст продуктів зносу між поверхнями, що труться, а також через тепловий режим, дію середовища, що оточує вузол тертя. Інтенсивність зношування зі збільшенням номінальної площі поверхні за незмінних інших факторів, що впливають на тертя, має тенденцію до збільшення.

Експериментально встановлено та теоретично обґрунтовано, що із зменшенням загальної конструктивної жорсткості контакту елементів пари тертя коефіцієнт тертя зростає внаслідок збільшення площі фактичного дотику. Реальним засобом зниження жорсткості є розбиття загальної площі тертя на окремі елементи, що самостійно навантажуються [50, 51].

Численні дослідження переконують, що в умовах тертя, коли можливе суттєве підвищення температури, вплив зміни конструкції та розмірів фрикційного з'єднання на тертя і знос виявляється через тепловий режим і градієнт механічних властивостей, що виникає внаслідок нагрівання елементом пари тертя.

Конструктивні макрогеометричні параметри фрикційного з'єднання впливають на всі основні характеристики теплового режиму тертя: розподіл теплових потоків, поверхневу температуру, температурний градієнт і об'ємний розподіл температури в тілах, що труться. Через ефективний коефіцієнт тертя конструкція впливає на загальну генерацію теплоти, а через жорсткість елементів, що труться – на рівномірність генерації теплоти і межах номінальної площі контакту. Маса елементів, що труться, теплопоглинаючий об'єм, розміри поверхні тертя і тепловіддаючої поверхні є факторами, що визначають розподіл теплоти і тілах, що труться, поверхневу температуру та інші характеристики температурного поля [52, 53].

Важливою конструктивною характеристикою вузла тертя є коефіцієнт взаємного перекриття. Він являє собою відношення площі тертя елементів, що труться. Великий вплив цього показника на тертя пояснюється тим, що від його значення суттєво залежать тепловий режим, напружений стан і можливість проникнення оточуючого середовища на поверхню тертя, утримання або видалення продуктів зносу. Неповне взаємне перекриття забезпечує можливість тепловіддачі із відкритих ділянок поверхні тертя; при повному перекритті вся теплота йде в глиб тіл, що труться. Тому зі зменшенням взаємного перекриття є тенденція до зниження середньої поверхневої температури та

зростання температурного градієнта. Тобто менше взаємне перекриття при постійному тиску забезпечує більш легкий тепловий режим тертя (температуру і градієнт температури).

Практика підтверджує, що для багатьох важконавантажених фрикційних пристроїв зменшення коефіцієнта взаємного перекриття призводить до підвищення коефіцієнта тертя та більшої стабільності у разі зміни температури. Зміна взаємного перекриття може суттєво впливати на напружений стан тіл, що труться, і виникнення окисних плівок.

Оточуюче середовище під час тертя розглядається як фактор, що впливає на розвиток фізико-хімічних явищ у зоні тертя і, отже, на тертя та зношування.

Встановлено, що форма та розміри вузла тертя, коефіцієнт взаємного перекриття є факторами, що впливають на надходження мастильного матеріалу до зони фрикційного контакту. Для цього пропонується метод моделювання фізико-хімічних явищ, що залежать від дії оточуючого середовища під час тертя різних антифрикційних та фрикційних матеріалів; критерії моделювання та масштабні коефіцієнти переходу, що отримані з умов подібності процесів тертя, зношування та теплоутворення [54, 55].

При цьому складання математичних моделей більш характерно для прогнозування стану контактних поверхонь та поведінки мастильного матеріалу під час проектування та початкових етапів експлуатації дизелів суден морського та внутрішнього водного транспорту. Збільшення тривалості експлуатації дизелів призводить до виникнення у трибологічних системах внутрішніх факторів, які не можливо запрограмувати або змодельовати на етапі проектування. Також важливим чинником, що зумовлює певну обмеженість математичних моделей процесів мащення, стану мастильного матеріалу та утворення продуктів зносу, є випадковість процесів тертя. Це зумовлює пошук додаткових шляхів визначення технічного стану контактних поверхонь судових дизелів.

Найбільш розповсюдженим варіантом діагностування технічного стану трибосполучень судових дизелів, а саме циліндрових втулок, поршневих кілець, вкладишів підшипників та поверхонь колінчатого валу, є аналіз моторного мастила, що забезпечує мащення цих вузлів. Для судових двотактних дизелів, що компонуються системами циліндрового та циркуляційного мащення, виконується аналіз циркуляційного (лубрикаторного) мастила, при цьому проби мастила відбираються з підпоршневого простору дизеля. Для чотиритактних дизелів, що мають одну загальну систему циркуляційного мащення (що забезпечує подачу моторного мастила до циліндрової групи та до підшипників ковзання) виконуються аналіз мастила, проби якого відбираються з картера дизеля. Виконання цих аналіз відбувається у судовій експрес лабораторії або у берегових дослідницьких лабораторіях. У першому випадку виконується визначення основних експлуатаційних характеристик моторного мастила – його в'язкості, загального лужного числа та рівню механічних домішок, які потрапили до його обсягу. У другому – виконується більш повний аналіз моторного мастила, з визначенням вмісту окремих хімічних елементів, що характеризують знос контактних поверхонь та потрапляння до мастила забруднюючих речовин, що утворюються під час згоряння палива. Недолік першого методу – обмежена інформація щодо стану моторного мастила. Недолік другого – відносна тривалість часу від відправлення проб мастила до дослідницької лабораторії до моменту отримання результатів аналізу.

Формулювання цілей статті. Ціллю статті було визначення можливості проведення безпосередньо на судні під час здійснення навігаційних переходів поширеного аналізу стану та експлуатаційних характеристик моторного мастила, що використовується в системах мащення судових дизелів.

Виклад основного матеріалу. Дослідження виконувались на спеціалізованому судні дедвейтом 9600 тонн до складу енергетичної установки якого входили судові дизелі 6R26 Wartsila. Основні характеристики дизелів наведені у табл. 1.

Під час експлуатації дизелів з метою забезпечення процесу мащення його основних елементів використовувалось моторне мастило Castrol 15W20.

Таблиця 1 – Основні характеристики суднового дизеля 6R26 Wartsila

Показник, позначення, розмірність	Чисельне значення
Діаметр циліндру, d , мм	260
Хід поршню, s , мм	320
Частота обертання, n , об/хв	900
Швидкість поршню, v , м/с	9,6
Середній ефективний тиск, p_e , МПа	2,55
Механічний коефіцієнт корисної дії у діапазоні навантаження 90...95 %, η_m , %	0,89...0,90
Коефіцієнт корисної дії генератору, $\eta_{ег}$, %	0,95...0,96
Діапазон в'язкості палива, рекомендованого до використання, ν , сСт за 50°C	до 730
Питома витрата палива для експлуатаційних режимів, що відповідають діапазону навантаження 35...95 %, b_e , г/(кВт·год)	192...186
Ефективна потужність, N_e , кВт	1950
Напрямок обертання колінчатого валу відносно відбору потужності	правий

Зміна експлуатаційних характеристик мастила контролювалась членами суднової машинної команди за допомогою діагностичного обладнання фірми Unitor. При цьому визначались кінематична в'язкість, загальне лужне число, вміст води та загальний вміст механічних домішок. Періодичність контролю вказаних показників коливалась в діапазоні 4...24 години та залежала від експлуатаційних режимів роботи дизелів та результатів попередніх вимірювань. Експрес діагностування експлуатаційних характеристик мастила дозволяло робити висновки о роботі очисного обладнання (мастильних фільтрів та мастильного сепаратору), перебігу робочого процесу (вдосконаленості процесів згоряння), ефективності роботи та налаштування паливної апаратури високого тиску, а також технічному стані контактних поверхонь дизеля (поршневих кілець, циліндрових втулок, вкладишів підшипників ковзання). За результатами експрес аналізу приймалися рішення щодо зміни режимів мащення та охолодження, переналаштування паливної апаратури, а також поповнення об'єму моторного мастила.

Після кожних 500 годин експлуатації виконувався відбір проб моторного мастила з метою його подальшого аналізу у береговій дослідницькій лабораторії. Основними показниками, які при цьому визначались, були компоненти мастила, що характеризують знос контактних поверхонь дизеля та відносяться до категорії Wear Elements (якими є Al, Cr, Cu, Fe, Sn, Pb), а також такі, що характеризують забруднення моторного мастила та відносяться до категорії Contaminant Elements (якими є B, Na, Si, V, Mo, Ni). Як правило, визначення та відсотковий вміст цих елементів у моторному мастилі виконується шляхом спектрального аналізу.

Як було вказано раніше, недоліком контролю показників у береговій дослідницькій лабораторії є певна затримка отримання його результатів. В деяких випадках це може сприяти несвоєчасному прийняттю управлінських рішень або виконанню відповідних технологічних операцій.

Через це, як додатковий спосіб контролю експлуатаційних характеристик мастила безпосередньо на судні та, відповідно, більш швидкого отримання результатів, виконувався аналізу спектрів горіння моторного мастила. З цією метою використовувався спектральний газовий аналізатор FlirX6530sc з вбудованою інфрачервоною камерою контролю. При цьому забезпечувався контроль так самих характеристик (Wear Elements та Contaminant Elements), визначення яких виконувалось у береговій дослідницькій лабораторії. Результати виконаних досліджень наведено на рис. 1, 2.

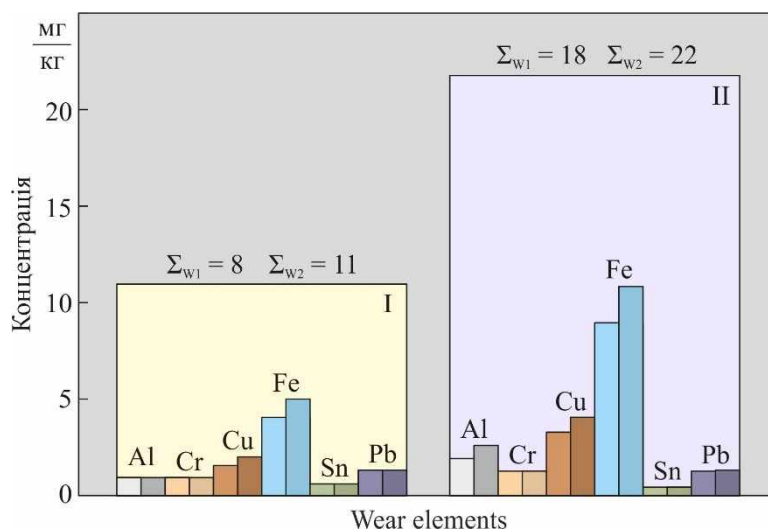


Рисунок 1 – Вміст механічних домішок у моторному мастилі Castrol 15W20 під час експлуатації в циркуляційній системі мащення суднових дизелів 6R26 Wartsila:
I – після 500 годин; II – після 1000 годин

На рис. 1, 2 з парних стовпчиків, що відповідають вмісту у моторному мастилі механічних домішок (Al, Cr, Cu, Fe, Sn, Pb) та забруднюючих речовин (B, Na, Si, V, Mo, Ni), перший відповідає вимірюванням, які виконувались у береговій дослідницькій лабораторії, другий – які виконувались на судні з використанням спектрального газового аналізатору FlirX6530sc.

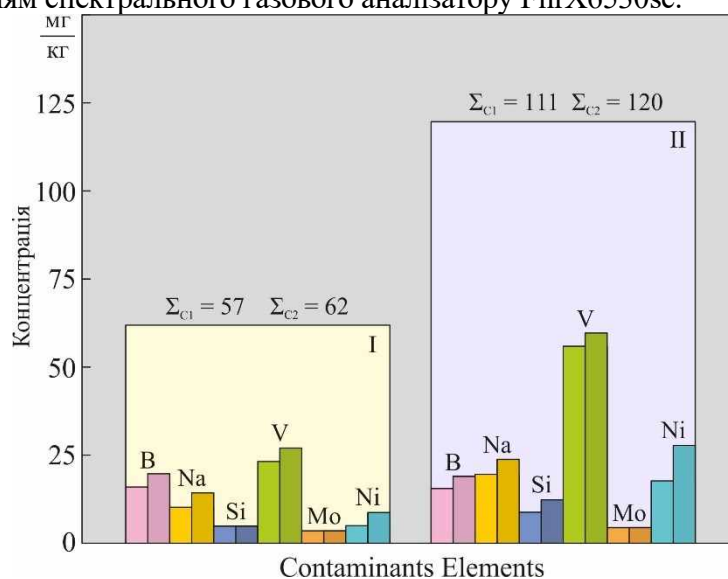


Рисунок 2 – Вміст забруднюючих речовин у моторному мастилі Castrol 15W20 під час експлуатації в циркуляційній системі мащення суднових дизелів 6R26 Wartsila:
I – після 500 годин; II – після 1000 годин

Під час дослідження також контролювались та підтримувались в рекомендованому фірмою-виробником діапазоні всі основні показники роботи дизелів 6R26 Wartsila та систем, що забезпечують їх функціонування.

Висновки. Наведені результати досліджень дозволяють зробити наступні висновки.

1. Під час експлуатації суден морського та внутрішнього водного транспорту постійне стає завдання забезпечення ресурсозберігаючої експлуатації дизелів, що на них встановлені та виконують функції головних та допоміжних двигунів. Виникнення цього завдання зумовлюється процесами тертя та зношування, що виникають та відбуваються під час зворотно-поступального руху поршня у циліндрі дизеля та обертального руху колінчатого валу. У першому випадку

відбувається знос у трибологічній системі поршневі кільця – втулка циліндра, у другому – у трибологічній системі колінчатий вал – вкладиш підшипника ковзання.

2. Найбільш зручним та ефективним методом контролю стану поверхонь тертя, що входять до складу вищевказаних трибологічних систем, є аналіз та діагностування моторного мастила, яке використовуються у циркуляційної системі мащення. Експрес аналіз моторного мастила, що виконується у судновій лабораторії, дозволяє визначити зміну в'язкості та загального лужного числа, а також загальний вміст механічних домішок, що потрапляють у мастило як результат зносу контактних поверхонь. З метою більш повного аналізу хімічних елементів, що знаходяться у мастилі, виконують його аналіз у берегових дослідницьких лабораторіях, для цього, як правило, використовується спектральний аналіз.

3. Недоліком контролю показників у береговій дослідницькій лабораторії є певна затримка у отриманні його результатів. В деяких випадках це може сприяти несвоєчасному прийняттю управлінських рішень або виконанню відповідних технологічних операцій. Через це, як додатковий спосіб контролю експлуатаційних характеристик мастила безпосередньо на судні та, відповідно, більш швидкого отримання результатів, виконувався аналіз спектрів горіння моторного мастила. З цією метою використовувався спектральний газовий аналізатор FlirX6530sc з вбудованою інфрачервоною камерою контролю. При цьому забезпечувався контроль так самих характеристик (Wear Elements та Contaminant Elements), визначення яких виконувалось у береговій дослідницькій лабораторії.

4. Збіг результатів діагностування стану моторного мастила, що виконувався за допомогою запропонованого спектральний газового аналізатору та результатів, що були отримані під час досліджень у берегової лабораторії, дозволяє рекомендувати метод визначення експлуатаційних характеристики моторного мастила за допомогою суднового спектральний газового аналізатору як метод попереднього аналізу. Результати, які при цьому можуть бути отримані, з високою точністю характеризують показники моторного мастила. Безпосередньо метод діагностування моторного мастила за допомогою газового аналізу сприяє забезпеченню ресурсозберігаючої експлуатації суднових дизелів.

ЛІТЕРАТУРА

1. Сагін С.В., Сагін А.С. Контроль та діагностування надійності та економічності дизелів морських та річкових засобів транспорту // Суднові енергетичні установки : наук.-техн. зб. – 2023. – Вип. 46. – С. 118-131. doi: 10.31653/smf46.2023.118-131.
2. Сагін С.В., Заблоцький Ю.В., Сагін А.С. Підвищення економічності роботи суднових середньооборотних дизелів // Водний транспорт. Збірник наукових праць. – 2025. – Вип. 1(42). – С. 166-179. doi.org/10.33298/2226-8553.2025.1.42.20.
3. 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>.
4. 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. 208-220. doi.org/10.33298/2226-8553.2024.3.41.21.
5. 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.org/10.33298/2226-8553.2025.1.42.04.
6. 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.
7. Сагін С.В. Зниження енергетичних втрат в прецизійних парах паливної апаратури суднових дизелів // Суднові енергетичні установки : наук.-техн. зб. – 2018. – Вип. 38. – С. 132-142.

8. Сагін С.В. Зниження механічних втрат у судових 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.
9. 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. <https://doi.org/10.20858/sjsutst.2025.127.10>.
10. Sagin S.V. Decrease in mechanical losses in high-pressure fuel equipment of marine diesel engines // Materials of the International Conference “Scientific research of the SCO countries: synergy and integration” – 2019. – P. 139–145. DOI: 10.34660/INF.2019.15.36258.
11. 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.
12. Сагін С.В., Сагін А.С. Контроль та діагностування надійності та економічності дизелів морських та річкових засобів транспорту // Суднові енергетичні установки: наук.-техн. зб. – 2023. – Вип. 46. – С. 118-131. doi: 10.31653/smf46.2023.118-131.
13. Левченко О.В., Двудіт З.П., Козленко О.В. Особливості управління персоналом підприємств залізничного транспорту // Ефективна економіка. – 2020. – № 6. – С. 1-7. <http://www.economy.nayka.com.ua/?op=1&z=7985>. DOI: 10.32702/2307-2105-2020.6.72
14. Двудіт З.П., Левченко О.В., Деркач Д.М. Формування маркетингових рішень у системі управління підприємством // Менеджмент та підприємництво в Україні: етапи становлення та проблеми розвитку. – 2020. – Вип. 2(1). – С. 21–28. <https://science.lpnu.ua/sites/default/files/journal-paper/2020/jun/21855/st3.pdf>
15. Kurdiuk S., Dremluk V., Melnyk O., Onishchenko O., Fomin O., Pištěk V., Kučera P. Development of a High-Reliability Hybrid Data Transmission System for Unmanned Surface Vehicles Under Interference Conditions // Drones. – 2025. – № 9 (3). – P. 174. <https://doi.org/10.3390/drones9030174>.
16. Мацкевич Д.В., Сагін С.В., Ханмамедов С.А. Изменение реологических характеристик смазочных материалов в циркуляционной масляной системе в процессе эксплуатации среднеоборотного двигателя // Судовые энергетические установки: науч.-техн. сб. – 2010. – Вып. 25. – С.109-118.
17. Сагін С.В., Поповский Ю.М., Гребенюк М.Н. Влияние ориентационной упорядоченности в граничных смазочных слоях на триботехнические характеристики узлов трения // Судовые энергетические установки: науч.-техн. сб. – 1998. – Вып. 1. – С.102-104.
18. Petrychenko O., Levynskyi 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>.
19. 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>
20. 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.
21. Сагін С.В., Столярик Т.О. Динаміка судових дизелів під час використанні 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.
22. Сагін С.В., Куропятник О.А. Визначення оптимальних режимів експлуатації судових двигунів внутрішнього згоряння під час використання біодизельного палива // Суднові енергетичні установки : наук.-техн. зб. – 2024. – Вип. 48. – С. 100-113. doi: 10.31653/smf48.2024.100-113.

23. Sagin S.V., Kuropyatnyk O.A. Using exhaust gas bypass for achieving the environmental performance of marine diesel engines // *Austrian Journal of Technical and Natural Sciences. Scientific journal.* – 2021. – № 7-8 – P. 36-43. <https://doi.org/10.29013/AJT-21-7.8-36-43>.
24. Сагін С.В., Куропятник О.А. Визначення оптимальних режимів процесів управління випускними газами судових дизелів // *Водний транспорт: Збірник наукових праць.* – 2024. – Вип. 2(40). – С. 173-185. doi.org/10.33298/2226-8553.2024.2.40.16.
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. – № 2(38). – С. 187-197. doi.org/10.33298/2226-8553.2023.2.38.19.
26. Двуліт З.П., Тимошук О.М., Левченко О.В. Вдосконалення бізнес-процесів сучасних судноплавних компаній в сфері міжнародних морських вантажних перевезень // *Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Серія: Проблеми економіки та управління.* – 2021. – № 1. – С. 1-12. <https://ena.lpnu.ua/items/c18bd237-03e6-4ae1-947c-6a2300e013e2>.
27. 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.
28. 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.
29. Сагин С.В. Реология моторных масел при режимах пуска и реверса судовых малооборотных дизелей // *Universum: Технические науки.* – 2018. – Вып. 3(48). – С. 67-71.
30. Сагин 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.
31. Сагин С.В., Мацкевич Д.В. Оптические характеристики граничных смазочных слоев масел, применяемых в циркуляционных системах судовых дизелей // *Судовые энергетические установки: науч.-техн. сб.* – 2011. – № 26. – С.116-125.
32. Сагін С.В., Куропятник О.А. Аналіз впливу біодизельного палива на екологічні та економічні показники роботи судових дизелів // *Водний транспорт. Збірник наукових праць.* – 2025. – Вип. 1(42). – С. 180-194. doi.org/10.33298/2226-8553.2025.1.42.21.
33. Побережний Р.В., Сагін С.В. Забезпечення екологічних показників дизелів суден річкового та морського транспорту // *Суднові енергетичні установки: наук. -техн. зб.* – 2020. – Вип. 41. – С. 5-9. DOI: 10.31653/smf340.2020.5-9.
34. Sagin S.V., Kuropyatnyk O.O., Tkachenko I.V Ensuring the environmental friendliness of marine diesel engines of specialized ships // *Суднові енергетичні установки: науково-технічний збірник.* – 2022. – Вип. 45. – С. 5-16. [doi: 10.31653/smf45.2022.5-16](https://doi.org/10.31653/smf45.2022.5-16).
35. 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.
36. Сагин С.В., Куропятник А.А. Оптимизация режимов работы системы перепуска выпускных газов судовых среднеоборотных дизелей // *Автоматизация судовых технических средств: науч. -техн. сб.* – 2019. – Вып. 25. – С. 79-89.
37. Petrychenko O., Levinskyi M. Trends and preconditions for widespread adoption of liquefied natural gas in maritime transport // *Transport systems and technologies.* – 2024. – № 43. – С. 21-36. DOI:10.32703/2617-9059-2024-43-2.
38. Заблоцький Ю.В., Сагін А.С. Визначення динамічних навантажень під час зміни режимів мащення прецизійних пар паливної апаратури судових дизелів // *Суднові енергетичні установки: наук.-техн. зб.* – 2022. – Вип. 44. – С. 121-131. [doi: 10.31653/smf44.2022.121-131](https://doi.org/10.31653/smf44.2022.121-131).

39. Кривий М. О., Сагін С. В. Визначення впливу властивостей моторних мастил на розподіл тиску в парах ковзання судових дизелів // Суднові енергетичні установки: наук.-техн. зб. – 2021. – Вип. 43. – С. 18-24. doi:10.31653/smf343.2021.18-24.
40. Sagin S., Sagin A., Zablotskiy 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. Levinskyi M. Automatic diagnostic of marine diesel generator lubricating oil condition // Автоматизація судових технічних засобів: наук.-техн. зб. – 2023. – Вип. 28. – С. 106-120. DOI: 10.31653/1819-3293-2023-1-28-106-120.
42. Сагин С.В., Заблоцкий Ю.В. Влияние анизотропных жидкостей на работу узлов трения судовых дизелей // Проблемы техники: наук.-виробн. журнал. – 2012. – № 4. – С. 68-81.
43. Заблоцкий Ю.В., Солодовников В.Г. Снижение энергетических потерь в топливной аппаратуре судовых дизелей // Проблемы техники: наук.-виробн. журнал. – 2013. – № 3. – С. 46-56.
44. Зверьков Д.О., Сагін С.В. Зниження механічних втрат у судових дизелях // Суднові енергетичні установки: наук.-техн. зб. – 2020. – Вип. 40. – С. 20-25. DOI : 10.31653/smf341.2020.20-25.
45. 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.
46. Сагін С.В., Столярик Т.О. Аналіз експлуатаційних характеристик моторних мастил судових дизелів // Суднові енергетичні установки: наук.-техн. зб. – 2021. – Вип. 43. – С. 69-80. doi: 10.31653/smf343.2021.69-80.
47. Заблоцкий Ю. В. Исследование влияния органических покрытий на работу элементов топливной аппаратуры высокого давления судовых дизелей // Судовые энергетические установки: науч.-техн. сб. – 2015. – № 35. – С. 83-92.
48. Поповский А.Ю., Сагин С.В. Комплексная оценка эксплуатационных характеристик смазочных углеводородных жидкостей // Автоматизация судовых технических средств : науч.-техн. сборник. – 2014. – Вып. 20. – С. 74-83.
49. Сагін С.В., Заблоцкий Ю.В. Діагностування технічного стану судових енергетичних установок засобів водного транспорту // Водний транспорт. Збірник наукових праць. – 2023. – № 2(38). – С. 164-175. doi.org/10.33298/2226-8553.2023.2.38.18.
50. Сагин С. В. Определение диапазона стратификации вязкости смазочного материала в трибологических системах судовых дизелей // Вісник Одеськ. нац. мор. ун-ту. – 2019. – Вип. 1(58). – С. 89-100.
51. Сагін С.В. Зниження механічних втрат у судових середньообертових дизелях // Суднові енергетичні установки: наук.-техн. зб. – 2020. – Вип. 40. – С. 5-11. DOI : 10.31653/smf340.2020.5-11.
52. Марченко О.О., Сагін С.В. Вдосконалення процесу очищення судових важких палив // Суднові енергетичні установки: наук.-техн. зб. – 2020. – Вип. 41. – С. 10-14. DOI: 10.31653/smf341.2020.10-14.
53. Руснак Д.Ю., Сагін С.В. Забезпечення екологічних вимог при ультразвуковій десульфурізації вуглеводних палив // Суднові енергетичні установки: наук.-техн. зб. – 2020. – Вип. 40. – С. 49-54. DOI: 10.31653/smf340.2020.49-54.
54. Сагин С.В., Заблоцкий Ю.В., Перунов Р.В. Технология использования и результаты испытаний присадок к топливам для судовых дизелей // Проблемы техники: наук.-виробн. журнал. – 2012. – № 3. – С. 84-103.
55. Сагин С.В., Заблоцкий Ю.В. Определение триботехнических характеристик поверхностей по степени упорядоченности пристенных слоев углеводородных жидкостей // Проблемы техники: наук.-виробн. журнал. – 2011. – № 3. – С. 78-88. doi.org/10.33298/2226-8553.2025.1.42.08.

REFERENCES

1. 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.
2. 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.
3. 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>.
4. Sagin S.S., Sagin S.V. Ensuring the safe maneuvering of large-tonnage vessels in confined port waters // *Water transport*. – 2024. – № 3(41). – С. 208-220. doi.org/10.33298/2226-8553.2024.3.41.21.
5. 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.
6. 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. – № 2(38). – С. 187-198. doi.org/10.33298/2226-8553/2023.2.38.20.
7. Sagin S.V. Reducing energy losses in precision steam of fuel equipment of marine diesel engines // *Ship power plants*. – 2018. – Vol. 38. – P. 132-142
8. Sagin S.V. Reducing mechanical losses in medium-speed marine diesel engines by optimizing the operation of circulating lubrication systems // *Herald of the Odessa Maritime University*. – 2020. – Vol. 1(61). – P. 87-96. doi.org 10.47049/2226-1893-2020-1-87-96.
9. 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. <https://doi.org/10.20858/sjsutst.2025.127.10>.
10. Sagin S.V. Decrease in mechanical losses in high-pressure fuel equipment of marine diesel engines // *Materials of the International Conference "Scientific research of the SCO countries: synergy and integration"* – 2019. – P. 139-145. DOI: 10.34660/INF.2019.15.36258.
11. 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.
12. Sagin S.V., Sagin A.S. Control and diagnostics of the 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.
13. Levchenko O.V., Dvulit Z.P., Kozlenko O.V. Features of Human Resource Management at Railway Transport Enterprises // *Efektivna ekonomika*. – 2020. – Vol. 6. – P. 1-7 <http://www.economy.nayka.com.ua/?op=1&z=7985>. DOI: 10.32702/2307-2105-2020.6.72.
14. Dvulit Z.P., Levchenko O.V., Derkach D.M. Formation of marketing decisions in the enterprise management system // *Menedzhment ta pidpriemnytstvo v Ukraini: etapy stanovlennia ta problemy rozvytku*. – 2020 – Vol. 2(1). – P. 21-28. <https://science.lpnu.ua/sites/default/files/journal-paper/2020/jun/21855/st3.pdf>
15. Kurdiuk S., Dremluk V., Melnyk O., Onishchenko O., Fomin O., Pištěk V., Kučera P. Development of a High-Reliability Hybrid Data Transmission System for Unmanned Surface Vehicles Under Interference Conditions // *Drones*. – 2025. – № 9 (3). – P. 174. <https://doi.org/10.3390/drones9030174>.
16. Matskevych D.V., Sagin S.V., Hanmamedov S.A. Changes in the rheological characteristics of lubricants in the circulating oil system during operation of a medium-speed engine // *Ship power plants*. – 2010. – Vol. 25. – P. 109-118.
17. Sagin S.V., Popovskii Y.M., Grebenuk M.N. The influence of orientation ordering in boundary lubricant layers on the tribological characteristics of friction units // *Ship power plants*. – 1998. – Vol. 1. – P. 102-104.

18. Petrychenko O., Levynskyi 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>.
19. 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>
20. 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.
21. 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.
22. Sagin S.V., Kuropyatnyk O.A. Determining the optimal operating modes of marine internal combustion engines when using biodiesel fuel // *Ship power plants*. – 2011. – Vol. 48. – P. 100-113. [doi: 10.31653/smf48.2024.100-113](https://doi.org/10.31653/smf48.2024.100-113).
23. Sagin S.V., Kuropyatnyk O.A. Using exhaust gas bypass for achieving the environmental performance of marine diesel engines // *Austrian Journal of Technical and Natural Sciences. Scientific journal*. – 2021. – № 7-8 – P. 36-43. <https://doi.org/10.29013/AJT-21-7.8-36-43>.
24. Sagin S.V., Kuropyatnyk O.A. Determination of optimal modes of exhaust gas control processes for marine diesel engines // *Water transport*. – 2024. – № 1(39). – P. 173–185. doi.org/10.33298/2226-8553.2024.2.40.16.
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. – № 2(38). – P. 187–197. doi.org/10.33298/2226-8553.2023.2.38.19.
26. 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. – № 1. – P. 1-12. <https://ena.lpnu.ua/items/c18bd237-03e6-4ae1-947c-6a2300e013e2>.
27. 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.
28. 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.
29. Sagin S.V. Rheology of motor oils in start-up and reverse modes of marine low-speed diesel engines // *Universum: Technical sciences*. – 2018. – № 3(48). – P. 67-71.
30. 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.
31. Sagin S.V., Matskevych D.V. Optical characteristics of boundary lubricating layers of oils used in circulation systems of marine diesel engines // *Ship power plants*. – 2011. – Vol. 26. – P. 116-125.
32. Sagin S.V., Kuropyatnyk O.A. Analysis of the impact of biodiesel fuel on the environmental and economic performance of marine diesel engines // *Water transport*. – 2025. – Вип. 1(42). – С. 180-194. doi.org/10.33298/2226-8553.2025.1.42.21.
33. Poberezhnyi R.V., Sagin S.V. Ensuring the environmental performance of diesel engines in river and sea transport vessels // *Ship power plants*. – 2020. – Vol. 41. – P. 5-9. DOI: 10.31653/smf340.2020.5-9.
34. Sagin S.V., Kuropyatnyk O.O., Tkachenko I.V. Ensuring the environmental friendliness of marine diesel engines of specialized ships // *Ship power plants*. – 2022. – № 45. – P. 5–16. [doi: 10.31653/smf45.2022.5-16](https://doi.org/10.31653/smf45.2022.5-16).
35. 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.

36. Sagin S.V., Kuropyatnyk O.A. Optimization of operating modes of the exhaust gas bypass system of marine medium-speed diesel engines // Automation of ship facilities. – 2019. – № 25. – P. 79-89.
37. Petrychenko O., Levynskyi M. Trends and preconditions for widespread adoption of liquefied natural gas in maritime transport // Transport systems and technologies. – 2024. – № 43. – C. 21-36. DOI:10.32703/2617-9059-2024-43-2.
38. Zablotskyi Yu.V., Sagin A.S. Determination of dynamic loads during the change of lubrication modes of precision pairs of fuel equipment of marine diesel engines // Ship power plants. – 2022. – Vol. 44. – P. 121-131. doi: 10.31653/smf44.2022.121-131.
39. Kryvyi M. O., Sagin S. V. Determination of the influence of properties of engine oils on pressure distribution in friction pairs of marine diesel engines // Ship power plants. – 2021. – Vol. 43. – P. 18-24. doi:10.31653/smf343.2021.18-24.
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. Levynskyi M. Automatic diagnostic of marine diesel generator lubricating oil condition // Automation of ship technical facilities. – 2023. – № 28. – P. 106-120. DOI: 10.31653/1819-3293-2023-1-28-106-120
42. Sagin S.V., Zablotsky Yu.V. The influence of anisotropic fluids on the operation of friction units of marine diesel engines // Problems of technical. – 2012. – Vol. 4. – P. 68-81.
43. Zablotskyi Yu.V., Solodovnikov V.G. Reducing energy losses in fuel equipment of marine diesel engines // Problems of technical. – 2012. – Vol. 3. – P. 46-56.
44. Zverkov D.O., Sagin S.V. Reduction of mechanical losses in marine diesel engines // Ship power plants. – 2020. – № 41. – P. 20–25. DOI: 10.31653/smf341.2020.20-25.
45. 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.
46. Sagin S.V., Stoliaryk T.O. Analysis of operational characteristics of motor oils of marine diesels // Ship plants. – 2021. – Vol. 43. – P. 69-80. doi: 10.31653/smf343.2021.69-80.
47. Zablotskyi Yu.V. A study of the influence of organic coatings on the operation of high-pressure fuel system components of marine diesel engines // Ship power plants. – 2015. – Vol. 35. – P. 83-92.
48. Popovskii A.Y., Sagin S.V. Complex assessment of operational characteristics of lubricating hydrocarbon liquids // Automation of ship facilities. – 2014. – №20. – P. 74-83.
49. 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.
50. Sagin S.V. Determination of the range of lubricant viscosity stratification in tribological systems of marine diesel engines // Herald of the Odessa National Maritime University. – 2019. – № 1(58). – P. 89–100.
51. Sagin S.V. Reducing mechanical losses in marine medium-speed diesel engines // Ship power plants. – 2020. – Vol. 40. – P. 5-11. DOI : 10.31653/smf340.2020.5-11.
52. Marchenko O.O., Sagin S.V. Improving the process of cleaning marine heavy fuels // Ship power plants. – 2020. – Vol. 41. – P. 10-14. DOI: 10.31653/smf340.2020.10-14.
53. Rusnak D.Y., Sagin S.V. Ensuring environmental requirements during ultrasonic desulfurization of hydrocarbon fuels // Ship power plants. – 2020. – Vol. 40. – P. 49-54. DOI: 10.31653/smf340.2020.49-54.
54. Sagin S.V., Zablotsky Yu.V., Perunov R.V. Technology of use and test results of fuel additives for marine diesel engines // Problems of technical. – 2012. – Vol. 3. – P. 84-103.
55. Sagin S.V., Zablotskyi Y.V. Determination of tribological characteristics of surfaces by the degree of ordering of wall layers of hydrocarbon liquids // Problems of technical. – 2011. – Vol. 3. – P. 78-88.

Razinkin R.O.**ENSURING RESOURCE-SAVING OPERATION OF MARINE DIESEL ENGINES BY DIAGNOSING ENGINE OIL**

The results of research on determining a method that contributes to the resource-saving operation of marine diesel engines are presented. It is noted that during the operation of marine and inland waterway vessels, the task of ensuring the resource-saving operation of diesel engines installed on them and performing the functions of main and auxiliary engines becomes a constant task. The emergence of this task is due to the processes of friction and wear that arise and occur during the reciprocating motion of the piston in the diesel cylinder and the rotational motion of the crankshaft. In the first case, wear occurs in the tribological system of the piston rings - cylinder sleeve, in the second - in the tribological system of the crankshaft - plain bearing liner. The most convenient and effective method of monitoring the condition of the friction surfaces that are part of the above-mentioned tribological systems is the analysis and diagnosis of motor lubricant used in the circulating lubrication system. In order to fully analyze the chemical elements contained in the lubricant, its analysis is performed in shore research laboratories, for this, as a rule, spectral analysis is used. The disadvantage of monitoring indicators in a shore research laboratory is a certain delay in obtaining its results. In some cases, this may contribute to untimely adoption of management decisions or performance of relevant technological operations. Therefore, as an additional method of monitoring the operational characteristics of the lubricant directly on the vessel and, accordingly, faster obtaining of results, an analysis of the combustion spectra of motor lubricant was performed. For this purpose, a FlirX6530sc spectral gas analyzer with a built-in infrared control camera was used. At the same time, control of the same characteristics (Wear Elements and Contaminant Elements), the determination of which was performed in the shore research laboratory, was ensured. The coincidence of the results of diagnosing the condition of motor oil, which was carried out using the proposed spectral gas analyzer, and the results obtained during research in the shore laboratory, allows us to recommend a method for determining the operational characteristics of motor oil using a ship spectral gas analyzer as a method of preliminary analysis. The results that can be obtained in this case characterize the performance of motor oil with high accuracy. The method of diagnosing motor oil using gas analysis directly contributes to ensuring resource-saving operation of ship diesel engines.

Keywords: contact surfaces, diagnostics, friction, lubrication system, lubrication, marine diesel, maritime transport, motor oil, technical condition, wear

МЕТОДИКА НАВЧАННЯ

УДК 629.5.036:004.8

doi.org/10.33298/2226-8553.2025.3.43.25

© Гейлик А. В., Ляшко О. В., Вяла Ю. Е.

**ІНТЕГРАЦІЯ КОРЕЛЯЦІЙНО-РЕГРЕСІЙНИХ МОДЕЛЕЙ
ТА ОПТИМІЗАЦІЙНИХ ЗАДАЧ У ФОРМУВАННІ ПРОФЕСІЙНОЇ МАТЕМАТИЧНОЇ
КОМПЕТЕНТНОСТІ МАЙБУТНІХ ФАХІВЦІВ ТРАНСПОРТНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ**

У статті обґрунтовано доцільність посилення прикладної спрямованості математичної підготовки майбутніх фахівців морського і річкового транспорту шляхом використання кореляційно-регресійних моделей та задач оптимізації. Метою дослідження є висвітлення методичних підходів до формування професійної математичної компетентності студентів морських спеціальностей у процесі вивчення дисциплін математичного циклу. Методологічну основу дослідження становлять компетентнісний та діяльнісний підходи, методи математичного моделювання, аналізу статистичних даних і педагогічного узагальнення. У статті наведено приклади навчальних задач, зорієнтованих на реальні процеси морського та річкового транспорту, що демонструють можливості застосування методу найменших квадратів, тренд-аналізу та методів умовної і безумовної оптимізації. Показано, що поєднання класичних математичних методів із використанням цифрових інструментів сприяє підвищенню рівня математичної та професійної компетентності майбутніх фахівців транспортної галузі.

Ключові слова: професійна математична компетентність; морська та річкова освіта; прикладна спрямованість навчання; кореляційно-регресійний аналіз; оптимізаційні задачі.

Постановка проблеми. Підготовка фахівців морського та річкового флоту має свою специфіку, яка підтверджується практикою; міжнародними документами морської галузі (Міжнародна конвенція про підготовку і дипломування моряків та несення вахти); нормативними документами України (Закон України «Про освіту», «Про вищу освіту»; Морська доктрина України на період до 2035 року; Декларація про європейський простір для вищої освіти).

Модернізація системи вищої морської та річкової освіти, орієнтація на міжнародні стандарти підготовки фахівців і зростання вимог до безпеки судноплавства зумовлюють необхідність підвищення якості фундаментальної та професійної підготовки здобувачів вищої освіти. Особливу роль у цьому процесі відіграє математична підготовка, яка забезпечує формування здатності до аналізу, прогнозування та оптимізації професійних процесів у транспортній галузі.

Аналіз досліджень і публікацій. Проблеми формування математичної та професійної компетентності студентів закладів вищої освіти розглядалися у працях вітчизняних і зарубіжних науковців. Значну увагу компетентнісному підходу в математичній освіті приділено у дослідженнях Ю. Колягіна, Л. Кудрявцева, Н. Ходирєвої, В. Ключка та ін. Окремі аспекти математичної підготовки майбутніх фахівців морської та річкової галузі висвітлено у працях В. Кліндухової, О. Ляшко, А. Гейлик, Ю. Вялої, Т. Джежуль та інших. Разом із тим питання системного використання кореляційно-регресійного аналізу й оптимізаційних моделей у процесі формування професійної математичної компетентності потребує подальшого науково-методичного осмислення.

Мета даної статті. Метою статті є обґрунтування методичних підходів до формування професійної математичної компетентності майбутніх фахівців морського і річкового транспорту на основі використання кореляційно-регресійних моделей та задач оптимізації у процесі навчання вищої математики.

Методологічну основу дослідження становлять компетентнісний і діяльнісний підходи. У процесі дослідження використано такі методи: теоретичний аналіз і узагальнення наукових джерел;

аналіз навчальних програм і змісту дисциплін математичного циклу; педагогічне узагальнення досвіду викладання вищої математики у закладах вищої морської освіти; методи математичного моделювання, кореляційно-регресійного аналізу, оптимізації та статистичної обробки даних.

Виклад основного матеріалу. Математика виступає універсальною мовою інженерних розрахунків і досліджень у морській галузі. Недостатній рівень математичної підготовки унеможливорює ефективне опанування дисциплін природничо-наукового та професійного циклів. Водночас доцільно організоване навчання вищої математики, зорієнтоване на професійні задачі, є дієвим засобом формування математичної компетентності майбутніх судноводіїв і суднових механіків.

Розглянуті у статті приклади демонструють можливості використання кореляційно-регресійних моделей для аналізу реальних процесів морського та річкового транспорту: вантажообігу, пасажирських перевезень, аварійності, часових витрат на вантажні операції. Такий підхід дозволяє показати студентам відмінність між функціональними та статистичними залежностями і сформулювати навички інтерпретації результатів математичного моделювання.

Наведемо декілька конкретних прикладів. Аналітична інформація для них узяття нами із відомих підручників, періодичних джерел та електронних ресурсів.

Перша група прикладів стосується безпосередньо методу найменших квадратів. З одного боку, ми демонструємо студентам застосування диференціального числення функцій декількох змінних для розв'язування оптимізаційних задач (або ж розглядаємо сам метод найменших квадратів як застосування задач безумовної оптимізації), тим самим підтримуючи та розвиваючи математичну грамотність студентів-моряків. З іншого боку, в експлуатаційній практиці достатньо часто мають місце саме кореляційні, а не функціональні зв'язки (наприклад, час слідування судна, час та продуктивність вантажних робіт на судні, тощо). Рівняння регресії для аналітичного відображення та подальшої графічної інтерпретації цих кореляційних зв'язків будуються, як відомо, за допомогою методу найменших квадратів [2], [3]. Тому «вплітаючи» подібні задачі у традиційний матеріал, ми сприяємо формуванню якісної професійної математичної компетенції студентів.

Приклад 1. Використовуючи данні таблиці 1, методом найменших квадратів побудувати рівняння лінійної залежності осадки вантажного теплоходу від кількості вантажу. На координатній площині побудувати експериментальні точки та графік отриманої прямої [2, с.36].

Таблиця 1 - Експериментальні дані до прикладу 1

Кількість вантажу	x (тис. т)	0,35	2,45	4,4	6	2,6	1,8	5,3
Осадка теплоходу	y (м)	1	2	3	3,8	2,5	1,5	3,5

Приклад 2. Дослідити тренд розвитку пасажирських перевезень на річковому та морському транспорті в Україні з 2017 по 2022 рік (таблиця 2). Побудувати відповідні лінійні тренд-функції. Проаналізувати рівняння отриманих прямих (зокрема кутові коефіцієнти) та зробити висновки [3].

Таблиця 2 - Статистичні дані до прикладу 2

Роки (x)	2017	2018	2019	2020	2021	2022
Перевезення морським транспортом (y_1 , млн.)	26	8	4	11	7	6
Перевезення річковим транспортом (y_2 , млн.)	19	4	2	2	1	1

Приклад 3. Скласти рівняння та побудувати графік лінійної тренд-функції, яка відображає стан аварійності на внутрішніх водних шляхах в Європі (дані ETSC, Eurostat, IMO / ILO, наявні до 2022–2023, адаптовані до розв'язання Тренд-задачі).

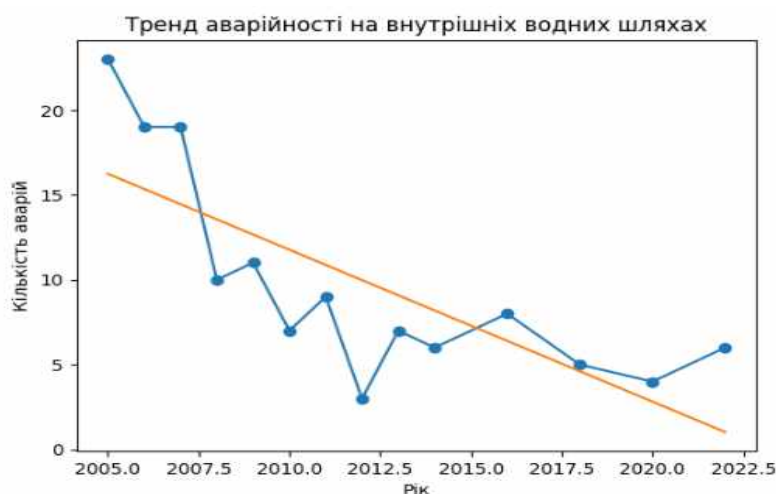
Таблиця 3 - Статистичні дані до прикладу 3

Роки (x)	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2016	2018	2020	2022
Число аварій (y)	11	19	9	3	7	6	8	5	4	6

Коментарі до розв'язання прикладів 1-3. Студентам пропонується і розв'язання відповідної системи нормальних рівнянь, і подальші графічні побудови виконати «вручну», тобто без застосування спеціальних програмно-педагогічних засобів. Саме для цього підібрано невеликий масив даних, що містить числа, які не призведуть до занадто громіздких обчислень. Саму ж систему нормальних рівнянь можна запропонувати розв'язати або методом Крамера, або іншими методами, що вивчалися у курсі вищої математики.

Запропоновані приклади доцільно використовувати у навчальному процесі під час вивчення тем «Метод найменших квадратів», «Тренд-аналіз» та «Елементи кореляційно-регресійного аналізу», зокрема з використанням табличних процесорів MS Excel.

Побудоване рівняння лінійної тренд-функції $y = -0,895x + 16,24$ відображає загальну тенденцію до зменшення аварійності на внутрішніх водних шляхах у досліджуваній період. Значення коефіцієнта детермінації $R^2 = 0,58$ свідчить про помірний ступінь щільності кореляційного зв'язку, що є типовим для процесів, зумовлених сукупною дією технічних, організаційних та людських факторів. Від'ємний кутовий коефіцієнт ($-0,895$) вказує на загальну тенденцію зниження аварійності, у середньому майже на одну аварію щороку.



Коливання навколо тренду свідчать про доцільність подальшого застосування нелінійних моделей або багатофакторного аналізу, що може бути предметом окремих навчально-дослідницьких завдань.

Отримані результати доцільно використовувати як приклад прикладного застосування методів математичного моделювання та статистичного аналізу у професійній підготовці майбутніх фахівців морського і річкового транспорту.

Складаючи та пропонуючи для розв'язування студентам подібні задачі, слід мати на увазі, що для більшості транспортних операцій у довідковій літературі наводиться рекомендована необхідна кількість спостережень, яка дозволяє зробити обґрунтовані висновки щодо загальних тенденцій та зв'язків між технічними показниками. Зокрема, число спостережень (N), що наводиться у таблиці 4 забезпечує відносну граничну похибку середнього значення показника 10% з ймовірністю 0,95. Для того щоб покращити точність до 5%, число спостережень необхідно збільшити приблизно у 4 рази [2, с.38].

Таблиця 4 – Число спостережень (N)

Операції	Кількість спостережень
Час ходу судна	5
Тривалість шлюзування	20
Тривалість бункеровки	40
Час завантаження (довантаження)	70
Час розвантаження	100
Час пропуску суден через шлюзи	120
Час технологічних очікувань	400

Кореляційні (регресивні) моделі процесів, які тим чи іншим чином відносяться до професійної діяльності студентів факультетів морського транспорту, далеко не завжди мають лінійний характер. Важливо, щоб студенти мали про це уявлення. Складання рівнянь та побудова графіків відповідних нелінійних залежностей є достатньо громіздкими. Тому для розв'язання таких задач студентам доцільно запропонувати використовувати комп'ютер.

Приклад 4. Відомо, що одним із основних елементів тривалості рейсу судна є витрати часу стоянки на виконання вантажних операцій. Значення цього показника залежить від кількості вантажу на борту судна; класу вантажу; технологічної схеми; класу вантажного приміщення; коефіцієнту конструктивної нерівномірності трюмів; числа люків на судні та інших факторів. Ставиться задача: дослідити за допомогою MS Excel залежність показника часу стоянки судна (y , доба) від кількості вантажу на борту (x , тис. т), використовуючи статистичні данні по обробці суден у Одеському порту (рис. 1.) [4, с.309]:.

Коментарі до розв'язання прикладу 4. Переслідуючи мету підтримки та подальшого розвитку графічної та інформаційної грамотності студентів, наведена вище точечна діаграма пропонується студентам не в електронному вигляді. Тобто для подальшої роботи з електронними таблицями MS Excel, студенти повинні вміти «прочитати» координати точок та занести їх у відповідні комірки. Далі студенти, використовуючи детальну довідку MS Excel, виконують ряд операцій по побудові ліній тренда. У таблиці 5 наведені результати, які отримують студенти. Зрозуміло, що це лише одна із можливих правильних відповідей, так як координати точок діаграми можна визначити лише наближено.

Таблиця 5 - Основні тренд-функції до прикладу 4 та їх оцінка

Тип залежності	Модель зв'язку	Показник точності кореляційного зв'язку, R^2
Лінійна	$y = 0,3608x + 0,5668$	$R^2 = 0,7319$
Квадратична (поліноміальна другого степеня)	$y = -0,0062x^2 + 0,4587x + 0,3209$	$R^2 = 0,7355$
Логарифмічна	$y = 1,4904\ln(x) + 0,8029$	$R^2 = 0,5989$
Експоненційна	$y = 0,7609e^{0,155x}$	$R^2 = 0,6258$

Фундаментальний курс вищої математики студентів морських спеціальностей, як правило, не передбачає вивчення теорії та практики кореляційно-регресивного аналізу. Однак, ми вважаємо доцільним та необхідним, щоб вони все ж таки отримували уявлення про ті критерії, за якими обирають ту чи іншу форму аналітичного зв'язку (регресійну модель). Так як у даному прикладі ми пропонуємо використовувати MS Excel, то для такого аналізу студентам необхідно вибрати в параметрах лінії тренда опцію: «Помістити на діаграму величину апроксимації R^2 ». В довідковій літературі R^2 називають

також коефіцієнтом детермінації або квадратом коефіцієнта кореляції. Студентам важливо повідомити, що оцінка щільності зв'язку між результативною ознакою y (регресантом) і факторною ознакою x (регресором) відбувається за шкалою, що наведена у таблиці 2 [3, с.51].

Таблиця 6 - Оцінка показника щільності кореляційного зв'язку

Зв'язок відсутній	Слабкий зв'язок	Зв'язок помірний	Зв'язок помітний	Сильний зв'язок	Достатньо сильний зв'язок	Функціональний зв'язок
$R^2 = 0$	$0,1 \leq R^2 < 0,3$	$0,3 \leq R^2 < 0,5$	$0,5 \leq R^2 < 0,7$	$0,7 \leq R^2 < 0,9$	$0,9 \leq R^2 < 0,99$	$R^2 = 1$

Аналізуючи результати таблиці 5, бачимо, що з усіх представлених, найбільш вдалою є квадратична (рис.3) та лінійна (рис.2) модель. Однак, враховуючи подальшу поведінку квадратичної функції (спадання після екстремальної точки), варто зробити вибір на користь лінійної моделі.

Взагалі, пропонуючи студентам для розв'язання задачі подібного характеру, варто володіти інформацією про можливі тенденції та характерні особливості розвитку досліджуваних процесів, а також про те, які аналітичні вирази здатні відображати ці тенденції та характерні риси [4, с.308]. Зокрема тренд-функцію можна визначити:

- шляхом розпізнання аналітичного виразу по геометрії емпіричного графіка (дискретного набору даних);
- формулюючи специфічну сталість, що задана раніше і повинна знайти відображення у шуканому аналітичному виразі;
- завдяки гіпотетичним аналогіям між поведінкою характеристик процесу, що досліджується, та властивостями математичних функцій.



Рисунок 1. Кореляційне поле задачі 4

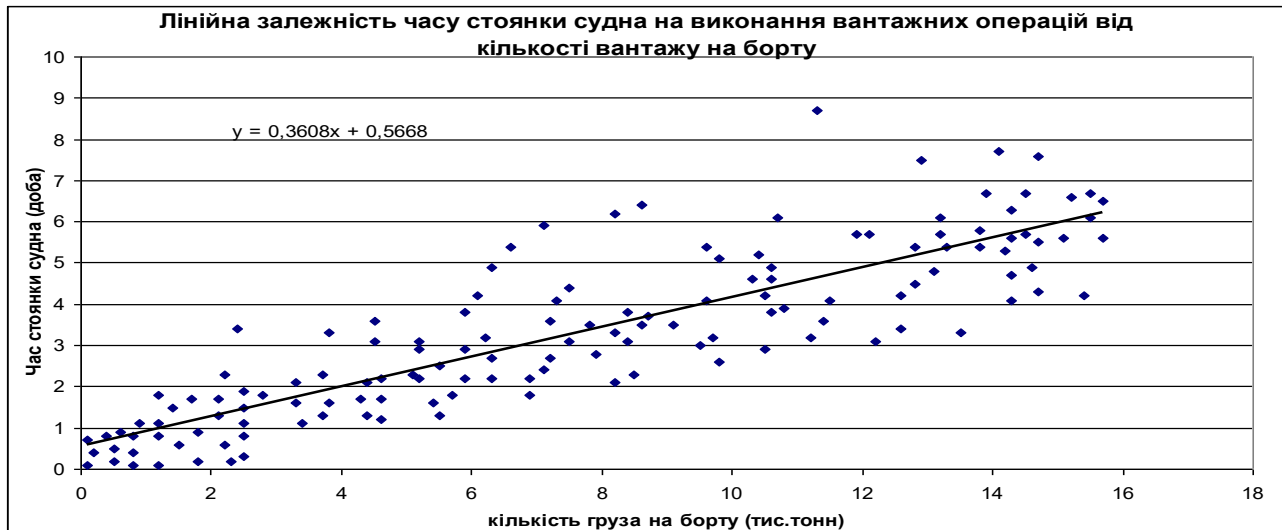


Рисунок 2 – Лінійна модель

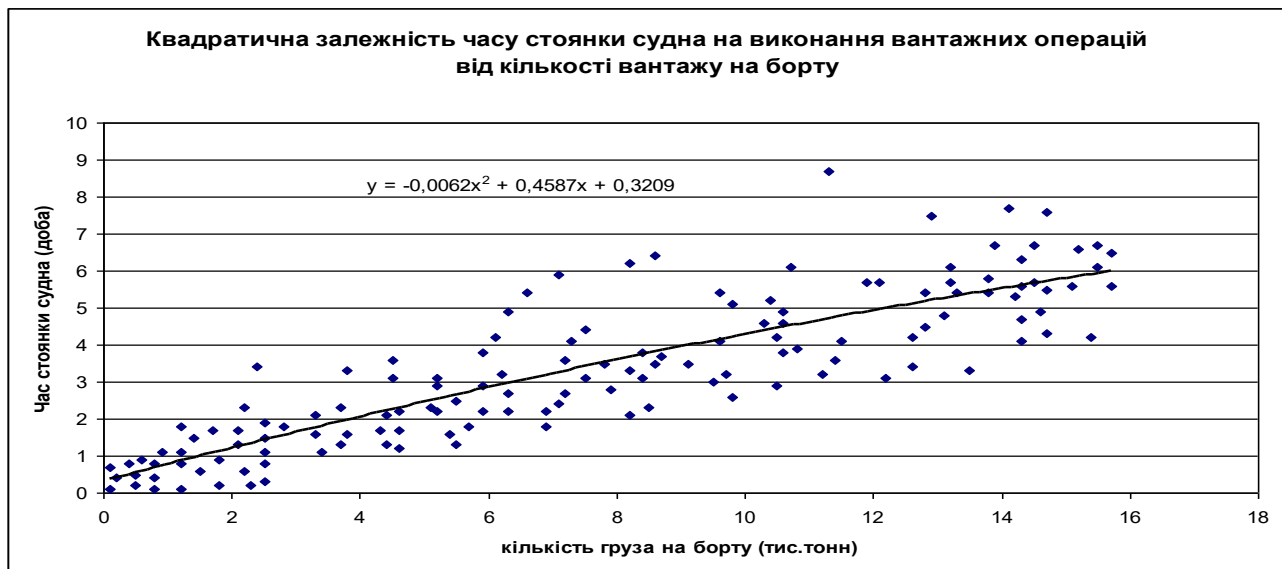


Рисунок 3 – Квадратична модель

Інша група прикладів має відношення до розділу «Задачі умовної оптимізації», який у деяких Вищих морських навчальних закладах включають у програму вивчення вищої математики, а в деяких ні. Практичний досвід та психолого-педагогічні дослідження (і наші [1], і інших дослідників) показали, що даний розділ є цікавим для студентів, посильним для вивчення, а також володіє широкими та глибокими можливостями для реалізації прикладної спрямованості.

Приклад 5. За коротку літню навігацію необхідно доставити 7 тисяч тонн тарно-штучних вантажів в контейнерах трьох типів. При цьому відправлено може бути біля 3 тисяч контейнерів. В контейнерах першого типу розміщається 1 т вантажу; другого типу – 2 т; третього типу – 5 т. Для річкового транспорту вказані перевезення економічної вигоди можуть не мати, тому наша мета *мінімізувати загальні витрати та приблизно їх обчислити*. При цьому відомо, що витрати по перевезенню контейнерів складають $2x^2 + 2y^2 + 2z^2$ (де x - кількість контейнерів першого типу; y - другого типу; z - третього типу), а доходи: $(x + 2y + 3z)$. Також відомо, що сумісне використання контейнерів трьох типів (через краще розміщення на судні) дає додатковий дохід (призводить до зменшення збитковості перевезень): $2xy + 2yz$ [6, с.206].

Коментарі до розв'язання. Математична модель відповідної задачі умовної оптимізації матиме вигляд:

$$u = (2x^2 + 2y^2 + 2z^2) - (x + 2y + 3z) - (2xy + 2yz) \rightarrow \min, \text{ при } \begin{cases} x + y + z = 3000 \\ x + 2y + 5z = 7000 \end{cases}$$

Студентам можна запропонувати розв'язати її методом Лагранжа. В результаті відповідних дій [4, с.81] отримуємо стаціонарну точку функції Лагранжа $M\left(\frac{179994}{168}; \frac{208008}{168}; \frac{115998}{168}\right)$. Дослідимо її за допомогою диференціала другого порядку:

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 L}{\partial x^2} &= 4 & \frac{\partial^2 L}{\partial x \partial y} &= -2 & \frac{\partial^2 L}{\partial x \partial z} &= 0 & \frac{\partial^2 L}{\partial y^2} &= 4 & \frac{\partial^2 L}{\partial y \partial z} &= -2 & \frac{\partial^2 L}{\partial z^2} &= 4 \\ d^2 L_M &= 4dx^2 + 2 \cdot (-2)dxdy + 2 \cdot 0 \cdot dx dz + 4dy^2 + 2 \cdot (-2)dydz + 4dz^2 = \\ &= 4dx^2 - 4dxdy + 4dy^2 - 4dydz + 4dz^2 \end{aligned}$$

Як бачимо, для з'ясування знаковизначеності $d^2 L_M$ необхідно використати додаткові умови відповідних теорем:

$$\begin{aligned} &\begin{cases} (x + y + z - 3000)'_x|_M dx + (x + y + z - 3000)'_y|_M dy + (x + y + z - 3000)'_z|_M dz = 0 \\ (x + 2y + 5z - 7000)'_x|_M dx + (x + 2y + 5z - 7000)'_y|_M dy + (x + 2y + 5z - 7000)'_z|_M dz = 0 \end{cases} \\ &\begin{cases} dx + dy + dz = 0 \\ dx + 2dy + 5dz = 0 \end{cases} \quad \begin{cases} dx + dy + dz = 0 \\ dy + 4dz = 0 \end{cases} \quad \begin{cases} dx + dy + dz = 0 \\ dy = -4dz \end{cases} \quad \begin{cases} dx - 4dz + dz = 0 \\ dy = -4dz \end{cases} \quad \begin{cases} dx = 3dz \\ dy = -4dz \end{cases} \end{aligned}$$

Таким чином

$$d^2 L_M = 4dx^2 - 4dxdy + 4dy^2 - 4dydz + 4dz^2 = 4 \cdot 9dz^2 - 4 \cdot 3dz \cdot (-4dz) + 4 \cdot 16dz^2 - 4 \cdot (-4dz)dz + 4dz^2 = \\ = 168dz^2 > 0$$

Тому

$$\begin{aligned} &M\left(\frac{179994}{168}; \frac{208008}{168}; \frac{115998}{168}\right) \text{ - умовний мінімум;} \\ u_{\text{ум.мін.}} &= u\left(\frac{179994}{168}; \frac{208008}{168}; \frac{115998}{168}\right) \approx 1946762 (\text{грощ.од.}) \end{aligned}$$

Згадаємо, що x , y , z - кількості контейнерів відповідного типу, тому їх необхідно округлювати до одиниць.

$$\begin{aligned} u_{\text{ум.мін.}} &= u(1071; 1238; 690) \approx 1945717 (\text{грощ.од.}) \\ \Delta &= |1946762 - 1945717| = 1045 (\text{грощ.од.}) \\ \varepsilon &= \left| \frac{1045}{1946762} \right| \cdot 100\% \approx 0,06\% \end{aligned}$$

Відповідь до даної задачі може бути сформульована наступним чином: для мінімізації витрат транспортних перевезень у заданих умовах доцільно використати 1071 контейнерів першого типу; 1238 – другого та 690 – третього. При цьому загальні витрати приблизно (с точністю 0,06%) складатимуть 1945717 грошових одиниць.

Методичні рекомендації щодо використання прикладів.

Запропоновані приклади доцільно використовувати у процесі викладання дисциплін математичного циклу для студентів спеціальностей морського і річкового транспорту з метою реалізації прикладної спрямованості навчання. На початковому етапі студентам доцільно запропонувати побудову тренд-функцій та розв'язування відповідних задач аналітичними методами, що сприяє усвідомленню математичної сутності кореляційно-регресійного аналізу.

На наступному етапі доцільним є використання табличних процесорів для автоматизації обчислень, побудови графіків і визначення показників щільності кореляційного зв'язку. Такий підхід сприяє розвитку інформаційної та цифрової грамотності студентів, формує навички роботи з даними, які є необхідними у сучасній професійній діяльності фахівців транспортної галузі.

Особливу методичну цінність мають завдання, що передбачають аналіз отриманих результатів, порівняння різних типів тренд-моделей та обґрунтування вибору оптимальної аналітичної залежності. Це дозволяє інтегрувати математичні знання з професійним контекстом і сприяє формуванню цілісного бачення реальних виробничих процесів.

Висновки. Проведений аналіз свідчить, що використання кореляційно-регресійних моделей і тренд-аналізу у процесі навчання вищої математики є ефективним засобом формування професійної математичної компетентності майбутніх фахівців морського і річкового транспорту. Запропоновані приклади аналізу пасажирських перевезень та аварійності на внутрішніх водних шляхах дозволяють продемонструвати студентам прикладний характер математичних методів і їх значущість для вирішення професійно орієнтованих задач.

Поєднання аналітичних методів розв'язування задач із використанням цифрових інструментів забезпечує системний розвиток математичної, інформаційної та професійної грамотності здобувачів вищої освіти. Отримані результати підтверджують доцільність інтеграції елементів кореляційно-регресійного аналізу та оптимізаційних моделей у зміст дисциплін математичного циклу як одного з напрямів модернізації професійної підготовки фахівців транспортної галузі.

ЛІТЕРАТУРА

1. Кліндухова В.М., Ляшко О.В. Про формування професійної математичної компетентності майбутніх фахівців морської галузі // *Science and education a new dimension*. – II (10), Issue 20, 2014. – P.66-69.
2. Колягін Ю. М. Методологічні засади математичної освіти. Київ: Освіта, 2018. 312 с.
3. Montgomery D. C. *Applied Statistics and Probability for Engineers*. 7th ed. Hoboken: Wiley, 2021.
4. OECD. *Education in the Digital Age*. Paris: OECD Publishing, 2020.
5. UNCTAD. *Review of Maritime Transport 2023*. New York: United Nations, 2023.
6. Носко М. О. Розвиток професійної компетентності майбутніх інженерів-кораблебудівників засобами математики // *Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут»*. Серія «Машинобудування». – 2022. – № 2 (102). – С. 120-128.
7. Шевченко К. В. Інтеграція цифрових технологій у викладанні вищої математики для студентів технічних спеціальностей // *Комп'ютер у школі та сім'ї*. – 2023. – № 3 (171). – С. 35-39.
8. World Bank. *Digital Skills for a Digital Economy: World Development Report 2024*. Washington, DC: World Bank Group, 2024.
9. ILO. *World Maritime Transport Report 2023: Seafarers in the Digital Era*. Geneva: International Labour Organization, 2023.
10. Суховий П. Статистичний аналіз даних у судноводінні: сучасні підходи та інструменти. Львів: Lviv Polytechnic Publishing House, 2021. 280 с.
11. UNESCO Institute for Statistics. *Global Education Monitoring Report 2024: Technology in Education*. Paris: UNESCO, 2024.

12. Майор В. Застосування математичних методів моделювання в морському транспорті: навчальний посібник. Одеса: ONMU Press, 2020. 150 с.

REFERENCES:

1. Klindukhova V.M., Liashko O.V. Pro formuvannya profesiinoi matematychnoi kompetentnosti maibutnikh fakhivtsiv morskoi haluzi //Science and education a new dimension. – II (10), Issue 20, 2014. – P.66-69.
2. Koliashin Yu. M. Metodolohichni zasady matematychnoi osvity. Kyiv: Osvita, 2018. 312 s.
3. Montgomery D. C. Applied Statistics and Probability for Engineers. 7th ed. Hoboken: Wiley, 2021.
4. OECD. Education in the Digital Age. Paris: OECD Publishing, 2020.
5. UNCTAD. Review of Maritime Transport 2023. New York: United Nations, 2023.
6. Nosko M. O. Rozvytok profesiinoi kompetentnosti maibutnikh inzheneriv-korablebudivnykiv zasobamy matematyky // Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu Ukrainy «Kyivskiy politekhnichnyi instytut». Seriya «Mashynobuduvannya». – 2022. – № 2 (102). – S. 120-128.
7. Shevchenko K. V. Intehratsiia tsyfrovyykh tekhnolohii u vykladanni vyshchoi matematyky dlia studentiv tekhnichnykh spetsialnostei // Kompiuter u shkoli ta simi. – 2023. – № 3 (171). – S. 35-39.
8. World Bank. Digital Skills for a Digital Economy: World Development Report 2024. Washington, DC: World Bank Group, 2024.
9. ILO. World Maritime Transport Report 2023: Seafarers in the Digital Era. Geneva: International Labour Organization, 2023.
10. Sukhovyi P. Statystychnyi analiz danykh u sudnovodinni: suchasni pidkhody ta instrumenty. Lviv: Lviv Polytechnic Publishing House, 2021. 280 s.
11. UNESCO Institute for Statistics. Global Education Monitoring Report 2024: Technology in Education. Paris: UNESCO, 2024.
12. Maior V. Zastosuvannya matematychnykh metodiv modeliuvannya v morskomu transporti: navchalnyi posibnyk. Odessa: ONMU Press, 2020. 150 s.

Heilyk A., Liashko O., Viala Yu.

INTEGRATION OF CORRELATION AND REGRESSION MODELS AND OPTIMIZATION PROBLEMS IN THE FORMATION OF PROFESSIONAL MATHEMATICAL COMPETENCE OF FUTURE TRANSPORT INFRASTRUCTURE SPECIALISTS

The article substantiates the feasibility of strengthening the applied orientation of mathematical training of future specialists in maritime and inland water transport through the use of correlation–regression models and optimization problems. The purpose of the study is to justify methodological approaches to the formation of professional mathematical competence of students of maritime specialties in the process of studying mathematical disciplines.

The methodological framework of the research is based on the competency-based and activity-oriented approaches. The study employs theoretical analysis and generalization of scientific sources, analysis of educational programs, pedagogical generalization of teaching experience, as well as methods of mathematical modeling, trend analysis, correlation–regression analysis and optimization.

The article presents professionally oriented examples based on real statistical data, including the analysis of passenger transportation trends and accident rates on inland waterways. It is shown that the integration of analytical mathematical methods with digital tools contributes to the development of mathematical, informational and professional competencies of future transport specialists. The proposed methodological recommendations confirm the effectiveness of applying correlation–regression models as a means of modernizing mathematical education in maritime higher education institutions.

Keywords.: professional mathematical competence; maritime and inland water transport education; applied mathematics; correlation–regression analysis; trend analysis; optimization problems; digital tools in education.

Стаття прийнята 25.09.2025

МЕТОД КЕЙСІВ ДЛЯ ПІДГОТОВКИ ІНЖЕНЕРІВ ВОДНОГО ТРАНСПОРТУ

У статті здійснено аналіз сучасного міжнародного досвіду провідних викладачів щодо використання кейс-методу в закладах освіти. Проведено дослідження результатів застосування кейс-методу при вивченні інженерної графіки в одеському національному морському університеті. Представлено приклади кейсів для створення простих деталей типу «Вал», «Фланець» та «Пластина» в розрахунково-графічній роботі. Доведено, що використання кейсів, у яких технічна ситуація передбачає створення кресленника виробу, підвищує практичну значущість результатів навчання з дисципліни «Інженерна та комп'ютерна графіка». Визначено недоліки, що виникли при упровадженні кейс-методу під час виконання розрахунково-графічної роботи, та окреслено шляхи їх вирішення. Для оптимізації часу на створення великої кількості варіантів індивідуальних завдань рекомендовано застосовувати штучний інтелект. Надано приклад промпту для створення навчальних кейсів з інженерної графіки за допомогою Copilot, AI-асистента від Microsoft. Аналіз використання кейсів засвідчив високу ефективність такої форми навчальної діяльності, яка дає змогу здобувачам освіти усвідомлювати практичну цінність знань, працювати з наближеними до реальних ситуаціями та розвивати креативність. Показано недоліки впровадження кейсів, які виявлені при виконанні завдання. Надано рекомендації для впровадження методу кейсів в курс «Інженерна та комп'ютерна графіка» для підтримки мотивації студентів різного рівня базової підготовки. Вказано причини високої зацікавленості здобувачів освіти до завдань створених за кейс-методом. Зроблено порівняльний аналіз між використанням класичних методів навчання і кейс-методом. Показано, що використання кейс-методу сприяє підвищенню якості оволодіння професійними компетентностями майбутніх інженерів водного транспорту.

Ключові слова: кейс, інженерна графіка, професійні компетентності, інженери водного транспорту

Постановка проблеми. Сучасний розвиток технологій висуває нові вимоги до підготовки інженерів технічних спеціальностей. Проблема полягає у невідповідності між традиційними освітніми підходами та реальними потребами ринку праці, що зумовлює необхідність модернізації освітніх програм, запровадження компетентнісного підходу та інтеграції практико-орієнтованих методів навчання. Якість підготовки інженерів визначається не лише рівнем засвоєння фундаментальних знань, а й здатністю випускників до інноваційної діяльності, міждисциплінарної співпраці та використання сучасних цифрових інструментів [1]. Водночас існує розрив між теоретичною підготовкою студентів і практичними навичками для ефективної роботи за фахом. Кейс-метод базується на аналітичному розгляді навчальних ситуацій (кейсів). Їх зміст спирається на наближений до реального матеріал, сформований на основі практичного досвіду, що забезпечує інтеграцію теорії та практики у навчальному процесі [2].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Метод кейсів є одним з провідних освітніх інструментів сучасної освіти, що активно впроваджується у різних галузях знань та освітніх рівнях. Зокрема, в роботі [3] наголошується, що метою методу кейсів є впровадження певної міри реалізму в бізнес-освіту, що дозволяє студенту заглибитися в суть предмета та його практику з усіма складнощами реального світу. Порівняльне дослідження [4] ефективності лекцій, кейсів і симуляцій у бізнес-освіті підкреслює переваги кейс-методу над традиційними формами навчання, особливо у професійній підготовці, де важливо навчити студентів застосовувати знання у реальних ситуаціях. Робота [5] демонструє ефективність кейсів у формуванні навичок стратегічного мислення, командної роботи та приймання обґрунтованих управлінських рішень у студентів бізнес-спеціальностей.

Дослідження [6] показує, що кейс-метод стимулює глибше опрацювання матеріалу та прийняття рішень, особливо в таких галузях, як медицина, право та бізнес. У дослідженні [7] доведено, що ілюстрація навчальних моментів реальними або змодельованими випадками розширює клінічні знання та навички, покращує командну роботу, практичну поведінку студентів-медиків та результати лікування пацієнтів.

Автори [8] відзначають, що кейс-метод допомагає долати пасивність студентів, позитивний вплив методу кейсів на заохочення активної участі студентів та навичок вирішення кейсів, але водночас виявляє труднощі у формуванні навичок розв'язання складних педагогічних ситуацій. Дослідження [9] показали, що при підготовці вчителів фізики в закладах вищої освіти інтеграція SWOT-аналізу в кейси дозволяє більш системно й усвідомлено розглядати педагогічні ситуації, визначати їхні переваги та недоліки, оцінювати можливості й загрози, формулювати обґрунтовані рішення та прогнозувати їхні наслідки. Аналіз [10] переваг впровадження кейс-методу в магістерські програми для педагогічної освіти виявив формування аналітичних і комунікативних навичок для майбутніх педагогів.

У статті [11] показано, що метод кейсів є інтегрованою активною технологією навчання, яка поєднує елементи аналізу конкретних ситуацій, дискусії та рольової гри із застосуванням теоретичних знань слухачами пенітенціарної служби України для вирішення реальних практичних завдань.

Впровадження [12] кейс-методів в інженерії показали, що студенти вважають, що кейси дозволяють їм побачити актуальність інженерних концепцій для реальних проблем. Навчання в університеті за кейс-методом поглиблює розуміння теоретичних понять, розвиває навички й підвищує мотивацію студентів [13].

Поєднання кейс-методу з цифровими технологіями підвищує мотивацію студентів та робить навчання більш інтерактивним [14]. Зокрема, можливості сучасних CAD-засобів забезпечують зручне проєктування об'єктів [15].

Аналіз сучасних наукових досліджень свідчить, що кейс-метод є високоефективним освітнім інструментом, який сприяє розвитку критичного мислення, практичних і соціальних навичок, підвищенню мотивації та зацікавленості здобувачів освіти. Переваги використання кейсів особливо помітні у професійній, медичній, педагогічній та міждисциплінарній освіті. Це робить кейс-метод доцільним для широкого впровадження у різних освітніх галузях і рівнях закладів освіти.

Серед основних недоліків використання кейс-методу виявлено потребу у необхідності залучення значних часових і методичних ресурсів педагога для підготовки кейсів, складність адаптації до великих аудиторій, потреба адаптації кейсів до конкретної дисципліни, вимагає системне оцінювання результатів навчання і наявність якісної технічної бази.

Незважаючи на широке запровадження кейс-методів на різних освітніх рівнях та дисциплінах по всьому світу, запровадження кейсів у закладах освіти технічного напрямку залишається недостатньо вивченим. Тому актуальним стає дослідження кейс-методу для підготовки інженерів морського транспорту.

Метою даного дослідження є підвищення якості надання освітніх послуг здобувачам вищої морської освіти.

Для досягнення мети поставлено такі задачі:

- провести аналіз досліджень з використання кейс-методу в освіті;
- знайти шлях для оптимізації часу на створення кейсів;
- вивчити результати застосування методу кейсів при вивченні дисципліни «Інженерна графіка» для підготовки інженерів водного транспорту;
- сформулювати рекомендації щодо запровадження кейс-методу при вивченні дисципліни «Інженерна та комп'ютерна графіка».

Виклад основного матеріалу дослідження. Для підвищення якості надання освітніх послуг в Одеському національному морському університеті при вивченні дисципліни «Інженерна та комп'ютерна графіка» запроваджено метод кейсів. Вивчення обов'язкової навчальної дисципліни циклу загальної підготовки «Інженерна та комп'ютерна графіка» за освітньо-професійною програмою «Експлуатація судових енергетичних установок» передбачає формування компетенцій для розуміння термодинамічних процесів у механічній та електромеханічній галузях. Крім того необхідно

сформувати такі Soft skills, як критичне мислення й креативність у процесі виконання графічних робіт, а також здатність до комплексного вирішення проблем.

Дисципліна «Інженерна та комп'ютерна графіка» передбачає лекційні, практичні заняття, а також самостійну роботу студентів, яка завершується виконанням розрахунково-графічного завдання. Для створення розрахунково-графічного завдання запроваджено кейс-метод. Зокрема, кейс «Креслення деталі відповідно до технічної ситуації за її конструктивними особливостями» створено з метою ознайомити здобувачів освіти з елементами суднових механізмів і трубопроводів, навчити виконувати технічне креслення з урахуванням стандартів морської галузі, розвинути навички побудови ортогональних проєкцій та аксонометрії.

Робота передбачає розрахунок маси деталі за вказаною маркою матеріалу, та складання специфікації вузла. Побудова ізометричної проєкції надана в якості додаткового завдання (рис.1). Для кожного кейса розроблено індивідуальні технічні ситуації, які можуть скластися в реальних умовах роботи суднового механіка. У зв'язку з недостатньою інженерною базою здобувачів освіти на першому курсі, було розроблено спрощені завдання для проєктування трьох типів простих деталей типу «Вал», «Фланець» і «Пластина» з мінімальною кількістю елементів. Кожний кейс складається з таких блоків: технічна ситуація, практичне застосування, конструктивні особливості деталі та завдання студента (рис.2).

ЗАВДАННЯ №1

Практичний кейс: КРЕСЛЕННЯ ДЕТАЛІ ВІДПОВІДНО ДО ТЕХНІЧНОЇ СИТУАЦІЇ ЗА ЇЇ КОНСТРУКТИВНИМИ ОСОБЛИВОСТЯМИ

★ **Мета завдання:**

- Ознайомити студентів з елементами суднових механізмів і трубопроводів.
- Навчити виконувати технічне креслення з урахуванням стандартів морської галузі.
- Розвинути навички побудови ортогональних проєкцій та аксонометрії.

■ **Умови завдання:**

- Робота виконується на креслярському папері відповідного до завдання формату.
- Специфікація виконується на окремому аркуші формату А4.
- В основному надпису вказують матеріал і масу деталі.

При розрахунку маси деталі прийняти густину матеріалу:

Матеріал	Густина, кг/м³
Сталь	7850
Чавун	7000
Бронза	8900
Латунь	8730
Алюміній	2700

📌 **Критерії оцінювання:**

Критерій	Бал
Точність геометричних побудов	3
Правильність нанесення розмірів	2
Якість аксонометрії	2
Оформлення креслення	2
Специфікація	1
Максимум	10

📌 **Додатково:**
Студенти можуть побудувати ізометричну проєкцію, щоб візуалізувати об'ємну форму деталі.

Рисунок 1 - Умови виконання розрахунково-графічного завдання

❖ **1. Кейс: «Фланцеве з'єднання трубопроводу системи охолодження дизельного двигуна»**

✎ **Технічна ситуація:** Ремонт трубопроводу.
На судні з дизельною енергетичною установкою виникла потреба в обслуговуванні трубопроводу системи охолодження. Для демонтажу та заміни окремих ділянок трубопроводу використовуються фланцеві з'єднання. Необхідно розробити креслення фланця з урахуванням стандартів, що застосовуються в суднобудуванні.

⚙ **Практичне застосування**

- Забезпечення герметичності при транспортуванні охолоджувальної рідини (води, антифризу) між радіатором, водяним насосом, сорочкою охолодження блоку циліндрів, теплообмінниками.
- Можливість швидкого демонтажу для технічного обслуговування, ремонту або заміни окремих елементів трубопроводу.
- Компенсація температурних деформацій завдяки використанню ущільнювальних прокладок і болтових з'єднань.

✎ **Конструктивні особливості деталі**

- Тип деталі:** Плоский фланець з отворами під 6 болтів M10 і центральним отвором для труби зовнішнім діаметром 40 мм.
- Основні елементи:**
 - Отвори під болти (розташовані по колу діаметром 100 мм)
 - Центрувальний виступ діаметром 60 мм (для точного з'єднання)
 - Ущільнювальна поверхня (під прокладку)
- Стандарти:** Виконання за ДСТУ ISO 7005-1 або DIN 2576

📌 **Завдання студента:**

- Виконати робоче креслення фланця.**
Зобразити:
 - головний вигляд (з отворами під болти);
 - вигляд збоку (з центрувальним виступом);
 - розріз по осі симетрії.
 Нанести всі розміри, допуски, шорсткості та технічні вимоги згідно з ДСТУ.
- Специфікація**
Скласти специфікацію до вузла фланцевого з'єднання (фланець, прокладка, болти, гайки, шайби).

Рисунок 2 - Приклад кейсу на деталь типу «Фланець»

В блоці «Технічна ситуація» вказується модель ситуації, яка потребує вирішення. В блоці «Практичне застосування» вказано для яких потреб необхідна деталь що проєктується. В блоці «Конструктивні особливості» вказано основні дані, які потрібні для уявлення про форму виробу. З наданої інформації здобувач освіти має зробити креслення деталі. В блоці «Завдання» вказані вимоги до виконання конструкторської документації.

При ознайомленні з технічною ситуацією кейсу та практичним застосуванням деталі здобувачі освіти знайомляться з ситуаціями за обраною спеціальністю. Нестандартна подача завдання викликає живий інтерес, створює зацікавленість майбутньою професією. Відповідно, виконання кейсу підвищує практичну значущість результатів навчання дисципліни «Інженерна та комп'ютерна графіка». Окрім професійних компетенцій запропонований кейс розвиває навички критично мислити, креативно вирішувати нестандартну ситуацію та знаходити комплексне рішення проблеми.

Створення якісного кейсу потребує від викладача пошук реальних практичних ситуацій, адаптацію матеріалів та формулювання питань. Це займає багато часу і ресурсів. Для вирішення задачі оптимізації часу щодо створення індивідуальних варіантів технічних ситуацій і практичних застосувань деталей для кейсів застосовано Copilot, AI-асистент від Microsoft. Кейси було згенеровано з максимально реалістичними ситуаціями, в структурованому вигляді. Це дало змогу зосередитися на методичній роботі, подальшому наповненню кейсів, перевірці змісту та відповідності стандартам, а не на первинному створюванні завдань.

Для стандартизації формулювань технічних ситуацій відповідно до академічних норм були розроблені промпти для Copilot. Один із них мав таке завдання: «Сформулюй десять технічних ситуацій для студентів суднових механіків, які повинні виконати креслення простої деталі типу «Вал» у межах розрахунково-графічного завдання з дисципліни «Інженерна та комп'ютерна графіка». Визнач практичне застосування цієї деталі. Вал має три ступені з різними з'єднувальними елементами. Наведи п'ять елементів складального вузла для оформлення специфікації». Такий промпт виявився достатнім для того, щоб Copilot не лише створив і структурував навчальний матеріал, а й запропонував додаткові елементи, здатні підвищити якість кейсу та його дидактичну цінність. Для створення 30 варіантів технічних ситуацій, що стосуються деталей типу «Вал», «Фланець» та «Пластина», Copilot знадобилося менше ніж 5 хвилин. Подальший етап передбачав перевірку викладачем коректності формулювань, їх відповідності стандартам морської галузі та доповнення необхідними уточненнями. Застосування інструментів штучного інтелекту демонструє високу ефективність, забезпечуючи оптимізацію педагогічної діяльності та підвищення її продуктивності.

Оцінювання практичного кейсу здійснювалося за зазначеними в завданні критеріями. Під час роботи над кейсом у здобувачів освіти, які виконували завдання на високому рівні, не виникало запитань. Завдання виявилось зрозумілим і цікавим, робота була виконана самостійно з використанням визначених стандартів. Крім цього, було здійснено самостійне ознайомлення з додатковими матеріалами стосовно заданої ситуації з довідкової літератури, інтернет джерел та приватних консультацій з судовими механіками. У здобувачів освіти, які виконували завдання на достатньому рівні, був проявлений інтерес до кейсів, але виникали запитання щодо уточнення зовнішнього вигляду виробу. Студенти, які виконували завдання на низькому рівні, зі всіх завдань з інженерної графіки виявили інтерес лише до виконання кейсів.

Інтерес до кейсів можна пояснити наступним чином:

- практична спрямованість: кейс-метод дозволяє працювати з наближеними до реальних ситуаціями, що робить завдання прикладними;
- зниження рівня абстракції: класичні розрахунково-графічні роботи часто вимагають високого рівня абстрактного мислення та знання теорії, тоді як кейси подають матеріал у конкретному контексті;
- підвищення мотивації завдяки сюжетності: кейси мають елемент проблемної технічної ситуації, що викликає інтерес і залучає навіть тих студентів, які відчують труднощі з формальними методами;
- можливість творчості: у кейсах допускається кілька варіантів рішень, що дає студентам відчуття свободи та шанс проявити креативність;
- зниження бар'єру складності: кейс-метод часто сприймається як більш доступний, адже він орієнтований на пошук рішень, а не на суворе дотримання алгоритмів чи стандартів.

Отже, інтерес до кейсів у студентів із нижчим рівнем виконання завдань пояснюється тим, що вони бачать у кейс-методі більш зрозумілий, практичний та мотивуючий формат навчання.

Аналіз результатів запровадження методу кейсів представлений у вигляді порівняльної таблиці (табл. 1), яка вказує різницю між використанням класичних методів навчання та кейс-метода, а також причини, чому студенти з нижчим рівнем виконання завдань виявили інтерес саме до кейсів.

Таблиця 1 - Порівняння мотивації студентів

Метод навчання	Характеристика	Сприйняття студентами	Причина інтересу або незацікавленості
Класичні методи (лекції, практичні)	Орієнтовані на теорію, алгоритми та стандарти	Викликають труднощі через абстрактність і високі вимоги до знань	Складність сприйняття, відсутність практичного контексту, низька мотивація
Кейс-метод	Побудований на наближених до реальних ситуаціях	Викликає інтерес навіть у студентів з низьким рівнем теоретичної бази	Практичність, зрозумілий контекст, можливість творчості, кілька варіантів рішень, сюжетність

Таким чином, кейс-метод сприймається як більш доступний і мотивуючий, адже він дозволяє здобувачам освіти бачити практичну користь знань, працювати з конкретними ситуаціями та проявляти креативність, тоді як класичні методи часто здаються складними й абстрактними.

При запровадженні методу кейсів до дисципліни «Інженерна та комп'ютерна графіка» для підготовки інженерів водного транспорту було виявлено такі недоліки:

- не всі здобувачі освіти мають можливість уявити виріб за описом. Це залежить від репрезентативної системи людини;

- здобувачі освіти не мають достатньої бази знань для глибокого розуміння технічної ситуації. Особливо це стосується здобувачів освіти на базі повної середньої освіти;

- ефективність виконання завдання залежить від активності дискусії. Якщо робота виконується індивідуально, або в онлайн-форматі необхідна допомога викладача для обговорення елементів виробу.

Виявлені недоліки зумовлюють необхідність використання кейсів спрощених моделей ситуацій та подання конструктивних характеристик деталей із мінімальною кількістю елементів. У цьому контексті виникає потреба акцентувати увагу здобувачів освіти на тому, що кейс має навчальний характер, аби запобігти формуванню неповного чи викривленого уявлення про реальні виробничі ситуації.

Не дивлячись на вказані недоліки, використання кейс-методу при вивченні дисципліни «Інженерна та комп'ютерна графіка» сприяє глибшому засвоєнню матеріалу, адже здобувачі освіти працюють із практичними ситуаціями, що наближені до реальних професійних завдань. Крім того майбутні інженери водного транспорту мають можливість використати отримані знання і уміння для виконання реалістичного завдання. Такий підхід формує навички аналізу, прийняття рішень, підвищує мотивацію та допомагає швидше опанувати стандарти конструкторської документації.

Аналіз результатів досліджень дозволив зробити рекомендації для запровадження кейс-методу при викладанні дисципліни «Інженерна та комп'ютерна графіка», щоб підтримати мотивацію здобувачів освіти різного рівня базової підготовки:

1. Структурування навчального процесу: починати викладання матеріалу з короткої лекції; переходити до кейсу, пропонуючи практичну ситуацію з теми; завершувати рефлексією: обговорення, які знання були використані. Розрахунково-графічні завдання надавати у вигляді кейсів з наближеними до реальних ситуаціями.

2. Диференціація завдань: для сильних студентів: надавати кейси з високим рівнем абстракції; для студентів низького рівня підготовки - з простими завданнями.

3. Використання інформаційних технологій: інтегрувати CAD-системи для виконання кейсів; використовувати цифрові кейси (відео, інтерактивні моделі).

4. Мотиваційні прийоми: пояснювати практичну цінність знань для виконання кейсу; дозволяти вибір кейсів або способи виконання завдання; організовувати дискусії після кейсів, для демонстрації можливості різних рішень.

5. Поступове ускладнення: починати з простих кейсів з очевидним рішенням; поступово вводити багатофакторні завдання.

Таким чином, баланс між класичними методами навчання та кейсами дозволяє підтримати мотивацію здобувачів освіти різного рівня підготовки: сильні отримують виклик у складних завданнях, а ті, хто має труднощі, бачать практичний сенс і поступово підвищують свій рівень знань. Для можливості підвищення рівня складності кейсів пропонується активне запровадження міждисциплінарного зв'язку.

Висновки. Кейс-метод широко використовується викладачами в усіх напрямках освіти для розвитку у здобувачів освіти аналітичного мислення та навичок роботи з інформацією. Для підвищення практичної значимості результатів навчання з дисципліни «Інженерна та комп'ютерна графіка» ефективно використовувати кейси з наближеними до реальних ситуаціями. Для оптимізації часу на створення багатоваріантних кейсів запропоновано використовувати штучний інтелект. Запровадження кейс-методу для підготовки інженерів водного транспорту підвищує якість надання освітніх послуг, прищеплює інтерес до спеціальності, покращує опанування дисципліни та формує професійні компетентності, які стануть в нагоді для майбутніх фахівців XXI століття. Перспектива подальших досліджень в напрямку використання кейс-методу для підготовки інженерів морського транспорту полягає у запровадженні міждисциплінарного зв'язку.

ЛІТЕРАТУРА

1. Mahdi O., Nassar I., Almuslamani H. The role of using case studies method in improving students' critical thinking skills in higher education. *International Journal of Higher Education*. 2020. 9 (2). 297–308. <https://doi.org/10.5430/ijhe.v9n2p297>
2. Liulko M. Інноваційні інтерактивні технології в процесі вивчення іноземних мов. *International Science Journal of Education & Linguistics*. 2024. 3 (6). 42–51. <https://doi.org/10.46299/j.isjel.20240306.05>
3. Shah B. Case method of teaching in management education. *Journal of Management*. 2019. 6 (1). 1–11. https://www.researchgate.net/publication/372410189_Case_Method_of_Teaching_in_Management_Education (дата звернення: 08.12.2025)
4. Thistlethwaite J. E., Davies D., Ekeocha S., Kidd J. M., MacDougall C., Matthews P., Purkis J., Clay D. The effectiveness of case-based learning in health professional education. A BEME systematic review: BEME Guide No. 23. *Medical Teacher*. 2012. 34 (6). 421–444. <https://doi.org/10.3109/0142159X.2012.680939>
5. Mu F., Hatch J. E. The efficacy of the case method in tertiary business education: A scoping review: 2000–2022. *The International Journal of Management Education*. 2024. 22 (2). 100983. 1–16. <https://doi.org/10.1016/j.ijme.2024.100983>
6. Silitubun E., Mustaji M., Dewi U. The effectiveness of case-based learning in enhancing students' critical thinking skills. *Journal of Neonatal Surgery*. 2025. 14 (2). 136–141. <https://doi.org/10.52783/jns.v14.1844>
7. McLean S. F. Case-based learning and its application in medical and health-care fields: A review of worldwide literature. *Journal of Medical Education and Curricular Development*. 2016. 3. 39–49. <https://doi.org/10.4137/JMECD.S20377>
8. Effectiveness of Case Method Implementation in Pedagogical Learning of Students Across Study Programs: A Study on Multidisciplinary Courses in Indonesian. *EDUKASIA Jurnal Pendidikan Dan Pembelajaran*. 2025. 6 (1). 149–160. <https://doi.org/10.62775/edukasia.v6i1.1407>
9. Совкова Т. Інтеграція SWOT-аналізу в кейс-метод при навчанні фізики в педагогічному університеті. *Наукові інновації та передові технології*. 2025. № 5 (45). С. 1461–1473. [https://doi.org/10.52058/2786-5274-2025-5\(45\)-1461-1473](https://doi.org/10.52058/2786-5274-2025-5(45)-1461-1473)
10. Стинська В., Чепіль М., Прокопів Л. Кейс-метод – інновація у методиці підготовки студентів магістратури у закладі вищої освіти. *Молодь і ринок*. 2023. № 4 (212). С. 16–19. DOI: 10.24919/2308-4634.2023.279115.
11. Дрижак В.В., Єрмак С.М. Використання кейс-методу для підготовки майбутніх фахівців служби пробації. *Вісник Національного університету «Чернігівський колегіум» імені Т.Г.Шевченка*. 2020. Вип. 164(8). С. 161–166. DOI: 10.5281/zenodo.3905793. Yadvav

12. Yadav A., Alexander V., Mehta S. Case-based instruction in undergraduate engineering: Does student confidence predict learning? *International Journal of Engineering Education*. 2019. 35 (1A). 25–34. https://www.researchgate.net/publication/330224179_Case-based_Instruction_in_Undergraduate_Engineering_Does_Student_Confidence_Predict_Learning (дата звернення: 08.12.2025)
13. Raza S. A., Qazi W., Umer B. Examining the impact of case-based learning on student engagement, learning motivation and learning performance among university students. *Journal of Applied Research in Higher Education*. 2020. 12 (3). 517–533. <https://doi.org/10.1108/JARHE-05-2019-0105>
14. Kaur R., Kumar R., Sharma V. Case based learning as an innovative teaching tool. *International Journal of Basic & Clinical Pharmacology*. 2017. 3 (2). 395–398. <https://www.ijbcp.com/index.php/ijbcp/article/view/443> (дата звернення: 08.12.2025)
15. Лопатюк С.П. Використання команд «Slice», «Sectionplane» при 3D-моделюванні в AutoCAD. *Водний транспорт*. 2025. №2(43). С. 220-228. doi.org/10.33298/2226-8553.2025.2.43.19

REFERENCES

1. Mahdi, O.; Nassar, I.; Almuslamani, H. (2020). The role of using case studies method in improving students' critical thinking skills in higher education. *International Journal of Higher Education*, 9(2), 297–308. <https://doi.org/10.5430/ijhe.v9n2p297> [in English].
2. Liulko, M. (2024). Innovatsiini interaktyvni tekhnolohii v protsesi vyvchennia inozemnykh mov [Innovative Interactive Technologies in the Process of Learning Foreign Languages]. *International Science Journal of Education & Linguistics*, 3(6), 42–51. <https://doi.org/10.46299/j.isjel.20240306.05> [in Ukrainian].
3. Shah, B. (2019). Case method of teaching in management education. *Journal of Management*, 6(1), 1–11. Available at: https://www.researchgate.net/publication/372410189_Case_Method_of_Teaching_in_Management_Education (date of application 08.12.2025) [in English].
4. Thistlethwaite, J. E.; Davies, D.; Ekeocha, S.; Kidd, J. M.; MacDougall, C.; Matthews, P.; Purkis, J.; Clay, D. (2012). The effectiveness of case-based learning in health professional education. A BEME systematic review: BEME Guide No. 23. *Medical Teacher*, 34(6), 421–444. <https://doi.org/10.3109/0142159X.2012.680939> [in English].
5. Mu, F.; Hatch, J. E. (2024). The efficacy of the case method in tertiary business education: A scoping review: 2000–2022. *The International Journal of Management Education*, 22(2), Article 100983, 1-16. <https://doi.org/10.1016/j.ijme.2024.100983> [in English].
6. Silitubun, E.; Mustaji, M.; Dewi, U. (2025). The effectiveness of case-based learning in enhancing students' critical thinking skills. *Journal of Neonatal Surgery*, 14(2), 136–141. <https://doi.org/10.52783/jns.v14.1844> [in English].
7. McLean, S. F. (2016). Case-based learning and its application in medical and health-care fields: A review of worldwide literature. *Journal of Medical Education and Curricular Development*, 3, 39–49. <https://doi.org/10.4137/JMECD.S20377> [in English].
8. Effectiveness of Case Method Implementation in Pedagogical Learning of Students Across Study Programs: A Study on Multidisciplinary Courses in Indonesian. (2025). *EDUKASIA Jurnal Pendidikan Dan Pembelajaran*, 6, (1), 149–160. <https://doi.org/10.62775/edukasia.v6i1.1407> [in English].
9. Sovkova, T. (2025). Intehratsiia SWOT-analizu v keis-metod pry navchanni fizyky v pedahohichnomu universyteti [Integration of SWOT-Analysis into Case Method in Teaching Physics at Pedagogical University]. *Naukovi innovatsii ta peredovi tekhnolohii*, 5(45), 1461–1473. [https://doi.org/10.52058/2786-5274-2025-5\(45\)-1461-1473](https://doi.org/10.52058/2786-5274-2025-5(45)-1461-1473) [in Ukrainian].
10. Stynska, V.; Chepil, M.; Prokopiv, L. (2023). Keis-metod – innovatsiia u metodytsi pidhotovky studentiv mahistratury u zakladi vyshchoi osvity [Case Method – Innovation in the Methodology of Preparing Master's Students in Higher Education Institution]. *Molod i rynok*, 4(212), 16–19. <https://doi.org/10.24919/2308-4634.2023.279115> [in Ukrainian].
11. Dryzhak, V. V.; Yermak, S. M. (2020). Vykorystannia keis-metodu dlia pidhotovky maibutnikh fakhivtsiv sluzhby probatsii [Application of Case Method for Training Future Probation Service Specialists].

Visnyk Natsionalnoho universytetu "Chernihivskiy kolehium" imeni T. H. Shevchenka, 164(8), 161–166. <https://doi.org/10.5281/zenodo.3905793> [in Ukrainian].

12. Yadav, A.; Alexander, V.; Mehta, S. (2019). Case-based instruction in undergraduate engineering: Does student confidence predict learning? International Journal of Engineering Education, 35(1A), 25–34. Available at: https://www.researchgate.net/publication/330224179_Case-based_Instruction_in_Undergraduate_Engineering_Does_Student_Confidence_Predict_Learning (date of application 08.12.2025) [in English]

13. Raza, S. A.; Qazi, W.; Umer, B. (2020). Examining the impact of case-based learning on student engagement, learning motivation and learning performance among university students. Journal of Applied Research in Higher Education, 12(3), 517–533. <https://doi.org/10.1108/JARHE-05-2019-0105> [in English].

14. Kaur, R.; Kumar, R.; Sharma, V. (2017). Case based learning as an innovative teaching tool. International Journal of Basic & Clinical Pharmacology, 3(2), 395–398. Available at: <https://www.ijbcp.com/index.php/ijbcp/article/view/443> (date of application 08.12.2025) [in English].

15. Lopatiuk, S. P. (2025). Vykorystannia komand «Slice», «Sectionplane» pry 3D-modeliuvanni v AutoCAD [Use of the “Slice” and “Sectionplane” commands in 3D modeling in AutoCAD]. Vodnyi transport, 2(43), 220–228. <https://doi.org/10.33298/2226-8553.2025.2.43.19> [in Ukrainian].

Peretiaka N.

CASE METHOD FOR TRAINING WATER TRANSPORT ENGINEERS

In the article, an analysis of modern international experience of leading educators regarding the use of the case method in educational institutions is carried out. A study of the results of applying the case method in the study of engineering graphics at Odesa National Maritime University has been conducted. Examples of cases for creating simple parts such as “Shaft,” “Flange,” and “Plate” in a calculation-graphic assignment are presented. It has been proven that the use of cases in which the technical situation involves the creation of a product drawing increases the practical significance of learning outcomes in the discipline “Engineering and Computer Graphics.” The shortcomings that arose during the implementation of the case method in performing calculation-graphic assignments have been identified, and ways of overcoming them have been outlined. To optimize the time required for generating a large number of variants of individual tasks, the use of artificial intelligence is recommended. An example of a prompt for creating educational cases in engineering graphics with the help of Copilot, Microsoft’s AI assistant, is provided. The analysis of case usage demonstrated the high effectiveness of this form of educational activity, which enables learners to realize the practical value of knowledge, work with situations close to real ones, and develop creativity. The shortcomings of case implementation revealed during task performance are shown. Recommendations are given for introducing the case method into the course “Engineering and Computer Graphics” to support the motivation of students with different levels of prior preparation. The reasons for the high interest of learners in tasks created using the case method are indicated. A comparative analysis between the use of classical teaching methods and the case method has been made. It is shown that the use of the case method contributes to improving the quality of mastering professional competencies of future water transport engineers.

Keywords: case, engineering graphics, professional competencies, water transport engineers

Стаття прийнята 15.11.2025

SYSTEMATIZATION AND MODERNIZATION OF MATHEMATICAL METHODS FOR EVALUATING THE EFFICIENCY OF ECONOMIC SYSTEMS.

Abstract: *The article provides a comprehensive analysis and systematization of mathematical methods used to evaluate the efficiency indicators of economic systems under modern economic conditions. The feasibility of applying economic and mathematical modeling as a tool for formalizing complex economic processes and supporting managerial decision-making is substantiated. The possibilities of applying methods of mathematical statistics, econometrics, mathematical programming, game theory, queuing theory, and operations research in the context of enterprise performance analysis are considered. A generalized formulation of the problem of efficiency evaluation using an objective function and a system of constraints is proposed. An example of a multifactor regression model is presented, allowing the assessment of the influence of key economic indicators on an integrated efficiency index. The results of the study can be used to improve the validity of management decisions and to forecast the development of economic systems.*

Keywords: *efficiency indicators, economic and mathematical modeling, mathematical programming, econometric methods, operations research..*

Problem Statement. Under modern conditions, the functioning of enterprises in any sector is characterized by a high level of complexity, dynamism, and uncertainty of the external environment. This determines the need to apply scientifically grounded approaches to performance evaluation that are based on the use of advanced mathematical tools and formalized models [2, p. 23].

The application of mathematical methods in the assessment of economic processes contributes to solving a specific range of practical tasks, including:

- structuring economic information systems and establishing requirements for their standardization and adjustment in order to address a set of problems related to efficient optimization of planning and management;
- providing tools for intensifying and increasing the accuracy of economic calculations, which enables multifactor substantiation of economic processes;
- conducting in-depth quantitative analysis of the assessment of sequential changes in the development of economic entities;
- solving fundamentally new economic problems that cannot be addressed by other means [4, p. 48].

Analysis of Recent Research and Publications. Theoretical and practical issues related to the modeling of economic processes and the economic efficiency of enterprises have been addressed in the works of A. V. Kozachenko, V. F. Haponenko [9], Yu. H. Lysenko, F. I. Yevdokimov, S. M. Shkarlet, V. M. Porokhnia, N. O. Podluzhna, M. V. Kurkin, and others.

A significant contribution to the development of modern mathematical frameworks and various areas of operations research has been made by R. Ackoff [3], R. Bellman, G. Dantzig, H. Kuhn, J. von Neumann, T. Saaty [8], R. Churchman, A. Kaufmann, L. V. Kantorovich, N. P. Buslenko, E. S. Venttsel, N. N. Vorobyov, N. N. Moiseev, D. B. Yudin, and other scholars.

Despite the substantial scientific value of these contributions, a number of important issues related to the application of mathematical methods in the study of efficiency indicators remain insufficiently developed. At present, certain contradictions persist in the construction of economic and mathematical models for analyzing economic processes. As a result, the problem of effectively implementing mathematical tools to substantiate efficiency assessment from the standpoint of economic and mathematical modeling remains unresolved, particularly with regard to the selection of dominant indicators. The insufficient level of research on the quantitative evaluation and analysis of efficiency indicators hinders the timely prevention of crisis phenomena within enterprises and reduces the overall effectiveness of their functioning [5, p. 15].

The purpose of the study is to systematize and substantiate the application of mathematical methods for evaluating the efficiency indicators of economic systems and for constructing adequate economic and mathematical models.

Presentation of the main material. In economic and mathematical modeling, one of the most challenging tasks is to identify the mathematical essence of an economic problem. This requires an understanding of the specific features of the economic process as well as proficiency in appropriate mathematical tools.

The solution of economic analysis problems by means of mathematical methods is possible only when such problems are formulated in mathematical terms, that is, when real economic relationships and dependencies are expressed using the apparatus of mathematical analysis. This necessitates the development of mathematical models.

In practice, a wide range of mathematical methods is applied to solve economic problems. Methods of elementary mathematics are used in traditional economic calculations, particularly when substantiating resource requirements and developing plans and projects. Classical methods of mathematical analysis are applied both independently (differentiation and integration) and as components of other methods, such as mathematical statistics and mathematical programming.

Statistical methods constitute the primary means of studying mass recurrent phenomena. They are applied to analyze changes in efficiency indicators treated as stochastic processes. When the relationships between the analyzed characteristics are not deterministic but stochastic in nature, statistical and probabilistic methods become virtually the only effective research tools. In economic analysis, the most widely used methods include simple and multiple correlation analysis [6].

When studying simultaneous statistical populations, distribution laws, variation series, and sampling methods are employed. For multidimensional statistical populations, correlation and regression analysis, as well as variance, covariance, spectral, component, and factor analyses, are applied.

Econometric methods are based on the synthesis of three fields of knowledge: economics, mathematics, and statistics. The foundation of econometrics is the economic model, which represents a schematic description of an economic phenomenon or process, reflecting its essential characteristics through scientific abstraction.

One of the most widely used methods of economic analysis is the input–output method. This approach is based on matrix (balance) models constructed in a tabular form and clearly illustrates the interrelationships between production costs and output results.

Methods of mathematical programming serve as the main tools for solving optimization problems related to production and economic activity. Essentially, these methods are used for planning calculations and make it possible to assess the intensity of planned targets, the scarcity of results, and to determine limiting types of raw materials and groups of equipment [10].

Operations research is understood as the development of methods for purposeful actions (operations), the quantitative evaluation of decisions, and the selection of the optimal alternative. The objective of operations research is to integrate structurally interconnected elements of a system in a way that most effectively supports the analysis of efficiency indicators.

Game theory, as a branch of operations research, represents a theory of mathematical models for making optimal decisions under conditions of uncertainty or conflict among multiple parties with differing interests [11].

Queueing theory, based on probability theory, examines mathematical methods for the quantitative evaluation of mass service processes. A distinctive feature of all problems related to queueing systems is the random nature of the phenomena under study. The number of service requests and the time intervals between their arrivals are random; however, taken together, they follow statistical regularities, the quantitative study of which constitutes the subject of queueing theory.

This theory makes it possible to study systems designed to service a mass flow of randomly occurring requests. Both the moments of request arrivals and the service times may be random. The objective of queueing theory methods is to identify a rational organization of service that ensures a specified quality

level and to determine optimal service standards (according to an adopted criterion) for servicing demands that arise unexpectedly and irregularly [4, p. 67].

Economic cybernetics analyzes economic phenomena and processes as complex systems from the perspective of the laws of control and information flows within them. Methods of modeling and systems analysis are most highly developed precisely within this field.

General formulation of the problem of studying efficiency indicators.

All factors that influence the process of analyzing economic efficiency indicators can be divided into two groups:

- constant factors (conditions under which the operation is carried out), the influence on which is impossible. These factors are denoted by $\alpha_1, \alpha_2, \dots$;
- dependent factors (decision variables) $x_1, x_2, \dots$

The efficiency criterion is expressed by an objective function that depends on factors from both groups. Therefore, the objective function can be represented in the following form:

$$Z = f(x_1, x_2, \dots, \alpha_1, \alpha_2, \dots) \quad (1)$$

All operations research models can be classified according to the nature and characteristics of the operation, the type of problems being addressed, and the specifics of the mathematical methods applied.

It is important to first highlight the large class of optimization models. Such problems arise when attempting to optimize the efficiency of planning and management in complex systems, primarily economic systems. The efficiency optimization problem can be formulated in a general form as follows:

Find variables $x_1, x_2, \dots, x_n$, that satisfies a system of inequalities (or equations)

$$\phi_i(x_1, x_2, \dots, x_n) \leq b_i, i = 1, 2, \dots, m \quad (2)$$

and the transformation of the maximization (or minimization) of the objective function

$$Z = f(x_1, x_2, \dots, x_n) \rightarrow \max(\min) \quad (3)$$

In cases where the functions f and ϕ_i in problems (2) – (3), are at least twice differentiable, classical optimization methods can be applied. However, the application of these methods in operations research for efficiency indicators is rather limited, as determining the conditional extremum of a function of n variables is technically very challenging: the method allows identification of a local extremum, but due to the multidimensional nature of the function, finding its maximum (or minimum) value (global extremum) can be quite labor-intensive—especially since this extremum may occur at the boundary of the solution domain. Classical methods fail entirely if the set of admissible argument values is discrete or if the function Z is given in tabular form. In such cases, mathematical programming methods are employed to solve problems (2) – (3).

Mathematical programming is a branch of mathematics that develops the theory and numerical methods for solving multidimensional extremal problems with constraints, i.e., problems of finding the extremum of a function of many variables subject to restrictions on the domain of those variables. The function whose extremal value needs to be determined under economic constraints is called the objective function, performance indicator, or optimality criterion. Economic constraints are formalized as systems of restrictions. Together, these elements constitute a mathematical model.

If the efficiency criterion $Z = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ is a linear function, and the function $\phi_i(x_1, x_2, \dots, x_n)$ appears in the system of constraints (1), such a problem is solved using linear programming methods.

If, based on practical considerations, the solution is required to be integer-valued, the problem becomes one of integer linear programming. If the efficiency criterion and/or the system of constraints are defined by nonlinear functions, the problem becomes one of nonlinear programming. In particular, if the specified functions exhibit convexity, the resulting problem is classified as a convex programming problem.

If a mathematical programming problem involves a time variable and the efficiency criterion (2) is expressed not explicitly as a function of variables but implicitly—through equations describing the progression of operations over time—the problem is considered a dynamic programming problem.[12]

The advantage of the model we propose is that the performance indicator Y is measured using the methodology developed and described in previous sections, which allows a unified approach to evaluating all indicators and their interrelationships, obtaining results measured on a consistent scale, and enabling the prediction of its real value.

Consider an example of a multifactor regression model describing the relationship between the integral adaptability coefficient and the constituent indicators of a company's operational efficiency: the performance indicator is measured using the methodology developed and described in previous sections, allowing a unified approach to evaluating all indicators and their interrelationships, obtaining results on a single scale, and predicting its real value.

The task is to study and determine the form of the relationship (construct a multifactor regression model) between the integral efficiency coefficient and a set of economic indicators influencing the company's operational performance:

- x_1 – рентабельність загальна основної діяльності;
- x_2 – рентабельність основних засобів;
- x_3 – коефіцієнт фондівддачі;
- x_4 – коефіцієнт оборотності;
- x_5 – коефіцієнт придатності основних засобів;
- x_6 – продуктивність праці.

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_4x_4 + b_5x_5 + b_6x_6 + e \quad (4)$$

where e – is the random error vector;

$b_0, b_1, b_2, b_3, b_4, b_5, b_6$,— are unknown parameters in the multifactor regression model, which are estimated using the least squares method to minimize the error vector.

The impact of each performance indicator of the enterprise on the adaptability coefficient is characterized by the partial regression coefficients. A partial regression coefficient indicates the amount by which the value of the corresponding indicator changes in response to a one-unit change, assuming that all other indicators remain constant.

Without loss of generality, it can be assumed that the expected value of the random error vector is zero and that its variance is finite. In this case, the integral adaptability indicator y is a function of the constituent factors of the enterprise's operational performance.

The proposed model can be expressed in matrix form as $Y=XB$, where

$$Y = \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \end{pmatrix} \quad \begin{array}{l} \text{- is the column vector of values of the dependent variable } Y, \text{ which in our case} \\ \text{represents is equal to } Y=XB \end{array}$$

$$X = \begin{pmatrix} 1 & x_{11} & x_{21} & x_{31} & x_{41} & x_{51} & x_{61} \\ 1 & x_{12} & x_{22} & x_{32} & x_{42} & x_{52} & x_{62} \\ 1 & x_{13} & x_{23} & x_{33} & x_{43} & x_{53} & x_{63} \end{pmatrix} \quad \begin{array}{l} \text{the matrix of values of the enterprise's} \\ \text{performance indicators.} \end{array}$$

$$X^T = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ x_{11} & x_{12} & x_{13} \\ x_{21} & x_{22} & x_{23} \\ x_{31} & x_{32} & x_{33} \\ x_{41} & x_{42} & x_{43} \\ x_{51} & x_{52} & x_{53} \\ x_{61} & x_{62} & x_{63} \end{pmatrix} \quad \text{the matrix transposed relative to the matrix } X$$

$$B = \begin{pmatrix} b_0 \\ b_1 \\ b_2 \\ b_3 \\ b_4 \\ b_5 \\ b_6 \end{pmatrix} \quad \text{the column vector of unknown regression coefficients}$$

To estimate the unknown parameters, the least squares method is applied, yielding:

$$B = (X^T X)^{-1} \cdot (X^T Y) \quad (5)$$

Using the data from the enterprise's performance reports, we obtain: [1]:

$$X = \begin{pmatrix} 1 & 0,03 & 0,01 & 0,95 & 1,41 & 0,15 & 64,73 \\ 1 & -0,34 & -0,21 & 0,04 & 0,67 & 0,14 & 33,81 \\ 1 & -0,42 & -0,27 & 0,35 & 0,95 & 0,14 & 42,89 \end{pmatrix} \quad X^T = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 0,03 & -0,34 & -0,42 \\ 0,01 & -0,21 & -0,27 \\ 0,95 & 0,04 & 0,35 \\ 1,41 & 0,67 & 0,95 \\ 0,15 & 0,14 & 0,14 \\ 64,73 & 33,81 & 42,89 \end{pmatrix}$$

We find the product of the formed matrices :

$$X^T X = \begin{pmatrix} 3 & -0,73 & -0,47 & 1,34 & 3,03 & 0,43 & 141,43 \\ -0,73 & 0,2929 & 0,1851 & -0,1321 & -0,5845 & -0,1019 & -27,5673 \\ -0,47 & 0,1851 & 0,1171 & -0,0934 & -0,3831 & -0,0657 & -18,0331 \\ 1,34 & -0,1321 & -0,0934 & 1,0266 & 1,6988 & 0,1971 & 77,8574 \\ 3,03 & -0,5845 & -0,3831 & 1,6988 & 3,3395 & 0,4383 & 154,6675 \\ 0,43 & -0,1019 & -0,0657 & 0,1971 & 0,4383 & 0,0617 & 20,4475 \\ 141,43 & -27,5673 & -18,0331 & 77,8574 & 154,6675 & 20,4475 & 7172,641 \end{pmatrix}$$

Calculating the inverse matrix $(X^T X)^{-1}$ gives the result:

$$(X^T X)^{-1} = \begin{pmatrix} 1,12298 & 3,28752 & 6,25696 & 5,77799 & 9,15529 & 5,70015 & 7,26747 \\ 5,1972 & 2,52072 & 3,86912 & 1,0637 & 1,18037 & 1,07355 & 2,93181 \\ 8,36456 & 3,98187 & 6,1276 & 1,76117 & 1,73504 & 1,77457 & 4,93695 \\ 3,05274 & 6,93536 & 1,05038 & 7,08345 & 1,494 & 7,11159 & 1,874614 \\ 1,64924 & 5,47264 & 8,66007 & 5,88493 & 7,31875 & 5,41965 & 1,6934 \\ 3,02946 & 5,43821 & 8,25349 & 4,14773 & 3,92521 & 5,11808 & 1,22879 \\ 6,28479 & 1,09049 & 1,55576 & 8,30205 & 2,95029 & 9,834714 & 1,85737 \end{pmatrix}$$

Find the product $X^T Y$:

$$X^T \cdot Y = \begin{pmatrix} 0,408017 \\ -0,08891 \\ -0,05744 \\ 0,194913 \\ 0,421689 \\ 0,058708 \\ 19,7025 \end{pmatrix}$$

Therefore, the column vector of unknown regression coefficients B is equal to:

$$B = \begin{pmatrix} b_0 \\ b_1 \\ b_2 \\ b_3 \\ b_4 \\ b_5 \\ b_6 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0,1483154 \\ 0,06020629 \\ 0,1011563 \\ 0,03993138 \\ 0,03760462 \\ 0,02725289 \\ 0,04241248 \end{pmatrix}$$

This is how the regression model is set aside:

$$K_{\text{ef}} = 0,1483154 + 0,06020629x_1 + 0,1011563x_2 + 0,03993138x_3 + 0,03760462x_4 + 0,02725289x_5 + 0,04241248x_6$$

Conclusion. Systematization and modernization of mathematical methods for evaluating efficiency contribute to the improvement of economic analysis quality and the soundness of managerial decisions. Further research should be directed toward the development of econometric models that take into account industry-specific features and the dynamics of economic processes.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Беник Н. Г. Організаційно-економічний механізм адаптації суднобудівельно-судноремонтних підприємств водного транспорту : автореф. дис. канд. екон. наук : 08.00.04. - Київ, 2015. - 20 с.
2. Акофф Р. Л. Планування майбутнього корпорації / пер. з англ. - Київ : Основи, - 2018. - 352 с.
3. Беллман Р. Динамічне програмування. - Київ : Мир, 2017. - 400 с.
4. Данциг Г. Б. Лінійне програмування і розширення. - Київ : Вища школа, 2019. - 512 с.
5. Канторович Л. В. Економічний розрахунок і ефективність. - Харків : Фактор, 2020. - 288 с.
6. Сааті Т. Л. Прийняття рішень. Метод аналізу ієрархій. - Київ : Видавничий дім «КМ Академія», 2021. - 360 с.
7. Лисенко Ю. Г., Порохня В. М. Економіко-математичні методи і моделі управління підприємством. - Київ : Центр навчальної літератури, 2018. - 336 с.
8. Гапоненко В. Ф., Шкарлет С. М. Управління ефективністю підприємства. - Київ : КНЕУ, 2019. - 280 с.
9. Мамаєва З. М. Вступ до економіко-математичного моделювання. - Харків : ХНЕУ ім. С. Кузнеця, 2016. - 240 с.
10. Черчмен С., Акофф Р., Арноф Л. Вступ до дослідження операцій. - Київ : Мир, 2020. - 480 с.
11. Вентцель Е. С. Дослідження операцій : задачі, принципи, методологія. - Київ : Либідь, 2019. - 416 с.
12. Юдін Д. Б., Горяшко А. П. Лінійне та нелінійне програмування. - Київ : Наукова думка, 2021. - 392 с.

REFERENCES

1. Benyk, N. H. (2015). *Organizational and economic mechanism of adaptation of shipbuilding and ship-repair enterprises of water transport* (Extended abstract of PhD dissertation). Kyiv, Ukraine.
2. Ackoff, R. L. (2018). *Creating the Corporate Future*. Kyiv: Osnovy.

3. Bellman, R. (2017). *Dynamic Programming*. Kyiv: Myr.
4. Dantzig, G. B. (2019). *Linear Programming and Extensions*. Kyiv: Vyshcha Shkola.
5. Kantorovich, L. V. (2020). *Economic Calculation and Efficiency*. Kharkiv: Faktor.
6. Saaty, T. L. (2021). *Decision Making for Leaders: The Analytic Hierarchy Process*. Kyiv: KM Academia Publishing.
7. Lysenko, Yu. H., & Porokhnia, V. M. (2018). *Economic and Mathematical Methods and Models of Enterprise Management*. Kyiv: Center for Educational Literature.
8. Haponenko, V. F., & Shkarlet, S. M. (2019). *Enterprise Performance Management*. Kyiv: KNEU.
9. Mamaieva, Z. M. (2016). *Introduction to Economic and Mathematical Modeling*. Kharkiv: Simon Kuznets KhNEU.
10. Churchman, C. W., Ackoff, R. L., & Arnoff, E. L. (2020). *Introduction to Operations Research*. Kyiv: Myr.
11. Venttsel, E. S. (2019). *Operations Research: Problems, Principles, Methodology*. Kyiv: Lybid.
12. Yudin, D. B., & Horiashko, A. P. (2021). *Linear and Nonlinear Programming*. Kyiv: Naukova Dumka.

А.Гейлик, Ю.Вяла

СИСТЕМАТИЗАЦІЯ ТА МОДЕРНІЗАЦІЯ МАТЕМАТИЧНИХ МЕТОДІВ ОЦІНЮВАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЕКОНОМІЧНИХ СИСТЕМ

У статті здійснено комплексний аналіз та систематизацію математичних методів, що застосовуються для оцінювання показників ефективності економічних систем у сучасних умовах розвитку економіки. Обґрунтовано доцільність використання економіко-математичного моделювання як інструменту формалізації складних економічних процесів та прийняття управлінських рішень. Розглянуто можливості застосування методів математичної статистики, економетрики, математичного програмування, теорії ігор, теорії масового обслуговування та дослідження операцій у контексті аналізу ефективності діяльності підприємств. Запропоновано узагальнену постановку задачі дослідження показників ефективності з використанням цільової функції та системи обмежень. Наведено приклад багатофакторної регресійної моделі, що дозволяє оцінити вплив ключових економічних показників на інтегральний показник ефективності. Результати дослідження можуть бути використані для підвищення обґрунтованості управлінських рішень і прогнозування розвитку економічних систем.

Ключові слова: показники ефективності, економіко-математичне моделювання, математичне програмування, економетричні методи, дослідження операцій.

Стаття прийнята 12.09.2025

ТРАНСПОРТНІ ТЕХНОЛОГІЇ

УДК 656.02:004.738.5:355.02

doi.org/10.33298/2226-8553.2025.3.44.28

© Кучерук Г.Ю., Войченко Т.О., Сіващенко Т.В.

**РОЛЬ ЦИФРОВІЗАЦІЇ ТРАНСПОРТНОЇ ЛОГІСТИКИ В КОНТЕКСТІ
МУЛЬТИМОДАЛЬНИХ ПЕРЕВЕЗЕНЬ В УМОВАХ ВОЄННОГО СТАНУ**

У статті розглянуто актуальність цифровізації транспортної логістики мультимодальних перевезень в умовах воєнного стану. Проаналізовано вплив воєнних дій на логістичні ланцюги, визначено ключові напрями цифрової трансформації, що дозволяють підвищити гнучкість, безпеку та ефективність логістичних операцій на мультимодальних перевезеннях. Показано значення цифрових технологій для забезпечення сталого функціонування транспортної системи, обміну даними та управління ризиками в кризових умовах.

Ключові слова: цифровізація, мультимодальні перевезення, транспортна логістика, війна, управління ризиками, логістичні ланцюги, IT-рішення.

Постановка проблеми. Воєнний стан, введений в Україні у зв'язку з повномасштабною агресією, суттєво вплинув на всі сфери економіки, особливо на логістику мультимодальних перевезень. Порушення транспортних маршрутів, ризики для персоналу, нестача пального та знищення інфраструктури — всі ці фактори вимагають нових підходів до організації логістичних процесів. Одним з ключових інструментів адаптації є цифровізація, яка дозволяє гнучко реагувати на зміни, забезпечувати координацію та швидкий обмін інформацією.

Останні роки характеризуються зростанням наукового інтересу до цифровізації логістичних процесів, особливо у контексті кризових ситуацій, таких як пандемія COVID-19, а з 2022 року — повномасштабна війна в Україні. Вітчизняні та зарубіжні дослідники активно досліджують трансформацію логістики під впливом цифрових технологій.

Зокрема, у праці авторів [1] розглядаються основні виклики, що постають перед логістичною системою України під час воєнного стану, і підкреслюється роль цифрових інструментів у забезпеченні стійкості логістичних ланцюгів. Топалов Р. [2] аналізує вплив цифрової трансформації на ефективність перевезень, в якій основну роль відіграють штучний інтелект, автоматизація та цифрова комунікація. Також **Європейські звіти та публікації OECD, WEF (World Economic Forum)** висвітлюють успішні кейси цифровізації в умовах надзвичайних ситуацій, зокрема в країнах ЄС, де активно використовуються платформи управління ризиками, цифрове моделювання маршрутів і системи supply chain visibility.

Проте, незважаючи на значну увагу до теми, у вітчизняній науці все ще недостатньо ґрунтовних емпіричних досліджень, які б охоплювали реальні кейси впровадження цифрових технологій у логістиці під час бойових дій, ефективність конкретних цифрових рішень в умовах деструкції інфраструктури та інформаційної нестабільності та оцінку цифрової зрілості логістичних підприємств України в кризових умовах відсутні. Також залишається недостатньо вивченим питання **кібербезпеки в цифровій логістиці**, особливо на фоні гібридних загроз, що включають кібератаки на логістичну інфраструктуру, державні реєстри, цифрові платформи тощо.

Таким чином, хоча наукова база з проблем цифровізації логістики активно формується, значна частина прикладних аспектів залишається відкритою. Це створює потребу у міждисциплінарних

дослідженнях, що поєднуюватимуть транспортну логістику, інформаційні технології, військову економіку та безпекові науки.

Виклад основного матеріалу. Воєнний стан, запроваджений в Україні через широкомасштабну агресію, суттєво змінив функціонування мультимодальних логістичних систем. Порушення транспортних маршрутів, руйнування інфраструктури, нестача пального, загроза безпеці персоналу, зростання ризиків та витрат на перевезення — усе це вимагає нових підходів до організації логістики. В умовах такої нестабільності саме цифровізація транспортної логістики виступає ефективним засобом адаптації до сучасних викликів, дозволяючи забезпечити гнучкість, стійкість та безперебійність логістичних операцій.

Цифрові технології відіграють ключову роль у відновленні та стабілізації логістичних процесів на транспорті. Завдяки впровадженню IT-рішень забезпечується моніторинг руху вантажів у режимі реального часу за допомогою GPS-систем, швидкий обмін інформацією між усіма учасниками ланцюгів постачання через електронні платформи, а також аналітична обробка даних для прогнозування ризиків та оптимізації рішень. У кризових умовах цифрові інструменти дозволяють скоротити час на ухвалення рішень, ефективно планувати маршрути, уникати небезпечних ділянок і забезпечувати безперервне постачання критично важливих вантажів, зокрема гуманітарної допомоги, ліків, пального.

Цифрові інструменти транспортної логістики мультимодальних перевезень наведені у табл. 1. Вони дозволяють значно скоротити час на ухвалення рішень, оперативно реагувати на зміну умов (наприклад, обстріли, блокування доріг, зміни в роботі пунктів пропуску), уникати небезпечних ділянок, і, як наслідок, забезпечувати безперервність постачання критично важливих вантажів. Це стосується насамперед гуманітарної допомоги, медикаментів, продовольства, пального, які мають надходити вчасно до зон, що перебувають у надзвичайному або бойовому стані.

Таблиця 1 - Цифрові інструменти логістики мультимодальних перевезень

Цифровий інструмент	Призначення	Приклади
GPS-трекінг та супутниковий моніторинг	Відстеження руху вантажів у реальному часі, корекція маршрутів	Google Maps API, Here Tracking
TMS (Transportation Management Systems)	Оптимізація маршрутів і графіків перевезень	SAP Transportation Management, Oracle TMS
WMS (Warehouse Management Systems)	Автоматизація складських процесів, облік запасів	Manhattan WMS, Infor WMS
Хмарні сервіси та електронні платформи	Миттєвий обмін інформацією між учасниками логістичного ланцюга	Prozorro.Продажі, Microsoft Azure, Amazon Web Services
Big Data та аналітика	Прогнозування ризиків, виявлення вузьких місць	Tableau, Power BI, Hadoop
AI та машинне навчання	Формування оптимальних сценаріїв дій на основі прогнозів	IBM Watson, Google AI, TensorFlow
Мобільні додатки для логістів і водіїв	Оперативне інформування про ситуацію на маршрутах	Trans.eu, Project44, логістичні мобільні додатки
Електронний документообіг (eTTN, eCMR)	Скорочення часу на оформлення документів, прозорість операцій	e-TTN в Україні, eCMR у ЄС
Дрони та IoT-пристрої	Моніторинг інфраструктури, доставка критичних вантажів	DJI дрони, IoT-сенсори для вантажів і транспорту

Впровадження сучасних ІТ-рішень дозволяє здійснювати моніторинг руху вантажів у режимі реального часу з використанням GPS-трекінгу, що забезпечує прозорість логістичних операцій та контроль за дотриманням маршрутів.

Електронні платформи та хмарні сервіси забезпечують миттєвий обмін інформацією між усіма учасниками логістичного ланцюга — від постачальників і перевізників до митних та прикордонних служб. Це скорочує час реагування, зменшує ризик помилок, а також сприяє інтеграції приватних та державних структур у єдиний цифровий простір управління логістикою.

Важливим компонентом є аналітична обробка великих обсягів даних (Big Data), яка дає змогу оперативно виявляти затримки, прогнозувати вузькі місця в системі перевезень, а також приймати оптимальні управлінські рішення щодо планування маршрутів, перерозподілу ресурсів або зміни напрямків доставки. У кризових умовах — особливо при зруйнованій інфраструктурі або нестабільній ситуації на місцевості — такі рішення є критично важливими.

Цифрові інструменти дозволяють значно скоротити час на ухвалення рішень, оперативно реагувати на зміну умов (наприклад, обстріли, блокування доріг, зміни в роботі пунктів пропуску), уникати небезпечних ділянок, і, як наслідок, забезпечувати безперервність постачання критично важливих вантажів. Це стосується насамперед гуманітарної допомоги, медикаментів, продовольства, пального, які мають надходити вчасно до зон, що перебувають у надзвичайному або бойовому стані.

Крім того, цифровізація сприяє покращенню взаємодії між цивільними та військовими структурами, зменшенню навантаження на документообіг завдяки електронним накладним (eTTN), оптимізації витрат та формуванню довгострокових стратегій розвитку логістичної інфраструктури навіть в умовах невизначеності.

Цифровізація логістики в умовах війни чинить багатовимірний вплив на людський фактор, змінюючи як характер трудової діяльності, так і вимоги до персоналу. Насамперед цифрові інструменти зменшують фізичне та інформаційне навантаження на працівників, автоматизуючи рутинні операції — заповнення документів, відстеження вантажів, облік запасів. Це сприяє зниженню втоми, мінімізації помилок та зростанню точності дій, що особливо важливо в умовах нестабільності та стресу. Одночасно цифровізація підвищує відповідальність персоналу, оскільки дії фіксуються в системах у реальному часі, що вимагає вищого рівня самоконтролю, цифрових компетентностей та постійного оновлення знань. ІТ-рішення також істотно знижують ризики, пов'язані з людським фактором, оскільки завдяки аналітичній обробці даних управлінські рішення приймаються на основі точних розрахунків і прогнозів, а не лише інтуїції або досвіду.

Однак поряд із позитивними ефектами зростає й вразливість: за статистикою CERT-UA, переважна більшість успішних кібератак пов'язані з людською необережністю — відкриттям фішингових листів, використанням ненадійних паролів чи нехтуванням процедурами кібербезпеки. Це висуває нові вимоги до навчання персоналу правилам цифрової гігієни та безпечної поведінки в інформаційному середовищі. Водночас цифрова трансформація може викликати психоемоційне перенавантаження, особливо в умовах воєнного стану, коли працівники змушені швидко адаптуватися до нових інструментів у ситуації обмеженого ресурсу, тривожності та нестабільності. Впровадження цифрових рішень без належної підготовки або підтримки може викликати опір, зниження мотивації чи навіть професійне вигорання. Отже, цифровізація не лише трансформує логістичні процеси, а й суттєво змінює роль людини в системі управління перевезеннями. Вона потребує стратегічного управління людським фактором: інвестицій у навчання, адаптацію, психологічну підтримку та побудову культури безпеки й відкритості до змін.

Практичними прикладами цифровізації транспортної логістики в умовах війни є використання інтегрованих державних систем, таких як «Шлях» створена Міністерством інфраструктури України у співпраці з Службою безпеки України та Державною прикордонною службою [3]. Вона дозволяє **отримувати електронні дозволи на виїзд водіїв-чоловіків за межі країни**, що значно скорочує час і бюрократичні процедури, забезпечуючи прозорість і контроль для видачі дозволів на перевезення, цифрові карти з оновлюваною інформацією про стан доріг та зони ризику, платформи

Prozorro. Продажі для логістики гуманітарної допомоги, а також впровадження дронів для доставки вантажів або моніторингу ситуації на маршрутах. Крім того, використання автоматизованих складських систем (WMS), електронного документообігу, систем управління транспортом (TMS) значно зменшує вплив людського фактора, підвищує точність і прозорість логістичних процесів.

Водночас цифровізація в умовах війни має й певні ризики. Зокрема, зростає залежність логістичних компаній від стабільної IT-інфраструктури та інтернет-зв'язку, підвищується небезпека кібератак і витоку конфіденційної інформації. Також частина персоналу може не мати достатньої підготовки для ефективного використання цифрових інструментів, що потребує додаткових навчальних програм.

Особливу увагу в умовах воєнного стану заслуговує проблема **кібербезпеки цифрових транспортних логістичних систем**. З впровадженням цифрових інструментів — від систем управління перевезеннями (TMS), електронного документообігу, хмарних платформ до автоматизованих систем складування (WMS) — транспортна логістика стає все більш залежною від IT-інфраструктури та стабільного захищеного інтернет-з'єднання. Це відкриває нові вектори для кібератак, які можуть бути спрямовані не лише на бізнес-процеси, а й на **критично важливу інфраструктуру** країни.

У сучасних умовах транспортна логістика — це не лише транспортування вантажів, а й обробка великих обсягів даних про маршрути, постачання, склади, гуманітарну допомогу, які можуть становити цінну або вразливу інформацію для противника. **Хакерські атаки на логістичні системи можуть призводити до блокування постачань, саботажу транспорту, витоку інформації про переміщення військових або критичних ресурсів.**

На думку експертів з кібербезпеки (зокрема, згідно з аналітикою CERT-UA та звітами компаній Cisco, Kaspersky та IBM Security), з 2022 року в Україні фіксується зростання цілеспрямованих кібератак саме на логістичні компанії, державні транспортні платформи та цифрові інструменти управління перевезеннями [4, 5]. Особливо вразливими вважаються:

- **Хмарні сервіси без багатофакторної автентифікації;**
- **Системи зберігання резервних копій без шифрування;**
- **API-з'єднання з державними платформами** (які можуть бути джерелом як витоку даних, так і інструментом зараження);
- **Низький рівень цифрової грамотності персоналу**, який створює загрозу фішингу або несанкціонованого доступу.

Наукові дослідження авторів [6, 7] підкреслюють, що одним із головних бар'єрів впровадження цифрової логістики є не технічна, а **організаційно-безпекова підготовленість компаній** до цифрової трансформації. Часто не існує внутрішніх політик інформаційної безпеки, не проводять регулярного навчання персоналу з протидії кібератакам та не здійснюють тестування на проникнення в свої системи.

Таким чином, **кібербезпека є не лише технічним, а й стратегічним компонентом цифрової транспортної логістики**. Її ігнорування може звести нанівець переваги цифровізації, поставити під загрозу життя людей і ефективність військово-гуманітарної логістики. Незважаючи на визнання проблеми у фаховій літературі, **практичних досліджень з вітчизняного досвіду протидії кібератакам у логістиці в період активних бойових дій майже немає**. Це становить важливу перспективу для подальших міждисциплінарних досліджень на стику транспортної логістики, кібербезпеки та воєнної економіки.

Попри ризики, цифрова трансформація транспортної логістики залишається необхідною умовою для її функціонування в умовах війни та перспективного розвитку в повоєнний період. Після завершення бойових дій саме цифрова логістика стане основою для побудови ефективних, інтегрованих у європейський простір транспортно-логістичних систем України. Очікується розширення державних і приватних цифрових платформ, масштабна підготовка логістичних кадрів,

підвищення рівня автоматизації, а також активна інтеграція з міжнародними логістичними сервісами.

Таким чином, цифровізація транспортної логістики в умовах воєнного стану є не лише відповіддю на загрози, а й важливим кроком до модернізації галузі та зміцнення економічної безпеки України.

Висновки. Цифровізація є ключовим фактором стійкості та адаптивності логістики в мультимодальних перевезеннях умовах воєнного стану. Вона дозволяє зменшити ризики, зберегти ефективність і забезпечити гнучке управління ланцюгами постачання навіть у критичних умовах. Успішна цифровізація транспортної логістики потребує комплексного підходу: розвитку технологій, модернізації інфраструктури, захисту інформаційних систем і — що не менш важливо — системної роботи з людським капіталом. Саме синергія технологічних рішень та підготовленого персоналу дозволяє забезпечити ефективну логістику навіть в умовах гібридних загроз та обмежених ресурсів. Важливо, щоб цифрова трансформація транспортної логістики продовжувалась і в післявоєнний час як складова відновлення економіки.

ЛІТЕРАТУРА

1. Целлер, В., Крамський, С. (2024). Інфраструктурна підтримка інновацій в сфері транспортної логістики в умовах турбулентності під час війни. *Економіка та суспільство*, (67). <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2024-67-142>
2. Топалов, Р. (2024). Цифрова трансформація логістичних систем: сутнісна характеристика та особливості. *Економіка та суспільство*, (70). <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2024-70-58>
3. Державне агентство відновлення та розвитку інфраструктури України. Нова онлайн-послуга для міжнародних перевізників спрощує перетин кордону // Сайт Державного агентства відновлення та розвитку інфраструктури України. — 14.09.2023. — Режим доступу: <https://restoration.gov.ua/press/news/57092.html> (дата звернення: 02.07.2025).
4. CERT-UA. War in Ukraine: Pulse of Cyber Defense. — 2023. — Режим доступу: <https://nsarchive.gwu.edu/media/30055/ocr> (дата звернення: 02.07.2025).
5. AP News. Russian hackers target Western firms shipping aid to Ukraine, US intelligence says. — 29.05.2025. — Режим доступу: <https://apnews.com/article/6308ca3e11c8299470df573e4f422878> (дата звернення: 02.07.2025).
6. Венгерська, Н., Сулейманова А. (2024). Кібербезпека України в контексті міжнародної співпраці з великою британією та глобалізаційних викликів. *Фінансові стратегії інноваційного розвитку економіки*, (4 (60)), 81-85. <https://doi.org/10.26661/2414-0287-2023-4-60-14economyandsociety.i>
7. Черниш Ю., Мальцева І. та ін. (2023). Підходи до захисту інформації в організаціях під час надзвичайного (воєнного) стану // *Кібербезпека: освіта, наука, техніка*. Т.4 (20), с 93-99. <https://doi.org/10.28925/2663-4023.2023.20>

Стаття прийнята 10.09.2025

Овчарук В.О., Ющук І.В.

КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ КОНТЕЙНЕРНИХ ПЕРЕВЕЗЕНЬ НА МОРСЬКИХ МАРШРУТАХ НА ОСНОВІ МЕРЕЖЕВОЇ ТРАНСПОРТНОЇ ЗАДАЧІ

У статті представлено підхід до математичного моделювання та оптимізації контейнерних перевезень у морських транспортних мережах із урахуванням динаміки графіків руху суден. Запропонована методика ґрунтується на застосуванні мережових транспортних моделей, які відображають структуру взаємодії портів, складів та транспортних вузлів у вигляді орієнтованого графа. Вузли мережі відповідають подіям або станам системи (прибуття суден, наявність контейнерів, можливість зберігання чи переміщення), а дуги характеризують можливі напрямки контейнерних потоків із заданими параметрами вартості та пропускної спроможності. Розроблена математична модель враховує черговість заходів суден у порти та дозволяє формалізувати операції перевезення та зберігання контейнерів між заходами. Для розв'язання задачі оптимізації використано комбінацію методів лінійного програмування, алгоритмів оптимального потоку в мережах та методу потенціалів. Таке поєднання забезпечує швидке отримання наближених до оптимальних рішень навіть у задачах великої розмірності.

Практична реалізація математичної моделі здійснена за допомогою програмних засобів, що забезпечило інтеграцію математичних алгоритмів із сучасними інформаційними системами управління транспортом. Результати моделювання, проведеного на даних, наближених до реальних умов міжнародних морських ліній, показали зниження сукупних витрат на транспортування та зберігання контейнерів на 12–18%, зменшення порожніх пробігів і покращення балансу між використанням власних та орендованих контейнерів. Отримані результати підтверджують, що запропонований підхід є ефективним інструментом для планування та оперативного управління контейнерними перевезеннями і може бути адаптований до інших видів транспорту з багаторівневою структурою мережі.

Ключові слова: мережева транспортна задача, оптимізація, метод потенціалів, оптимізація логістики, контейнерні перевезення, морські транспортні мережі.

Постановка проблеми. Сучасний розвиток світової транспортно-логістичної системи супроводжується постійним зростанням обсягів вантажоперевезень. Таке зростання зумовлює необхідність удосконалення методів управління транспортними процесами. Контейнерні перевезення забезпечують високу ефективність логістичних операцій, гнучкість у формуванні транспортних ланцюгів та скорочення витрат часу на перевалку вантажів. Водночас підвищення конкуренції на ринку транспортних послуг та жорсткі терміни доставки обумовлюють потребу у впровадженні інноваційних підходів до планування та управління рухом контейнерного парку.

Традиційні методи організації перевезень з великою кількістю пунктів обробки вантажів, багатоваріантністю маршрутів та значними коливаннями попиту стають недостатньо ефективними. Проблема ускладнюється необхідністю оптимально розподіляти ресурси у реальному часі, врахувати обмеження потужності, використовувати власні та орендовані контейнери.

Одним із шляхів вирішення цих завдань є застосування математичних моделей транспортного типу. Мережеві транспортні моделі дозволяють комплексно описати рух вантажопотоків, врахувати специфічні обмеження та критерії оптимізації. Використання економіко-математичних методів у поєднанні з сучасними інформаційними технологіями відкриває можливості для оперативного прийняття рішень, підвищення точності планування та ефективності управління контейнерними перевезеннями на морському транспорті.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Мережеві транспортні задачі вже майже півстоліття посідають центральне місце у сфері математичного моделювання процесів перевезень і розподілу ресурсів. Їх активне дослідження відбувається у теоретичному напрямі розвитку методів операційного аналізу і в прикладному аспекті вирішення практичних завдань планування транспортних потоків [1]. Висока зацікавленість науковців у проблематиці мережевих транспортних задач пояснюється їх універсальністю та значущістю для економіки. Адже транспортні задачі відображають ключові закономірності функціонування логістичних систем, забезпечують основу для раціонального використання матеріальних, фінансових і часових ресурсів та сприяють підвищенню ефективності виробничо-господарської діяльності [2].

У роботі [3] розглянуто моделі оптимального потоку в мережах та їхнє застосування у транспортній логістиці. Автори детально описують алгоритми для знаходження оптимальних маршрутів з урахуванням пропускної спроможності, вартості перевезення та часових обмежень. Значна увага приділена особливостям реалізації цих алгоритмів у програмних середовищах та можливостям використання у комплексних логістичних системах.

Дослідження [4] присвячене розробці та застосуванню математичного апарату для оптимізації роботи транспортних систем. У роботі наведено приклади використання лінійного програмування для розподілу вантажопотоків, визначення оптимальних маршрутів та завантажень. Детально розглянуті задачі великої розмірності, де необхідна ефективна декомпозиція задачі та використання спеціалізованих алгоритмів. Поєднання математичних методів із сучасними інформаційними технологіями створює умови для побудови гнучких, масштабованих систем управління транспортом.

У роботі [5] проаналізовано методи планування роботи рухомого складу з урахуванням технічного стану транспортних засобів, їх завантаженості та режимів експлуатації. Автори підкреслюють важливість синхронізації транспортних процесів і використання адаптивних планів перевезень. Також враховується динаміка попиту та зміну дорожніх умов. Запропоновані підходи базуються на інтеграції планових та диспетчерських рішень. Такий підхід дозволяє зменшити простой, підвищити коефіцієнт використання пробігу та знизити експлуатаційні витрати.

Використання сучасних інструментів програмування дозволяє застосовувати практичні підходи до реалізації алгоритмів транспортних задач [6]. Дослідники використовують метод потенціалів та проводять аналіз результатів на прикладах реальних задач. Використання Python дозволяє створювати інтерактивні моделі, легко інтегровані з базами даних та аналітичними панелями. Такий підхід є результативним для оперативного планування.

Для розробки автоматизації процесу планування пропонуються концепції та інструменти для моніторингу перевезень [7]. Зроблено акцент на інтеграції баз даних, геоінформаційних систем та математичних моделей для формування оптимальних планів доставки [8]. Автори пропонують створення модульних систем, які можуть адаптуватися до змін умов роботи транспортних підприємств. Також може використовуватись сценарний аналіз для вибору найкращої стратегії в умовах невизначеності [9].

Постановка завдання. Метою статті є розробка та обґрунтування ефективної математичної моделі управління контейнерними перевезеннями. Така економіко-математична модель базується на принципах мережевих транспортних задач і враховує специфіку функціонування транспортно-логістичних систем у реальному часі.

Запропонований підхід передбачає створення формалізованого опису процесів переміщення контейнерного парку з урахуванням обмежень на потужності перевезень, терміни виконання замовлень, доступність контейнерів у різних пунктах обробки вантажів та вартості транспортних, орендних і вантажно-розвантажувальних операцій.

Інтеграція математичної моделі з інформаційними системами управління та використання алгоритмів підтримки прийняття рішень дають можливість автоматично збирати дані про рух транспорту, обробляти їх та своєчасно коригувати планові показники. Для реалізації транспортної задачі застосовуються методи, що базуються на лінійному програмуванні та алгоритмах оптимального потоку в мережах.

У математичній моделі розглядалось розв'язання задачі на транспортній мережі, що досить часто зустрічається на практиці [10], а конкретно мережеву транспортну задачу.

Викладення основного матеріалу. Побудова єдиної сітьової моделі для оптимізації контейнерних перевезень передбачає врахування графіка або черговості прибуття кожного судна-контейнеровоза до кожного порту заданої лінії. Черговість заходів суден у порти визначається для конкретної транспортної мережі і для заданого періоду планування.

Для прикладу розглянемо ситуацію, коли у перший порт лінії першим заходить друге судно при своїй першій зупинці, другим — третє судно, також на першій зупинці, і третім — перше судно при першій зупинці. У другий порт першим заходить третє судно (перша зупинка), другим — друге судно (друга зупинка), третім — перше судно (друга зупинка). У третій порт першим прибуває третє судно (третя зупинка), за ним — друге судно (третя зупинка), тоді як перше судно в цей порт не заходить. Задача може бути представлена у вигляді схеми, де кожна комірка містить номер судна та номер його зупинки у відповідному порту (рис. 1).

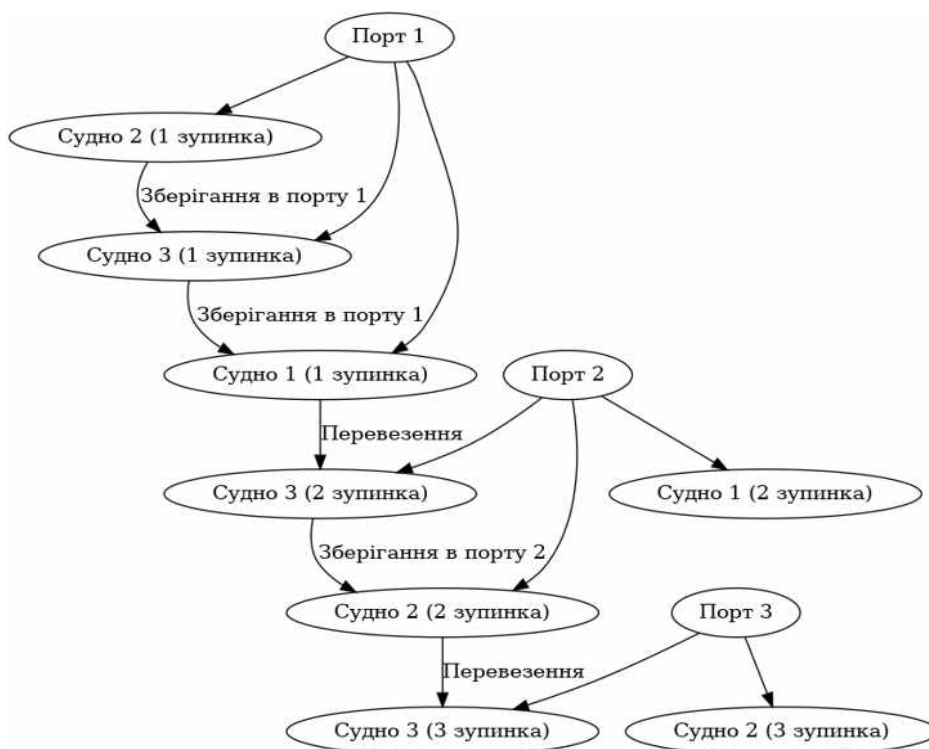


Рисунок . 1 – Схема руху суден

Джерело: розроблено авторами

На основі такої схеми виконується нумерація вершин моделі та формується транспортна мережа. Кожна вершина відповідає певному стану або події — прибуттю судна, наявності контейнерів у порту, можливості їхнього переміщення або зберігання. Це дає змогу однозначно ідентифікувати елементи мережі та забезпечує коректне формування математичної моделі.

Наприклад, коли друге судно прибуває до першого порту, існує кілька варіантів задоволення потреб у порожніх контейнерах до прибуття наступного судна. По-перше, можна залишити частину контейнерів у порту. У термінах потокової моделі така дія відповідає додаванню дуги між вершинами, яка відображає можливість збереження контейнерів у часі з певною вартістю (витратами на зберігання між заходами двох конкретних суден). По-друге, у порту можуть залишатися контейнери, що вже є на момент прибуття судна, включаючи орендовані. Це також моделюється додаванням відповідних дуг між джерелами потоку з урахуванням вартості зберігання між заходами.

Аналогічний підхід застосовується для всіх портів і суден відповідно до їхнього графіка. Формування таких дуг у моделі дозволяє врахувати як прямі перевезення контейнерів між портами, так і зберігання ресурсів у межах порту між заходами суден. У результаті формується повна сітьова

структура, в якій кожна дуга характеризується пропускною спроможністю та вартістю, а кожна вершина — функціональною роллю в транспортному процесі.

У побудованій моделі для зручності всі вершини мережі було пронумеровано від 1 до 39. Припустимо, що друге судно здійснює захід у перший порт. У такій ситуації виникає декілька можливих способів забезпечення потреб у порожніх контейнерах до моменту прибуття наступного судна.

Перший варіант полягає у залишенні частини контейнерів, що доставляються судном, безпосередньо в порту. У термінах мережевих потоків це відповідає можливості перенесення потоку з вершини-стоку 4 до вершини-стоку 8 з метою покриття наявного попиту. Відповідно, між зазначеними вершинами вводиться дуга (4;8), по якій переміщується кожна одиниця потоку з вартістю, еквівалентною витратам на зберігання одного контейнера в порту 1 у період між заходами контейнеровозів 2 та 3.

Другий варіант передбачає збереження в порту контейнерів, що перебували там до моменту прибуття судна, а також контейнерів, залучених шляхом оренди. Це відображається у мережі введенням дуги (25;29), яка поєднує вершину-джерело 25 з вершиною-джерелом 29, та дуги (34;38), що з'єднує вершини 34 і 38. Переміщення потоку по цих дугах моделює витрати, пов'язані із зберіганням контейнерів у порту 1 в інтервалі між заходами суден 2 і 3.

Аналогічні структурні зв'язки представлені на рисунку 2. Зокрема, вершини 1 і 8 з'єднано дугою (8;1), вершини 29 і 22 — дугою (29;22), а вершини 38 і 31 — дугою (38;31). Крім того, вершини 7 і 5 поєднані дугою (7;5), вершини 26 і 23 — дугою (26;23), вершини 35 і 32 — дугою (35;32). Вершини 9 і 6 з'єднано дугою (9;6), тоді як вершини 30 і 27 та вершини 39 і 36 — відповідно дугами (30;27) і (39;36). Усі ці дуги відображають можливості перерозподілу потоків контейнерів у межах мережевої моделі та інтерпретуються як витрати на зберігання і переміщення у порту.

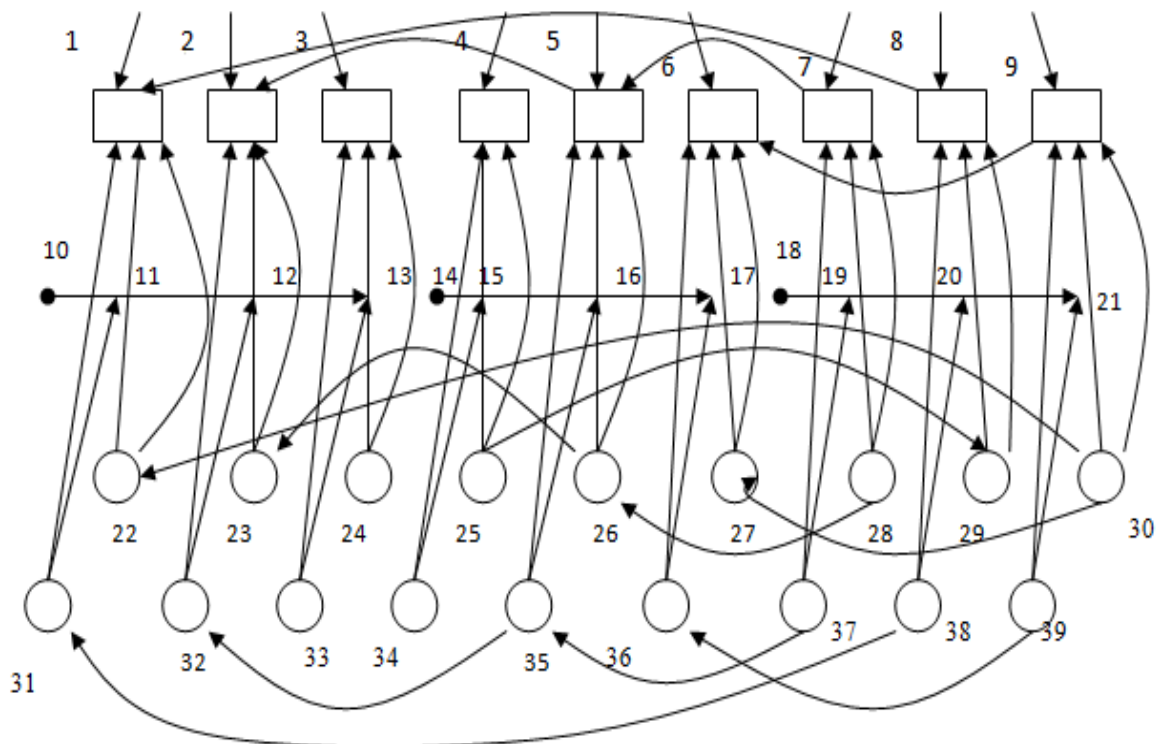


Рисунок 2 – Мережа для типової ситуації на міжнародній морській лінії

Джерело: розроблено авторами

Запропоновані правила побудови мережі є формалізованими та можуть бути алгоритмізовані для автоматичної реалізації у програмному середовищі. Це дозволяє швидко будувати моделі для різних варіантів графіків руху та швидко оновлювати їх при зміні умов експлуатації.

Використання алгоритмів оптимального потоку та методу потенціалів дозволяє вирішувати задачі великої розмірності. В таких задачах враховується обмеження реального середовища. Це можуть бути ситуації з пропускною спроможністю портів, обмеженням парком контейнерів, часовими вікнами заходів суден. При цьому час розв'язання задачі суттєво скорочується порівняно з класичними методами лінійного програмування.

Практична перевірка моделі на даних, наближених до реальних умов міжнародних морських ліній, показала, що оптимізація дозволяє зменшити сумарні витрати на перевезення та зберігання контейнерів у середньому на 12–18 % залежно від конфігурації транспортної мережі. Також вдалося знизити кількість порожніх пробігів і покращити баланс між використанням власних та орендованих контейнерів.

Таблиця 1. Результати моделювання оптимізації контейнерних перевезень

Показник	До оптимізації (%)	Після оптимізації (%)
Витрати на транспортування та зберігання	100	85
Кількість порожніх пробігів	100	82
Ефективність використання власних контейнерів	100	112
Частка орендованих контейнерів	100	88
Час розрахунків моделі	100	55

Джерело: розроблено авторами

Інтеграція математичної моделі з інструментами Python (бібліотеки оптимізації PuLP, NetworkX, SciPy) дає змогу створити гнучке обчислювальне середовище для сценарного аналізу. Це дозволило тестувати різні стратегії реагування на непередбачувані ситуації, наприклад, зміни у розкладі суден або тимчасову недоступність окремих портів.

Висновки. Проведене дослідження підтвердило, що застосування мережевих транспортних моделей для оптимізації контейнерних перевезень на морських лініях є ефективним інструментом підвищення економічної та операційної результативності транспортних систем. Запропонована методика побудови моделі з урахуванням черговості заходів суден у порти та можливостей зберігання контейнерів дозволяє формалізувати складні логістичні процеси у вигляді орієнтованої мережі, придатної для автоматизованого опрацювання.

Використання алгоритмів оптимального потоку, методу потенціалів, евристичних процедур для задач великої розмірності забезпечує швидке отримання оптимальних або наближених до оптимальних рішень у режимі, наближеному до реального часу. Поєднання математичного моделювання з інструментами програмної реалізації та інтеграція з інформаційними системами управління транспортом підвищують гнучкість і масштабованість розробленої методики.

Отримані результати свідчать про зменшення сукупних витрат на транспортування та зберігання контейнерів, скорочення порожніх пробігів і підвищення ефективності використання контейнерного парку. Можливість сценарного аналізу дає змогу транспортним операторам адаптувати плани до змін попиту, графіків руху та позаштатних ситуацій.

Розроблений підхід може бути успішно впроваджений у практику управління контейнерними перевезеннями не тільки на морських лініях, а і на інших видах транспорту, де актуальною є задача оптимального розподілу вантажопотоків у складних багаторівневих мережах.

ЛІТЕРАТУРА

1. Іваницька О.В., Рощина Н.В., Сербул Р.С. Транспортна задача лінійного програмування. *Агросвіт*. 2015. Вип. 14. С. 35–40.
2. Bielli M., Bielli A., Rossi R. Trends in models and algorithms for fleet management. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*. 2011. Vol. 20. P. 4–18. DOI: [10.1016/j.sbspro.2011.08.004](https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2011.08.004)
3. Прокудін Г.С. та ін. Розв'язання мережевих транспортних задач у середовищі Excel. *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: технічні науки*. 2020. Т. 31. Вип. 5. С. 214–219. URL: <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2020.5/35>.
4. Кавун Г.М. Економіко-математичні моделі для розрахунку оптимального планування вантажоперевезень в аграрних підприємствах. *Таврійський науковий вісник. Серія: Економіка*. 2021. Вип. 10. С. 38–44. URL: <https://doi.org/10.32851/2708-0366/2021.10.5>.
5. Кузькін, О.Ф., Муковська Д.Я., Райда І.М., Веремеєнко Л.А. Оптимізація оперативного управління використання парку автомобільних транспортних засобів промислового підприємства. *Вісник Херсонського національного технічного університету*. 2024. Вип. 1(88). С. 63–71. URL: <http://dx.doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2024.1.8>.
6. Тарас Кобильник, Оксана Сікора, Тетяна Вдовичин. Методичні аспекти розв'язування транспортної задачі з мовою python. *Молодь і ринок*. 2024. № 13. С. 72–77. URL: <https://doi.org/10.24919/2308-4634.2024.320565>.
7. Pinto R., Lagorio A., Golini R. Urban Freight Fleet Composition Problem. *IFAC-PapersOnLine*. 2018. Vol. 51(11). P. 582–587. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.08.305>
8. Lemme, R.F.F., Arruda, E.F., Bahiense, L. Optimization model to assess electric vehicles as an alternative for fleet composition in station-based car sharing systems. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. 2019. Vol. 67, p. 173–196. URL: <https://doi.org/10.1016/j.trd.2018.11.004>
9. Development of Vehicle Speed Forecasting Method for Intelligent Highway Transport System / G. Prokudin et al. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. №. 4/3 (100). P. 6–14. DOI: 10.15587/1729-4061.2019.174255
10. O. Prokudin. Application of Information Technologies for the Optimization of Itinerary when Delivering Cargo by Automobile Transport. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. №. 2/3 (92). P. 51–59. DOI: 10.15587/1729-4061.2018.128907

REFERENCES

1. Ivanytska, O. V., Roshchyna, N. V., & Serbul, R. S. (2015). Transportation problem of linear programming. *Agrosvit*, (14), 35–40 [in Ukrainian].
2. Bielli, M., Bielli, A., & Rossi, R. (2011). Trends in models and algorithms for fleet management. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 20, 4–18. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2011.08.002>
3. Prokudin, H. S., et al. (2020). Solving network transportation problems in the Excel environment. *Scientific Notes of Taurida National V. I. Vernadsky University. Series: Technical Sciences*, 31(5), 214–219 40 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2020.5/35>
4. Kavun, H. M. (2021). Economic and mathematical models for calculating optimal freight transport planning in agricultural enterprises. *Tavriya Scientific Bulletin. Series: Economics*, (10), 38–44 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.32851/2708-0366/2021.10.5>
5. Kuzkin, O. F., Mukovska, D. Ya., Rayda, I. M., & Veremeyenko, L. A. (2024). Optimization of operational management of the use of industrial enterprise vehicle fleets. *Bulletin of Kherson National Technical University*, 1(88), 63–71 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2024.1.8>

6. Kobylnyk, T., Sikora, O., & Vdovychyn, T. (2024). Methodical aspects of solving the transportation problem using Python language. *Youth and the Market*, (13), 72–77 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.24919/2308-4634.2024.320565>
7. Pinto, R., Lagorio, A., & Golini, R. (2018). Urban freight fleet composition problem. *IFAC-PapersOnLine*, 51(11), 582–587. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.08.305>
8. Lemme, R. F. F., Arruda, E. F., & Bahiense, L. (2019). Optimization model to assess electric vehicles as an alternative for fleet composition in station-based car sharing systems. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 67, 173–196. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2018.11.004>
9. Prokudin, G., et al. (2019). Development of vehicle speed forecasting method for intelligent highway transport system. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4/3(100), 6–14. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.174255>
10. Prokudin, O., et al. (2018). Application of information technologies for the optimization of itinerary when delivering cargo by automobile transport. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2/3(92), 51–59. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.128907>

Volodymyr Ovcharuk, Inna Yushchuk

COMPUTER MODELLING AND OPTIMISATION OF CONTAINER TRANSPORT ON SEA ROUTES BASED ON A NETWORK TRANSPORT PROBLEM

The purpose of this article is to develop and improve the methodology of mathematical modeling and optimization of container transportation in maritime transport networks, taking into account the dynamics of vessel schedules and the specifics of port operations. The research is aimed at creating a universal methodology that ensures higher efficiency of logistics flow management, reduction of operating costs, and better utilization of the container fleet. Particular attention is paid to developing models that consider the sequence of vessel arrivals at ports, the possibility of storing containers between arrivals, and the balance between owned and leased containers, which plays a key role in the functioning of modern transport and logistics systems.

The study reviews contemporary approaches to transportation optimization and identifies unresolved issues, particularly the insufficient integration of dynamic factors into network transport models. A mathematical model is proposed in the form of a directed graph, where nodes represent ports, storage facilities, and vessels, while arcs describe the possible routes of container flows with associated costs and time constraints. The solution approach combines methods of linear and integer programming, optimal flow algorithms, and the potentials method. The practical implementation was carried out in Python using the PuLP and NetworkX libraries, which enabled the automated construction of the network and scenario-based analysis under different operating conditions of maritime container transportation. Computational experiments demonstrated that the proposed approach reduces total transportation and storage costs by 12–18%, decreases empty runs by 15–20%, improves the efficiency of using owned containers by 10–15%, reduces the share of leased containers by 10–15%, and shortens computation time by 40–50% compared to traditional planning methods.

The obtained results confirm the feasibility of applying the developed methodology in maritime container transport management systems. The model is characterized by its universality and adaptability to dynamic changes in vessel schedules, making it suitable for practical implementation by logistics companies and transport operators. The proposed approach ensures improved economic efficiency of transport systems, better use of port infrastructure, and supports the development of integrated transport and logistics networks. Future research directions include extending the model to multimodal transportation and incorporating risk and uncertainty factors into decision-making processes.

Keywords: optimization, network transport model, transportation problem, potentials method, logistics, container transportation, maritime transport networks

Стаття прийнята 04.09.2025

© Шарко О.В., Дорошенко А.С.

THE IMPACT OF ENVIRONMENTAL FLUCTUATIONS ON THE PERFORMANCE OF INTERNATIONAL MARITIME TRANSPORTATION

This article presents an analytical review of the current state of global maritime fleet development and the impact of environmental fluctuations on the efficiency and effectiveness of international maritime transport. The research objective is to develop information and analytical tools to support maritime transport logistics processes in the face of unpredictable environmental changes, which is essential for improving the efficiency of international maritime transport management. The article notes the dominance of vessels of various functional purposes in maritime trade. China's dominance is supported by the bulk carrier and container ship sector, Japan by refrigerated vessels and liquefied petroleum gas vessels, the United States by cruise ships, and Singapore by vessels transporting liquefied natural gas and supporting offshore fields. The article determines that, against the backdrop of growing international transport, disruptions and interruptions associated with geopolitical conflicts and climate risks are observed. A substantive interpretation of the impact of geopolitical conflicts on the efficiency of maritime transport is offered. An analysis of the components of the influence of the external environment on the efficiency of transport is provided. The paper outlines the key trends in the modern development of maritime freight transportation in the context of dynamic environmental changes, including a 2% growth in global seaborne trade with significant cost fluctuations, regional transport disruptions, and rising consumer prices caused by rising freight rates. Recommendations and prospects for the development of maritime transportation in an uncertain environment are offered, including the use of modern low-carbon fuel technologies, coordinated route planning, and the development of new logistics solutions.

Keywords: transportation, international sea routes, analysis, status, external environment, obstacles, classification, trends, recommendations

Statement of the problem.

The relevance of this work relates to maritime logistics management processes under conditions of uncertain external disturbances on the operation of shipping facilities. Complex, constantly changing maritime shipping conditions negatively impact their implementation. When preparing shipping plans, it is necessary to consider, in addition to possible navigational and climatic conditions for their duration, intensity, and timing, equipment performance characteristics (fuel consumption, transit speed, main engine loads, etc.), as well as economic factors related to overall shipping costs associated with deviations from planned international routes, additional fuel consumption, and personnel salaries. Planning in advance for possible changes in maritime shipping conditions is virtually impossible, requiring management decisions to be made under conditions of uncertain environmental influences.

An analysis of recent research and publications on this issue shows that the necessary information on the impact of environmental fluctuations on maritime transport is reflected in estimates contained in statistical compendiums [1, 2]. However, a detailed analysis of the causes of environmental influence on the efficiency of international maritime transport is not provided. Uncertainty in management is associated with insufficient information on the conditions of specific situations during transport transitions, as well as a low degree of predictability and foresight of these conditions. Uncertainty is associated with risk in maritime transport management [3, 4].

In [5], it is noted that logistics in ports and maritime supply chains has reached such a level of complexity that decision-making under uncertainty requires the use of analytical methods in the form of decision support systems for various operational tasks. The problems and trends of the maritime shipping industry are specified. The rapidly changing external environment forces adaptation to external disturbances and the selection of appropriate management tools. In [6], the characteristics and patterns of functioning of maritime shipping

companies are examined in the context of permanent changes in the economic situation with the expansion of regulatory influences from international maritime organizations. In [7], factors hindering the systemic development and realization of the potential of multimodal transportation from the perspective of logistics and transportation are identified. A single-criteria approach to optimal planning of maritime transportation cannot currently be considered satisfactory, as there is no universal indicator that can be applied as a single criterion of optimality.

Maritime traffic management based on the exchange of digital information and optimization of the maritime transportation chain is considered in [8]. Factors for effective resource management include improved situational awareness on the bridge, timely arrival at port, and shorter routes.

The maritime transport and logistics sector requires intensive data exchange for effective management and decision-making. The integration of Internet of Things (IoT) technologies in the maritime industry [9] includes vessel tracking, emissions monitoring, and cargo delivery security. IoT solutions, adapted to the current needs of the maritime transport sector, are aimed at intelligentizing maritime services. [10] identifies key research challenges and trends in testing external induced loads, humidity, and transparency of bulk cargo during maritime transportation.

An analysis of information on maritime transport management tools under uncertainty allowed us to identify key processes in modern maritime transport information support and determine their focus on improving transport efficiency.

An unresolved aspect of the overall problem of managing the development of international maritime transport includes an assessment of the current state and the degree of influence of the external environment on process efficiency.

The aim of this work is to study the impact of environmental fluctuations on the performance and efficiency of international maritime transport and trends in these changes. To achieve this, the following tasks must be completed:

- compilation of an information and analytical database on global maritime transport;
- determining the volume of international maritime transport and its development trends;
- identifying the factors hindering the development of international maritime transport;
- specifying geopolitical conflicts and climate risks;
- drawing conclusions and recommendations.

Contribution to the main material of the investigation.

The global merchant fleet plays a key role in the global economy, transporting goods over long intercontinental distances. Countries with developed maritime fleets can export their goods and import necessary resources. Maritime transport accounts for up to 80% of all global shipping. In 2025, the global order book amounted to 5,404 vessels with a total deadweight of 346 million tonnes, a 15% increase over 2023 figures [2]. The development of the global maritime fleet is characterized by an increase in orders for vessels with increased transport volumes.

Today, the main categories of vessels—bulk carriers, tankers, container ships, and gas carriers—account for more than 90% of the total maritime fleet by tonnage. China has the largest fleet by number of vessels. China's dominance is supported by the development of the bulk carrier and container ship sectors, valued at US\$68.4 billion. Japan is the leader in the liquefied petroleum gas and refrigerated cargo segment, with a vessel value of \$49.9 billion. Greece has the largest tanker fleet, exerting strategic influence on global shipping lanes and enabling it to capitalize on geopolitical shifts. The United States continues to dominate the cruise sector, valued at \$58.6 billion. Singapore serves the petroleum gas and offshore support market, with a fleet valued at \$107.2 billion. Singapore's strategic location and developed port infrastructure have made it a maritime hub.

The sharp rise in ship prices is due to disruptions to maritime transport in the Red Sea, as ships divert their routes around the Cape of Good Hope to avoid military action. In December 2023, the political situation in the Middle East escalated, leading to attacks on cargo vessels transiting the Bab el-Mandeb Strait, which connects the Red Sea and the Gulf of Aden. Shippers are forced to seek alternative routes.

The dynamics of international maritime transport per ton of cargo, with a shift toward longer routes, is presented in Figure 1 [2].

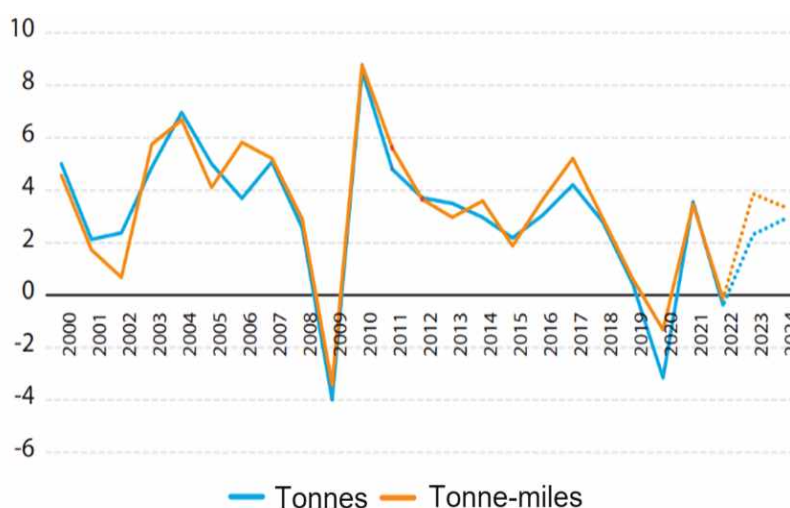


Fig. 1 – International Sea Transport Dynamics

Bypassing the African continent around the Cape of Good Hope adds 14-15 days to the Red Sea voyage on the China-Europe route. Bypassing Africa increases the distance and time of crossings, which in turn increases demand for vessels by 3% and container ships by 12% [1]. The increased route lengths have led to an increase in the number of port calls. This has complicated the maritime operational environment and exacerbated environmental problems associated with additional carbon dioxide emissions caused by increased fuel consumption and faster vessel speeds. The challenging operational environment for maritime transport, driven by geopolitical conflicts and climate risks, is hampering the stability of maritime trade. The increased route lengths have led to congestion, particularly in Asia, which accounts for 60% of global container trade. By mid-2024, vessel transit through the Suez Canal had declined: throughput through the Gulf of Aden had fallen by 76%, while transit through the Cape of Good Hope had increased by 85%. Lengthening the routes had led to increased costs for fuel, wages, and insurance, and had caused an increase in atmospheric emissions. Rising trade costs and shipping tariffs had led to an increase in global consumer prices. Simulation calculations show a 0.9% increase in consumer prices. This will have the greatest negative impact on the development of small island developing states, as these countries depend on maritime transport, particularly on the import and export of food products. Due to global changes and disruptions in strategically important shipping lanes, real GDP is projected to decline by 0.06%, and in these countries, the decline may be nearly halved, as meteorological factors such as air temperature, wind speed, direction, and precipitation intensity are the determining factors.

According to the UN Conference on Trade and Development, they will grow by 0.6% in 2025 due to rising shipping costs. The dynamics and trends in maritime trade demonstrate the continued focus on international maritime transport.

The concept of risk is associated with an assessment of the probability of occurrence of events, while the concept of uncertainty does not have such an assessment of probability. There are differences in the cause-and-effect relationships of both concepts. Uncertainty is generated by incomplete information, the randomness of the manifestation of external unstable connections, the result of the intersection of independent processes and events. Risk is directly related to decision-making. The concept of uncertainty is ambiguous, while risk has a quantitative dimension. In this case, risks should first be identified, and then a number of precautionary measures should be taken to reduce or eliminate them.

The war in Ukraine and restrictions on shipping in the Black Sea forced Egypt to purchase grain from Brazil. In September 2023, Turkey implemented additional technical safety protocols, which resulted in delays in adapting to the new regulations.

Climate change is among the factors that determine the impact of external conditions on the functioning of the international maritime shipping sector. Storms, hurricanes, fog, and ice are the causes of disruptions to shipping schedules due to low water levels in the Panama Canal, and sometimes even transport accidents due to tsunamis in countries such as Japan and South Korea.

There is no universally accepted definition of geopolitical conflicts due to the diversity of political, economic, and international legal aspects. The semantic content of the term geopolitical conflict is understood as a manifestation of interstate contradictions at a stage of significant escalation.

In their most obvious interpretation, geopolitical conflicts result from the interaction of parties to pursue their interests, using all available means within the relevant international relations. They exhibit characteristics of perceived necessity, increasing tension, and pressure without the use of external force. Based on these definitions, a general description and specific use of geopolitical conflict in maritime transport is presented in Table 1.

Table 1 Geopolitical conflicts in maritime transport

General features and characteristics	Features of manifestation in maritime transport
Rising tensions	Manifestation of interstate contradictions
Pressure without resorting to military action	Protective measures
Changing the rules of conduct for interacting parties	Timely response to changes in transportation conditions
Interstate discrepancy and inconsistency	Agreements and protocols
Fulfilling one's own interests at the expense of other countries	Adequacy of responses
Pirate attacks	Changing routes and transition plans

Geopolitical conflict in maritime transport exacerbates the destructive effects of international relations. The causes of conflict include:

- competition between states;
- conflicting national interests;
- territorial claims.

A diagram of the environmental impact on maritime transport performance, compiled based on the information presented, is presented in Figures 2 and 3.

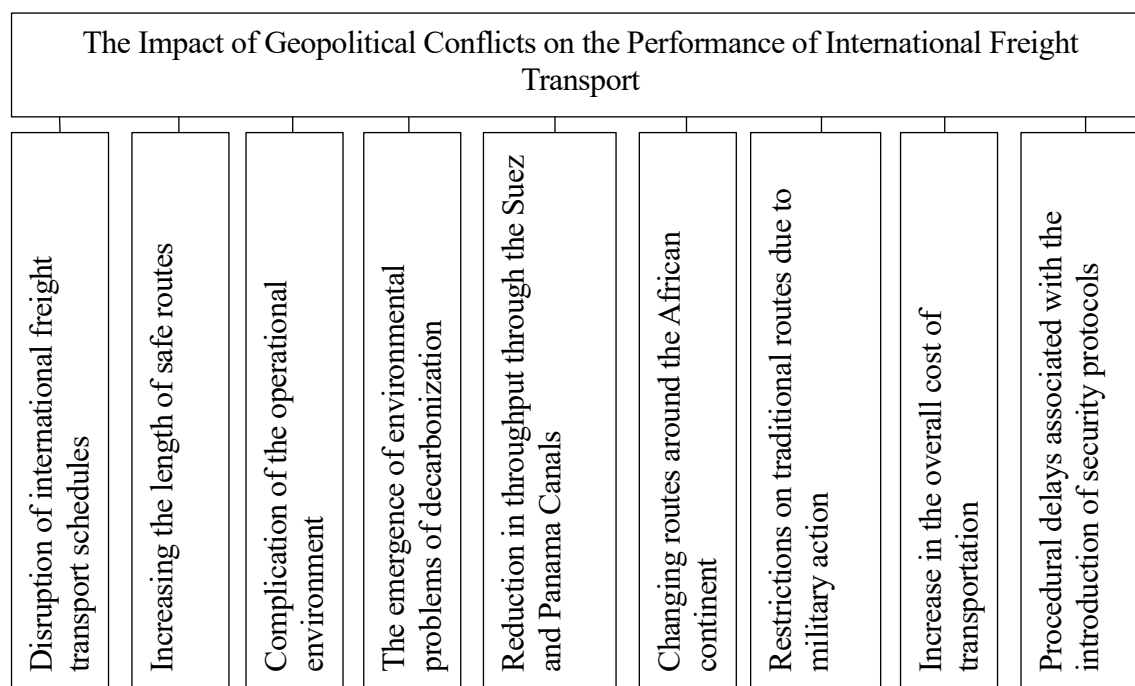


Fig. 2 – The impact of geopolitical conflicts on the performance of international freight transport

Global climate change is associated with long-term weather fluctuations caused by both natural conditions of increased solar activity, melting glaciers, shallowing of riverbeds and water areas, and anthropogenic human

activity associated with deforestation, drainage of wetlands, and an increase in the greenhouse effect from the combustion of fuel in international maritime transport. The consequences of this are global changes in sea level, extreme changes in weather conditions, hurricanes, tornadoes, and tsunamis. Climate change has led to an imbalance in natural systems: melting glaciers, rising sea levels, changing precipitation patterns, and an increase in the frequency of extreme events. Recommendations from analysts at the UN Conference on Trade and Development [2] propose joint action, because climate change affects every country, as a link is observed between climate change and the occurrence of natural disasters. It is noted that with rising sea levels, low-lying areas of the United States, Great Britain, Italy, Germany, and Denmark will be flooded. Urgent and ambitious action is needed to support the sustainability of climate change and risk reduction measures in the use of transport technologies.

Artificial intelligence and machine learning will be potentially transformative technologies in predicting changes in navigation and weather conditions. Various insights from advanced satellite technologies, Internet of Things innovations, and digitalization can be used not only to detect climate change but also to proactively address environmental impacts on the performance of international transport.

Climate change impacts integrated socio-ecological systems [11], disrupting their sustainable functioning and causing irreversible changes. Sea ice is declining, permafrost is melting faster, heat waves and heavy precipitation are increasing, and water resources are depleting. These impacts are changing lifestyles, management strategies, technological solutions, and implementation measures. It is necessary to develop, integrate, and adjust strategies for interaction between economic actors in the context of changing climate conditions and climate adaptation over time.

The combination of geopolitical tensions, the impacts of climate change, and armed conflicts has led to disruptions and interruptions in trade and supply chains.

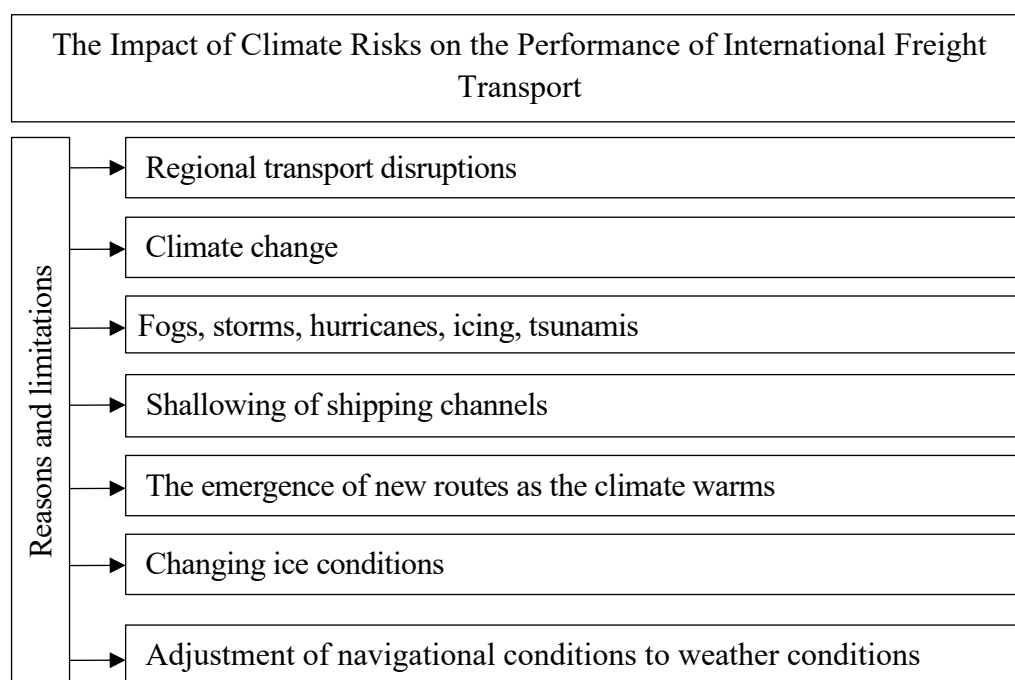


Fig. 3 – The impact of climate risks on the performance of international freight transport

The key trends in global maritime freight transport are:

- 2% growth in global seaborne trade, with significant cost changes;
- regional transport disruptions related to the refinement of the Suez and Panama Canals, port congestion, and increased operating costs;
- freight growth associated with increased distances and higher insurance premiums;
- rising consumer prices driven by rising freight rates.

According to UNCTAD forecasts [1], global seaborne trade will grow by an average of 2.4% in 2029.

The recommendations of the United Nations Conference on Trade and Development are aimed at coordinated action in the areas of navigation and adaptation, increased investment in low-carbon fuels, the use of modern technologies in forecasting, more precise route planning through the development of software and hardware for managing uncertain external influences, and the development of flexible logistics solutions.

To improve safety, reliability, and resilience, the maritime logistics sector must embrace new digital technologies. As maritime logistics overcomes the challenges, priority must be given to developing management tools to cope with the uncertain impact of external disturbances, helping to withstand disruptions and adapt to their sources. The external environment is becoming increasingly fluid and unpredictable, adding new challenges and tasks to maritime transport performance. It's important to maintain focus not on the final goal, but to apply a specific set of knowledge to achieve it and implement it in specific conditions.

Evidence and prospects for further exploration in this direction.

The novelty of this work lies in its systematization and classification of the impact of geopolitical conflicts and climate risks on the efficiency of maritime transport. It outlines the key trends in the modern development of maritime freight transport in the context of dynamic environmental changes, including a 2% growth in global seaborne trade with significant cost fluctuations, regional transport disruptions, and rising consumer prices caused by rising freight rates. Recommendations and prospects for the development of maritime transport in an uncertain environment are offered, including the use of modern information-intelligence technologies for managing low-carbon fuel development, coordinated route planning, and the development of new logistics solutions. This allows for the discovery of new directions for the further development of international transport.

List of Wikorista Gerels

1. Review of maritime for 2021 United Nation Organization Overview, https://unctad.org/system/files/official-document/rmt2021_en_0.pdf, (2024)
2. Review of maritime for 2023 United Nation Organization Overview, <https://unctad.org/publication/review-maritime-transport-2023>, (2023)
3. Sharko O.V., Doroshenko O.S., Zhyshchynskiy Y. S.: Improving the efficiency of transport logistics in conditions of uncertainty and risk. Матеріали XVII Міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті». MINTT-2025. 28–30 травня 2025 року, Одеса, Україна, pp. 245-248 (2025). URL: <https://ksma.ks.ua/wp-content/uploads/2025/05/%D0%9C%D0%B0%D1%82%D0%B5%D1%80%D1%96%D0%B0%D0%BB%D0%B8-%D0%9C%D0%86%D0%9D%D0%A2%D0%A2-2025-%D1%80..pdf>
4. Sharko O., Doroshenko O.: Increasing the efficiency of transport by optimising the management structure of complex logistics scheme. Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті. 2025. №1(24). PP. 89-101. DOI: 10.36910/automash.v1i24.1712
5. Mar-Ortiz, J., Gracia, M.D., Castillo-García, N. Challenges in the design of decision support systems for port and maritime supply chains (2018) Studies in Computational Intelligence , 764, pp.49-71.
6. Яворская А.Ф. Критериальные ограничения устойчивого развития локальных морских транспортных комплексов. Економіка та управління національним господарством 2018, вип.17, С.182-188
7. Ступникова Е.А., Резинкин Д.Е. Анализ неопределенности развития международных грузовых контейнерных перевозок. Вестник Евразийской науки 2023, Т.15, №6, С.29-32
8. Lind, M., Hägg, M., Siwe, U., Haraldson, S. Sea Traffic Management - Beneficial for all Maritime Stakeholders (2016) Transportation Research Procedia, 14, pp. 183-192.
9. Plaza-Hernández, M., Gil-González, A.B., Rodríguez-González, S., Prieto-Tejedor, J., Corchado-Rodríguez, J.M. Integration of IoT technologies in the maritime industry (2021) Advances in Intelligent Systems and Computing, 1242 AISC, pp. 107-115.
10. Zhao, Z., Wu, W., Zheng, Q., Yu, X., Yu, S. Three elements of liquefaction risk of liquefiable solid bulk cargoes during sea transport: Critical review (2023) Marine Georesources and Geotechnology, 41 (12), pp. 1465-1483.
11. Newlands, N.K. Big Data Governance, Technology, and Implementation in Climate-Resilient Societies(2022) The Palgrave Handbook of Climate Resilient Societies: Volumes 1-2, 2, pp. 1341-1360

Автори випуску

Александровська Надія Ігорівна, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри суднобудування і судноремонт ім. проф. Ю.Л. Воробйова Одеського національного морського університету м. Одеса, [ORCID 0000-0001-6591-2068](#)

Бажак Ольга Валеріївна, доктор філософії, доцент кафедри інженерних дисциплін Дунайського інституту Національного університету «Одеська морська академія», м. Ізмаїл, Україна, ORCID 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

Василенко Володимир Миколайович, кандидат історичних наук, доцент, старший викладач кафедри навігації та управління суднами Навчально-наукового Київського інституту водного транспорту імені гетьмана Петра Конашевича-Сагайдачного Національного транспортного університету ORCID 0000-0002-8511-0772

Войченко Тетяна Олександрівна, к.е.н., доц., доцент кафедри логістики Державного університету «Київський авіаційний інститут», м. Київ, . ORCID [0000-0002-0109-4622](#)

Вяла Юлія Едуардівна, старший викладач кафедри прикладної математики Навчально-наукового Київського інститут водного транспорту імені Петра Конашевича-Сагайдачного Національного транспортного університету, м. Одеса, ORCID 0000-0003-0369-3570

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](#)

Гаценко Лариса Володимирівна, доктор філософії, доцент кафедри соціальних комунікацій Навчально-наукового Київського інституту водного транспорту імені гетьмана Петра Конашевича-Сагайдачного Національного транспортного університету, м. Київ, ORCID 0000-0003-1210-5726

Гейлик Анастасія Вадимівна, кандидат педагогічних наук, доцент, доцент кафедри прикладної математики Навчально-наукового Київського інститут водного транспорту імені Петра Конашевича-Сагайдачного Національного транспортного університету, м. Київ, ORCID 0000-0002-4675-5711

Голіков Володимир Володимирович, доктор технічних наук, професор, професор кафедри навігації і керування судном Одеського національного морського університету, м. Одеса, ORCID [0000-0003-1591-3016](#);

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

Гончарук Ірина Павлівна, кандидат технічних наук, доцент, Одеського національного морського університету, доцент кафедри навігації і керування судном, м. Одеса, ORCID: 0000-0002-5306-4206,

Гусев Віктор Миколайович, професор, Херсонська державна морська академія, професор кафедри загальнофахової підготовки та морської безпеки, м. Херсон, ORCID 0000-0001-7775-2276,

Давидов Володимир Семенович, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри судноводіння та керування судном Київського інститут водного транспорту імені Петра Конашевича- Сагайдачного Національного транспортного університету, м. Київ

Дембрович Олександр Олександрович, старший викладач кафедри навігації та управління суднами Навчально-наукового Київського інституту водного транспорту імені гетьмана Петра Конашевича-Сагайдачного Національного транспортного університету, м. Київ, ORCID 0000-0002-3625-7225

Долинська Наталія Борисівна, аспірант кафедри навігації і керування судном, Одеського національного морського університету, м. Одеса, ORCID 0009-0003-1347-0538

Дорошенко Олексій Сергійович, аспірант кафедри транспортних технологій та механічної інженерії, Херсонська державна морська академія, Україна, ORCID [0009-0002-2999-569X](#)

Заєць Анастасія Юрївна, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри суднобудування і судноремонту ім. проф. Ю.Л. Воробйова Одеського національного морського університету, м. Одеса, ORCID [0000-0002-5803-9069](#);

Зазірний Андрій Андрійович, доктор філософії, доцент кафедри навігації і управління суднами Навчально-наукового Київського інституту водного транспорту імені гетьмана Петра Конашевича-Сагайдачного Національного транспортного університету, ORCID [0000-0002-5780-4654](#)

Калініченко Євгеній Володимирович, канидат 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);

Капустян Олексій Євгенович, кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедрою інтегровані технології зварювання та моделювання конструкцій Національного університету «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, ORCID [0000-0002-8979-8076](https://orcid.org/0000-0002-8979-8076),

Квасников П. К., ст. викладач кафедри навігації і управління судном Дунайського інституту Національного університету «Одеська морська академія», м. Ізмаїл, Україна, ORCID 0009-0006-7567-0684

Кирилах Світлана Вікторівна, здобувачка вищої освіти третього (освітньо-наукового) рівня вищої освіти за спеціальністю «Матеріалознавство», кафедри композиційних матеріалів, хімії та технологій, Національний університет «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-5688-5616>,

Коломієць Дмитро Павлович, старший викладач кафедри навігації та управління суднами Навчально-наукового Київського інституту водного транспорту імені гетьмана Петра Конашевича-Сагайдачного Національного транспортного університету, м. Київ, ORCID 0009-0002-7548-1999

Корбан Дмитро Вікторович, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри управління судном Національного університету «Одеська морська академія», м. Одеса ORCID: 0000-0002-6798-2526,

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 0000-0001-6716-679

Куценко Юрій Олексійович, Херсонська державна морська академія, старший викладач кафедри Загальнофахової підготовки та морської безпеки, м. Херсон, ORCID 0000-0001-8868-3632

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

Любарець Ігор Олександрович, аспірант кафедри навігації і управління судном Київського інститут водного транспорту імені Петра Конашевича-Сагайдачного Національного транспортного університету, м. Київ, ORCID 0000-0003-1810-1435.

Ляшко Ольга Вікторівна, кандидат фізико-математичних наук, доцент, завідувач кафедри прикладної математики Навчально-наукового Київського інститут водного транспорту імені Петра Конашевича-Сагайдачного Національного транспортного університету, м. Київ, ORCID 0000-0003-2616-898X

Маркітан Володимир Володимирович Старший викладач, Національний університет «Одеська морська академія», Навчально-науковий інститут навігації, м. Одеса, ORCID: 0009-0009-4720-6181

Муравйов Гліб Миколайович, аспірант Національного університету «Одеська морська академія», Навчально-науковий інститут навігації, м. Одеса, Україна, ORCID: 0009-0008-1739-4399

Овчарук Володимир Олексійович, к.т.н., доцент кафедри інформаційних технологій, штучного інтелекту і кібербезпеки, Національний університет харчових технологій, м. Київ, ORCID: 0000-0002-8994-976X,

Панов Сергій Львович, канд. техн. наук, доцент кафедри суднових енергетичних установок, допоміжних механізмів суден та їх експлуатації Навчально-наукового Київського інституту водного транспорту імені гетьмана Петра Конашевича-Сагайдачного Національного транспортного університету, м. Київ, ORCID 0000-0002-4512-9030

Пастух Олександр Васильович, старший викладач кафедри електрообладнання та автоматики водного транспорту, Навчально-наукового Київського інституту водного транспорту імені гетьмана Петра Конашевича-Сагайдачного Національного транспортного університету, м. Київ ORCID 0009-0004-1940-1063

Перевертов Деніс Сергійович, аспірант Національного університету «Одеська морська академія», Навчально-науковий інститут інженерії, м. Одеса, Україна ORCID: 0009-0008-1832-3234

Перетяка Наталія Олександрівна, канидат технічних наук, доцент, доцент кафедри машинознавство й інженерна механіка Одеського національного морського університету, м. Одеса, ORCID 0000-0003-3370-2140

Пізніцалі Людмила Вікторівна, канидат технічних наук, доцент, доцент кафедри суднобудування і судноремонт ім. проф. Ю.Л. Воробйова Одеського національного морського університету, м. Одеса, ORCID [0000-0002-8046-0917](https://orcid.org/0000-0002-8046-0917)

Разінкін Роман Олександрович, старший викладач Дунайського інституту Національного університету «Одеська морська академія» м. Одеса, ORCID 0000-0002-5817-7445.

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](#)

Россомаха Олена Ігорівна – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри навігації і керування судном, доцент кафедри суднобудування і судноремонт ім. проф. Ю.Л. Воробйова Одеського національного морського університету, м. Одеса, ORCID [0000-0002-4425-2192](#)

Сагін Сергій Вікторович, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри суднових енергетичних установок Національного університету «Одеська морська академія», м. Одеса, ORCID [0000-0001-8742-2836](#)

Сівашенко Тетяна Володимирівна, к.е.н., доц., доцент кафедри логістики Державного університету «Київський авіаційний інститут», м. Київ, ORCID [0009-0009-6424-469X](#)

Сокол Альона Олександрівна, Херсонська державна морська академія, доцент кафедри загальнофахової підготовки та морської безпеки, м. Херсон ORCID 0000-0002-8179-453X

Сокол Ігор Васильович, Херсонська державна морська академія, доцент кафедри навігації та управління судном, м. Херсон, ORCID 0000-0002-7324-1441

Степук Василь Аркадійович, старший викладач кафедри суднових енергетичних установок, допоміжних механізмів суден та їх експлуатації Навчально-наукового Київського інституту водного транспорту імені гетьмана Петра Конашевича-Сагайдачного Національного транспортного університету, м. Київ, ORCID 0000-0001-5703-1674

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](#)

Шарко Олександр Володимирович – доктор технічних наук, професор, професор кафедри транспортних технологій та механічної інженерії, Херсонська державна морська академія, ORCID [0000-0001-9025-7990](#)

Юцук Інна Василівна, старший викладач кафедри інформаційних технологій, штучного інтелекту і кібербезпеки, Національний університет харчових технологій, м. Київ, ORCID 0000-0003-1420-0356