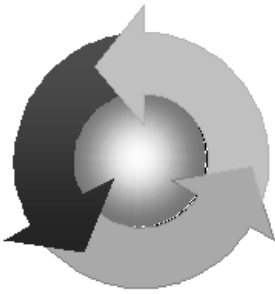


Міністерство освіти і науки України
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ОДЕСЬКА МОРСЬКА АКАДЕМІЯ»

Суднові енергетичні установки



Науково-технічний
збірник


Випуск 52

Одеса
2026


УДК 629.5


Суднові енергетичні установки: науково-технічний збірник. – 2026. – Вип. 52. –188 с.


Збірник присвячено проблемам суднової енергетики, проектування, модернізації та експлуатації суднових енергетичних установок, методам підвищення ефективності і надійності використання суднових технічних засобів.


Головний редактор: д-р техн. наук, проф. Сагін Сергій Вікторович , Національний університет "Одеська морська академія", Україна.


Члени редколегії:


> д-р техн. наук, проф. Будашко Віталій Віталійович , Національний університет "Одеська морська академія", Україна;


> канд. техн. наук, доц. Заблоцький Юрій Вікторович , Національний університет "Одеська морська академія", Україна;


> д-р техн. наук, проф. Хлієва Ольга Яківна , Національний університет "Одеська морська академія", Україна;


> д-р техн. наук, проф. Фомін Олексій Вікторович , Національний транспортний університет, м. Київ, Україна;

> д-р техн. наук, проф. Шумоло Олександр Миколайович , Одеський національний морський університет, Україна;

> д-р техн. наук, проф. Шевцов Анатолій Павлович , Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Миколаїв, Україна;

> Dr. Puzdrowska Patrycja , Gdańsk University of Technology, Ship Power Plant Department, Poland;

> Dr. Kučera Pavel , Brno University of Technology, Faculty of Mechanical Engineering, Czech Republic;

> Dr. Ierin Volodymyr , NingboTech University, People's Republic of China.

Адреса редакційної колегії: Україна, 65029, Одеса, вул. Дідріхсона, 8, Національний університет «Одеська морська академія» (НУОМА).

Комп'ютерна верстка Журавльов Ю.І. e-mail: ivanovich1zh@gmail.com, тел. +38-067-558-13-28.

Випуск затверджено вченою радою НУОМА, протокол № 9 від 30.04.2026 р.

ISSN 1815-6770 Print

ISSN 3083-7901 Online

©Національний університет "Одеська морська академія", 2026

Зміст

Голікова В.В., Крайнова В.І., Розлуцький О.М. Інтегрована проактивна модель забезпечення безпеки професійної діяльності під час експлуатації морських суден в умовах використання альтернативних палив і цифровізації	5
Кривий М.О., Кривий О.Ф. Критерій режимів роботи підшипників ковзання суднового пропульсивного комплексу із урахуванням неньютонівської поведінки мастил.....	20
Корбан В.Х., Шумілова К.В. Ефективність очищення випускних газів суднових енергетичних установок електромагнітною хвилею кругової поляризації.....	35
Парменова Д.Г., Кулешов І.М. Цифрові засоби забезпечення декарбонізації морського транспорту.....	45
Сагін А.С., Заблоцький Ю.В. Особливості експлуатації паливної апаратури високого тиску під час переведення суднових дизелів на паливо з низьким вмістом сірки.....	61
Сагін С.В., Мадей В.В., Даніленко Д.В. Використання біопалива з олії каранджі у суднових дизелях.....	77
Склярєнко І.Ю., Ганношина І.М., Клочков Ю.П., Роздобудько В.В. Інтеграція інноваційних технологій в суднову енергетичну інфраструктуру для підвищення ефективності експлуатації.....	88
Сандлер А. К., Опришко М. О. Волоконно-оптичний візкозіметр для суднових енергетичних установок.....	97
Стукаленко О.М., Дулдїєр А.П. Ефективність постійного опору фрикціона у здвоєному підвісі суднового вантажопідйомного пристрою при відмові шкентеля під час опускання вантажу	107
Фомін О.В., Щербина Ю.В., Мартиненко В.І., Мартиненко Д.І. Комплексний підхід до проектування систем «судно – вагонцистерна» з оптимізацією режимів роботи суднових енергетичних установок.....	116

Vychuzhanin V.V., Vychuzhanin A.V. Dynamic failure risk assessment in ship power plants using cognitive digital twins	125
Zhuravlov Yu.I., Bogach V. M. Prediction of the onset of fatigue failure of ship propeller shafts	152
Реферати.....	166
Правила оформлення і подання рукописів для збірника «Суднові енергетичні установки».....	186

DOI: 10.31653/smf52.2026.5-19

дата першого надходження: 11.01.26
дата прийняття статті до друку після
рецензування: 21.02.26
дата публікації: 05.05.26Голікова В.В.¹, Крайнова В.І.², Розлуцький О.М.³¹ORCID 0000-0003-1946-4609, ²ORCID 0009-0005-1843-926X,³ORCID 0000-0003-1920-927X

Національний університет «Одеська морська академія»

**ІНТЕГРОВАНА ПРОАКТИВНА МОДЕЛЬ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ
БЕЗПЕКИ ПРОФЕСІЙНОЇ ДІЯЛЬНОСТІ ПІД ЧАС
ЕКСПЛУАТАЦІЇ МОРСЬКИХ СУДЕН В УМОВАХ ВИКОРИСТАННЯ
АЛЬТЕРНАТИВНИХ ПАЛИВ І ЦИФРОВІЗАЦІЇ**

Постановка проблеми у загальному вигляді. Сучасний етап розвитку морського транспорту характеризується істотним ускладненням умов забезпечення безпеки праці, що зумовлює необхідність перегляду традиційних підходів до її організації. Упродовж тривалого часу в галузі домінувала реактивна модель безпеки праці, за якої основна увага зосереджувалася на розслідуванні вже реалізованих подій – аварій, травм, пожеж, технічних відмов і помилок екіпажу. Такий підхід дає можливість з'ясувати причини інцидентів тільки після їх виникнення, однак в умовах ускладнення суднових систем, інтенсифікації експлуатаційних процесів і появи нових загроз його можливості для запобігання небезпечним подіям залишаються обмеженими. Підтвердженням цього є сучасні тенденції у сфері безпеки судноплавства: за даними класифікаційного товариства DNV (Det Norske Veritas), у 2022–2024 рр. кількість морських інцидентів зростає на 22 %, а кількість пожеж і вибухів – на 42 % порівняно з 2021 року [1].

У зв'язку з цим особливої актуальності набуває інтегрована проактивна модель безпеки праці, орієнтована не на реагування події, що вже відбулися, а на завчасне виявлення, оцінювання та попередження небезпечних станів. Її сутність полягає в системному аналізі факторів ризику ще до їх переходу в аварію або травмування, зокрема в оцінюванні функціонального стану екіпажу, технічного стану обладнання, небезпечних режимів експлуатації, цифрових збоїв, кіберзагроз і специфіки нових енергетичних систем. Такий підхід відповідає сучасним підходам до розроблення суднової системи управ-

ління безпекою, в межах якої безпечність праці доцільно розглядати не лише як результат усунення наслідків інцидентів, а також як своєчасне виявлення відхилень, що передують небезпечним подіям, та забезпечують стійке функціонування суднового середовища [2-5].

Необхідність переходу до інтегрованої проактивної моделі безпеки праці істотно посилюється під впливом енергетичного переходу в судноплаванні. Упровадження альтернативних видів суднового палива, зокрема аміаку, водню, метанолу, скрапленого природного газу та інших перспективних палив для морських суден, зумовлює формування нових профілів професійного ризику, пов'язаних із токсичністю, вибухо- та пожежонебезпечністю, а також з особливими вимогами до зберігання, вентиляції, виявлення витоків і підготовки екіпажу. Європейське агентство з безпеки на морі (European Maritime Safety Agency, EMSA) в [6] зазначає, що чинні стандарти підготовки й компетентності в Кодексі з підготовки і дипломування моряків та несення вахти (Кодекс STCW) не охоплюють усіх аспектів нових паливних систем, які вже впроваджуються в морській галузі. Водночас Міжнародна морська організація (International Maritime Organization, IMO) на 109-й сесії Комітету з безпеки на морі схвалила тимчасові керівні принципи щодо безпеки суден, які використовують аміак як паливо, що вказує на активний процес формування нового нормативного середовища у сфері використання альтернативних палив [7].

Паралельно відбувається інтенсивна цифровізація судових систем, яка проявляється у широкому впровадженні автоматизованих систем управління, цифрових датчиків, програмного забезпечення, засобів дистанційного моніторингу, штучного інтелекту та електронної навігації. За таких умов безпека праці дедалі більше залежить не лише від технічного стану механізмів і професійних дій персоналу, а й від надійності цифрової інфраструктури судна. Це, своєю чергою, актуалізує проблему кіберфізичних ризиків, тобто таких ризиків, за яких цифровий збій, помилка програмного забезпечення або кібератака можуть безпосередньо трансформуватися у фізичну небезпеку – втрату керованості, зіткнення, пожежу, ушкодження обладнання, травмування екіпажу або забруднення морського середовища. Значущість цієї проблеми підтверджується тим, що, наприклад, класифікаційне товариство DNV фіксує підвищений рівень прийнятності кіберризиків в морській галузі, зокрема IMO сформувала міжнародну рамку врахування кіберризиків, Міжнародна асоціація класифікацій-

них товариств (International Association of Classification Societies, IACS) запровадила класифікаційні вимоги до кіберстійкості, а окремі національні морські адміністрації вже імплементували управління кіберризиками до обов'язкових процедур систем управління безпекою суден та безпеки судноплавства [8-10].

Не менш важливим чинником сучасної безпеки праці на морі є психофізіологічний і психосоціальний стан екіпажу. Дослідження Єльського університету (Yale University) та Фонду моряків Міжнародної федерації транспортників (ITF Seafarers' Trust) засвідчило наявність ознак депресії у 25 % опитаних моряків, тривожності – у 17 %, а суїцидальних думок – у 20 % [11]. Матеріали Міжнародної благодійної організації морського добробуту «Місія для моряків» (Mission to Seafarers) і Міжнародна мережа добробуту та допомоги морякам (International Seafarers' Welfare and Assistance Network, ISWAN) підтверджують, що добробут, відпочинок, соціальна взаємодія, відчуття фізичної безпеки та якості організації праці є безпосередньо пов'язаними з реальним рівнем безпеки на борту судна [12-14].

Отже, постановка проблеми полягає в тому, що сучасна система охорони праці на морському транспорті більше не може обмежуватися реакцією на наслідки вже реалізованих інцидентів. Вона повинна бути переорієнтована на управління ризиками, яке враховує одночасний вплив енергетичного переходу, цифрової трансформації судових систем, зростання кіберфізичних загроз, а також психофізіологічних і психосоціальних чинників безпеки праці екіпажу.

Узагальнення наведених джерел дає підстави стверджувати, що така переорієнтація створює передумови для формування інтегрованої проактивної моделі безпеки праці на морському транспорті, здатної забезпечувати своєчасне виявлення небезпечних станів, зменшення професійного ризику та підвищення стійкості судової системи взаємодії людини і техніки в сучасних умовах [1, 5-14].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Сучасні наукові дослідження, аналітичні звіти та нормативні документи з проблематики забезпечення безпеки праці на морському транспорті доцільно систематизувати за кількома взаємопов'язаними напрямками.

Перший напрям охоплює праці й документи, присвячені загальним тенденціям трансформації безпеки судноплавства в умовах технологічних змін, енергетичного переходу та посилення кіберризиків. Так, DNV у звітах про сучасні тенденції у сфері безпеки і кіберпріоритети в морській галузі фіксує зростання кількості інцидентів одно-

часно з посиленням значущості цифрових загроз для безпечної експлуатації суден [1, 8]. EMSA у дослідженні TRAINALTER [6] акцентує увагу на тому, що чинні стандарти підготовки моряків не охоплюють усіх аспектів експлуатації суден з альтернативними паливними та енергетичними системами. Водночас IMO, IACS і USCG формують нормативне підґрунтя для реагування на нові виклики, пов'язані з безпекою суден, що використовують в якості палива аміак, інтеграцією кіберризик-менеджменту до системи управління безпекою та запровадженням обов'язкових вимог кібербезпеки для морської транспортної системи [7, 9, 10, 15].

Другий напрям утворюють дослідження, присвячені цифровізації охорони праці, передусім застосуванню цифрових двійників, штучного інтелекту та засобів імерсивного навчання. У роботах [16-18] цифрові двійники й методи, що ґрунтуються на використанні штучного інтелекту, розглядаються як інструменти діагностування несправностей, прогнозного технічного обслуговування, аналізу ризиків і підтримки прийняття рішень у морському середовищі. Окремий масив праць стосується технологій віртуальної та доповненої реальності (VR/AR-технології) у підготовці екіпажів з питань безпеки. В огляді [19] автори узагальнюють сучасний стан використання VR у тренуванні з пожежогасіння та евакуації, зокрема в [20] автори обґрунтовують доцільність поєднання CFD-моделювання й VR для відтворення пожежних сценаріїв у віртуальному машинному відділенні, а в [21] дослідники показують переваги віртуальної реальності із повним зануренням (імерсивна VR) для навчання динамічної оцінки ризику в морській діяльності. Практичний інтерес до цього напрямку підтверджується також промисловою апробацією технологій цифрового двійника в суднобудуванні та експлуатації суден, зокрема наданням DNV принципового схвалення (Approval in Principle) інтегрованої хмарної системи Hyundai Intelligent Digital Twin Ship (HiDTS), розробленій групою HD Hyundai [22].

Третій напрям охоплює дослідження людського фактора, психофізіологічного стану екіпажу, психосоціальних умов праці та можливостей їх цифрового моніторингу. Дослідження, описане в [11] засвідчує високу поширеність симптомів депресії, тривожності та суїцидальних думок серед моряків. Матеріали Mission to Seafarers демонструють, що рівень задоволеності моряків змінюється під впливом умов праці, доступу до сходу на берег, відчуття безпеки, навчання та організації побуту на борту судна [12, 13]. ISWAN у межах проєкту

«Соціальна взаємодія має значення» (Social Interaction Matters (SIM) Project) доводить, що соціальна взаємодія, відпочинок і щоденні організаційні практики на судні є важливими чинниками добробуту та безпечності праці [14]. Поряд із цим у праці [23] показано, що поєднання датчиків, здатних фіксувати рухи тіла, положення працівника, зміну рівноваги, прискорення, нахили та інші ознаки нестійкості, із методами машинного навчання, які дають змогу аналізувати ці дані та виявляти характерні ознаки небезпечної поведінки чи стану, створює передумови для завчасного виявлення підвищеного ризику падіння моряків під час роботи на судні.

Отже, аналіз зазначених праць дає підстави говорити про поступове зміщення акценту з переважно технічного розуміння безпеки до інтегрованого бачення забезпечення безпеки праці як результату взаємодії технічних, людських, цифрових і організаційних чинників [5, 11-14, 23].

Водночас аналіз опрацьованих джерел свідчить, що більшість публікацій зосереджується на окремих компонентах проблеми – цифрових технологіях, альтернативних паливах, кібербезпеці, психічному здоров'ї, психосоціальних умовах праці та підготовці екіпажів, – не розглядаючи їх у цілісному взаємозв'язку. Це актуалізує необхідність подальшого наукового обґрунтування інтегрованої проактивної моделі безпеки праці на морському транспорті, у межах якої зазначені чинники слід розглядати як взаємопов'язані складові цілісної системи забезпечення безпеки [1-24].

Постановка завдання. З урахуванням сучасних тенденцій розвитку морського транспорту постає науково-прикладне завдання формування інтегрованої проактивної моделі безпеки праці, яку розуміємо як структурно-функціональне представлення сукупності технічних, організаційних, інформаційних і поведінкових компонентів, взаємодія яких забезпечує виявлення небезпек, оцінювання професійних ризиків, вибір превентивних заходів і підтримання належного рівня безпеки праці в процесі експлуатації морських суден [1-14].

У цих умовах виникає потреба в науковому обґрунтуванні такої моделі, у межах якої безпека праці розглядатиметься як результат взаємодії екіпажу, судових технічних систем, цифрової інфраструктури, психофізіологічного стану моряків і виробничого середовища. Така модель має інтегрувати засоби імерсивної підготовки, цифрові двійники, технології штучного інтелекту, інструменти моніторингу

функціонального стану моряків, механізми психосоціальної підтримки, а також засоби управління ризиками, пов'язаними з використанням альтернативних палив і кіберризиками [5, 6-10, 11-24].

Отже, завдання дослідження полягає в теоретичному обґрунтуванні та структуризації інтегрованої проактивної моделі безпеки праці на морському транспорті, яка відповідала б сучасним умовам експлуатації суден нового покоління та забезпечувала підвищення рівня безпеки праці шляхом комплексного поєднання технічних, людських, організаційних і цифрових механізмів попередження ризиків.

Виклад основного матеріалу дослідження. Методологічною основою запропонованого підходу доцільно вважати концепцію Safety-II, у межах якої безпека трактується не як проста відсутність небажаних подій, а як здатність системи підтримувати кероване та прийнятне функціонування в умовах мінливого, частково непередбачуваного середовища [5]. У контексті морської галузі це означає перехід від ізольованого аналізу інцидентів до дослідження того, яким чином екіпаж, процедури, технічні засоби та цифрова інфраструктура забезпечують стійкість судна до відхилень, перевантажень і помилок у реальних умовах експлуатації.

У межах такого підходу безпеку праці на судні доцільно трактувати як властивість складної системи взаємодії людини, техніки й організації праці, що формується під впливом кількох взаємопов'язаних блоків [6-24]: імерсивної підготовки та ситуаційної візуалізації, тобто підготовки, що відбувається через практичну взаємодію з віртуальними, доповненими або змодельованими виробничими ситуаціями, для яких зазвичай використовують VR-тренажери, AR-засоби, 3D-сценарії, інтерактивні симуляції аварійних або штатних режимів роботи; моніторингу функціонального стану людини й параметрів робочого середовища; прогностичної аналітики на основі цифрових двійників і технологій штучного інтелекту; а також інтеграції ризиків, пов'язаних із новими паливами, кіберризиків і психосоціальних чинників у систему управління безпекою. Такий підхід є виправданим, оскільки саме на стику цих чинників і формується сучасний професійний ризик на морському транспорті.

Перший функціональний блок становлять засоби імерсивного навчання, комп'ютерної графіки та моделювання аварійних сценаріїв. Їх значення полягає в тому, що вони переводять правила безпеки від формального інформування до практичної готовності діяти за проце-

дурами. У морській підготовці це особливо важливо для критичних подій, таких як: пожежі в машинному відділенні, задимлення маршрутів евакуації, аварійних дій у замкнених просторах, швартових операцій підвищеної небезпеки, а також робіт у токсичному чи нестабільному середовищі [19-21]. Огляд в [19] показує, що морські VR-рішення сьогодні зосереджені передусім на тренуванні з пожежогасіння та евакуації, тоді як в [21] результати свідчать про потенціал імерсивної VR-підготовки для підвищення мотивації, результативності навчання та готовності до безпечної поведінки [19, 21]. Отже, VR/AR слід розглядати не як допоміжний візуальний засіб, а як інструмент формування стійких алгоритмів безпечної поведінки.

Другий блок утворюють системи безперервного моніторингу стану моряка та параметрів робочого середовища. У традиційній моделі охорони праці стан працівника оцінюється переважно епізодично – через медогляди, інструктажі чи нагляд. Однак у судових умовах рівень втоми, стресу, ризик втрати рівноваги або когнітивного переважання можуть змінюватися набагато швидше, ніж це фіксують стандартні процедури. Саме тому датчики індивідуального носіння, біометричні платформи, локальні системи позиціонування та цифрові інструменти зворотного зв'язку доцільно розглядати як засоби раннього виявлення потенційно небезпечних станів: перевтоми, дезорієнтації, ризику падіння, перегріву або перебування працівника в небезпечній зоні без належної взаємодії з іншими членами екіпажу [23]. У дослідженні [23] встановлено, що модель машинного навчання (ML-модель), розроблена на основі даних із датчиків, розміщуваних на тілі, забезпечила значення показника Area Under the Curve (AUC) 0,9204 при класифікації ризику падіння в умовах бортової та кільової хитавиці, що свідчить про перспективність застосування такого підходу в морській практиці.

Поряд із цим сучасна система охорони праці повинна враховувати не лише фізіологічні, а й психосоціальні показники. Дані, наведені в [11], свідчать про суттєву поширеність симптомів депресії, тривожності та суїцидальних думок серед моряків. Матеріали Mission to Seafarers показують, що в Q4 2024 індекс задоволеності моряків знизився до 6,91, а у Q2 2025 зріс до 7,54, однак попри позитивну динаміку оцінок, проблеми, пов'язані з безпекою, навчанням і комплектуванням екіпажів, зберігалися серед найпоширеніших скарг [12, 13]. Під час досліджень у межах SIM Project [14] протягом трьох місяців було зібрано фізичні, психологічні та соціальні дані від 176 моряків

на шести суднах, які додатково підтвердили, що відпочинок, соціальна взаємодія й повсякденна організація життя на борту безпосередньо впливають на добробут і безпечність праці. Це означає, що сучасний моніторинг безпеки праці має поєднувати фізичні, поведінкові та психосоціальні індикатори в єдиному профілі ризику [2].

Третій блок формують цифрові двійники та прогностична аналітика із застосуванням штучного інтелекту. У морській галузі цифровий двійник доцільно розуміти не лише як віртуальну копію технічного об'єкта, а як інтеграційну платформу, яка поєднує експлуатаційні параметри, діагностичні сигнали, сценарії відмов, результати моделювання й дані сенсорного моніторингу [16-18]. В [16] продемонстровано можливість використання цифрового двійника для діагностування несправностей на автономному судні, а практичний інтерес до такого підходу підтверджується наданням принципового схвалення у 2024 році системі HiDTS компанії HD Hyundai як одного з елементів розвитку верифікації цифрових двійників на основі даних [22]. У поєднанні з алгоритмами штучного інтелекту цифровий двійник може виконувати функцію ядра системи підтримки рішень, яка пов'язує технічний стан, режим експлуатації, дії екіпажу та сценарії ризику.

Четвертий блок – інтеграція ризиків альтернативних палив, кіберризиків і психосоціальних чинників у єдиний контур управління безпекою. Енергетичний перехід у судноплаванні створює нові профілі небезпеки, пов'язані з токсичністю, займистістю, параметрами зберігання, вентиляції, виявлення витоків і реагування на аварії. Аналіз джерел [6, 7, 24, 25] дає підстави вважати, що охорона праці на суднах нового покоління потребує ширшого використання підходів кількісного оцінювання ризику (Quantitative Risk Assessment, QRA), ідентифікації небезпек (Hazard Identification, HAZID), детального методу аналізу відхилень у функціонуванні систем (Hazard and Operability Analysis, HAZOP), спеціалізованої підготовки екіпажу, а також перегляду аварійних процедур і засобів безпеки з урахуванням специфіки нових енергетичних систем.

Паралельно цифровізація судових систем породжує клас кіберфізичних ризиків, що безпосередньо впливають на безпеку екіпажу, судна та морського середовища. В [8] встановлено, що 61 % морських фахівців вважають прийнятним збільшення кіберризиків, якщо це сприяє інноваціям, а 71 % вважають свої промислові активи більш уразливими до кібератак, ніж раніше. У відповідь Резолюці-

єю MSC.428(98) вимагається, щоб схвалена система управління безпекою враховувала управління кіберризиками відповідно до функціональних вимог Міжнародного кодексу з управління безпечною експлуатацією суден і запобіганням забрудненню (ISM Code) [9]. Уніфіковані вимоги Міжнародної асоціації класифікаційних товариств, викладені в [10], відносно кіберстійкості судна як цілісної системи та бортових систем і обладнання, спрямовані на забезпечення захищеності цифрової інфраструктури судна на етапах проектування, побудови, інтеграції та експлуатації та поширюються на нові судна, закріплені в контрактівній документації з 1 липня 2024 року, а фінальне правило Берегової охорони США «Cybersecurity in the Marine Transportation System», що встановлює мінімальні обов'язкові вимоги до управління кіберризиками в морській транспортній системі, зокрема щодо розроблення кіберплану, призначення відповідальної особи з кібербезпеки, проведення оцінювання вразливостей, підготовки персоналу та реагування на кіберінциденти, набуло чинності 16 липня 2025 року [15].

Таблиця 1. Структурно-функціональна модель інтегрованого проактивного забезпечення безпеки праці на морському транспорті

Компонент моделі	Інтеграційний блок	Об'єкт впливу	Механізм підвищення безпеки праці	Очікуваний результат
Імерсивна підготовка та візуалізація ризиків	VR/AR-тренажери, 3D-моделі, CFD-інтегровані сценарії	Поведінка екіпажу в аварійних і нестандартних ситуаціях	Відтворення критичних сценаріїв; формування готовності до аварійних ситуацій; підвищення здатності розпізнавати зміни в виробничій обстановці	Зниження ймовірності помилок під час виконання дій у разі пожежі, евакуації та аварійних ситуацій
Моніторинг функціонального стану моряка	Датчики індивідуального носіння, біометричні датчики, системи локалізації, цифрові опитувальні інструменти	Втома, ризик падіння, стрес, дезорієнтація, ізоляція працівника	Раннє виявлення ознак небезпечних станів людини та передання інформації керівнику робіт або системі підтримки рішень	Зниження ризику інцидентів, пов'язаних із перевтомою, втратою рівноваги та когнітивним перевантаженням
Інтелектуальний аналіз і прогностичне управління	ШІ-алгоритми, комп'ютерний збір, аналіз аномалій, ризик-аналітика	Небезпечні відхилення в технічних і поведінкових процесах	Виявлення комбінацій слабких сигналів, які передують аварії або порушенню безпечного режиму праці	Перехід від реактивного реагування до попередження небезпечних подій

Закінчення таблиці 1

Компонент моделі	Інтеграційний блок	Об'єкт впливу	Механізм підвищення безпеки праці	Очікуваний результат
Інтелектуальний аналіз і прогностичне управління	ШІ-алгоритми, комп'ютерний зір, аналіз аномалій, ризик-аналітика	Небезпечні відхилення в технічних і поведінкових процесах	Виявлення комбінацій слабких сигналів, які передують аварії або порушенню безпечного режиму праці	Перехід від реактивного реагування до попередження небезпечних подій
Цифровий двійник судна / системи	Технологія цифрового двійника, інтеграція даних сенсорного моніторингу, сценарне моделювання	Суднові механізми, енергетичні установки, робочі зони, сценарії відмов	Поєднання технічного стану, експлуатаційних параметрів і ризикових сценаріїв в єдиній моделі	Підвищення точності оцінювання ризиків, ефективності моніторингу технічного стану та обґрунтованості управлінських рішень
Управління ризиками, що пов'язані з використанням альтернативних палив	QRA, HAZID, HAZOP, керівництва з безпеки, спеціалізована підготовка	Аміак, водень, інші перспективні палива	Ідентифікація специфічних небезпек токсичності, займистості, витоків, вентиляції та евакуації	Зниження ризику аварій і професійних уражень в умовах переходу до нових видів судового палива
Кіберстійкість як елемент безпеки праці	Система управління безпекою з інтегрованим управлінням кіберризиками; уніфіковані вимоги щодо кіберстійкості; план кібербезпеки	Навігаційні, автоматизовані, енергетичні та інформаційні системи судна	Інтеграція кіберризиків в загальне управління безпекою судна; захист від збоїв, що можуть мати фізичні наслідки	Зменшення ймовірності кіберфізичних інцидентів, які загрожують екіпажу і судну
Психосоціальна стійкість екіпажу	Програми підтримки добробуту, відпочинок, соціальна взаємодія, нормативно закріплена підтримка	Психічне здоров'я, командна взаємодія, стійкість до стресу	Підтримання функціональної працездатності та зниження хронічного психоемоційного виснаження	Підвищення стабільності людського елемента як ключової ланки безпеки

Джерело: розроблено авторами на основі [1-25]

Це дає підстави розглядати кіберстійкість вже не як автономну IT-функцію, а як невід'ємний компонент загальної безпеки, зокрема безпеки праці, на сучасному судні.

Узагальнення зазначених функціональних блоків у більш деталізованому вигляді наведено в таблиці 1.

З урахуванням викладеного інтегровану проактивну систему охорони праці на сучасному судні доцільно будувати як багаторівневу структуру, у якій сенсори і засоби керування та відображення інформації забезпечують збір первинних даних, цифровий двійник інтегрує технічні, виробничі та поведінкові параметри, ШІ-алгоритми виявляють відхилення і приховані ознаки ризику, VR/AR-технології використовуються для підготовки екіпажу до критичних сценаріїв, психосоціальна підтримка забезпечує стійкість людського фактору, а система управління безпекою судна закріплює ці рішення у формі процедур, тренувань, ролей і відповідальності. Саме в такій системі охорона праці перестає бути реакцією на інцидент, що вже стався, і набуває ознак керованої адаптивності, що відповідає принципу Safety-II, відповідно до якої безпека розглядається як здатність системи підтримувати прийнятний рівень функціонування в умовах змін, відхилень і експлуатаційних навантажень. [6-25].

Висновки і перспективи подальших досліджень. Проведений аналіз дає підстави стверджувати, що традиційна реактивна модель безпеки праці на морському транспорті вже не повною мірою відповідає умовам сучасної безпечної експлуатації суден. Зростання кількості морських інцидентів, ускладнення технічних систем, поширення використання альтернативних палив, цифровізація судового середовища та посилення ролі людського фактору зумовлюють необхідність переходу до інтегрованої проактивної моделі безпеки праці, у межах якої безпека розглядається як динамічна властивість системи взаємодії екіпажу, технічних засобів і виробничого середовища [1, 5, 6, 11-14].

На основі аналізу джерел обґрунтовано, що до ключових елементів такої системи доцільно віднести імерсивну підготовку на основі VR/AR і сценарного моделювання, безперервний моніторинг функціонального стану екіпажу, цифрові двійники та аналітику на основі штучного інтелекту. Їх інтеграція уможливилує перехід від реагування на наслідки до завчасного виявлення потенційно небезпечних станів, прогнозування ризикових комбінацій відхилень і підвищення

адаптивної стійкості системи «екіпаж – технічні засоби – цифрова інфраструктура – зовнішнє середовище» [5, 16-22].

Установлено, що енергетичний перехід і цифровізація морського флоту вимагають переосмислення самої структури професійного ризику. З одного боку, нові палива формують специфічні профілі небезпеки, які ще не повною мірою вивчені й не охоплені чинними стандартами; з іншого боку, посилюється значення кіберзагроз, що дедалі тісніше пов'язуються з фізичною безпекою екіпажу та функціонуванням критичних судових систем. Саме тому інтеграцію ризиків альтернативних палив і кіберризиків у єдиний контур управління безпекою доцільно розглядати як один із пріоритетних напрямів розвитку сучасної системи безпеки праці на морі [6-10, 15, 24].

Окремо встановлено, що психофізіологічний стан і психосоціальну стійкість екіпажу доцільно розглядати як самостійний компонент сучасної системи охорони праці, оскільки рівень втоми, стресу, соціальної ізоляції та психологічного виснаження безпосередньо впливає на безпеку професійної діяльності на борту [11-14, 23].

Перспективи подальших досліджень доцільно пов'язати з розробленням інтегрованих систем підтримки прийняття рішень, які поєднуюватимуть дані про технічний стан судна, функціональний стан моряків, ризику нових палив, психосоціальні показники та кіберзагрози в межах єдиної прогностичної системи забезпечення безпеки. Окремим напрямом має стати нормативне й методичне забезпечення спеціалізованої підготовки моряків до роботи на суднах, що використовують альтернативні палива [6, 7, 24].

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Maritime Safety Trends 2014–2024: Preparing for Future Risks. *Det Norske Veritas (DNV)*: website. URL: <https://www.dnv.com/maritime/publications/maritime-safety-report-2014-2024-download/> (date: 04.03.2026).

2. Парменова Д. Г. Систематизация факторов опасности для построения профиля риска судовых работ. *Науковий вісник Херсонської державної морської академії*. 2014. № 1(10). С. 30-35.

3. Голікова В. В., Крайнова В. І., Парменова Д. Г., Синюта К. О. Особливості ергономіки робочого місця майбутніх фахівців водного транспорту. *Водний транспорт*. 2022. Вип. 2(36). С. 218-223. <https://doi.org/10.33298/2226-8553.2022.2.36.18>

4. Селіванов С. Є., Пашенко Ю. В., Парменова Д. Г. Оцінка ризику. *Актуальні проблеми безпеки на транспорті, в енергетиці, інфраструктурі: матеріали I Міжнародної науково-практичної конференції STEI-2021*. Херсон, 2021. С. 253-262.

5. Hollnagel E. Safety-I and Safety-II: The Past and Future of Safety Management (1st ed.). CRC Press, 2014. URL: [10.1201/9781315607511](https://doi.org/10.1201/9781315607511).

6. TRAINALTER – Study on the identification of specific competences for seafarers on ships using alternative fuels and energy systems. *European Maritime Safety Agency (EMSA)*: website. URL: <https://www.emsa.europa.eu/we-do/assistance/visits-and-inspections/129-certification-seafarers/5377-train-alter-report.html> (date: 02.03.2026).

7. Maritime Safety Committee – 109th session (MSC 109), 2-6 December 2024. *International Maritime Organization*: website. URL: <https://www.imo.org/en/mediacentre/meetingsummaries/pages/msc-109th-session.aspx> (date: 02.03.2026).

8. Maritime Cyber Priority 2024/25: Managing cyber risk to enable innovation. *Det Norske Veritas (DNV)*: website. URL: <https://www.dnv.com/cyber/insights/publications/maritime-cyber-priority-2024/> (date: 03.03.2026).

9. Resolution MSC.428(98) – Maritime Cyber Risk Management in Safety Management Systems, adopted on 16 June 2017.

10. Unified Requirements E26 (Cyber Resilience of Ships) and E27 (Cyber Resilience of On-board Systems and Equipment). *International Association of Classification Societies (IACS)*: website. URL: <https://iacs.org.uk/news/iacs-ur-e26-and-e27-press-release> (date: 09.03.2026).

11. Lefkowitz R. Y., Slade M. D. Seafarer Mental Health Study. *New Haven: Yale University; ITF Seafarers' Trust*, 2019. URL: https://www.dnmf.no/getfile.php/137791-1632662805/Bildegalleri/ST_MentalHealthReport_Final_Digital-1.pdf (date: 09.03.2026).

12. Seafarers Happiness Index Q4 2024. Mission to Seafarers. URL: https://www.seafarershappinessindex.org/wp-content/uploads/Seafarers_Happiness_Index_Q4_2024.pdf (date: 02.03.2026).

13. Strong gains in seafarer happiness levels, but serious safety concerns emerge. 11.08.2025. *Mission to Seafarers*: website.

URL: <https://www.missiontoseafarers.org/news/strong-gains-in-seafarer-happiness-levels-but-serious-safety-concerns-emerge> (date: 02.03.2026).

14. Social Interaction Matters (SIM) Project. *International Seafarers' Welfare and Assistance Network (ISWAN)*: website.

URL: <https://www.iswan.org.uk/our-work/social-interaction-matters-project/> (date: 09.03.2026).

15. Cybersecurity in the Marine Transportation System. Federal Register. 2025. 90 FR 6298. *U.S. Coast Guard*: website.

URL: <https://www.federalregister.gov/documents/2025/01/17/2025-00708/cybersecurity-in-the-marine-transportation-system> (date: 02.03.2026).

16. Hasan A. I., Asfihani T., Osen O. L., Bye R. T. Leveraging digital twins for fault diagnosis in autonomous ships. *Ocean Engineering*. 2024. Vol. 292. Art. 116546. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.116546>.

17. Durlík I., Miller T., Kostecka E., Tuński T. Artificial Intelligence in Maritime Transportation: A Comprehensive Review of Safety and Risk Management Applications. *Applied Sciences*. 2024. Vol. 14, No. 18. Art. 8420. <https://doi.org/10.3390/app14188420>.

18. Madusanka N. S., Fan Y., Yang S., Xiang X. Digital Twin in the Maritime Domain: A Review and Emerging Trends. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2023. Vol. 11, No. 5. Art. 1021. <https://doi.org/10.3390/jmse11051021>.

19. Vukelić G., Ogrizović D., Bernečić D., Glujić D., Vizentin G. Application of VR Technology for Maritime Firefighting and Evacuation Training – A Review. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2023. Vol. 11, No. 9. Art. 1732. <https://doi.org/10.3390/jmse11091732>.

20. Glujic D., Vukelic G., Bernecic D., Vizentin G., Ogrizovic D. Coupling CFD and VR for Advanced Firefighting Training in a Virtual Ship Engine Room. *Results in Engineering*. 2024. Vol. 24. Art. 103025. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.103025>.

21. Makransky G., Klingenberg S. Virtual reality enhances safety training in the maritime industry: An organizational training experiment with a non-WEIRD sample. *Journal of Computer Assisted Learning*. 2022. Vol. 38, No. 4. P. 1127–1140. <https://doi.org/10.1111/jcal.12670>.

22. HD Hyundai receives DNV AiP for cloud-based HiDTS digital twin system. *Det Norske Veritas (DNV)*: website. URL: <https://www.dnv.com/news/2024/hd-hyundai-receives-dnv-aip-for-cloud-based-hidts-digital-twin-system/> (date: 09.03.2026).

23. Choi J., Knarr B. A., Youn J.-H., Song K. Y. Machine Learning-Based Approach to Identifying Fall Risk in Seafarers Using Wearable Sensors. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2024. Vol. 12, No. 2. Art. 356. <https://doi.org/10.3390/jmse12020356>.

24. Franks A., Parkar S., Hansen C. R. Use of quantitative risk assessment to enhance the safety of ships using ammonia as fuel. *Journal of Safety and Sustainability*. 2024. Vol. 1, No. 3. P. 127–140. <https://doi.org/10.1016/j.jsasus.2024.09.004>.

25. Парменова Д. Г., Голікова В. В., Крайнова В. І., Астахов М. В. Аналіз сучасних методів управління безпекою праці на морському транспорті. *Матеріали науково-технічної конференції «Морський та річковий флот: експлуатація і ремонт»*, 20.03.2025 – 21.03.2025. Одеса: НУОМА, 2025. С. 130 – 133.

DOI: 10.31653/smf52.2026.20-34

дата першого надходження: 14.03.26
дата прийняття статті до друку після
рецензування: 23.03.26
дата публікації: 05.05.26Кривий¹ М.О., Кривий² О.Ф.¹ORCID 0000-0001-8704-4791, ²ORCID 0000-0001-7507-7203

Національний університет «Одеська морська академія»

КРИТЕРІЙ РЕЖИМІВ РОБОТИ ПІДШИПНИКІВ КОВЗАННЯ СУДНОВОГО ПРОПУЛЬСИВНОГО КОМПЛЕКСУ ІЗ УРАХУВАННЯМ НЕНЬЮТОНІВСЬКОЇ ПОВЕДІНКИ МАСТИЛ

Постановка проблеми в загальному вигляді. Моніторинг роботи підшипників ковзання (ПК) є одним із основних чинників уникнення безаварійної роботи суднового пропульсивного комплексу взагалі, і ПК зокрема. Моніторинг роботи ПК базується на різного роду показниках, зокрема, в'язкістних характеристиках мастильних матеріалів. Для безаварійної роботи ПК вказані показники повинні задовольняти певним умовам – критеріям, які б забезпечували рідинний режим їх роботи, тобто наявність мастильного шару між вкладишем і цапфою. Тому розробка вказаних критеріїв, які б враховували різні показники роботи ПК, і зокрема в'язкістних характеристик мастил, є не тільки складною теоретичною, але і важливою практичною проблемою.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Судновий пропульсивний комплекс, який включає енергетичні установки (СЕУ) і допоміжне суднове обладнання є складним інженерним комплексом і складається із великої кількості різних вузлів і механізмів (дивись, зокрема [1-5]). Довговічність роботи суднового пропульсивного комплексу залежить від довговічності роботи кожного окремого вузла, розрахунок надійності кожного із яких проводиться, як правило, окремо. Одним із таких важливих вузлів є підшипники ковзання, які присутні як в головній СЕУ, так і допоміжному обладнанні. Зокрема, це рамові і шатунні шийки колінчастих валів, опорні підшипники валопроводів гребних гвинтів [4], опорні підшипники стерна [5]. Дослідження в цьому напрямку проводились багатьма авторами, зокрема, фундаментальна теорія підшипників ковзання, яка викладена в роботі [6], отримала подальший розвиток в роботах [7-11]. В роботі [12] експериментально досліджено надійності опорних

підшипників гребних гвинтів при різних способах мащення. В роботі [13], за допомогою чисельних розв'язків рівняння Рейнольдса, вивчалися трибологічні характеристики опорних підшипників гребних гвинтів із урахуванням деформації вигину кормового валу та кавітації. В роботах [14-16] за допомогою аналітичних розв'язків рівняння Рейнольдса, досліджені різні аспекти довговічності експлуатації суднових опорних підшипників ковзання, в роботі [17] отримані аналітичні залежності для кутів початку і кінця робочої зони від відносного ексцентриситета ε_0 і відносного радіального зазору δ_0 в парі ковзання. Вивченню експлуатаційних характеристик, як то ККД, суднових гвинтів і стерн присвячені роботи [4, 5]. В роботі [18] вдосконалено критерій Зомерфельда для визначення режимів роботи суднових підшипників ковзання. В роботі [19] дана класифікація суднових мастил і наведенні їх характеристики. Дослідження [11, 20, 21] показують, що в зв'язку із екстремальними режимами роботи поведінка мастил в робочій зоні підшипників ковзання судового комплексу, носить неньютонівських [6, 20] характер, не врахування якого призводить до суттєвих похибок при проектуванні і прогнозуванні безаварійної роботи. До неньютонівської поведінки мастил призводять також забруднення мастил в ході експлуатації і домішки [23, 24], які використовують для поліпшення в'язкістних характеристик мастил. Аналіз існуючих джерел показав, що практично відсутні дослідження, які б враховували неньютонівську поведінку мастил при вивченні режимів роботи суднових підшипників ковзання. До робіт в цьому напрямку слід віднести роботи [2, 3], де отримані математичні моделі для коефіцієнтів навантаженості і для гідродинамічного тертя для неньютонівських мастил. Подібні задачі для ньютонівських мастил розглянуті в роботах [6, 24-39]. Процеси мащення в суднових енергетичних установках присвячені роботи [40-42]. Але питання критеріїв роботи суднових підшипників ковзання, які б враховували неньютонівську поведінку мастил залишається вивченим не достатньо.

Постановка завдання. Завданням даного дослідження є розробка нового критерію для визначення режимів роботи підшипників ковзання судового пропульсивного комплексу, які б враховували неньютонівську поведінку мастил.

Виклад основного матеріалу дослідження.

1. Математична постановка задачі.

Розглянемо задачу по визначенню розподілу питомого тиску $p(\varphi)$, $\varphi \in (\varphi_1, \varphi_2)$, в мастильному шарі підшипника ковзання. Мастильний шар утворюється між вкладишем радіуса R_2 і валом (цапфою) радіуса R_1 , який обертається із сталою швидкістю ω_0 [с⁻¹]. Кути φ_1 φ_2 – початок і кінець робочої зони мастильного шару (див. рис. 1). Будемо вважати, що мастила ньютонівські, тобто їх динамічна в'язкість залежить від тиску і визначається за допомогою формули Баруса [15, 18]:

$$\mu = \mu_0 e^{\xi p(\varphi)}, \quad (1)$$

де ξ [Па⁻¹] – п'єзоефіцієнт в'язкості мастил, μ_0 $\left[\frac{\text{Н}\cdot\text{с}}{\text{м}^2}\right]$ – динамічна в'язкість при атмосферному тиску. Вказані параметри залежать від температури і визначаються експериментально [19 - 21]. Характер поведінки в'язкості мастил при зміні тиску в підшипнику ковзання визначає градієнт в'язкості:

$$\frac{d\mu}{dp} = G_\mu(p) = \xi \mu_0 \cdot e^{\xi p(\varphi)}. \quad (2)$$

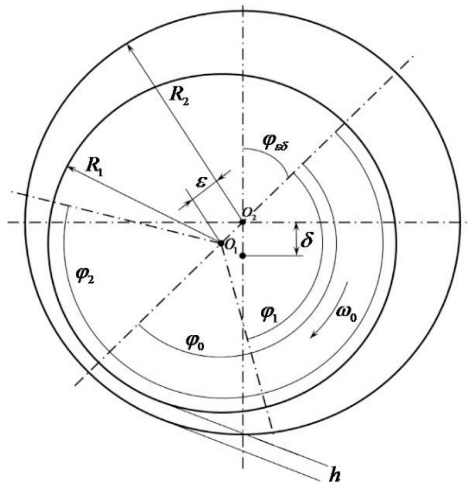


Рис. 1. Модель пари ковзання [2, 3]

Введемо нову безрозмірну функцію $q(\varphi)$, яка пов'язана із розшукуваним питомим тиском $p(\varphi)$ так:

$$q(\varphi) = e^{-\xi \cdot p(\varphi)}, \quad p(\varphi) = -\xi^{-1} \ln q(\varphi). \quad (3)$$

Скориставшись диференціальним рівнянням Рейнольдса [6-9], відносно функції $q(\varphi)$ не важко отримати наступну крайову задачу [2-3].

$$\frac{d}{d\varphi} \left(\tilde{h}^3 \frac{dq}{d\varphi} \right) = -\beta_p \frac{d\tilde{h}}{d\varphi}, \quad \varphi_1 < \varphi < \varphi_2; \quad (4)$$

$$\tilde{h}(\varphi) = \delta^{-1} h(\varphi) = 1 + \varepsilon_0 \cos \varphi; \quad (5)$$

$$q(\varphi_1) = q(\varphi_2) = 1; \quad q'(\varphi_2) = 0; \quad (6)$$

де $h(\varphi)$ – товщина мастильного шару; $\varepsilon_0 = \frac{\varepsilon}{\delta}$ – відносний ексцентриситет; ε – ексцентриситет центрів тіл пар ковзання; $\delta = (R_2 - R_1)$ – радіальний зазор (див. рис. 1).

В диференціальному рівнянні (4) безрозмірний коефіцієнт впливу β_p виражається через параметри підшипника ковзання і характеристики мастил

$$\beta_p = \frac{\pi G_{\mu 0} n_0}{5 \delta_0^2}, \quad (7)$$

де $G_{\mu 0} = \xi \mu_0$ [с] – значення градієнту в'язкості (2) при атмосферному тиску; $n_0 = \frac{30 \omega_0}{\pi} \left[\frac{\text{обр}}{\% \text{хв}} \right]$ – частотою обертання цапфи; $\delta_0 = \frac{\delta}{R_1}$ – відносний радіальний зазор підшипника ковзання.

2. Визначення питомого тиску в мастильному шарі

Після інтегрування рівняння (4), отримаємо

$$\frac{dq}{d\varphi} = -\beta_p \frac{\tilde{h} + C}{\tilde{h}^3}. \quad (8)$$

Враховуючи перші дві умови із (6) і теорему Ролля, можемо стверджувати, що на інтервалі (φ_1, φ_2) існує точка φ_0 , в якій $q'(\varphi_0) = 0$. Остання рівність, після підстановки φ_0 в рівняння (8) дає можливість невідому сталу C подати так: $C = -\tilde{h}_0 = -1 - \varepsilon_0 \cos(\varphi_0)$, а диференціальне рівняння переписати у вигляді

$$dq = -\beta_p \frac{\tilde{h}(\varphi) - \tilde{h}_0}{\tilde{h}^3(\varphi)} d\varphi. \quad (9)$$

Точний розв'язок диференціального рівняння (9), який задовольняє другій крайовій умові (6), запишемо у вигляді:

$$q(\varphi) = 1 - \beta_p \varepsilon_0 \int_{\varphi}^{\varphi_2} \frac{\cos \varphi_0 - \cos \psi}{(1 + \varepsilon_0 \cos \psi)^3} d\psi. \quad (10)$$

Рівняння для визначення кута φ_0 отримаємо використавши першу граничну умову із (6):

$$q(\varphi_1) = 1; \Rightarrow \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} \frac{\cos \psi - \cos \varphi_0}{(1 + \varepsilon_0 \cos \psi)^3} d\psi = 0. \quad (11)$$

Далі, скориставшись другою формулою із (4), знайдемо розподіл питомого гідродинамічного тиску $p(\varphi)$ в робочому шарі пари ковзання для неньютонівського мастила

$$p(\varphi) = \frac{-1}{\xi} \ln \left(1 - \beta_p \varepsilon_0 \int_{\varphi}^{\varphi_2} \frac{\cos \varphi_0 - \cos \psi}{(1 + \varepsilon_0 \cos \psi)^3} d\psi \right). \quad (12)$$

Подання (12) питомого гідродинамічного тиску в мастильному шарі для неньютонівських мастил крім відносного ексцентриситету ε_0 також містить коефіцієнт впливу β_p , який згідно формулі (7) залежить від параметрів підшипника ковзання і характеристики мастил, і, зокрема, від п'єзокоефіцієнту в'язкості мастил ξ . Саме останній визначає неньютонівський характер поведінки мастил, при $\xi \rightarrow 0$ мастила стають ньютонівськими. Якщо в формулі (12) виконати граничний перехід: $\xi \rightarrow 0$ ($\beta_p \rightarrow 0$), скориставшись правилом Лопітала, то отримаємо розподіл питомого гідродинамічно тиску для ньютонівських мастил $p_n(\varphi)$.

$$p_n(\varphi) = \lim_{\xi \rightarrow 0} p(\varphi) = \frac{\pi \mu_0 n_0}{5 \delta_0^2} \varepsilon_0 \int_{\varphi}^{\varphi_2} \frac{\cos \varphi_0 - \cos \psi}{(1 + \varepsilon_0 \cos \psi)^3} d\psi. \quad (13)$$

3. Критерій рідинного тертя для неньютонівських мастил

Згідно формулі (12) питомий тиск в мастильному шарі буде невід'ємним і обмеженим лише при виконанні умови

$$0 \leq \tilde{q}_0(\varphi, \varepsilon_0) < \frac{1}{\beta_p}, \quad (14)$$

$$\tilde{q}_0(\varphi, \varepsilon_0) = \frac{1}{\beta_p} (1 + q(\varphi)) = \int_{\varphi}^{\varphi_2} \frac{\cos \varphi_0 - \cos \psi}{\tilde{h}^3(\psi)} d\psi.$$

Враховуючи, що функція $q(\varphi)$ в точці φ_0 досягає мінімуму, а в точках φ_1, φ_2 максимуму, причому $q(\varphi_1) = q(\varphi_2) = 1$, то функція $q_0(\varphi, \varepsilon_0)$ в точках φ_1, φ_2 буде досягати мінімуму, причому $\tilde{q}_0(\varphi_1, \varepsilon_0) = \tilde{q}_0(\varphi_2, \varepsilon_0) = 0$, а в точці φ_0 буде досягати максимуму: $q_0(\varepsilon_0) = \tilde{q}_0(\varphi_0, \varepsilon_0) = \max_{\varphi_1 \leq \varphi \leq \varphi_2} \tilde{q}_0(\varphi, \varepsilon_0)$. Наведенні міркування дозволяють зробити висновок: умовою застосовності мастил для заданих режимів роботи пари ковзання є виконання критерію:

$$\beta_p < K_\mu. \quad (15)$$

$$K_\mu = \frac{1}{q_0(\varepsilon_0)}; \quad q_0(\varepsilon_0) = \varepsilon_0 \int_{\varphi_0}^{\varphi_2} \frac{\cos \varphi_0 - \cos \psi}{(1 + \varepsilon_0 \cos \psi)^3} d\psi. \quad (16)$$

В умові (15) число K_μ можна вважати критерієм обмеженості питомого тиску в робочій зоні підшипника ковзання, тобто перебування його в стані рідинного режиму тертя. У формулі (16) для визначення критерію K_μ входять характерні кути пари ковзання: кінець робочої зони φ_2 і кут максимального тиску φ_0 . В роботі [17] доведено, що вказані характерні кути залежить тільки від відносного ексцентриситету ε_0 , і отримані формули для їх визначення

$$\varphi_2 = \frac{180^\circ}{\pi} \left(2.83 \cdot \arccos(\varepsilon_0) + 1.655 \sqrt{\varepsilon_0} \cdot \arcsin(\varepsilon_0) + 0.165 \sqrt{\varepsilon_0} \right); \quad (17)$$

$$\varphi_0 = \frac{180^\circ}{\pi} \left(1.096 \cdot \arccos(\varepsilon_0) + 1.137 \sqrt{\varepsilon_0} \cdot \arcsin(\varepsilon_0) + 1.293 \sqrt{\varepsilon_0} \right). \quad (18)$$

Отже критерій K_μ є функцією відносного ексцентриситету, в Таблиці 1 виписані його значення для різних значень ε_0 . Це дає можливість, за допомогою умови (15), виконувати моніторинг режиму рідинного тертя в підшипнику ковзання при заданих технічних параметрах підшипника і заданій швидкості обертання цапфи, з урахуванням в'язкістних характеристик мастил. Слід зауважити, що оскільки для ньютонівських мастил $\beta_p = 0$, тому без урахування в математичній моделі підшипника ковзання неньютонівської поведінки мастил, критерій (15) отримати не можливо.

Таблиця 1. Значення критерію K_{μ}

ε_0	K_{μ}	ε_0	K_{μ}	ε_0	K_{μ}	ε_0	K_{μ}
0,01	85,1064	0,275	3,6912	0,525	1,5630	0,775	0,5184
0,05	17,3256	0,300	3,4008	0,55	1,4322	0,800	0,4386
0,075	11,6730	0,325	3,0942	0,575	1,3104	0,825	0,3630
0,100	8,8836	0,350	2,8254	0,600	1,1946	0,850	0,2910
0,125	7,3014	0,375	2,5890	0,625	1,0842	0,875	0,2244
0,150	6,2592	0,400	2,3760	0,65	0,9786	0,900	0,1620
0,175	5,4942	0,425	2,1810	0,675	0,8784	0,925	0,1074
0,200	4,9158	0,450	2,0034	0,700	0,7818	0,950	0,0594
0,225	4,4286	0,475	1,8480	0,725	0,6900	0,975	0,0216
0,250	4,0284	0,500	1,7028	0,750	0,6018	0,990	0,0055

Аналіз даних таблиці 1 показує, що значення K_{μ} спадають по експоненті із ростом ε_0 , а $\ln K_{\mu}$ спадає приблизно як $\text{ctg}(\varepsilon_0)$. Скориставшись вказаними закономірностями і методами регресійного аналізу [4, 5, 17, 18], отримаємо наступну аналітичну залежність:

$$K_{\mu} = \exp\left\{0.4542\text{ctg}(3.1588\sqrt{\varepsilon_0} - 0.0902) - 2.7621\sqrt{\varepsilon_0} + 2.746\right\}. \quad (19)$$

Для верифікації отриманої математичної моделі (19), обчислені значення критерія за формулою формули (19), на рисунку 1, це синя суцільна лінія, і за допомогою сплайн апроксимації табличних даних, це точкова лінія чорного кольору. Результати обчислень показали практично повне співпадіння отриманих значень (98.97% - 99.75%), що підтверджує високу адекватність математичної моделі (19).

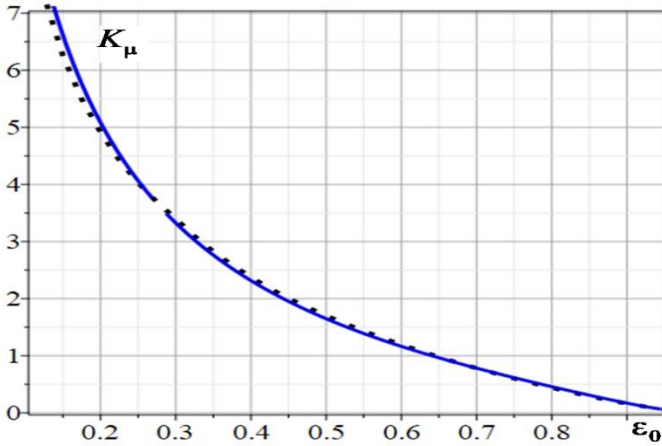


Рис.1. Верифікація математичної моделі (19) для K_μ

4. Валідація критерію рідинного тертя для неньютонівських мастил K_μ .

Для валідації отриманого критерію досліджено на усталених режимах роботи основних типів суднових двигунів D1 – D10, наведених в таблиці 2, там же наведені деякі проектно-розрахункові параметри рамових і шатунних підшипників ковзання (ПК) цих двигунів, зокрема:

- питоме середнє навантаження рамових підшипників p_{ra} , МПа;
- питоме середнє навантаження шатунних підшипників p_{st} , МПа;
- максимально можлива частота обертання n_{max} , об/хв;
- штатні частота обертання n_0 , об/хв;
- відносний радіальний зазор рамових підшипників δ_{ra0} ;
- відносний радіальний зазор рамових підшипників δ_{st0} .

В таблиці 3 наведені рекомендовані мастила для двигунів D1 – D10, а також значення їх динамічної в'язкості μ_0 і п'єзокоефіцієнту в'язкості ξ , при основних температурах в робочому циклі мащення: 60°C, 80°C, 90°C.

Данні наведені в таблицях 2 і 3 дають можливість розрахувати значення відносного ексцентриситету ϵ_0 , критерію K_μ і коефіцієнту впливу β_p . Ці значення для рамових і шатунних підшипників ковзання для двигунів D1 – D10 наведені відповідно в таблицях 4 і 5.

Таблиця 2. Робочі параметри рамових і шатунних ПК

D	Двигун	P_{ra} , МПа	P_{st} , МПа	n_{max} , об/хв	n_0 , об/хв	$\delta_{ra0} \cdot 10^3$	$\delta_{st0} \cdot 10^3$
1	Sulzer 9RTA84C	8...12	10...14	102	90...100	0,714... 0,952	1,00... 1,28
2	Sulzer 7RTA68	8...12	10...14	102	90...100	0,882... 1,176	1,25... 1,61
3	MAN B&W 6S50ME	6...10	8...12	127	120	0,962... 1,346	1,25... 2,00
4	MAN 12V48/60CR	5...8	7...10	514	500	0,833... 1,25	1,32... 1,84
5	Wärtsilä 46F	7...10	9...13	600	540... 600	1,087... 1,522	1,58... 2,11
6	Wärtsilä 9L32	4...7	6...9	750	720	1,25... 1,875	1,92... 2,69
7	MAN 8L27/38	4...6	5...8	800	720...750	1,481... 2,222	2,27... 3,18
8	Yanmar 6EY22	5...7	6...9	1000	720...900	1,364... 2,273	2,22... 3,33
9	MTU 20V4000	6...9	8...12	1900	1800	1,50... 2,50	2,22... 3,33
10	MTU 16V4000 M93	6...9	8...12	1900	1800	1,50... 2,50	2,22... 3,33

Таблиця 3. Мاستила та їх динамічні в'язкості і п'єзокоєфіцієнт в'язкості при різних температурах для двигунів D1 – D10

D	Мастило	$\mu_0 \cdot 10^3$, Па·с			$\xi \cdot 10^8$, Па ⁻¹		
		60°	80°	90°	60°	80°	90°
1	Total Atlanta Marine D3005	42,08	26,93	21,54	3,3	3	2,8
2	BP Vanellus Multi	48,51	31,04	24,83	2,9	2,6	2,4
3	Mobilgard™ 300	41,56	26,6	21,28	2,9	2,6	2,4
4	Shell Argina T	44,62	28,56	22,85	3,4	3,1	2,9
5	Chevron Delo 400 MGX	46,98	30,07	24,05	3,9	3,6	3,4
6	Castrol CDX 30	41,82	26,76	21,41	2,4	2,1	1,9
7	Shell Rimula R4X15W-40	47,08	30,13	24,10	3,9	3,6	3,4
8	Yanmar Genuine Oil 15W-40	43,68	27,96	22,36	3,4	3,1	2,9
9	Exxon Mobil Delvac1LE5W-30	36,57	23,41	18,73	2,4	2,1	1,9
10	Mobil Delvac MX 15W-40	49,5	31,68	25,34	2,4	2,1	1,9

Зауважимо, що Таблицях 4 і 5 наведені максимально можливі значення відносного ексцентриситету ε_0 для кожного типу двигуна на усталених режимах. Значення ε_0 можуть бути визначенні також онлайн в процесі експлуатації для кожного двигуна за допомогою віброметрів, індикаторів стану підшипників, аналізаторів стану підшипників, та іншого обладнання. Інші параметри розраховані за допомогою формул (7) і (19) з використанням даних таблиць 2 і 3.

Таблиця 4. Верифікація критерію K_μ для рамових ПК

D	ε_0	K_μ	β_p		
			60°	80°	90°
1	0.82	0.398	0.171	0.099	0.074
2	0.80	0.459	0.114	0.065	0.048
3	0.75	0.616	0.098	0.056	0.042
4	0.65	0.964	0.686	0.401	0.300
5	0.65	0.964	0.585	0.345	0.261
6	0.59	1.342	0.291	0.163	0.118
7	0.55	1.390	0.394	0.233	0.176
8	0.45	1.953	0.452	0.264	0.197
9	0.43	2.090	0.441	0.247	0.179
10	0.43	2.090	0.597	0.334	0.242

Таблиця 5. Значення критерію K_μ для шатунних ПК

D	ε_0	K_μ	β_p		
			60°	80°	90°
1	0.83	0.368	0.087	0.051	0.038
2	0.80	0.459	0.057	0.032	0.024
3	0.72	0.715	0.058	0.033	0.025
4	0.65	0.964	0.275	0.161	0.120
5	0.70	0.783	0.277	0.164	0.124
6	0.59	1.207	0.123	0.069	0.050
7	0.57	1.296	0.168	0.099	0.075
8	0.50	1.649	0.170	0.099	0.074
9	0.47	1.825	0.201	0.113	0.082
10	0.45	1.953	0.272	0.152	0.110

Висновки і перспективи подальших досліджень.

Проведене числове моделювання дозволило зробити наступні, важливі для застосування висновки:

при збільшенні навантаження на ПК і зменшенні частоти обертання цапфи значення відносного ексцентриситету ε_0 зростає, при цьому для шатунних ПК значення ε_0 дещо більше ніж у рамових;

критерій (15) виконується для усталених режимів рамових і шатунних ПК, при основних температурах в робочому циклі мащення: 60°C, 80°C, 90°C, для основних типів суднових двигунів D1 – D10;

для нових мастил, наведених в Таблиці 3, критерій (15) виконується при робочих температурах, і на етапі запуску двигунів не призводить до критичного зростання гідродинамічного, тобто ПК буде працювати в рідинному режимі.

В процесі експлуатації суднових двигунів за рахунок забруднення відбувається збільшення кінетичної в'язкості мастил, що може призвести до зростання значень коефіцієнту впливу β_p . Це свідчить про необхідності розробки методики регулярного контролю значення β_p і моніторингу виконання критерію (15) в процесі експлуатації.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Gazi Kocak, Veysel Gokcek, Yakup Genc. Condition Monitoring and Fault Diagnosis of a Marine Diesel Engine with Machine Learning Techniques. *Pomorstvo*, 2023. 37(1), pp. 32–46. <https://doi.org/10.31217/p.37.1.4>

2. Kryvyi, O.; Miyusov, M. V.; Kryvyi, M. New mathematical models for the load factor of slip pairs in the ship propulsion system for non-Newtonian lubricants. *Pomorstvo*. 2024, 38(1), 114–125. <https://doi.org/10.31217/p.38.1.9>

3. Kryvyi O., Miyusov M. V., Kryvyi M.: New Mathematical Models for Coefficients of Hydrodynamic Resistance to Rotation and Friction of Sliding Bearings of Ship Propulsion System for non-Newtonian Lubricants. *TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, 2025. Vol. 19, No. 3, pp. 1029-1039, doi:10.12716/1001.19.03.38,

4. Kryvyi, O.; Miyusov M.; Kryvyi M. Construction and Analysis of New Mathematical Models of the Operation of Ship Propellers in Different Maneuvering Modes. *Trans Nav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*. 2023, 17 (1), 95-102. doi:10.12716/1001.17.01.09

5. Kryvyi, O.; Miyusov, M. V.; Kryvyi, M. Analysis of Known and Construction of New Mathematical Models of Forces on a Ship's Rudder in an Unbounded Flow. Analysis. *Trans Nav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*. 2023, 17(4), 831-839. DOI:10.12716/1001.17.04.09
6. Korovchinsky, M. V. Theoretical basis for plain bearings operation. *Mashgiz*, M. 1959. 403p.
7. Wael A. Altabay. Chapter 14 - Sliding bearings, Editor(s): Wael A. Altabay, *Fundamentals of Machine Component Design*, Elsevier, 2024. P. 331-353. <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-21449-3.00010-4>.
8. S. Balakrishnan, C.E. Baker, H. Rahnejat, (2010) 18 - Fundamentals of hydrodynamic journal bearings: an analytical approach, Editor(s): Homer Rahnejat, *Tribology and Dynamics of Engine and Powertrain*, Woodhead Publishing, Pages 591-614, <https://doi.org/10.1533/9781845699932.2.591>.
9. Deters, L. Plain Bearings. In: Mang, T. (eds) *Encyclopedia of Lubricants and Lubrication*. Springer, Berlin, Heidelberg. 2014. 354p. https://doi.org/10.1007/978-3-642-22647-2_14.
10. B. Hamrock, S. Schmid, B. Jacobson *Fundamentals of Fluid Film Lubrication*, 2nd Ed. *Marcel Dekker Inc, N.Y.* 2004. 289 p. <https://doi.org/10.1201/9780203021187>
11. Habchi, W., Bair S. Quantifying the inlet pressure and shear stress of elastohydrodynamic lubrication. *Tribology Int*, 2023. 182(8):108351. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2023.108351>
12. Litwin, W. Marine Propeller Shaft Bearings under Low-Speed Conditions: Water vs. Oil Lubrication. *Tribology Transactions*. 2019. 62(5), 839–849. <https://doi.org/10.1080/10402004.2019.1625991>
13. He T., Zou D., Lu X., Guo Y., Wang Z., Li W. Mixed-lubrication analysis of marine stern tube bearing considering bending deformation of stern shaft and cavitation. *Tribology International*. 2014. 73, 108-116. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2014.01.013>.
14. Сагін, С.В.; Кривий, М.О. Розрахунок контактної тиску та зони контакту в парах ковзання судових дизелів. *Автоматизація судових технічних засобів: наук. -техн. зб.* Одеса: НУ "ОМА". 2021, 27. 84 – 92. DOI: 10.31653/1819-3293-2021-1-27-84-92.
15. Кривий, М.О.; Сагін, С.В. Визначення впливу властивостей моторних мастил на розподіл тиску в парах ковзання судових дизелів. *Суднові енергетичні установки : науково-технічний збірник*. Одеса: НУ «ОМА». 2021, 43, 18-24. doi: 10.31653/smf43.2021.18-24.

16. Сагін, С.В.; Кривий, М.О. Визначення розподілу тиску в шарі неньютонівських мастил у судових енергетичних установках. *Вісник ОНМУ*. 2020, 2(62), 160-170. <https://doi.org/10.47049/2226-1893-2020-2-160-170>.

17. Кривий, М. О. Визначення характерних кутів пар ковзання судових енергетичних установок. *Суднові енергетичні установки : науково-технічний збірник*. Одеса: НУ «ОМА». 2023, 47, 32-45. DOI: 10.31653/smf47.2023. 32-45.

18. Кривий М. О. Вдосконалення критеріїв для визначення режимів роботи підшипників ковзання судового пропульсивного комплексу. *Суднові енергетичні установки: науково-технічний збірник*. Одеса: НУ «ОМА». 2024, 49, 54 – 68. DOI: 10.31653/smf49.2024. 54-68.

19. Jao, T.C., Verhelst, A. Marine Engine Oils. In: Wang, Q.J., Chung, Y.W. (eds) *Encyclopedia of Tribology*. Springer, Boston, MA. 2013. https://doi.org/10.1007/978-0-387-92897-5_952

20. H. van Leeuwen. The determination of the pressure - viscosity coefficient of a lubricant through an accurate film thickness formula and accurate film thickness measurements. *Proc. of the I. Mech. E, Part J: of Engineering Tribology*. 2009. 223 (8), 1143-1163. doi:10.1243/13506501JET504

21. H. van Leeuwen. The determination of the pressure–viscosity coefficient of a lubricant through an accurate film thickness formula and accurate film thickness measurements. Part 2. *Proc. of the I. Mech. E, Part J: J. of Engineering Tribology*. 2011. 225 (6), 449-464. doi:10.1177/1350650111398405

22. Lotfizadeh Dehkordi B, Shiller PJ and Doll GL. Pressure- and Temperature-Dependent Viscosity Measurements of Lubricants with Polymeric Viscosity Modifiers. *Front. Mech. Eng*. 2019. 5:18. doi: 10.3389/fmech.2019.00018

23. Zhou Y, Li W, Stump BC, Connatser RM, Lazarevic S, Qu J. (2018) Impact of Fuel Contents on Tribological Performance of PAO Base Oil and ZDDP. *Lubricants*. 2018; 6(3):79. <https://doi.org/10.3390/lubricants6030079>

24. Matsushita, O., Tanaka, M., Kobayashi, M., Keogh, P., Kanki, H. Basics of Plain Bearings. In. *Vibrations of Rotating Machinery. Mathematics for Industry*. Springer, Tokyo. 2019. https://doi.org/10.1007/978-4-431-55453-0_2

25. Spikes, H. A. The half-wetted bearing. Part 1: Extended Reynolds equation. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*. 2003, 217(1), 1-14. doi:10.1243/135065003321164758.

26. Spikes, H. A. The half-wetted bearing. Part 2: Potential application in low load contacts. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*. 2003, 217(1), 15-26. doi:10.1243/135065003321164776

27. Sun, J.; Gui, C.L. Hydrodynamic lubrication analysis of journal bearing considering misalignment caused by shaft deformation. *Tribol. Int.* 2004, 37, 841–848. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2004.05.007>.

28. Singh, U.; Roy, L.; Sahu, M. Steady-state thermo-hydrodynamic analysis of cylindrical fluid film journal bearing with an axial groove. *Tribology International*. 2008, 41(12), 1135-1144. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2008.02.009>.

29. Brito, F.P.; Miranda, A.S.; Claro, J.C.; Fillon, M. Experimental comparison of the performance of a journal bearing with a single and a twin axial groove configuration. *Tribology International*, 2012. 54, 1-8. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2012.04.026>.

30. Gertzos, K. P.; Nikolakopoulos, P.G.; Papadopoulos, C.A. CFD analysis of journal bearing hydrodynamic lubrication by Bingham lubricant. *Tribology International*. 2008, 41(12), 1190-1204. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2008.03.002>.

31. Manshoor, B.; Jaat, M.; Zaman, I.; Khalid, A. CFD Analysis of Thin Film Lubricated Journal Bearing. *Procedia Engineering*. 2013, 68, 56-62, <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.12.147>.

32. Balakrishnan, S.; Baker, C.E.; Rahnejat, H. 18 - Fundamentals of hydrodynamic journal bearings: an analytical approach. Editor(s): Homer Rahnejat, *Tribology and Dynamics of Engine and Powertrain*, Woodhead Publishing. 2010, 591-614. <https://doi.org/10.1533/9781845699932.2.591>.

33. Benasciutti, D.; Gallina, M.; Munteanu, M. G.; Flumian, F. A Numerical Approach for the Analysis of Deformable Journal Bearings. *Fra&IntStrut* 2012, 6, 37-45. <https://doi.org/10.3221/IGF-ESIS.21.05>

34. Nikolic, N.; Torovic, T.; Antonic Z. A procedure for constructing a theoretical wear diagram of IC engine crankshaft main bearings *Mechanism and Machine Theory*, 2012, 58, 120-136. <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2012.07.009>.

35. Sfyris, D.; Chasalevris, A. An exact analytical solution of the Reynolds equation for the finite journal bearing lubrication. *Tribology Int.* 2012, 55, 46-58, <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2012.05.013>.

36. Chasalevris, A.; Sfyris, D. Evaluation of the finite journal bearing characteristics, using the exact analytical solution of the Reynolds equation. *Tribol Int.* 2013, 57, 216-234. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2012.08.011>.

37. Vencel, A.; Rac, A. Diesel engine crankshaft journal bearings failures. *Case study, Engineering Failure Analysis.* 2014, 44, 217-228. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2014.05.014>.

38. Wei, L.; Wei, H.; Duan, S. and Zhang, Y. An EHD-mixed lubrication analysis of main bearings for diesel engine based on coupling between flexible whole engine block and crankshaft. *Industrial Lubrication and Tribology.* 2015, 67(2), 150-158. <https://doi.org/10.1108/ILT-08-2013-0088>.

39. Cherabi, B.; Hamrani, A.; Belaidi, I.; Khelladi, S.; Bakir, F. An efficient reduced-order method with PGD for solving journal bearing hydrodynamic lubrication problems. *Comptes Rendus. Mécanique.* 2016, 344(10), 689-714. doi:10.1016/j.crme.2016.05.006.

40. Заблоцький Ю. В.; Сагін, А. С. Визначення динамічних навантажень під час зміни режимів мащення прецизійних пар паливної апаратури суднових дизелів. Суднові енергетичні установки : науково-технічний збірник. Одеса: НУ «ОМА». 2022, 44. 121-131. doi: 10.31653/smf44.2022.121-131.

41. Zablotsky Yu.V.; Sagin S.V.; Enhancing Fuel Efficiency and Environmental Specifications of a Marine Diesel When using Fuel Additives. *Indian Journal of Science and Technology.* 2016, 9(46), 353-362. DOI: 10.17485/ijst/2016 /v9i46/107516.

42. Sagin, S.; Karianskyi, S.; Madey, V.; Sagin, A.; Stoliaryk, T.; Tkachenko, I. Impact of Biofuel on the Environmental and Economic Performance of Marine Diesel Engines. *J. Mar. Sci. Eng.* 2023, 11, 120. <https://doi.org/10.3390/jmse11010120>

DOI: 10.31653/smf52.2026.35-44

дата першого надходження: 11.01.26
дата прийняття статті до друку після
рецензування: 21.02.26
дата публікації: 05.05.26

Корбан В.Х.¹, Шумілова К.В.²¹ORCID 0009-0005-5294-9909, ²ORCID 0000-0003-1222-3730

Національний університет «Одеська морська академія»

ЕФЕКТИВНІСТЬ ОЧИЩЕННЯ ВИПУСКНИХ ГАЗІВ СУДНОВИХ ЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЮ ХВИЛЕЮ КРУГОВОЇ ПОЛЯРИЗАЦІЇ

Постановка проблеми в загальному вигляді

Велике значення набуває питання як аналізу стану середовища у районі функціонування суднових енергетичних установок, а й розробка заходів із забезпечення чистоти атмосфери шляхом зменшення викидів з вихлопних труб дизельних двигунів в атмосферу до гранично допустимих концентрацій, встановлених на Стокгольмській конференції ООН у 1972 р.

Занят практики: необхідність пошуку оптимальних методів зниження викидів в атмосферу шкідливих речовин, які створюються в процесі роботи суднових енергетичних установок при згорянні палива.

Об'єкт дослідження – вихлопні гази суднових енергетичних установок.

Предмет дослідження – електромагнітна хвиля кругової поляризації.

Формулювання мети та постановка завдання дослідження.

Метою даного дослідження є вироблення пропозицій щодо вдосконалення методів та технічних засобів запобігання забруднення навколишнього середовища при функціонуванні суднових енергетичних установок. Тому завданням дослідження є пошук альтернативного методу очищення вихлопних газів судового двигуна та виміру концентрації шкідливого забруднення, для вирішення проблем екологічної безпеки морських дизельних двигунів.

Методи дослідження: в дослідженні використано метод очищення вихлопних газів суднових енергетичних установок електромагнітною хвилею кругової поляризації, а також метод вимірювання концентрації газів з вихлопних труб суднових енергетичних устано-

вок з використанням неполяризованої електромагнітної хвилі на випромінювання і елементи матриці розсіяння Мюллера електромагнітної хвилі, відбитої від газового об'єму, які відповідають концентрації вихлопних газів суднового дизеля.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Одні з найнебезпечніших забруднень, таких як оксиди азоту, викиди яких регулюються вимогами МАРПОЛ 73/78 (Міжнародна конвенція щодо запобігання забрудненню з суден) [1], при згорянні дизельного палива суднового двигуна розглянуті в дослідженні [2]. Зазначено, що ефективне очищення вихлопних газів від оксидів азоту забезпечують каталітичні системи відновлення. Однак, через використання сечовини як реагента в цих системах, збільшуються викиди вуглекислого газу, що викликає утворення парникового ефекту, що сприяє глобальному потеплінню.

Збільшення концентрації оксидів азоту у вихлопних газах дизельного двигуна при використанні палива з вмістом сірки (не більше 0,1 %) досліджено в роботі [3]. Показано, що зміна динамічних і теплових навантажень, що виникають при використанні палива зі зниженим вмістом сірки в судових дизельних двигунах призводить до виникнення аварійних ситуацій. Для управління ризиком таких аварійних ситуацій запропоновано переконфігурацію паливної системи високого тиску, зі зміною кутів випередження подачі палива.

В статті [4] запропоновано методи зменшення шкідливих викидів судових дизелів, зокрема системи рециркуляції відпрацьованих газів (EGR) та впорскування води. Досліджено ефективність використання рециркуляції відпрацьованих газів (EGR) низького тиску та їх вплив на екологічні та технічні характеристики. Також представлено способи зниження емісії оксидів азоту дизелів суден морського та внутрішнього водного транспорту, а саме: застосування селективного каталітичного нейтралізатора SCR (забезпечення 90-95 % зниження викидів NO_x); переведення дизелів на використання газового палива (зниження концентрації оксидів азоту в випускних газах на 85-90 %); забезпечення перебігу робочого циклу дизеля за циклом Міллера (призводить до 45-50 % зниження емісії оксидів азоту NO_x) та ін.

Питання екологічної стійкості судових дизельних двигунів при використанні біодизельного палива дизелів MAN-B&W Diesel Group 5S60ME-C8 та Daihatsu Diesel 6DL-16, що працюють на нафтовому паливі та біодизельному паливі, висвітлено у статті [5]. Ефективність

використання біопалива, підтверджена зниженням концентрації оксидів азоту у вихлопних газах. Встановлено, що використання біопалива забезпечує зниження концентрації оксидів азоту у вихлопних газах на 14,71-25,13% та підвищує екологічну стійкість судових дизельних двигунів на 13,75-29,42%, але при цьому збільшує питому ефективну витрату палива. Були визначені оптимальні кути випередження впорскування палива, що забезпечують найкращі екологічні характеристики дизельних двигунів.

Альтернативні методи [6], такі як очищення вихлопних труб і використання паливних сумішей, що містять біодизель, були запропоновані як індикатор ефективності методів управління екологічною безпекою. Встановлено, що ці методи відповідають вимогам Конвенції MARPOL, а саме (співвідношення SO_2 до CO_2 у діапазоні 2,29-4,17 (у сферах спеціального екологічного контролю) та в діапазоні 6,46-20,83 (поза зоною спеціального екологічного контролю). Однак використання очищення відпрацьованих газів за допомогою скрубної обробки збільшує енергоспоживання для забезпечення цього процесу, оскільки при використанні очищення вихлопних газів додаткові втрати потужності досягають 237-278 кВт.

Експерименти підтвердили низький рівень екологічної стійкості паливної суміші (включаючи біодизель), але цей метод потребує меншого енергоспоживання і характеризується простішим додатковим обладнанням, а також рекомендується як основний метод екологічної безпеки для морських транспортних суден.

Використання скрубів [7] для зменшення вмісту сірки в морських дизельних двигунах є досить надійним методом експлуатації суден. Дослідження показали, що викиди SO_x зменшуються до 95%, а викиди твердих частинок (PM) – на 60%.

Актуальні питання захисту атмосфери від викидів токсичних сполук із вихлопної системи судової дизельної установки за допомогою методів зменшення викидів, зокрема постачання паливних сумішей морського дизельного палива (MDO) та ефіру рапсової олії (RME) (MDO/RME) до двигуна, а також зміни параметрів упорскування пального та кутів таймінгу впорскування, показані в дослідженні [8]. Доведено, що ці процеси зменшують викиди оксиду азоту та вуглекислого газу, особливо при більших навантаженнях двигуна, а зменшення кута упередження впорскування явно зменшує вміст NO_x у вихлопних газах.

Способи зменшення забруднення повітря токсичними викидами з вихлопних труб морських дизельних установок, проблеми декарбонізації судноплавства, екологічні та інноваційні рішення, для зменшення впливу судового палива на довкілля, а також роль людського фактору у підтримці сталого довкілля, які розглянуті в сучасних дослідженнях [9-13], представляють методи контролю викидів шкідливих речовин в атмосферу та експлуатацію різних газочисних установок. Однак поки що ефективність установок з контролю навколишнього середовища та газового очищення ще не є достатньо високою, і вирішення питань екологічної безпеки морських дизельних двигунів є нагальною проблемою сучасного судноплавства.

Виклад основного матеріалу дослідження.

Розглянемо метод очищення вихлопних газів судових енергетичних установок електромагнітною хвилею кругової поляризації. Зазначимо, що кругова поляризація – це стан поляризації, при якому вектор електричного поля у кожній точці електромагнітного поля хвилі має постійну величину. Проте його напрямок обертається з постійною швидкістю в площині, яка перпендикулярна до напрямку хвилі, що поширюється.

Припустимо, що газові частинки (тверді, газоподібні та рідкі), які випромінюються з вихлопних труб судових енергетичних установок, рухаються по колу під впливом електромагнітної хвилі кругової поляризації. Такі частинки в магнітному полі з круговою поляризацією піддаються впливу сили Лоренца:

$$F_L = q|B \cdot V|, \quad (1)$$

де q – заряд частинки;

B – вектор індукції магнітного поля;

V – це вектор швидкості зарядженої частинки.

Враховуючи векторний добуток, формула (1) буде записана як (2):

$$F_L = q|V||B|\sin \alpha, \quad (2)$$

де α – кут між векторами B і V .

Частинки в магнітному полі хвилі рухаються вздовж траєкторії у формі спіральної лінії, вісь якої паралельна вектору індукції маг-

нітного поля хвилі, а радіус траєкторії руху визначається за умовою (3):

$$R = \frac{mV \sin \alpha}{qB}, \quad (3)$$

де m – маса частинки.

Кутовий момент частинки позначається як (4):

$$M = mVR \sin \alpha \quad (4)$$

або, враховуючи формулу (3), рівняння (4) записується як (5):

$$M = \frac{m^2 V^2 \sin^2 \alpha}{qB}. \quad (5)$$

Нехай дві частинки рухаються з однаковою швидкістю, але мають різні маси m_1 і m_2 . Заряди частинок рівні за величиною і протилежні за знаком. Частинки знаходяться на такій відстані одна від одної, що сили взаємного притягання можна ігнорувати. Оскільки заряди частинок мають протилежний знак, під впливом сили Лоренца (2) вони обертаються вздовж правої та лівої спіралей. Тоді загальний крутний момент руху частинок M_Σ коли вони обертаються, буде дорівнювати алгебраїчній сумі їхніх моментів, тобто:

$$M_\Sigma = \frac{m_1^2 V^2 \sin^2 \alpha}{qB} - \frac{m_2^2 V^2 \sin^2 \alpha}{qB} \dots \quad (6)$$

Після відповідного перетворення (6) загальний крутний момент частинок буде записаний як (7):

$$M_\Sigma = \frac{(m_1^2 - m_2^2) V^2 \sin^2 \alpha}{qB} \quad (7)$$

або, користуючись одиничною різницею квадратів, рівняння (7) буде записано як (8):

$$M_\Sigma = \frac{m_\Sigma \Delta m V^2 \sin^2 \alpha}{qB}, \quad (8)$$

де m_Σ – сума мас частинок; Δm – різниця в масі частинок.

Якщо система, що складається з рівної кількості позитивно та негативно заряджених частинок різної маси, проходить через магнітне поле електромагнітної хвилі з круговою поляризацією, то загальний кутовий момент її руху буде відрізнятися від нуля і дорівнювати нулю при однаковій масі частинок.

Якщо частинки вихлопних газів суднової енергетичної установки утворюють електричний диполь, що складається з двох протилежних зарядів однакової абсолютної величини і тісно з'єднаних між собою, то основною фізичною характеристикою такого диполя є дипольний момент P (9):

$$P = qr, \quad (9)$$

де r – вектор, спрямований від негативного заряду до позитивного, довжина якого дорівнює відстані між центрами зарядів.

Для кожного дипольного заряду в магнітному полі хвилі сили Лоренца діють протилежно спрямовані на заряди з різними знаками. Внаслідок цього диполь піддається впливу моменту сил Лоренца $M_{\mathcal{L}}$ (10), які орієнтують його вздовж напрямку, перпендикулярного площині, утвореній індукційними векторами ξ_{mn} магнітного поля та вектором швидкості електричного диполя $V_{\mathcal{D}}$:

$$M_{\mathcal{L}} = P \cdot |V_{\mathcal{D}} \cdot B|, \quad (10)$$

Розглянемо взаємодію електричного диполя з магнітним полем кругової поляризаційної хвилі: коли заряди частинок концентровані в різних масах, між ними немає жорсткого зв'язку. Тоді кожен із зарядів має обмежений ступінь свободи, що дозволяє йому обертатися спіраллю в полі кругової поляризації, а радіус такої траєкторії буде обмежений довжиною та природою зв'язку між зарядами. Щоб врахувати параметри зв'язку між зарядами, у формулі кутового моменту (8) вводимо коефіцієнт вихору K_B , значення якого змінюється від нуля до одного. Тоді рівняння (8) буде записано як (11):

$$M_{\Sigma} = \frac{K_B m_{\Sigma} \Delta m V^2 \sin^2 \alpha}{qB}. \quad (11)$$

За відсутності взаємодії між зарядами, K_B дорівнює одиниці, і у випадку об'єднання зарядів у жорсткий диполь – K_B дорівнює нулю.

Спіральний електричний диполь переміщає масу частинок вихлопних газів, які під впливом сили тяжіння викидаються з магнітного поля хвилі у певний контейнер, звідки їх утилізують. Швидкість падаючих частинок під час обертання визначається формулою Стокса (12):

$$v = 1,3 \cdot 10^{-2} \rho_c r_c^2, \quad (12)$$

де ρ – густина частинок, г/см³; r – радіус частинок, мкм.

Основна частинка вихлопних газів концентрується у вузькому струмені обертального вихору.

Для вимірювання концентрації частинок, що випромінюються з вихлопних труб судових енергетичних установок, використовують неполяризовану електромагнітну хвилю на випромінювання, матрицю Мюллера електромагнітного енергетичного розсіювання на випромінюваних частинках, коефіцієнти яких відповідають концентрації газових компонентів частинок і параметрам поляризації відбитої хвилі. Взаємозв'язок між відбитим і опроміненим об'ємом газу електромагнітної хвилі з матрицею розсіяння Мюллера записується як (13):

$$\begin{bmatrix} I_{vid} \\ Q_{vid} \\ U_{vid} \\ V_{vid} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \xi_{11} & \xi_{12} & \xi_{13} & \xi_{14} \\ \xi_{21} & \xi_{22} & \xi_{23} & \xi_{24} \\ \xi_{31} & \xi_{32} & \xi_{33} & \xi_{34} \\ \xi_{41} & \xi_{42} & \xi_{43} & \xi_{44} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{vin} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (13)$$

де I, Q, U, V – параметри поляризації електромагнітної хвилі, що випромінюється (vin) та відбивається (vid); ξ_{mn} – діелектрична проникність газових компонентів на виході вихлопної труби СЕУ.

Розв'язання рівняння (13) дозволяє визначити концентрацію газових компонентів за першим стовпцем елементів матриці Мюллера:

$$\begin{aligned}\xi_{11} &= \frac{I_{\text{вид}}}{I_{\text{вин}}}; \\ \xi_{21} &= \frac{Q_{\text{вид}}}{I_{\text{вин}}}; \\ \xi_{31} &= \frac{U_{\text{вид}}}{I_{\text{вин}}}; \\ \xi_{41} &= \frac{V_{\text{вид}}}{I_{\text{вин}}}.\end{aligned}\tag{14}$$

Оскільки параметр $I_{\text{вин}}$ залишається сталим у процесі експериментальних досліджень, ми припускаємо, що він дорівнює одиниці, і тоді рівняння (14) переписується як:

$$\xi_{11} = I_{\text{вид}}; \xi_{21} = Q_{\text{вид}}; \xi_{31} = U_{\text{вид}}; \xi_{41} = V_{\text{вид}}.\tag{15}$$

У рівнянні (15) кожний з елементів матриці Мюллера $\xi_{11} - \xi_{41}$ визначає концентрацію вихлопного газу на виході СЕУ, а їх сума $\xi_{\Sigma} = \xi_{11} + \xi_{12} + \xi_{31} + \xi_{471}$ визначає повну концентрацію об'єму вихлопних газів.

Висновки і перспективи подальших досліджень.

1. Запропоновано метод очищення вихлопних газів суднових енергетичних установок за допомогою електромагнітної хвилі круглової поляризації.

2. Концентрація газової суміші вимірюється шляхом її опроміювання неполяризованою хвилею з використанням першого стовбці елементів матриці розсіювання Мюллера.

3. У майбутньому рекомендується розробити функціональну схему пристрою для вимірювання концентрації газових компонентів, що виділяються з вихлопних труб суднових енергетичних установок, за допомогою високоточного мікрохвильового методу, який використовує здатність молекул газу поглинати електромагнітне випромінювання певної частоти.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. 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.

2. Kuropyatnyk, O. Maintaining the environmental friendliness of seagoing vessels when using catalytic reduction systems for marine diesel engines. *Transport Development*. 2025. Vol. (3(26)), P. 73-86. <https://doi.org/10.33082/td.2025.3-26.05>

3. 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. Vol. 5(1(73)). P. 37–43. <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2023.290198>

4. Побережний Р. В., Сагін С. В. Забезпечення екологічних показників дизелів суден річкового та морського транспорту. *Суднові енергетичні установки*. Вип. 41. С. 5-9. DOI: 10.31653/smf340.2020.5- 9

5. 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). id.1440. <https://doi.org/10.3390/jmse12081440>

6. Сагін, С. В., Сагін, С. С., Мадей, В. В. Аналіз методів управління екологічною безпекою навігаційного переходу суден морського транспорту. *Technology Audit and Production Reserves*. 2023. Vol. 4(3(72)). P. 33-42. <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2023.286039>

7. Tran T.A. Research of the Scrubber Systems to Clean Marine Diesel Engine Exhaust Gases on Ships. *Journal of Marine Science: Research & Development*. 2017. Vol 7(6). P. 243. DOI: 10.4172/2155-9910.1000243

8. Witkowski, K. Research of the Effectiveness of Selected Methods of Reducing Toxic Exhaust Emissions of Marine Diesel Engines. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2020. Vol. 8(6). 452 p. <https://doi.org/10.3390/jmse8060452>

9. Behrends B. Particulate Matter emission reduction in international maritime shipping. *German Environment Agency*. 2025. <https://doi.org/10.60810/openumwelt-7816>

10. Голяков В. А., Данилов К. С., Шумілова К. В. Еколого-енергетична ефективність експлуатації контейнеровозів на міжконтинентальних перевезеннях. *Суднові енергетичні установки*. 2025. Вип. 50. С. 26-41. DOI: 10.31653/smf 50.2025.26-41.

11. Шумілова К. В., Шумілов Д. І. Багатоаспектний вплив судноплавства і діяльності людини в ракурсі парадигми управління ресурсами світового океану. *Суднові енергетичні установки*. 2023. Вип. 47. С. 217-230. <https://doi.org/10.31653/smf47.2023.217-230>

12. Шумілова К. В. Декарбонізація судноплавства – шляхи переходу на альтернативну енергетику. *Матеріали III Міжнародної науково-практичної морської конференції, МРР&О-2021, X.: Видав. Іванченка І.* Одеськ. нац. мор. ун-т. 2021. С. 123-130. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.36574.15681>

13. Шумілова, К., & Константінов, О. (2025, жовтень 16). Екологічні та інноваційні рішення для зменшення впливу судового палива на морське середовище. *Друга Всеукраїнська науково-практична конференція «Сталий, інклюзивний, смарт розвиток: наукові підходи до вирішення сучасних глобальних і локальних викликів»*, Тернопіль. <https://doi.org/10.5281/zenodo.1737061>

DOI: 10.31653/smf52.2026.45-60

дата першого надходження: 14.01.26
дата прийняття статті до друку після
рецензування: 21.02.26
дата публікації: 05.05.26

Парменова Д.Г.¹, Кулешов І.М.²¹ORCID 0000-0001-7794-8586, ²ORCID 0009-0009-0169-4669

Національний університет «Одеська морська академія»

ЦИФРОВІ ЗАСОБИ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДЕКАРБОНІЗАЦІЇ МОРСЬКОГО ТРАНСПОРТУ

Постановка проблеми в загальному вигляді. Декарбонізація морського транспорту на сьогодні перетворилася на системну управлінську, технічну та економічну проблему. Після ухвалення Міжнародною морською організацією (ІМО) Стратегії 2023 року щодо скорочення викидів парникових газів із суден вимоги до екологічності суден стали значно жорсткішими: визначено орієнтир досягнення нульового балансу викидів міжнародного судноплавства приблизно до 2050 року, збережено ціль зниження вуглецевої інтенсивності щонайменше на 40 % до 2030 року відносно 2008 року та встановлено мету щодо забезпечення до 2030 року щонайменше 5 % загально-енергоспоживання міжнародного судноплавства за рахунок технологій, палив та джерел енергії з нульовими або майже нульовими викидами парникових газів, із орієнтиром на досягнення 10 % [1]. У таких умовах судноплавні компанії, порти, класифікаційні товариства, розробники суднових енергетичних установок і органи державного та міжнародного регулювання стикаються не лише з потребою впровадження нових палив та енергетичних рішень, а й з необхідністю якісно нового рівня цифрового управління судновими операціями, ланцюгами постачання, технічним станом обладнання та верифікацією викидів.

У цьому контексті цифровізація не є лише допоміжним елементом. Вона стає інфраструктурою декарбонізації, оскільки саме цифрові дані дозволяють перетворити загальні екологічні цілі на конкретні експлуатаційні рішення: вибір швидкості, маршруту, режиму енергоспоживання, часу прибуття до порту, параметрів технічного обслуговування та поєднання енергетичних ресурсів, що використовуються на судні. У сучасних дослідженнях зазначається, що цифровізація здатна підтримати декарбонізацію як у судноплаванні, так і в

портах та суміжних логістичних системах [2]. Водночас огляд досліджень з цифрової трансформації морського транспорту показує, що її результативність визначається не лише наявністю технологій, а й стандартизацією даних, міжорганізаційною координацією та готовністю персоналу працювати з новими інструментами [3].

Постановка проблеми. Проблема полягає в тому, що сучасне судноплавство перебуває під подвійним тиском. З одного боку, зростають міжнародні та регіональні вимоги до скорочення викидів. Міжнародна морська організація (ІМО) поєднала обов'язкові технічні та експлуатаційні механізми, зокрема визначення індексу енергоефективності існуючого судна (ЕЕХІ) та експлуатаційного показника вуглецевої інтенсивності судна (СІІ), запровадження Плану управління енергоефективністю судна (SEEMP) та системи збору даних про споживання палива. Відповідно до чинних підходів SEEMP має включати три частини: План управління, спрямований на підвищення енергоефективності, План збору даних щодо витрати палива та План щодо експлуатаційної вуглецевої місткості судна [4, 5]. Система збору даних ІМО про споживання судового палива (IMO Data Collection System, IMO DCS) вимагає від суден валовою місткістю 5000 рег. тонн і більше фіксувати та подавати верифіковані дані про витрати палива, а держави прапора – передавати їх до бази даних ІМО у визначені строки [6, 7]. З іншого боку, у Європейському Союзі (ЄС) з 1 січня 2024 року морські перевезення включені до Системи торгівлі дозволами на викиди Європейського Союзу (European Union Emissions Trading System, EU ETS), а з 2025 року регламент ЄС щодо використання відновлюваних і низьковуглецевих палив у морському транспорті (FuelEU Maritime) запроваджує поетапне скорочення викидів парникових газів з суден від 2 % у 2025 році до 80 % у 2050 році та вимагає в окремих випадках підключення до берегового електропостачання під час стоянки [8, 9].

За цих умов традиційними підходами до управління судовою енергоефективністю є періодичний аналіз рейсу, ручне опрацювання звітів, ізольоване планування маршруту або обслуговування за календарним принципом – виявляються недостатніми. Вони не забезпечують своєчасної реакції на зміну погоди, навантаження, черги в портах, погіршення технічного стану пропульсивного комплексу, зміну нормативних вимог і вартості забезпечення вуглецевої відповідності.

Постановка завдання. Завданням дослідження було визначення того, які саме цифрові інструменти реально здатні забезпечити скорочення викидів на морському транспорті, як вони інтегруються з чинними міжнародними нормами та які обмеження супроводжують їх впровадження.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблематика декарбонізації морського транспорту в сучасних наукових дослідженнях дедалі частіше розглядається у взаємозв'язку з цифровою трансформацією судноплавства, портової інфраструктури та логістичних ланцюгів. У фаховій літературі наголошується, що досягнення цілей зі скорочення викидів парникових газів у морській галузі пов'язується не лише з технічною модернізацією суден і впровадженням альтернативних палив, а й із застосуванням цифрових інструментів, здатних поєднувати експлуатаційні, енергетичні, екологічні та регуляторні параметри в єдину систему прийняття рішень [1, 3].

Аналіз наукових праць показує, що одним із найбільш розроблених напрямів є дослідження систем цифрового моніторингу, звітності та аналітики, які забезпечують виконання міжнародних і регіональних вимог щодо енергоефективності та викидів. У центрі уваги таких досліджень перебувають питання збору, передавання, верифікації та інтерпретації експлуатаційних даних судна для забезпечення відповідності вимогам СІІ, SEEMP та DCS. Зокрема, у роботі [10] запропоновано спрощену систему моніторингу для малих і середніх суден, здатну на основі обмеженого набору параметрів формувати достатньо інформативну картину щодо швидкості, потужності, витрати палива, викидів CO₂ та загальної ефективності судна [10]. Поряд із цим у професійних аналітичних матеріалах Інституту морської інженерії, науки і технологій (IMarEST) підкреслюється, що саме дані, отримані в процесі експлуатації, створюють підґрунтя для зниження витрати палива, скорочення викидів та прийняття більш обґрунтованих операційних рішень у сфері декарбонізації [11].

Окремий масив публікацій присвячено цифровій оптимізації рейсу, швидкості та погодної маршрутизації. У цих роботах доводиться, що врахування прогнозованих гідрометеорологічних умов, параметрів навантаження судна та критеріїв безпеки дозволяє зменшувати витрати палива без погіршення експлуатаційної надійності та безпеки судноплавства [12, 13]. Важливо, що сучасні дослідження та аналітичні матеріали розглядають «оптимізацію рейсу» (voyage optimisation) і «погодну маршрутизацію» (weather routing) не як ізо-

льовані навігаційні інструменти, а як частину ширшої системи координації між судном, портом і логістичним ланцюгом. Саме в такому контексті «прибуття точно в строк» (just-in-time arrival) починає тлумачитися не лише як інструмент економії часу, а і як засіб запобігання надлишковому спалюванню палива внаслідок поспіху до порту та подальшого простою на якорі [14].

Перспективним напрямом сучасних досліджень є застосування цифрових двійників у морському транспорті. У публікаціях цього напрямку цифровий двійник трактується як динамічна модель судна, його підсистем або маршруту, яка безперервно оновлюється на основі експлуатаційних даних і дає можливість оцінювати наслідки рішень до їх практичної реалізації. У роботі [15] такий підхід використано для маршрутизації судна з урахуванням вимог декарбонізаційного регулювання, що дозволило поєднати реальні експлуатаційні та метеорологічні дані з фізичною моделлю оцінювання викидів [15]. У ширшому контексті цифрові двійники розглядаються як інструмент енергетичного менеджменту, моделювання режимів роботи, оцінювання технічного стану судна та аналізу сценаріїв підвищення енергоефективності [15].

Значна увага в останніх дослідженнях приділяється також застосуванню штучного інтелекту (AI), машинного навчання (ML) та технічного обслуговування на основі прогнозування стану. Наукові й прикладні публікації свідчать, що великі масиви експлуатаційних даних, судової сенсорика, рейсова звітність та технічні параметри обладнання формують підґрунтя для прогнозування енергоспоживання, виявлення енергоефективних режимів роботи та раннього виявлення відхилень у технічному стані обладнання [16, 17]. Для судових енергетичних установок це особливо важливо, оскільки діагностування технічного стану та контроль паливної економічності безпосередньо пов'язані з витратою палива й експлуатаційною ефективністю [16, 18]. Окремі аналітичні матеріали також підкреслюють, що інструменти штучного інтелекту можуть бути ефективними для прогнозного технічного обслуговування, підвищення надійності обладнання та підтримки операційних рішень у судноплаванні [17].

Ще одним важливим напрямом наукових публікацій є цифровізація портів і декарбонізація ланцюга перевезення. Дослідники відзначають, що істотна частка надлишкових викидів формується на стику взаємодії судна з портом унаслідок неузгодженості операцій, неточності інформації про розрахунковий час прибуття судна

(estimated time of arrival, ETA), затримок на підходах та простоїв суден із працюючими допоміжними двигунами. У цьому контексті дедалі більшої уваги набувають портові цифрові платформи та цифрові двійники портів. Так, у роботі [19] продемонстровано можливість використання портового цифрового двійника для покращення прогнозу часу прибуття суден і викидів CO₂ під час рейсу [19]. Водночас стратегічні документи ІМО та регіональні акти ЄС підкреслюють значення розвитку берегового електропостачання, постачання низьковуглецевої енергії та оптимізації логістичного ланцюга як важливих складових декарбонізації морської галузі [1, 9].

Поряд із визнанням значного потенціалу цифровізації в науковій літературі окреслюються і її обмеження. Насамперед ідеться про залежність результативності цифрових інструментів від якості даних, коректності калібрування сенсорів, повноти телеметрії та сумісності інформаційних форматів. У джерелі [3] серед ключових бар'єрів цифрової трансформації морського транспорту розглядаються питання, пов'язані з драйверами, чинниками успіху та бар'єрами цифровізації, зокрема проблемами інтеграції та організаційної взаємодії [3]. Крім того, сучасні підходи ІМО до оцінювання викидів у межах життєвого циклу палива засвідчують перехід від вузького підходу «від суднового танка до вихлопу» (tank-to-wake), який передбачає оцінювання викидів парникових газів тільки під час експлуатації судна, до ширшого – «від джерела до вихлопу» (well-to-wake), що охоплює повний життєвий цикл палива – від його виробництва, перероблення й транспортування до кінцевого використання на борту судна, і вимагає врахування не лише факту спалювання палива на борту, а й його походження, життєвого циклу та показників його екологічного впливу на довкілля [20, 21].

Отже, аналіз останніх досліджень і публікацій дає підстави стверджувати, що цифрові інструменти дедалі більше розглядаються як системна основа декарбонізації морського транспорту. Вони забезпечують зв'язок між технічною експлуатацією судна, оптимізацією рейсу, енергетичним менеджментом, портовою координацією та виконанням регуляторних вимог. Водночас подальших досліджень потребують питання інтеграції цих інструментів у єдині цифрові екосистеми, здатні забезпечувати комплексне управління енергоефективністю, викидами та екологічною відповідністю морського транспорту.

Виклад основного матеріалу дослідження. Цифровізація морського транспорту у сучасних умовах виступає не лише засобом підвищення операційної ефективності, а й важливим інструментом забезпечення декарбонізації судноплавства. Її практичне значення полягає у формуванні цілісного інформаційного контуру, в межах якого дані про роботу судна, його енергетичної установки, маршрут, портову взаємодію та паливне забезпечення перетворюються на підставу для прийняття технічних, експлуатаційних і рішень щодо дотримання нормативних вимог.

1. Цифрові дані як основа декарбонізації, що здійснюється під впливом нормативних вимог. Перша група цифрових інструментів пов'язана з моніторингом, звітністю та аналітикою показників енергоефективності і викидів. Саме розвиток таких систем робить реальним виконання вимог СІІ, SEEMP та DCS. Цифрова платформа енергетичного моніторингу зазвичай об'єднує суднові датчики, лічильники витрати палива, дані Глобальної системи позиціонування / Автоматичної ідентифікаційної системи (GPS/AIS), метеорологічну інформацію, дані про режими роботи суднової енергетичної установки, а також берегові аналітичні модулі. У практичному вимірі це означає перехід від звітності за минулий період до майже безперервної оцінки вуглецевої інтенсивності конкретного рейсу, судна і навіть окремого режиму роботи енергетичної установки. Наукові розробки у цій сфері вже пропонують спрощені, але достатньо інформативні системи моніторингу. Зокрема, у дослідженні [10] розроблено спрощену систему контролю для малих і середніх суден, яка на основі обмеженого набору даних (GPS, витрата палива, частота обертання) здатна визначати швидкість, потужність, витрату палива, оцінку викидів CO₂ та ефективність судна з передаванням інформації до берегового центру в реальному часі [10]. Важливість цієї роботи полягає в тому, що декарбонізація вимагає цифрових рішень не лише для великих океанських суден, а й для прибережного, сервісного та малого тоннажу, де ресурсні обмеження особливо відчутні. Водночас сам збір даних ще не гарантує результату. Ефект виникає тоді, коли цифровий контур перетворює дані на керівні дії: прогноз досягнення рейтингу СІІ, попередження про зростання витрати палива, автоматизовану перевірку відповідності звітності, порівняння фактичного профілю енерговитрат із базовим або контрактним. У публікаціях IMarEST підкреслюється, що саме дані, отримані в ході операцій, стають основою для скорочення витрат палива та викидів, а оптимізація

використання вантажомісткості судна та організації рейсу на основі даних може забезпечувати значне підвищення ефективності [11]. Отже, цифровий моніторинг слід розглядати не як форму звітності заради звітності, а як механізм управління декарбонізаційним ризиком.

2. Оптимізація рейсу, швидкості та погодної маршрутизації. Друга велика група інструментів – це системи оптимізації рейсу, погодної маршрутизації, прибуття точно в строк та інтегрованого планування рейсу. Вони прямо впливають на витрати палива і викиди, оскільки дають змогу уникати нераціональних розгонів, необґрунтовано високої сервісної швидкості, тривалого очікування біля порту та проходження маршрутів із високим хвильовим опором. У дослідженнях з навігаційної оптимізації вже доведено, що врахування прогнозованих гідрометеорологічних умов забезпечує вибір більш паливоективних маршрутів без зниження рівня безпеки судноплавства [12]. Інші роботи пропонують спеціалізовані алгоритми погодної маршрутизації, які забезпечують зниження показника вуглецевої інтенсивності судна за одночасного врахування безпеки плавання, графіка руху та енергоефективності [13]. З погляду декарбонізації принципово важливим є відхід від ізольованого планування судном лише власного переходу. Реальний ефект з'являється, коли оптимізація маршруту узгоджується з часовим вікном обслуговування судна в порту, готовністю причалу, вантажно-технологічними операціями термінала та логістичним ланцюгом. Саме тому сучасні підходи до прибуття точно в строк розглядаються як інструмент не тільки економії часу, а й уникнення зайвого спалювання палива через поспіх до порту з подальшим простоем на якорі. IMarEST у матеріалах щодо інтелектуальних транспортних систем для морської галузі вказує, що поєднання судна, порту і логістики у спільну цифрову архітектуру дає менші затримки, зменшує черги та викиди, а адаптивна оптимізація швидкості вже сама по собі може істотно скорочувати емісії [14]. Практичне значення таких систем особливо зросло після запровадження СІІ та регіональних механізмів вуглецевого регулювання. За наявності прогнозу погоди, фактичного осідання, вантажного профілю, стану корпусу та гвинта оператор отримує можливість у реальному часі вирішувати компроміс між строком доставки, рейтингом СІІ, витратами на паливо та потенційними вуглецевими платежами. Тобто цифрова маршрутизація перетворюється на інструмент багатокритеріального управління, а не просто на навігаційну допомогу.

3. Цифрові двійники судна та енергетичних систем. Одним із найперспективніших напрямів вважається застосування цифрових двійників. Для морського транспорту цифровий двійник – це динамічна цифрова модель судна, його підсистем або маршруту, яка безперервно оновлюється експлуатаційними даними та дозволяє оцінювати наслідки рішень до їх фактичної реалізації. Для декарбонізації це має вирішальне значення, оскільки двійник дозволяє моделювати вплив швидкості, стану моря, технічного стану, типу палива, стратегій розподілу навантаження або використання гібридних енергетичних установок на паливоспоживання та викиди. У [15] запропоновано цифровий двійник для маршрутизації судна з урахуванням виконання вимог декарбонізаційного регулювання. Запропонований підхід поєднує реальні експлуатаційні й метеорологічні дані з фізичною моделлю оцінки викидів і дає змогу прогнозувати ймовірність відповідності судна нормативним вимогам впродовж рейсу [15]. Така постановка є надзвичайно важливою, бо переносить цифровий двійник з рівня технічної візуалізації на рівень підтримки рішень щодо забезпечення відповідності встановленим вимогам. Іншими словами, цифровий двійник перестає бути лише моделлю стану судна і стає інструментом декарбонізаційного менеджменту. У ширшому науковому контексті цифрові двійники розглядаються також як засіб оптимізації роботи пропульсивного комплексу, енергетичного менеджменту гібридних установок, аналізу відхилень фактичної витрати палива від еталонної, оцінки ефекту очищення корпусу та гвинта, а також верифікації сценаріїв переходу на альтернативні палива. Для судових механіків це формує новий підхід до технічної експлуатації судових систем: технічний стан і викиди розглядаються спільно, а рішення щодо обслуговування, налаштування або ремонту приймаються з урахуванням їхнього екологічного ефекту. У результаті декарбонізація перестає бути завданням лише комерційного департаменту або екологічного менеджменту і стає частиною системи технічної експлуатації судна.

4. Прогнозування, штучний інтелект і технічне обслуговування на основі прогнозування стану. Наступна група цифрових інструментів пов'язана з машинним навчанням, прогноною аналітикою та технічним обслуговуванням за фактичним станом. Наукові огляди засвідчують, що великі обсяги експлуатаційних даних, дані сенсорного контролю, рейсова звітність та гідрометеорологічна інформація є фундаментом для точного прогнозування енергоспоживання суден і

пошуку енергоефективних режимів [22]. Чим точніше система прогнозує споживання палива за реальних умов, тим ефективніше вона може підтримувати рішення щодо швидкості, розподілу навантаження, очищення підводної частини, коригування графіка технічного обслуговування та вибору маршруту. Технічне обслуговування на основі прогнозування стану має безпосередній декарбонізаційний потенціал, хоча в традиційних обговореннях він часто недооцінюється. Погіршення стану форсунок, турбоагнітача, систем наддуву, теплообмінних поверхонь, лінії валопроводу або підводної частини корпусу поступово підвищує питомі витрати палива [16, 18]. Якщо ці відхилення виявляються не під час планового ремонту, а набагато раніше - за допомогою алгоритмів аномалій, цифрових профілів навантаження та прогнозних моделей, - судно уникає систематичних прихованих викидів. У цьому сенсі інструменти штучного інтелекту та машинного навчання є не додатком до технічної експлуатації, а способом запобігання енергетичній деградації судна. IMarEST також відзначає роль штучного інтелекту в оптимізації маршруту, врахуванні погоди, трафіку, цін на паливо та інтеграції з портовою логістикою для зменшення простоїв і витрат палива [14, 17]. Водночас застосування таких інструментів у морській галузі потребує обережності: моделі повинні бути зрозумілими для екіпажу та берегових операторів, навчатися на репрезентативних даних і не підміняти собою критерії безпеки судноплавства. Найбільш продуктивним є поєднання фізичних моделей судна з алгоритмами машинного навчання, коли цифрова система не просто прогнозує результат, а інтерпретує його через реальні експлуатаційні параметри.

5. Портова цифровізація та декарбонізація ланцюга перевезення. Значна частина надлишкових викидів формується не лише в рейсі, а й на стику судна з портом. Запізнена інформація про готовність причалу, неузгодженість вантажно-технологічних операцій терміналу, відсутність точного часу прибуття судна, простої на підходах та стоянка з працюючими допоміжними двигунами зумовлюють додаткове спалювання палива. Саме тому в Стратегії ІМО 2023 року прямо звертається увага на розвиток портової інфраструктури, берегового електропостачання, постачання низьковуглецевої енергії та подальшу оптимізацію логістичного ланцюга, включаючи порти [1]. У цьому контексті значний інтерес становлять портові цифрові двійники. У роботі [19] створено портовий цифровий двійник, який використовує спільні дані морських стейкхолдерів і алгоритм інтерактивного

планування для покращення прогнозу часу прибуття суден та викидів CO₂ під час рейсу. Значення такого підходу полягає в тому, що об'єктом декарбонізації стає не окреме судно, а узгоджена система «судно - порт - термінал - ланцюг доставки». Відповідно скорочення викидів досягається не лише завдяки альтернативному паливу, а й завдяки усуненню операційної неузгодженості. Регіональні механізми нормативного регулювання додатково стимулюють цифровізацію портової діяльності. FuelEU Maritime прямо підтримує використання відновлюваних і низьковуглецевих палив, чистих технологій і берегового електропостачання [9]. Це означає, що порти повинні мати не тільки фізичну інфраструктуру, а й цифрові платформи для верифікації джерела енергії, енергетичного балансу, режиму підключення судна, відстеження параметрів, передбачених FuelEU Maritime, та обміну даними з судноплавною компанією і верифікатором. Без такої цифрової надбудови навіть наявність технічної інфраструктури не забезпечить належного декарбонізаційного результату.

6. Межі ефективності цифрових інструментів. Попри значний потенціал, цифровізацію не можна розглядати як самодостатнє рішення. По-перше, її результативність залежить від якості даних: помилки в калібруванні датчиків, розриви телеметрії, несумісність форматів або спотворення вхідних параметрів призводять до хибних управлінських рішень. По-друге, цифрові системи вимагають стандартизації та належного рівня довіри між зацікавленими сторонами. Огляд цифрової трансформації морського транспорту виокремлює брак стандартів і кооперації як одну з ключових перешкод [3]. По-третє, декарбонізація не зводиться до оптимізації експлуатації: навіть найкраща цифрова система не замінить необхідності оновлення флоту, впровадження альтернативних палив, використання берегової енергії та модернізації енергетичних установок. Разом із тим саме цифрові інструменти забезпечують узгодження технологічних, експлуатаційних і нормативних рішень. Міжнародна морська організація у керівництвах щодо оцінювання інтенсивності викидів парникових газів упродовж життєвого циклу морських палив переходить від підходу «від судового паливного танка до вихлопу» до підходу «від виробництва палива до його використання на борту судна», охоплюючи вуглекислий газ, метан і закис азоту та вводячи маркування життєвого циклу палива як технічний інструмент обліку [20, 21]. Це означає, що в подальшому цифрові платформи мають працювати не лише з даними про спалювання палива на борту, а й з верифікацією його походжен-

ня, життєвого циклу та екологічних характеристик. Отже, майбутнє цифрової декарбонізації морського транспорту полягає в інтеграції судових, портових, логістичних і паливних даних в єдині екосистеми прийняття рішень.

З огляду на викладене, у таблиці 1 наведено узагальнений опис і обмеження використання основних цифрових інструментів декарбонізації.

Таблиця 1. Основні цифрові інструменти декарбонізації морського транспорту

Інструмент	Джерело даних	Декарбонізаційний ефект	Основні обмеження
Системи моніторингу та аналітики паливоспоживання, викидів і вуглецевої інтенсивності судна (MRV/DCS/СП-аналітики)	Дані про паливоспоживання, GPS/AIS, параметри головних і допоміжних механізмів, журнали режимів роботи, рейсові, метеорологічні та вантажні дані	Забезпечують безперервний контроль паливоспоживання, викидів і вуглецевої інтенсивності судна; створюють інформаційну основу для виявлення відхилень, підвищення енергоефективності та дотримання екологічних вимог	Результативність залежить від точності датчиків, повноти та безперервності збору даних, уніфікації форматів обміну інформацією, коректності верифікації показників, а також від узгодженості судових і берегових інформаційних систем
Оптимізація рейсу, погодна маршрутизація	Прогнозовані й фактичні гідрометеорологічні умови, дані про осідання судна, швидкість і режим руху, розрахунковий час прибуття, часові вікна портового обслуговування, характеристики вантажу, параметри стану корпусу і рушійного комплексу	Сприяють вибору паливоективних маршрутів і режимів руху, зменшенню надлишкової швидкості, простоїв на підходах до порту, експлуатаційних викидів і ризику погіршення вуглецевої інтенсивності, а також узгодженню судових і портових операцій	Ефективність залежить від точності прогнозів погоди, якості даних про технічний і вантажний стан судна, своєчасної інформації від порту та узгодження між вимогами безпеки, графіком перевезення і завданнями мінімізації паливоспоживання

Продовження таблиці 1

Інструмент	Джерело даних	Декарбонізаційний ефект	Основні обмеження
Цифрові двійники	Фізичні та математичні моделі судна і його підсистем, телеметрія в реальному часі, експлуатаційні дані енергетичної установки, навігаційна інформація, метеорологічні параметри, дані про технічний стан корпусу, рушійного комплексу та допоміжного обладнання	Дозволяють моделювати режими роботи судна, прогнозувати вплив швидкості, стану моря, навантаження, технічного стану та типу палива на паливоспоживання і викиди; підтримують обґрунтування рішень щодо підвищення енергоефективності, технічного обслуговування та дотримання екологічних і нормативних вимог	Вимагають високого рівня інтеграції різнорідних джерел даних, наявності валідованих фізичних і математичних моделей, значних обчислювальних ресурсів, регулярного оновлення параметрів моделі та складної процедури підтвердження достовірності результатів моделювання
Інструменти штучного інтелекту, машинного навчання (AI/ML) та прогнозного технічного обслуговування	Дані попередніх спостережень і поточного контролю роботи обладнання, параметри рейсу, навігаційні та погодні дані, дані сенсорного контролю, записи про технічне обслуговування і ремонт, показники паливоспоживання та навантаження енергетичної установки	Забезпечують раннє виявлення погіршення технічного стану обладнання, прогнозування відмов і неефективних режимів роботи, запобігання прихованому зростанню питомих витрат палива, підвищення точності експлуатаційних рішень і зниження викидів за рахунок своєчасного технічного втручання	Обмежуються залежністю від якості й репрезентативності даних, складністю інтерпретації результатів, ризиком перенавчання моделей, потребою в їх адаптації до нових умов експлуатації та необхідністю узгодження алгоритмічних висновків із вимогами надійності й безпеки судноплавства

Закінчення таблиці 1

Інструмент	Джерело даних	Декарбонізаційний ефект	Основні обмеження
Портові цифрові платформи та цифрові двійники	Дані про розрахунковий час прибуття судна, графіки швартування та розподілу суден за причалами, вантажно-технологічні операції терміналів, інформація про підключення до берегового електроживлення, дані щодо використання низьковуглецевих видів енергії, відомості про завантаженість портової інфраструктури та взаємодію з логістичними учасниками	Сприяють організації прибуття суден точно в строк, зменшенню черг і простоїв на підходах до порту, скороченню зайвого спалювання палива під час очікування, поліпшенню енергетичного балансу в порту та узгодженню судових, портових і термінальних операцій у межах декарбонізаційної стратегії	Впровадження ускладнюється потребою в міжорганізаційній сумісності інформаційних систем, високими вимогами до кібербезпеки, неоднорідністю цифрової зрілості учасників портового середовища, потребою в стандартизації обміну даними та значними витратами на створення й підтримку цифрової інфраструктури

Висновки і перспективи подальших досліджень.

1. Декарбонізація морського транспорту в сучасних умовах вже не може бути реалізована винятково за рахунок переходу на нові види палива або встановлення окремих технічних рішень. Її необхідною умовою є цифровізація судових, портових і логістичних процесів, оскільки саме цифрові інструменти забезпечують вимірюваність, прогнозованість і керуваність викидів.

2. Найбільший практичний ефект для декарбонізації дає поєднання п'яти класів інструментів: систем моніторингу та звітності щодо енергоефективності; оптимізації маршруту, швидкості та часу прибуття; цифрових двійників судна й порту; систем прогнозування на основі штучного інтелекту та машинного навчання; інтегрованих платформ координації між судном, портом і логістичним ланцюгом.

3. Цифрові інструменти особливо цінні тим, що вони переносять декарбонізацію з площини загальних цілей у сферу практичних експлуатаційних рішень щодо управління рухом судна, планування його заходу до порту, обирання режиму роботи енергетичної установки, визначення строків технічного обслуговування обладнання та оцінювання фактичного екологічного ефекту палива за його життєвим циклом.

4. Водночас ефективність цифровізації обмежується якістю даних, відсутністю єдиних стандартів, фрагментацією інформаційних потоків, кіберризиками та недостатньою підготовкою персоналу. Отже, подальші дослідження і практичні проекти доцільно спрямовувати на інтеграцію цифрових платформ із вимогами Міжнародної морської організації, регламенту FuelEU Maritime, системи торгівлі квотами на викиди Європейського Союзу та підходу, що ґрунтується на оцінюванні життєвого циклу палива, а також на розвиток компетентностей екіпажу та берегових фахівців у сфері управління судновою енергоефективністю на основі даних.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Resolution MEPC.377(80) – 2023 IMO Strategy on Reduction of GHG Emissions from Ships, adopted on 7 July 2023.

2. Agarwala P. Using digitalisation to achieve decarbonisation in the maritime transport sector. *Journal of Shipping and Trade*. 2021. <https://doi.org/10.1080/25725084.2021.2009420>.

3. Tijan E., Jovic M., Aksentijevic S., Pucihar A. Digital transformation in the maritime transport sector. *Technological Forecasting and Social Change*. 2021. Vol. 170. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2021.120879>.

4. Improving the energy efficiency of ships. *International Maritime Organization*: website. URL: <https://www.imo.org/en/ourwork/environment/pages/improving%20the%20energy%20efficiency%20of%20ships.aspx> (date: 02.03.2026)

5. Resolution MEPC.395(82) – 2024 guidelines for the development of a ship energy efficiency management plan (SEEMP), adopted on 4 October 2024.

6. IMO Data Collection System (DCS). *International Maritime Organization*: website.

URL: <https://www.imo.org/en/ourwork/environment/pages/data-collection-system.aspx> (date: 23.02.2026)

7. MEPC.1/Circ.871/Rev.1 – Guidance for submission of data to the IMO Data Collection System of fuel oil consumption of ships from a State not party to MARPOL Annex VI, 24 June 2022.

8. FAQ - Maritime transport in EU Emissions Trading System (ETS). *European Commission*: website. URL: https://climate.ec.europa.eu/eu-action/transport-decarbonisation/reducing-emissions-shipping-sector/faq-maritime-transport-eu-emissions-trading-system-ets_en (date: 26.02.2026)

9. Decarbonising maritime transport - FuelEU Maritime. *European Commission*: website. URL: https://climate.ec.europa.eu/eu-action/transport-decarbonisation/reducing-emissions-shipping-sector/faq-maritime-transport-eu-emissions-trading-system-ets_en?utm_source (date: 23.02.2026)

10. Kim S., Kim H., Jeon H. Development of a Simplified Performance Monitoring System for Small and Medium Sized Ships. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2023. Vol. 11, no. 9. Article 1734. <https://doi.org/10.3390/jmse11091734>.

11. Wang J, Lee K, Fu X, et al. Data-driven decarbonization in the maritime industry: An integrative analytical review. *Communications in Transportation Research*, 2026. <https://doi.org/10.26599/COMMTR.2026.9640002>

12. Kytariolou A., Delis A., Ventikos Y., Hamann R. Ship routing optimisation based on forecasted weather data and considering safety criteria. *Journal of Navigation*. 2022. <https://doi.org/10.1017/S0373463322000613>.

13. Sun W., Wang H., Zhang H. et al. An Improved Ship Weather Routing Framework for CII Reduction Accounting for Wind-Assisted Rotors. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2022. Vol. 10, no. 12. Article 1979. <https://doi.org/10.3390/jmse10121979>.

14. Why maritime must act now on Intelligent Transport Systems. *Institute of Marine Engineering, Science and Technology*: website. 2026. URL: <https://www.imarest.org/resource/why-maritime-must-act-now-on-intelligent-transport-systems.html> (date: 02.03.2026)

15. Wei Q., Liu Y., Dong Y., Li T., Li W. A digital twin framework for real-time ship routing considering decarbonization regulatory compliance. *Ocean Engineering*. 2023. Vol. 278. Article 114407. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.114407>.

16. Сагін С.В., Парменова Д.Г. Діагностування технічного стану суднових дизелів. *Суднові енергетичні установки: науково-технічний збірник*. Вип. 51. Одеса: НУОМА, 2025. С. 66-77. <https://doi.org/10.31653/smf51.2025.66-77>.

17. Artificial intelligence in shipping. 2026. *Institute of Marine Engineering, Science and Technology*: website. URL: https://www.imarest.org/resource/mp-artificial-intelligence-in-shipping.html?utm_source (date: 02.03.2026)

18. Сагін С.В., Парменова Д.Г., Верпека А.О. Підвищення паливної економічності дизелів суден морського транспорту. *Суднові енергетичні установки: науково-технічний збірник*. Вип. 50. Одеса: НУОМА, 2025. С. 102-115. <https://doi.org/10.31653/50.2025.102-115>.

19. Eom J.-O., Yoon J.-H., Yeon J.-H., Kim S.-W. Port Digital Twin Development for Decarbonization: A Case Study Using the Pusan Newport International Terminal. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2023. Vol. 11, no. 9. Article 1777. <https://doi.org/10.3390/jmse11091777>.

20. IMO framework on life cycle GHG intensity of marine fuels (LCA). *International Maritime Organization*: website. URL: <https://www.imo.org/en/ourwork/environment/pages/lifecycle-ghg---carbon-intensity-guidelines.aspx> (date: 02.03.2026)

21. Resolution MEPC.391(81) – International Maritime Organization. 2024 Guidelines on Life Cycle GHG Intensity of Marine Fuels (2024 LCA Guidelines), adopted on 22 March 2024.

22. Wang K., Yan X., Yuan Y., Jiang X. et al. A comprehensive review on the prediction of ship energy consumption and emissions. *Ocean Engineering*. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.112826>.

DOI: 10.31653/smf52.2026.61-76

дата першого надходження: 11.01.26
дата прийняття статті до друку після
рецензування: 21.02.26
дата публікації: 05.05.26Сагін А.С.¹, Заблоцький Ю.В.²¹ORCID: 0009-0000-4965-6121, ²ORCID: 0000-0002-6207-8802

Національний університет «Одеська морська академія»

**ОСОБЛИВОСТІ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ПАЛИВНОЇ АПАРАТУРИ
ВИСОКОГО ТИСКУ ПІД ЧАС ПЕРЕВЕДЕННЯ СУДНОВИХ
ДИЗЕЛІВ НА ПАЛИВО З НИЗЬКИМ ВМІСТОМ СІРКИ**

Постановка проблеми в загальному вигляді. Морський транспорт є основною складовою транспортної логістики, що забезпечує вантажопотоки між країнами, розташованими на різних континентах [1-3]. Перевезення готової продукції, сировини, зерна, нафти та газу між Південною і Північною Америкою, Азією, Африкою та Європою неможливе без використання морських суден різного дедвейту та призначення [4-6]. Рух сучасних морських суден забезпечується двигунами внутрішнього згорання, які є найпоширенішими тепловими двигунами та основним елементом суднових енергетичних установок [7-9].

Експлуатація суднових двигунів внутрішнього згорання суден морського і внутрішнього водного транспорту здійснюється не лише з підтриманням необхідної потужності та забезпеченням вимог фірм-виробників, а й із дотриманням екологічних показників їх роботи [10-12]. Основними екологічними показниками роботи суднових дизелів є концентрації оксидів сірки SO_x та оксидів азоту NO_x у випускних газах [13-15]. Їх значення визначаються відповідно до вимог Додатка VI Міжнародної конвенції MARPOL. При цьому граничні значення емісії NO_x (що відповідають рівням Tier I, II або III) залежать від року побудови дизеля та його номінальної частоти обертання. Граничні значення емісії SO_x визначаються виключно вмістом сірки в паливі [16-18].

З 01.02.2020 на судах морського та внутрішнього водного транспорту заборонено використання морських сортів палива із вмістом сірки понад 0,5 % за масою [19-22]. Також визначено спеціальні екологічні райони контролю викидів оксидів сірки (Sulfur Emission Control Areas — SECAs). У цих районах дозволяється вико-

ристовувати паливо з вмістом сірки не більше 0,1 % за масою. Під час роботи суден у цих районах або при їх перетині суднові дизелі переводяться на експлуатацію саме на таких сортах палива. Такий перехід виконується поступово з урахуванням об'єму палива у витратній цистерні, вмісту сірки в паливі та експлуатаційної потужності дизеля. Тривалість експлуатації дизеля на паливі з низьким вмістом сірки залежить від швидкісних характеристик судна, гідрометеорологічних умов переходу, часу перебування в зоні SECAs і коливається від кількох годин (при перебуванні судна в екологічних районах Північної Європи) до кількох діб (при русі вздовж узбережжя Північної Америки).

Однією з головних труднощів, що виникає під час переведення дизелів на роботу з використанням палива з низьким вмістом сірки, є таке. Зменшення вмісту сірки в паливі призводить до зниження його густини, в'язкості, температури самозаймання та підвищення теплотворної здатності палива (внаслідок пропорційного збільшення вмісту водню та вуглецю в паливі) [23, 24]. За однакових умов процесу впорскування палива, палива, що мають нижчу температуру самозаймання та вищу теплотворну здатність, характеризуються вищою температурою наприкінці згоряння T_z . Це пов'язано зі зменшенням кута затримки самозаймання, збільшенням кута початку горіння та вищою ефективністю процесу згоряння в районі верхньої мертвої точки [25, 26]. За умови більш раннього самозаймання палива збільшується кількість палива, що згорає до верхньої мертвої точки. Це призводить до підвищення швидкості згоряння палива та ступеня наростання тиску під час згоряння:

$$\lambda = p_z / p_c,$$

де p_z, p_c – максимальний тиск згоряння та тиск наприкінці стискання, МПа.

Дане явище є найбільш негативним для двотактних дизелів, які характеризуються підвищеною масою деталей кривошипно-шатунного механізму. У зв'язку з цим різко зростають ударні навантаження на крейцкопфні та мотильові підшипники [27, 28]. Визначення T_z шляхом вимірювання є неможливим через динамічність зміни температури в циліндрі дизеля, тому для оцінювання її значень використовують розрахункові моделі [29, 30]. Результати моделювання для співрозмірних за діаметром циліндра D , але різних за ходу поршня S дизелів фірми MAN Energy Solutions наведено в табл. 1.

Таблиця 1. Результати моделювання

Дизель та його характеристики	Характеристики палива		Температура наприкінці згоряння, К
	вміст сірки, %	питома теплота згоряння, кДж/кг	
K80ME	0,48...0,50	41580	1869
$D=0,8$ m,	0,4...0,45	41864	1878
$S=2,3$ m	0,05...0,09	42180	1896
L80ME	0,48...0,50	41596	1825
$D=0,8$ m,	0,4...0,45	41899	1839
$S=2,592$ m	0,05...0,09	42241	1858
S80ME	0,48...0,50	41695	1815
$D=0,8$ m,	0,4...0,45	41888	1836
$S=3,056$ m	0,05...0,09	42240	1851
G80ME	0,48...0,50	41595	1758
$D=0,8$ m,	0,4...0,45	41918	1762
$S=3,72$ m	0,05...0,09	42260	1788

Незначне на перший погляд підвищення температури в кінці згоряння T_z при переході з одного сорту палива на інший призводить до накопичувального ефекту через інерційність теплових процесів. При цьому зростають термічні навантаження на газовипускную систему дизеля. До «прихованих» негативних наслідків підвищення температури T_z також належить збільшення емісії оксидів азоту NO_x , які утворюються відповідно до високотемпературного механізму Зельдовича.

Таким чином, забезпечення вимог Додатка VI MARPOL та переведення судових дизелів на роботу на паливі з низьким вмістом сірки (що в обов'язковому порядку здійснюється під час перебування морських суден у районах SECAs) підвищує ризики виникнення таких аварійних ситуацій:

- підвищення динамічних навантажень у кривошипно-шатунному механізмі;
- зростання температурної напруженості;
- збільшення емісії оксидів азоту.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Розв'язання зазначених проблем пропонувалося різними способами. З метою зниження динамічних навантажень застосовується подача стисненого повітря в підпоршневий простір дизеля, а також зменшення циклової подачі палива і відповідне зниження частоти обертання дизеля [31-35]. Од-

нак ці способи знижують потужність дизеля та швидкість судна [36-39].

Для зниження температурної напруженості застосовується додаткове впорскування води в циліндр і газовипускную систему дизеля. За допомогою цих способів вдається знизити температуру випускних газів на 20...50 °С, однак при цьому підвищується ймовірність виникнення сірчистої корозії циліндрових втулок, поршнів і випускних клапанів [40-43].

Для зниження емісії оксидів азоту застосовуються різні способи, зокрема рециркуляція випускних газів, встановлення скрубєрів, фільтрів і каталітичних нейтралізаторів [44-46]. Ці способи забезпечують зниження концентрації оксидів азоту у випускних газах на 30...90 %, однак потребують суттєвих фінансових вкладень і технічного обслуговування додаткового обладнання [47-51]. Крім того, їх застосування обмежується у разі погіршення навігаційної обстановки морського переходу [52-54].

Постановка завдання. З врахуванням вищевикладеного, метою дослідження було розроблення методу керування факторами ризику виникнення аварійних ситуацій (зокрема різкого підвищення динамічних навантажень та збільшення емісії оксидів азоту) при використанні в судових дизелях палива з низьким вмістом сірки. При цьому мають підтримуватися в рекомендованих межах усі енергетичні та екологічні показники роботи дизеля.

Виклад основного матеріалу дослідження. Об'єктом дослідження є процес експлуатації судових дизелів із використанням палива, вміст сірки в якому не перевищує 0,1 %.

Дослідження виконувалися на спеціалізованому морському судні, призначеному для перевезення контейнерів. Як головний двигун на судні був встановлений судовий дизель MAN Energy Solutions 8K80ME-8.2-ГП з такими основними характеристиками:

- діаметр циліндра — 0,8 м;
- хід поршня — 2,3 м;
- частота обертання вала — 104 об/хв;
- кількість циліндрів — 8;
- номінальна потужність — 35600 кВт.

Експлуатація дизеля поза межами SECA здійснювалася на паливі RMG380 із вмістом сірки 0,48 %, а також на паливі RME180; у районах SECA — на паливі DMA із вмістом сірки 0,055 %. Основні характеристики палив наведено в табл. 2.

Таблиця 2. Основні характеристики суднових палив

Характеристика	RMG380	RME180	DMA
Вміст вуглецю, %	82.7	83.3	83.8
Вміст водню, %	10.6	10.7	11.1
Вміст сірки, %	0.48	0.42	0.055
Густина за 15 °С, кг/м ³	989	961	855
В'язкість за 50 °С, мм ² /с	380	380	12
Температура спалаху, °С	83	76	66
Температура самозаймання, °С	201	195	106
Теплотворна здатність, кДж/кг	41160	42010	42340
Район можливого використання	лише поза SECAs		будь-які райони, зокрема SECAs

Контроль параметрів роботи дизеля здійснювався за допомогою системи діагностики Doctor, яка дозволяє визначати величини з точністю $\pm 0,5$ %.

Емісія оксидів азоту з випускними газами визначалася за допомогою газоаналізатора фірми Testo, при цьому похибка під час виконання вимірювань не перевищувала 0,5 %.

Як показники, що оцінювалися під час роботи дизеля MAN Energy Solutions 8K80ME-8.2-TH на різних сортах палива, приймалися тиск згоряння p_z , температура випускних газів t_g , концентрація оксидів азоту у випускних газах NO_x , а також ступінь підвищення тиску під час згоряння λ . Результати досліджень наведено в табл. 3.

Таблиця 3. Результати дослідження

Марка палива	Максимальний тиск згоряння p_z , МПа	Температура випускних газів t_g , °С	Концентрація оксидів азоту у випускних газах NO_x , г/(кВт·х)	Ступінь підвищення тиску під час згоряння λ
RMG380	14,22	374	12,9	1,324
RME180	14,28	381	13,3	1,329
DMA	14,45	394	13,75	1,335

Результати проведених досліджень підтверджують раніше висловлений тезис про те, що переведення суднових дизелів на роботу на паливі з низьким вмістом сірки (з палива RMG380 на паливо RME180 та на паливо DMA) сприяє збільшенню динамічних і тепло-

вих навантажень, а також погіршує екологічні показники роботи дизеля. Усе це підвищує ризик виникнення аварійних ситуацій при переведенні судових дизелів на експлуатацію на паливі зі знизеним вмістом сірки.

Як метод, за допомогою якого можливо керувати даними процесами, було обрано перерегулювання фаз подачі палива, а саме — зміну кута випередження подачі палива в циліндри дизеля. Оптимальні значення цих кутів (за яких процес згоряння відбувається з максимальним тепловиділенням у момент знаходження поршня у верхній мертвій точці) визначаються під час проведення стендових випробувань дизеля. При цьому випробування проводяться для номінального режиму роботи дизеля та на паливі, марка якого передбачається як основна при експлуатації дизеля. Таким чином, не враховується ймовірність роботи дизеля на паливах зі знизеним вмістом сірки, а також на режимах, відмінних від номінального. У зв'язку з цим не існує рекомендацій щодо оптимальних кутів подачі палива для різних режимів роботи дизеля, а також у разі використання різних сортів палива. Визначення цих кутів можливе лише безпосередньо під час роботи дизеля, при цьому мають дотримуватися всі вимоги та рекомендації щодо його експлуатації.

У зв'язку з викладеним, подальша технологія експериментальних досліджень полягала в такому.

Після підготовки паливної системи дизеля MAN Energy Solutions 8K80ME-8.2-ТІІ до експлуатації в SECA (а саме повного витрачання палива RMG380 з вмістом сірки 0,48 % та заповнення витратних цистерн паливом DMA з вмістом сірки 0,055 %) було виконано переналаштування системи подачі палива в циліндри дизеля.

Для циліндрів №№ 1 і 8 значення кутів випередження подачі палива (за якими виконувалась експлуатація дизеля при використанні палива RMG380) залишилось незмінним і становило -4° пкв (повороту колінчастого вала).

Для циліндрів №№ 2, 3, 4, 5, 6, 7 встановлювалися нові кути випередження подачі палива θ : -3° , -2° , -1° , -1° , -2° , -3° пкв (CRA — crankshaft rotation angle) відповідно. Встановлення однакових кутів випередження подачі палива у двох циліндрах (першому і восьмому, другому і сьомому, третьому і шостому, четвертому і п'ятому) збільшувало масив отриманих результатів, підвищувало точність вимірювань і давало можливість виконати коригувальні дії у разі їх розбіжності.

У ході дослідження для кожного з циліндрів контролювалися максимальний тиск згоряння p_z , тиск у кінці стискання p_c , середній індикаторний тиск p_i та температура випускних газів t_g . Для кожного з наведених параметрів розраховувалися середні значення.

Крім того, визначалося значення ступеня підвищення тиску під час згоряння λ та здійснювався контроль емісії оксидів азоту у випускних газах NO_x . Фіксація показників роботи дизеля здійснювалася для навантаження $0,85N_{\text{enom}}$ (де $N_{\text{enom}}=35600$ кВт – номінальна потужність). Результати наведено в табл. 3.

Для кращої візуалізації отриманих значень на основі даних (табл. 3) були побудовані номограми (рис. 2), які відображають зміни показників роботи дизеля за різних умов налаштування паливної апаратури.

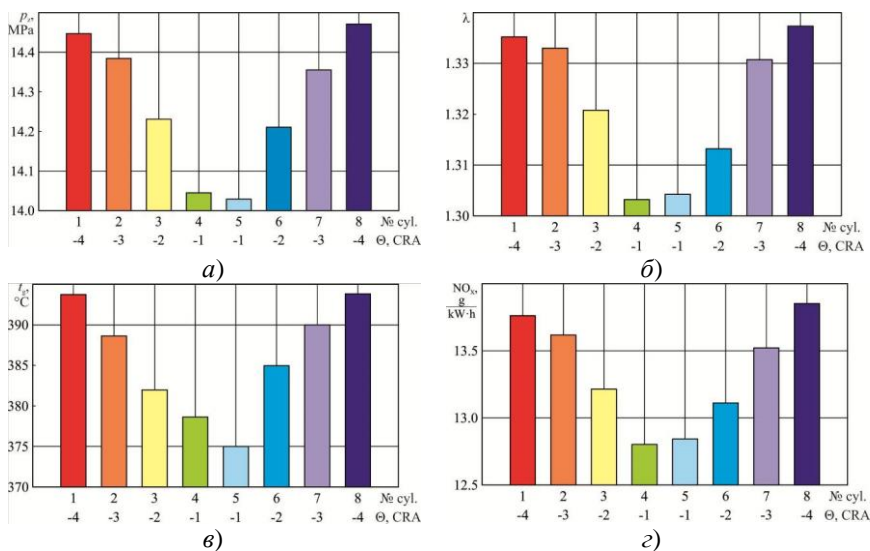


Рис. 2. Зміна показників роботи суднового дизеля 8K80MC-8.2-ТІІ за різних кутів випередження подачі палива θ :
 а – максимальний тиск згоряння; б – ступінь підвищення тиску під час згоряння; в – температура випускних газів; г – концентрація оксидів азоту в випускних газах

Таблиця 3. Результати експерименту

Параметр	Номер циліндра								Середнє значення
	1	2	3	4	5	6	7	8	
Тиск згоряння, P_z , МПа	14,45	14,38	14,23	14,05	14,03	14,21	14,36	14,47	14,27
Відхилення від середнього значення, ΔP_z , %	1,23	0,75	0,29	1,58	1,73	0,44	0,61	1,36	–
Тиск стискання, P_{cs} , МПа	10,82	10,78	10,77	10,78	10,76	10,82	10,8	10,82	10,79
Відхилення від середнього значення, ΔP_{cs} , %	0,29	0,07	0,17	0,08	0,26	0,29	0,11	0,29	–
Середній індикаторний тиск, p_i , МПа	1,995	1,987	2,012	2,02	1,996	1,985	2,014	2,018	2,00
Відхилення від середнього значення, Δp_i , %	0,42	0,82	0,43	0,82	0,37	0,93	0,53	0,72	–
Температура випускних газів, t_{g_1} , °С	394	388	382	378	375	385	390	394	386
Відхилення від середнього значення, Δt_{g_1} , °С	8	2	4	8	11	1	4	8	–
Ступінь підвищення тиску під час згоряння λ	1,335	1,334	1,321	1,303	1,304	1,313	1,329	1,337	–
Емісія оксидів азоту з випускними газами, NO_x , g/(kW·h)	13,75	13,62	13,21	12,82	12,85	13,12	13,51	13,88	–

Відзначимо також, що під час проведення експериментів відхилення контрольованих параметрів (тиску згоряння p_z , тиску стискання p_c , середнього індикаторного тиску p_i , температури випускних газів t_g) не перевищувало значень, регламентованих правилами експлуатації. Значення концентрації NO_x у випускних газах на всіх режимах роботи не перевищувало максимально допустимого рівня, який для дизелів, що належать до рівня Tier II відповідно до вимог Додатка VI MARPOL, становить 14,4 г/(кВт·год).

Наведені результати свідчать про можливість керування ризиком виникнення аварійних ситуацій, пов'язаних із використанням палива з низьким вмістом сірки, шляхом зміни кутів випередження подачі палива.

Проведення всіх експериментів було погоджено з технічним відділом судноплавної компанії, яка здійснює менеджмент судна та його енергетичної установки. Під час виконання експериментів контролювалися та підтримувалися в рекомендованих діапазонах усі параметри роботи суднового дизеля MAN Energy Solutions 8K80MC-8.2-TII.

Практичне значення отриманих результатів полягає у можливості їх використання як у двотактних, так і у чотиритактних дизелях, що мають електронну систему керування впорскуванням палива. Використання розробленого методу є особливо актуальним під час перебування суден у спеціальних екологічних районах, кількість і межі яких постійно збільшуються та розширюються.

До обмежень запропонованого методу належить наявність «критичних» кутів подачі палива, за яких знижується стійке самозаймання та згоряння палива. Визначення цих кутів можливе лише експериментально, причому для кожного дизеля окремо. При цьому необхідно враховувати конструкційні особливості дизеля, а також експлуатаційні характеристики палива.

Висновки і перспективи подальших досліджень. Показано, що у разі роботи суден морського та внутрішнього водного транспорту в екологічних районах SECAs виникає необхідність переведення суднових дизелів на паливо зі зниженим вмістом сірки. При цьому збільшується інтенсивність згоряння палива, підвищуються теплові та динамічні навантаження, а також погіршуються екологічні показники роботи дизеля. Усе це підвищує ризики виникнення аварійних ситуацій.

Як метод керування факторами ризику виникнення аварійних ситуацій при використанні в судових дизелях палива з низьким вмістом сірки може бути застосоване перерегулювання паливної апаратури високого тиску (зокрема забезпечення зміни кутів випередження подачі палива).

Експерименти, проведені на судовому дизелі MAN Energy Solutions 8K80MC-8.2-ТП, підтвердили, що у разі переведення дизеля з палива RMG380 (із вмістом сірки 0,48 %) на паливо DMA (із вмістом сірки 0,055 %) за рахунок зміни кутів випередження подачі палива можливо:

- забезпечити зниження тиску згоряння з 14,45 МПа до 14,03 МПа;
- досягти зменшення температури випускних газів з 394 °С до 375 °С;
- знизити ступінь підвищення тиску під час згоряння з 1,335 до 1,303;
- зменшити емісію оксидів азоту з випускними газами з 13,75 г/(кВт·год) до 12,82 г/(кВт·год).

Це забезпечує підвищення:

- екологічної стійкості — на 3,61...10,97 %;
- теплової стійкості — до 2,54 %;
- динамічної стійкості — до 4,82 %.

Виконання перерегулювання паливної апаратури високого тиску необхідно здійснювати під час перебування суден морського та внутрішнього водного транспорту в SECAs. При цьому слід забезпечити попередню підготовку паливної системи до використання палива зі зниженим вмістом сірки. Одночасно з цим, будь-яке перерегулювання або переналаштування паливної апаратури повинно виконуватися з забезпеченням всіх вимог та рекомендацій інструкцій з їхньої технічної експлуатації. Також необхідно підтримувати в необхідному діапазоні значення температури та в'язкості палива на всіх ділянках паливної системи.

Подальші дослідження будуть спрямовані на визначення діапазону можливих режимів експлуатації судових дизелів і паливної апаратури, за яких гарантується їх безаварійна робота у разі використання запропонованого методу.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Sagin S., Kuropyatnyk O., Tkachenko I. Ensuring the environmental friendliness of marine diesel engines of specialized ships // Суднові енергетичні установки : наук.-техн. зб. – 2022. – Вип. 45. – С. 5-16. doi: 10.31653/smf45.2022.5-16.

2. 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. Зб. наук. праць. – 2024. – Вип. 1(39). – С. 193-205. doi.org/10.33298/2226-8553.2024.1.39.20.

3. Мадей В.В., Волков О.М. Оптимізація процесу паливоподачі дизелів суден морського транспорту під час використання паливних сумішей до складу яких входить біодизельне паливо // Суднові енергетичні установки: наук.-техн. зб. – 2022. – Вип. 45. – С. 43-56. doi: 10.31653/smf45.2022.43-56.

4. Сагін А.С., Сагін С.В. Експериментальне визначення оптимальних фаз подачі палива в циліндр судових дизелів // Водний транспорт. Зб. наук. праць. – 2024. – Вип. 1(39). – С. 206-215. doi.org/10.33298/2226-8553.2023.2.38.22.

5. Stoliaryk T. Analysis of the operation of marine diesel engines when using engine oils with different structural characteristics // Technology Audit and Production Reserves. – 2022. – Vol. 5(1(67)). – P. 22–32. doi: http://doi.org/10.15587/2706-5448.2022.265868.

6. Petrychenko O., Levynskyi M. Trends and preconditions for widespread adoption of liquefied natural gas in maritime transport // Transport Systems and Technologies. – 2024. – Vol. 43. – P. 21-36. DOI:10.32703/2617-9059-2024-43-2.

7. Melnyk O., Onyshchenko S., Onishchenko O. Development measures to enhance the ecological safety of ships and reduce operational pollution to the environment // Sci. J. Silesian Univ. Technol. Series Transp. – 2023. – Vol. 118. – P. 195–206. https://doi.org/10.20858/sjsutst.2023.118.13.

8. Petrychenko O., Levynskyi M., Goolak S., Lukoševičius V. Prospects of Solar Energy in the Context of Greening Maritime Transport // Sustainability. – 2025. – Vol. 17. – P. 2141. https://doi.org/10.3390/su17052141.

9. Sagin S., Chymshyr V., Karianskyi S., Kuropyatnyk O., Madey V., Rusnak D. Using Ultrasonic Fuel Treatment Technology to Reduce Sulfur

Oxide Emissions from Marine Diesel Exhaust Gases // *Energies*. – 2025. – Vol. 18(17). – P. 4756. <https://doi.org/10.3390/en18174756>.

10. Wang Z., Ma Q., Zhang Z., Li Z., Qin C.; Chen J., Peng C. A Study on Monitoring and Supervision of Ship Nitrogen-Oxide Emissions and Fuel-Sulfur-Content Compliance // *Atmosphere*. – 2023. – Vol. 14. – P. 175. <https://doi.org/10.3390/atmos14010175>.

11. 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>.

12. 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. – С. 108-119. DOI: 10.31653/1819-3293-2021-1-27-108-119.

13. Заблоцький Ю.В. Зниження втрат енергії під час забезпечення процесів мащення суднових двигунів внутрішнього згоряння // *Суднові енергетичні установки : наук.-техн. зб.* – 2023. – Вип. 47. – С. 23-31. doi: 10.31653/smf47.2023.23-31.

14. Куропятник О.А. Управління емісією оксидів сірки під час використання палива біологічного походження, яке становлять гідровані рослинні мастила // *Розвиток транспорту*. – 2025. – Вип. 4(27). – С. 67-81. <https://doi.org/10.33082/td.2025.4-27.05>.

15. Руснак Д.Ю. Аналіз методів забезпечення вимог щодо емісії в атмосферу сірчистих сполук з випускними газами суднових дизелів // *Водний транспорт. Зб. наук. праць*. – 2025. – Вип. 1(42). – С. 227-240. doi.org/10.33298/2226-8553.2025.1.42.25.

16. Sagin S., Naichenia 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. Melnyk O., Onyshchenko S., Onishchenko O., Lohinov O., Ocheretna V. Integral Approach to Vulnerability Assessment of Ship's Critical Equipment and Systems // *Transactions on Maritime Science*. – 2023. – Vol. 12(1). doi:10.7225/toms.v12.n01.002.

18. Мадей В.В. Використання в суднових дизелях паливних сумішей до складу яких входить паливо біологічного походження //

Суднові енергетичні установки: наук.-техн. зб. – 2022. – Вип. 44. – С. 93-110. doi: 10.31653/smf44.2022.93-110.

19. Сагін С.В., Заблоцький Ю.В., Сагін А.С. Підвищення економічності роботи судових середньооборотних дизелів // Водний транспорт. Зб. наук. праць. – 2025. – Вип. 1(42). – С. 166-179. doi.org/10.33298/2226-8553.2025.1.42.20.

20. Wang F., Zhao J., Li T., Guan P., Liu S., Wei H., Zhou L. Research on NOx Emissions Testing and Optimization Strategies for Diesel Engines Under Low-Load Cycles // Atmosphere. – 2025. – Vol. 16. – P. 190. <https://doi.org/10.3390/atmos16020190>.

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

22. 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>.

23. 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. – Vol. 13(4). – P. 146. <https://doi.org/10.3390/lubricants13040146>.

24. Madey V. Assessment of the efficiency of biofuel use in the operation of marine diesel engines // Technology Audit and Production Reserves. – 2022. – Vol. 2(1(64)). – P. 34-41. doi: <http://doi.org/10.15587/2706-5448.2022.255959>.

25. Gorb S.I., Budurov M.I. Increasing the accuracy of a marine diesel engine operation limit by thermal factor // International Journal of Theoretical and Applied Mechanics. – 2021. – Vol. 6. – P. 18-26.

26. Сагін С.В., Колегаєв М.О., Парменова Д.Г. Зниження ризиків інвазійного забруднення морських акваторії під час експлуатації суден морського та внутрішнього водного транспорту // Суднові енергетичні установки : наук.-техн. зб. – 2023. – Вип. 47. – С. 131-147. doi: 10.31653/smf47.2023.131-147.

27. 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.

28. Goolak S., Riabov I., Petrychenko O., Kyrychenko M., Pohosov O. The simulation model of an induction motor with consideration of instantaneous magnetic losses in steel // *Advances in Mechanical Engineering*. – 2025. – Vol. 17(2). <https://doi.org/10.1177/16878132251320236>.

29. Сагін С.В., Куропятник О.А. Визначення експлуатаційних характеристики гібридних систем скрубєрного очищення випускних газів суднових дизелів від домішок сірки // *Водний транспорт. Збірник наукових праць*. – 2025. – Вип. 3(44). – С. 14-26. doi.org/10.33298/2226-8553.2025.3.44.02.

30. Сагін С.В., Куропятник О.А. Оцінка можливості використання гідрованого рослинного мастила як палива в суднових дизелях // *Вісник Одеськ. нац. мор. ун-ту. Зб. наук. праць*. – 2025. – Вип. 4(78). – С. 81-96. DOI: <https://doi.org/10.47049/2226-1893-2025-4-81-96>.

31. Разінкін Р.О. Діагностування технічного стану суднових дизелів за аналізом моторної оливи // *Розвиток транспорту*. – 2025. – Вип. 4(27). – С. 82-93. <https://doi.org/10.33082/td.2025.4-27.06>.

32. Разінкін Р.О. Забезпечення ресурсозберігаючої експлуатації суднових дизелів шляхом діагностування моторного мастила // *Водний транспорт. Збірник наукових праць*. – 2025. – Вип. 3(44). – С. 241-255. doi.org/10.33298/2226-8553.2025.3.43.24.

33. Melnyk O., Onyshchenko S., Onishchenko O., Koskina Y., Lohinov O., Veretennik O., Stukalenko O. Fundamental Concepts of Deck Cargo Handling and Transportation Safety // *Eur. Transp.* – 2024. – Vol. 98. – P. 1. <https://doi.org/10.48295/ET.2024.98.1>.

34. Колегаєв М.О., Мадей В.В., Побережний Р.В. Використання біодизельного палива під час експлуатації суднових дизелів // *Суднові енергетичні установки : наук.-техн. зб.* – 2025. – Вип. 51. – С. 10-21. DOI: 10.31653/smf 51.2025.10-21.

35. Budashko V., Shevchenko V. Solving a task of coordinated control over a ship automated electric power system under a changing load // *East-Eur. J. Enterp. Technol.* – 2021. – Vol. 2(110). – P. 54-70. [doi: 10.15587/1729-4061.2021.229033](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.229033).

36. Kolegaev M., Brazhnik I. Improvement of the process of preparing cargo tanks of crude oil tankers for cargo operations // *Technology Audit and Production Reserves*. – 2024. – Vol. 6(1(80)). – P. 36–40. <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2024.318534>.

37. 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:*

36. наук. праць. – 2025. – Вип. 1(42). – С. 99-108. doi.org/10.33298/2226-8553.2025.1.42.14.

38. Левченко О.В., Ганношина І.М., Остапчук Т.В. Система інформаційного забезпечення процесів прийняття рішень на мостіку судна // Водний транспорт: 36. наук. праць. – 2025. – Вип. 1(42). – С. 24-27. doi.org/10.33298/2226-8553.2025.1.42.04.

39. Заблоцький Ю.В. Підвищення економічності роботи судових дизелів // Суднові енергетичні установки: наук.-техн. зб. – 2020. – Вип. 40. – С. 12-16. DOI : 10.31653/smf340.2020.12-16.

40. Zablotskyi Yu.V., Sagin A.S. Applying of fuel additives in marine diesel engines // Суднові енергетичні установки: наук.-техн. зб. – 2021. – Вип. 43. – С. 5 – 17. doi: 10.31653/smf343.2021. 5-17.

41. Куропятник О.А. Вдосконалення експлуатаційних режимів системи рециркуляції випускних газів судових дизелів // Вісник Одеськ. нац. мор. ун-ту. 36. наук. праць. – 2025. – Вип. 4(78). – С. 66-80. DOI: <https://doi.org/10.47049/2226-1893-2025-4-66-80>.

42. Куропятник О.А. Підтримання екологічності морських суден під час використання систем каталітичного відновлення випускних газів судових дизелів // Розвиток транспорту. – 2025. – № 3. – С. 73-86. DOI: <https://doi.org/10.33082/td.2025.3-26.05>.

43. Сагін А.С., Заблоцький Ю.В. Регенерація змащувальних властивостей моторних палив і мастил під час експлуатації судових дизелів // Суднові енергетичні установки: наук.-техн. зб. – 2022. – Вип. 45. – С. 17-30. doi: 10.31653/smf45.2022.17-30.

44. Сагін А.С. Корегування процесу подачі палива під час використання в судових дизелях палив з різним вмістом сірки // Суднові енергетичні установки: наук.-техн. зб. – 2023. – Вип. 47. – С. 178-190. doi: 10.31653/smf47.2023.178-190.

45. Куропятник О.А. Управління емісією оксидів сірки під час використання палива біологічного походження, яке становлять гідровані рослинні мастила // Розвиток транспорту. – 2025. – Вип. 4(27). – С. 67-81. <https://doi.org/10.33082/td.2025.4-27.05>.

46. Мадей В.В., Заблоцький Ю.В., Сагін А.С. Оцінка ефективності використання палива біологічного походження в судових дизелях // Розвиток транспорту. – 2025. – № 2. – С. 71-85. <https://doi.org/10.33082/td.2025.2-25.06>.

47. Куропятник О.А. Забезпечення декарбонізації суден морського транспорту // Суднові енергетичні установки: наук.-техн. зб. – 2025. – Вип. 51. – С. 45-88. DOI: 10.31653/smf51.2025.45-58.

48. Levchenko O., Dvulit Z., Kozlenko O. Features of human resource management at railway transport enterprises // *Efektivna Ekonomika*. – 2020. – № 6. – P. 1-7. doi: 10.32702/2307-2105-2020.6.72.

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

50. Будашко В.В., Заблоцький Ю.В. Аналіз термодинамічних циклів охолодження природного газу під час його транспортування морськими суднами-газовозами // *Суднові енергетичні установки: наук.-техн. зб.* – 2024. – Вип. 48. – С. 18-30. doi: 10.31653/smf48.2024.18-30.

51. Сагін А.С., Заблоцький Ю.В. Аналіз ефективності морських перевантажувальних терміналів під час транспортування зрідженого природного газу суднами-газовозами // *Суднові енергетичні установки: наук.-техн. зб.* – 2024. – Вип. 48. – С. 114-125. doi: 10.31653/smf48.2024.114-125.

52. Сагін А.С. Корегування налаштування паливної апаратури високого тиску під час переведення суднових дизелів на паливо з низьким вмістом сірки // *Автоматизація суднових технічних засобів: наук.-техн. зб.* – 2023. – Вип. 28. – С. 67 – 78. DOI: 10.31653/1819-3293-2023-1-28-67-78.

53. Заблоцький Ю.В., Будашко В.В., Сагін А.С. Забезпечення технологічних операцій зі зрідженим природним газом під час його видобутку в морських прибережних акваторіях // *Автоматизація суднових технічних засобів: наук.-техн. зб.* – 2024. – Вип. 29. – С. 54–65. DOI: 10.31653/1819-3293-2024-1-29-54-65.

54. Zablotsky Y.V. The use of chemical fuel processing to improve the economic and environmental performance of marine internal combustion engines // *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.

DOI: 10.31653/smf52.2026.77-87

дата першого надходження: 11.01.26
дата прийняття статті до друку після
рецензування: 21.02.26
дата публікації: 05.05.26Сагін С.В.¹, Мадей В.В.², Даніленко Д.В.³¹ORCID 0000-0001-8742-2836, ²ORCID 0000-0002-8692-9077,³ORCID 0009-0004-3085-0900

Національний університет «Одеська морська академія»

ВИКОРИСТАННЯ БІОПАЛИВА З ОЛІЇ КАРАНДЖІ У СУДНОВИХ ДИЗЕЛЯХ

Постановка проблеми в загальному вигляді. Постійне підвищення рівня емісії шкідливих компонентів, що входять до складу випускних газів дизелів суден морського транспорту, а також підвищення кількості випускних газів, що потрапляють в атмосферу внаслідок морських перевезень, є актуальною проблемою [1-3]. Суднові дизелі надають значний внесок у викиди випускних газів, включаючи оксид СО і діоксид вуглецю СО₂, вуглеводні, що не згоріли НС, оксиди азоту NO_x [4-6]. Одним із варіантів зниження емісії зазначених шкідливих компонентів є використання біодизельного палива [7-9]. Біодизельне паливо, яке одержують із рослинних та відпрацьованих олій, стало заміною традиційного дизельного палива завдяки своїм сприятливим характеристикам згорання [10-12].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Первісно біодизельне паливо на основі харчових олій привернуло увагу, але його широко-масштабне використання викликало побоювання, пов'язані з продовольчою безпекою та вартістю. Олія каранджі (*Pongamia pinnata*), нехарчова олія, одержувана з насіння каранджі, широко доступна в ряді південно-східних країн (наприклад, в Індії та Китаї) і добре підходить для виробництва біодизелю завдяки високому вмісту олії та сприятливому складу жирних кислот [13-15]. Дослідники вивчали практичну застосування біодизеля з відпрацьованого рослинного масла і масла каранджі в двигунах з запаленням від стиснення [17-19]. Дослідження показали, що суміші біодизелю призводять до зниження викидів СО, НС та диму завдяки властивому біодизелю вмісту кисню, що сприяє більш повному згорянню цього типу палива [20-22]. Численні дослідження незалежно вивчали біодизельне паливо з відпрацьованого олії та олії каранджі, проте роботи з їх порівняльної

оцінки в однакових умовах роботи двигуна обмежені [23-25]. Дизельні двигуни залишаються домінуючими на судах морського та внутрішнього водного транспорту, завдяки своїй високій ефективності та економічності [26-28]. Проте, суднові дизелі роблять значний внесок у забруднення атмосфери і викиди парникових газів, що знижує стійкість морських перевезень [29-31]. Біодизельне паливо, отримане з відновлюваної сировини, стало багатообіцяючою заміною нафтового дизельного палива [32-34]. Перехід до відновлюваних та стійких видів палива стимулював масштабні дослідження в галузі виробництва біодизеля та його застосування в судових двигунах внутрішнього згорання [35-37]. Біодизель може вироблятися з різних видів сировини: харчових олій, нехарчових олій та відпрацьованих олій, при цьому відпрацьована рослинна олія та олія каранджі стають привабливими недорогими нехарчовими альтернативами, які пом'якшують конкуренцію між харчовими продуктами та паливом, а також проблеми утилізації відходів [38-40].

Постановка завдання. Дослідження спрямоване на експериментальне вивчення сумішей палива нафтового походження та олії каранджі в судовому чотиритактному дизельному двигуні з метою визначення оптимального складу сумішей палива нафтового та біологічного походження, а також оптимальних режимів експлуатації судових дизелів при використанні подібних сумішей.

Виклад основного матеріалу дослідження. Олія каранджі, нехарчова насіннева олія, також вивчалася для переробки в біодизель та застосування в двигунах [41-43]. Олію каранджі отримують з насіння *Pongamia pinnata* (також відомої як *Pongamia glabra*). Олія каранджі складається в основному з тригліцеридів, які є складними ефірами, утвореними з гліцерину, а також довголанцюгових жирних кислот [44, 45].

Метилловий ефір олії каранджі (Karanja oil methyl ester – КОМЕ) має характеристики, порівняні зі звичайним дизельним паливом нафтового походження. Щільність КОМЕ становить приблизно 860...890 кг/м³, яке кінематична в'язкість при 40 °С коливається у діапазоні 4,5...5,5 мм²/с, що відповідає параметрам дизельного палива класів DMA, DMB, DMC. Теплотворна здатність КОМЕ трохи нижче, ніж у дизельного палива, та знаходиться у діапазоні 37000...39000 кДж/кг, через наявність кисневмісних сполук. Температура спалаху біодизеля з олії каранджі перевищує 160 °С, що робить його безпечнішим для зберігання та обігу.

Основні характеристики олії каранджі, що застосовується для виробництва біодизельного палива, наведені у таблиці 1.

Таблиця 1: Характеристики біодизеля з олії каранджі

Параметр	Біодизельне паливо з олії каранджі (КОМЕ)
Тип сировини	Нехарчова олія
Джерело походження	Насіння <i>Pongamia pinnata</i>
Основні жирні кислоти	Олейнова, лінолева, пальмітинова, стеаринова
Основні компоненти біодизеля (метилові ефіри жирних кислот)	Метил олеат ($C_{19}H_{36}O_2$), метил лінолеат ($C_{19}H_{34}O_2$)
Густина, $кг/м^3$ за $15\text{ }^\circ\text{C}$	860...890
Кінематична в'язкість, $мм^2/с$, за $40\text{ }^\circ\text{C}$	4,5...5,5
Теплотворна здатність, $кДж/кг$	37000...39000
Температура спалаху, $^\circ\text{C}$	160...180

Дослідження виконували на трьох однотипних суднових чотиритактних дизелях 6Н21/32 Hyundai HiMSEN. Один із дизелів працював на дизельному паливі нафтового походження DMB20. Два інших – на суміші палива DMB20 та палива КОМЕ, при цьому вміст палива КОМЕ у суміші становив 5 %, 10 %, 15 %, 20 %. Для вимірювання витрати палива, витрати повітря, температури випускних газів та частоти обертання двигуна використовувалася стандартна вимірювальна апаратура [46, 47]. При кожному навантаженні двигун спочатку експлуатувався 30 хвилин, після чого здійснювався контроль за його енергетичними, економічними та екологічними показниками. Основні екологічні показники дизеля (оксид СО і діоксид вуглецю CO_2 , вуглеводні НС, що не згоріли, оксиди азоту NO_x) вимірювалися за допомогою каліброваного газоаналізатора Seitron [48, 49]. Як результат виконаних досліджень були проаналізовані характеристики викидів сумішей дизельного палива DMB20 та біодизельного палива КОМЕ на основі олії каранджі, при різних навантаженнях двигуна для співвідношень палива КОМЕ у суміші 5 %, 10 %, 15 % та 20 %, та проведено порівняння з роботою на чистому дизельному паливі. Викиди СО для сумішей DMB20 та КОМЕ знизилися при низьких та середніх навантаженнях у порівнянні з чистим дизельним паливом, що вказує на покращене згорання завдяки кисневмісній природі біодизеля. Дані, які наведені на рис. 1, свідчать, що суміші з 15 % та 20 % КОМЕ показали найнижчі викиди СО на середніх навантаженнях (40...60 %).

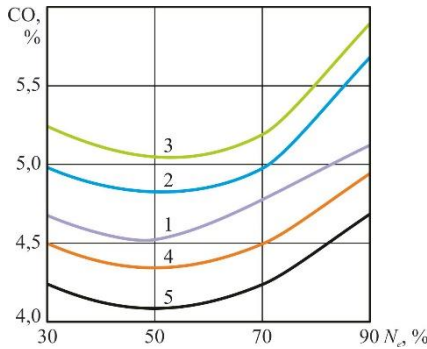


Рис. 1. Порівняння емісії CO для дизельного палива DMB20 та його сумішей з біопаливом КОМЕ:

1 – 100 % DMB20; 2 – 95 % DMB20 + 5 % КОМЕ; 3 – 90 % DMB20 + 10 % КОМЕ; 4 – 85 % DMB20 + 15 % КОМЕ; 5 – 80 % DMB20 + 20 % КОМЕ

Суміші, що містять 5% та 10% біодизельного палива КОМЕ, характеризуються підвищеною (порівняно з паливом DMB20) емісією CO. Найбільшим зростанням емісії CO характеризуються режими підвищеного навантаження (80...90%). Водночас, суміші, що містять 15 % та 20 % палива КОМЕ, забезпечують зниження емісії CO. Викиди вуглеводнів (НС), що не згоріли, збільшувалися з навантаженням для всіх видів сумішей палива. При цьому емісія СР для сумішей, що містять 5...10 % біодизельного палива КОМЕ, перевищує аналогічний показник для дизельного палива DMB20; для сумішей, що містять 15...20 % КОМЕ, має менше значення в порівнянні з паливом DMB20. Порівняння викидів незгорілих вуглеводнів (НС) показано на рис. 2.

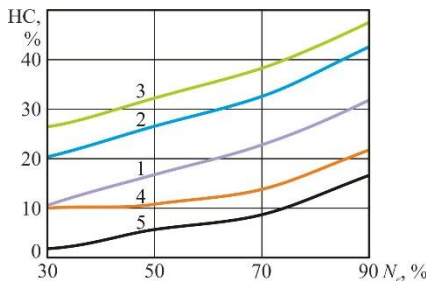


Рис. 2. Порівняння емісії НС для дизельного палива DMB20 та його сумішей з біопаливом КОМЕ:

1 – 100 % DMB20; 2 – 95 % DMB20 + 5 % КОМЕ; 3 – 90 % DMB20 + 10 % КОМЕ; 4 – 85 % DMB20 + 15 % КОМЕ; 5 – 80 % DMB20 + 20 % КОМЕ

Викиди CO_2 збільшувалися зі збільшенням навантаження для всіх видів палива, що відображає більшу витрату палива та покращене згоряння при більш високих навантаженнях. Суміші біодизеля (за винятком 5 % концентрації КОМЕ) забезпечують зниження рівня емісії CO_2 на всіх навантаженнях дизеля порівняно з експлуатацією на дизельному паливі DMB20 (рис. 3).

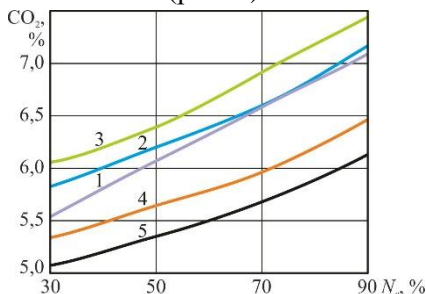


Рис. 3. Порівняння емісії CO_2 для дизельного палива DMB20 та його сумішей з біопаливом КОМЕ:

1 – 100 % DMB20; 2 – 95 % DMB20 + 5 % КОМЕ; 3 – 90 % DMB20 + 10 % КОМЕ; 4 – 85 % DMB20 + 15 % КОМЕ; 5 – 80 % DMB20 + 20 % КОМЕ

Викиди оксидів азоту NO_x значно зростають із збільшенням навантаження всім сумішей. Однак суміші з біодизельним паливом КОМЕ забезпечують нижчу емісію NO_x порівняно з дизельним паливом DMB20. При цьому найбільшою екологічною ефективністю характеризуються суміші з підвищеним вмістом КОМЕ (15 % та 20 %).

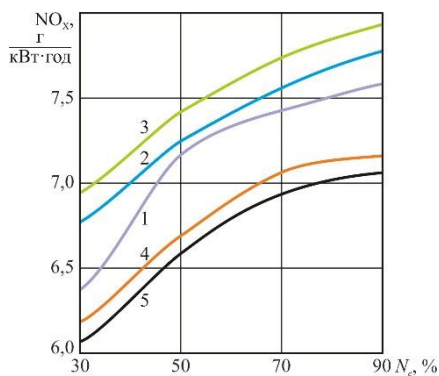


Рис. 4. Порівняння емісії NO_x для дизельного палива DMB20 та його сумішей з біопаливом КОМЕ:

1 – 100 % DMB20; 2 – 95 % DMB20 + 5 % КОМЕ; 3 – 90 % DMB20 + 10 % КОМЕ; 4 – 85 % DMB20 + 15 % КОМЕ; 5 – 80 % DMB20 + 20 % КОМЕ

Висновки і перспективи подальших досліджень. Було проведено експериментальне дослідження для оцінки екологічних характеристик сумішей дизельного палива DMB20 та біодизеля КОМЕ з олії каранджі. При цьому концентрація біодизельного палива КОМЕ у його суміші з паливом DMB20 становила 5 %, 10 %, 15 % та 20 %. Паливні суміші із зазначеним складом використовувалися при експлуатації суднового дизеля 6Н21/32 Hyundai HiMSEN. Дослідження виконувались у діапазоні 30...90 % навантаження дизеля. Результати підтверджують можливість використання подібних сумішей у суднових дизелях без додаткової модернізації їхньої паливної апаратури. Аналіз емісії оксидів СО і діоксидів СО₂ вуглецю, незгорілих вуглеводнів НС, а також оксидів азоту NO_x виявив наявність оптимальної концентрації біодизельного палива КОМЕ в його суміші з паливом нафтового походження DMB20, а також оптимальних експлуатаційних режимів роботи дизеля за якими забезпечується мінімальних рівень вказаних шкідливих компонентів у складі випускних газів. Експериментально встановлено, що суміші дизельного палива DMB20 та біодизеля КОМЕ з олії каранджі є екологічно сприятливими альтернативами традиційному паливу нафтового походження для двигунів внутрішнього згоряння.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Sagin S., Chymshyr V., Karianskyi S., Kuropyatnyk O., Madey V., Rusnak D. Using Ultrasonic Fuel Treatment Technology to Reduce Sulfur Oxide Emissions from Marine Diesel Exhaust Gases // *Energies*. – 2025. – Vol. 18(17). – P. 4756. <https://doi.org/10.3390/en18174756>.
2. Petrychenko O., Levinskyi M. Trends and preconditions for widespread adoption of liquefied natural gas in maritime transport // *Transport Systems and Technologies*. – 2024. – Vol. 43. – P. 21-36. DOI:10.32703/2617-9059-2024-43-2.
3. Melnyk O., Onyshchenko S., Onishchenko O. Development measures to enhance the ecological safety of ships and reduce operational pollution to the environment // *Sci. J. Silesian Univ. Technol. Series Transp.* – 2023. – Vol. 118. – P. 195–206. <https://doi.org/10.20858/sjsutst.2023.118.13>.
4. Petrychenko O., Levinskyi M., Goolak S., Lukoševičius V. Prospects of Solar Energy in the Context of Greening Maritime Transport //

Sustainability. – 2025. – Vol. 17. – P. 2141. <https://doi.org/10.3390/su17052141>.

5. Sagin S., Kuropyatnyk O., Tkachenko I. Ensuring the environmental friendliness of marine diesel engines of specialized ships // Суднові енергетичні установки : наук.-техн. зб. – 2022. – Вип. 45. – С. 5-16. doi: 10.31653/smf45.2022.5-16.

6. Wang Z., Ma Q., Zhang Z., Li Z., Qin C.; Chen J., Peng C. A Study on Monitoring and Supervision of Ship Nitrogen-Oxide Emissions and Fuel-Sulfur-Content Compliance // Atmosphere. – 2023. – Vol. 14. – P. 175. <https://doi.org/10.3390/atmos14010175>.

7. 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. Зб. наук. праць. – 2024. – Вип. 1(39). – С. 193-205. doi.org/10.33298/2226-8553.2024.1.39.20.

8. 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>.

9. Куропятник О.А. Управління емісією оксидів сірки під час використання палива біологічного походження, яке становлять гідровані рослинні мастила // Розвиток транспорту. – 2025. – Вип. 4(27). – С. 67-81. <https://doi.org/10.33082/td.2025.4-27.05>.

10. Мадей В.В., Волков О.М. Оптимізація процесу паливоподачі дизелів суден морського транспорту під час використання паливних сумішей до складу яких входить біодизельне паливо // Суднові енергетичні установки: наук.-техн. зб. – 2022. – Вип. 45. – С. 43-56. doi: 10.31653/smf45.2022.43-56.

11. Сагін А.С., Сагін С.В. Експериментальне визначення оптимальних фаз подачі палива в циліндр суднових дизелів // Водний транспорт. Зб. наук. праць. – 2024. – Вип. 1(39). – С. 206-215. doi.org/10.33298/2226-8553.2023.2.38.22.

12. Сагін С.В., Столярик Т.О. Динаміка суднових дизелів під час використанні моторних масил 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.

13. Заблоцький Ю.В. Зниження втрат енергії під час забезпечення процесів мащення суднових двигунів внутрішнього згоряння // Суднові енергетичні установки : наук.-техн. зб. – 2023. – Вип. 47. – С. 23-31. doi: 10.31653/smf47.2023.23-31.

14. Руснак Д.Ю. Аналіз методів забезпечення вимог щодо емісії в атмосферу сірчистих сполук з випускними газами суднових дизелів // Водний транспорт. Зб. наук. праць. – 2025. – Вип. 1(42). – С. 227-240. doi.org/10.33298/2226-8553.2025.1.42.25.

15. Stoliaryk T. Analysis of the operation of marine diesel engines when using engine oils with different structural characteristics // Technology Audit and Production Reserves. – 2022. – Vol. 5(1(67)). – P. 22–32. doi: <http://doi.org/10.15587/2706-5448.2022.265868>.

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. Melnyk O., Onyshchenko S., Onishchenko O., Lohinov O., Ocheretna V. Integral Approach to Vulnerability Assessment of Ship's Critical Equipment and Systems // Transactions on Maritime Science. – 2023. – Vol. 12(1). doi:10.7225/toms.v12.n01.002.

18. Melnyk O., Onyshchenko S., Onishchenko O., Koskina Y., Lohinov O., Veretennik O., Stukalenko O. Fundamental Concepts of Deck Cargo Handling and Transportation Safety // Eur. Transp.– 2024. – Vol. 98. – P. 1. <https://doi.org/10.48295/ET.2024.98.1>.

19. Колегаєв М.О., Мадей В.В., Побережний Р.В. Використання біодизельного палива під час експлуатації суднових дизелів // Суднові енергетичні установки : наук.-техн. зб. – 2025. – Вип. 51. – С. 10-21. DOI: 10.31653/smf 51.2025.10-21.

20. 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>.

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

22. Мадей В.В. Використання в суднових дизелях паливних сумішей до складу яких входить паливо біологічного походження //

Суднові енергетичні установки: наук.-техн. зб. – 2022. – Вип. 44. – С. 93-110. doi: 10.31653/smf44.2022.93-110.

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

24. Wang F., Zhao J., Li T., Guan P., Liu S., Wei H., Zhou L. Research on NOx Emissions Testing and Optimization Strategies for Diesel Engines Under Low-Load Cycles // Atmosphere. – 2025. – Vol. 16. – P. 190. <https://doi.org/10.3390/atmos16020190>.

25. Budashko V., Shevchenko V. Solving a task of coordinated control over a ship automated electric power system under a changing load // East.-Eur. J. Enterp. Technol. – 2021. – Vol. 2(110). – P. 54-70. doi: 10.15587/1729-4061.2021.229033.

26. Kolegaev M., Brazhnik I. Improvement of the process of preparing cargo tanks of crude oil tankers for cargo operations // Technology Audit and Production Reserves. – 2024. – Vol. 6(1(80)). – P. 36–40. <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2024.318534>.

27. Levchenko O., Dvulit Z., Kozlenko O. Features of human resource management at railway transport enterprises // Efektyvna Ekonomika. – 2020. – № 6. – P. 1-7. doi: 10.32702/2307-2105-2020.6.72.

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

29. 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: Зб. наук. праць. – 2025. – Вип. 1(42). – С. 99-108. doi.org/10.33298/2226-8553.2025.1.42.14.

30. Левченко О.В., Ганношина І.М., Остапчук Т.В. Система інформаційного забезпечення процесів прийняття рішень на мостик судна // Водний транспорт: Зб. наук. праць. – 2025. – Вип. 1(42). – С. 24-27. doi.org/10.33298/2226-8553.2025.1.42.04.

31. 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. – Vol. 13(4). – P. 146. <https://doi.org/10.3390/lubricants13040146>.

32. Madey V. Assessment of the efficiency of biofuel use in the operation of marine diesel engines // *Technology Audit and Production Reserves*. – 2022. – Vol. 2(1(64)). – P. 34–41. doi: <http://doi.org/10.15587/2706-5448.2022.255959>.

33. Gorb S.I., Budurov M.I. Increasing the accuracy of a marine diesel engine operation limit by thermal factor // *International Journal of Theoretical and Applied Mechanics*. – 2021. – Vol. 6. – P. 18–26.

34. Заблоцький Ю.В. Підвищення економічності роботи суднових дизелів // *Суднові енергетичні установки: наук.-техн. зб.* – 2020. – Вип. 40. – С. 12–16. DOI : 10.31653/smf340.2020.12-16.

35. Levinskyi M. Automatic diagnostic of marine diesel generator lubricating oil condition // *Автоматизація суднових технічних засобів: наук.-техн. зб.* – 2023. – Вип. 28. – С. 106–120. DOI: 10.31653/1819-3293-2023-1-28-106-120.

36. Goolak S., Riabov I., Petrychenko O., Kyrychenko M., Pohosov O. The simulation model of an induction motor with consideration of instantaneous magnetic losses in steel // *Advances in Mechanical Engineering*. – 2025. – Vol. 17(2). <https://doi.org/10.1177/16878132251320236>.

37. Сагін С.В., Колегаєв М.О., Парменова Д.Г. Зниження ризиків інвазійного забруднення морських акваторії під час експлуатації суден морського та внутрішнього водного транспорту // *Суднові енергетичні установки : наук.-техн. зб.* – 2023. – Вип. 47. – С. 131–147. doi: 10.31653/smf47.2023.131-147.

38. Zablotskyi Yu.V., Sagin A.S. Applying of fuel additives in marine diesel engines // *Суднові енергетичні установки: наук.-техн. зб.* – 2021. – Вип. 43. – С. 5 – 17. doi: 10.31653/smf343.2021. 5-17.

39. Будашко В.В., Заблоцький Ю.В. Аналіз термодинамічних циклів охолодження природного газу під час його транспортування морськими суднами-газовозами // *Суднові енергетичні установки: наук.-техн. зб.* – 2024. – Вип. 48. – С. 18–30. doi: 10.31653/smf48.2024.18-30.

40. Заблоцький Ю.В., Будашко В.В., Сагін А.С. Забезпечення технологічних операцій зі зрідженим природним газом під час його видобутку в морських прибережних акваторіях // *Автоматизація суднових технічних засобів: наук.-техн. зб.* – 2024. – Вип. 29. – С. 54–65. DOI: 10.31653/1819-3293-2024-1-29-54-65.

41. Куропятник О.А. Вдосконалення експлуатаційних режимів системи рециркуляції випускних газів суднових дизелів // *Вісник*

Одеськ. нац. мор. ун-ту. Зб. наук. праць. – 2025. – Вип. 4(78). – С. 66-80. DOI: <https://doi.org/10.47049/2226-1893-2025-4-66-80>.

42. Куропятник О.А. Підтримання екологічності морських суден під час використання систем каталітичного відновлення випускних газів судових дизелів // Розвиток транспорту. – 2025. – № 3. – С. 73-86. DOI: <https://doi.org/10.33082/td.2025.3-26.05>.

43. Сагін А.С., Заблоцький Ю.В. Аналіз ефективності морських перевантажувальних терміналів під час транспортування зрідженого природного газу суднами-газовозами // Суднові енергетичні установки: наук.-техн. зб. – 2024. – Вип. 48. – С. 114-125. doi: 10.31653/smf48.2024.114-125.

44. Мадей В.В., Заблоцький Ю.В., Сагін А.С. Оцінка ефективності використання палива біологічного походження в судових дизелях // Розвиток транспорту. – 2025. – № 2. – С. 71-85. <https://doi.org/10.33082/td.2025.2-25.06>.

45. Куропятник О.А. Забезпечення декарбонізації суден морського транспорту // Суднові енергетичні установки: наук.-техн. зб. – 2025. – Вип. 51. – С. 45-88. DOI: 10.31653/smf51.2025.45-58.

46. Сагін А.С., Заблоцький Ю.В. Регенерація змащувальних властивостей моторних палив і мастил під час експлуатації судових дизелів // Суднові енергетичні установки: наук.-техн. зб. – 2022. – Вип. 45. – С. 17-30. doi: 10.31653/smf45.2022.17-30.

47. Сагін А.С. Корегування налаштування паливної апаратури високого тиску під час переведення судових дизелів на паливо з низьким вмістом сірки // Автоматизація судових технічних засобів: наук.-техн. зб. – 2023. – Вип. 28. – С. 67 – 78. DOI: 10.31653/1819-3293-2023-1-28-67-78.

48. Сагін А.С. Корегування процесу подачі палива під час використання в судових дизелях палив з різним вмістом сірки // Суднові енергетичні установки: наук.-техн. зб. – 2023. – Вип. 47. – С. 178-190. doi: 10.31653/smf47.2023.178-190.

49. Zablotsky Y.V. The use of chemical fuel processing to improve the economic and environmental performance of marine internal combustion engines // 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.

DOI: 10.31653/smf52.2026.88-96

дата першого надходження: 22.01.26
дата прийняття статті до друку після
рецензування: 03.03.26
дата публікації: 05.05.26Скляренко І.Ю.¹, Ганношина І.М.², Клочков Ю.П.³,
Роздобудько В.В.⁴¹ORCID: 0000-0002-3970-078X, ²ORCID: 0000-0001-5810-2462,³ORCID: 0009-0003-6044-1115, ⁴ORCID: 0022-0053-6784-2233

Національний транспортний університет

ІНТЕГРАЦІЯ ІННОВАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ В СУДНОВУ ЕНЕРГЕТИЧНУ ІНФРАСТРУКТУРУ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЕКСПЛУАТАЦІЇ

Постановка проблеми у загальному вигляді. Морський транспорт стикається з жорсткими вимогами щодо екологічної безпеки та енергоефективності. Традиційні суднопотужні установки вичерпують свій ресурс, демонструючи низький коефіцієнт корисної дії в режимах змінного навантаження. Зростання вартості палива спонукає судноплавні компанії шукати шляхи оптимізації енергоспоживання на борту.

Інтеграція інноваційних технологій, таких як гібридні енергосистеми та відновлювані джерела енергії, стає критично важливою для галузі. Впровадження інтелектуальних систем керування енергопоточками дозволяє динамічно адаптувати параметри обладнання до умов експлуатації. Це безпосередньо впливає на зменшення викидів шкідливих речовин в атмосферу та акваторію.

Важливість цифровізації суднових енергетичних інфраструктур полягає у можливості предиктивного обслуговування технічних засобів. Сучасні енергетичні комплекси потребують переходу від концепції автономного живлення до мережових інтегрованих структур. Це забезпечує вищу надійність роботи критичних вузлів судна навіть при часткових відмовах окремих елементів.

Енергоефективність сьогодні є визначальним фактором конкурентоспроможності морських перевезень на світовому ринку. Відсутність системного підходу до інтеграції нових технологій стримує інноваційний розвиток морського флоту. Таким чином, дане дослідження має високу наукову та практичну значущість для модернізації технічного забезпечення суден. Комплексна реалізація запропо-

нованих заходів здатна суттєво знизити експлуатаційні витрати та подовжити життєвий цикл судового обладнання.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У публікації [1] розглянуто інтеграцію електроенергетичних систем суден із метою підвищення екологічності морського транспорту. Автори акцентують увагу на використанні інтегрованих енергосистем змінного струму та технологій енергоменеджменту. Проведено аналіз архітектур електричних мереж суден та їх взаємодії з береговою інфраструктурою.

У роботі [2] досліджено інноваційні підходи до інтеграції відновлюваних джерел енергії в офшорні морські системи. Значну увагу приділено конструкційним і системним аспектам взаємодії енергетичних установок.

У статті [3] проаналізовано інтегровані енергетичні системи для суден із низьким рівнем викидів. Дослідження охоплює поєднання різних джерел енергії, включаючи акумулятори та альтернативні палива. Встановлено, що оптимальна інтеграція компонентів дозволяє суттєво зменшити витрати палива та екологічний вплив.

У роботі [4] представлено огляд методів оптимізації систем управління енергією в судових мікромережах. Розглянуто алгоритми оптимального розподілу навантаження між джерелами енергії.

У дослідженні [5] проведено техніко-економічну оцінку інтеграції гібридних відновлюваних систем у судові енергетичні установки. Розглянуто різні комбінації джерел енергії та їх вплив на витрати. Встановлено, що гібридні системи є економічно виправданими за певних експлуатаційних сценаріїв.

У статті [6] розглянуто сталий розвиток гібридних енергетичних систем суден. Основна увага приділяється оптимізації керування енергетичними потоками.

У роботі [7] досліджено перспективні енергетичні установки для морського транспорту. Розглянуто інноваційні рушійні системи, включаючи електричні та водневі технології. Встановлено, що інтеграція новітніх технологій є ключовим фактором декарбонізації галузі.

У статті [8] представлено методи моделювання та оптимізації судових енергосистем. Розглянуто математичні підходи до аналізу енергетичних потоків. Автори досліджують алгоритми оптимізації конфігурацій систем. Доведено, що використання сучасних моделей дозволяє підвищити ефективність енергетичної інфраструктури суден.

У роботі [9] розглянуто оптимізацію топології та управління енергією в гібридних системах круїзних суден на паливних елементах. Значну увагу приділено підвищенню енергоефективності та надійності. Встановлено, що оптимізація структури системи дозволяє досягти кращих експлуатаційних показників.

У статті [10] досліджено сучасний стан та перспективи розвитку систем управління енергією гібридних суден. Розглянуто різні стратегії керування енергоспоживанням. Автори аналізують тенденції розвитку інтелектуальних систем управління. Показано, що впровадження таких систем підвищує ефективність використання енергоресурсів.

У публікації [11] розглянуто сталий розвиток відновлюваної енергетики в судноплаванні. Автори аналізують технологічні та екологічні аспекти інтеграції інновацій. Значну увагу приділено перспективам використання альтернативних джерел енергії.

У роботі [12] досліджено розроблення надійної системи передачі даних для безпілотних надводних апаратів. Розглянуто вплив завад на функціонування систем зв'язку. Автори пропонують підходи до підвищення надійності передачі інформації. Показано, що інтеграція сучасних інформаційних технологій є важливою складовою ефективною енергетичної інфраструктури.

У статті [13] досліджено підвищення екологічності бурових суден у спеціальних регіонах. Розглянуто інтеграцію технологій очищення та оптимізації енергоспоживання. Встановлено, що застосування інноваційних підходів дозволяє зменшити негативний вплив на довкілля.

У роботі [14] розглянуто питання надійності експлуатації суднових дизельних двигунів. Досліджено методи діагностики та контролю технічного стану. Автори аналізують вплив режимів роботи на ефективність енергетичних установок. Доведено, що інтеграція систем моніторингу підвищує безпеку та ефективність експлуатації.

Аналіз сучасної науково-технічної літератури засвідчив, що питанням визначення методів інтеграції інноваційних технологій в енергетичну інфраструктуру суден не приділено достатньої уваги. Більшість публікацій розглядають лише окремі вузли енергетичної установки без врахування системного взаємозв'язку між ними. Існуючі методики переважно базуються на статичних моделях, які не відображають динаміку реальних режимів експлуатації. Виявлено значний розрив між теоретичними розробками в галузі енергетики та їх

практичною реалізацією на борту суден. Необхідно розробити інтегрований підхід, що охоплює апаратні та програмні рішення для підвищення загальної ефективності системи.

Сучасна суднобудівна індустрія потребує кардинальних змін у підходах до проектування енергетичних комплексів. Існуючі енергетичні інфраструктури суден не в повній мірі відповідають новим вимогам щодо інтелектуального керування та ресурсоефективності. Головна проблема полягає у відсутності єдиної методології впровадження інноваційних компонентів у вже функціонуючі енергетичні системи.

Обмеженість можливостей традиційних систем розподілу енергії призводить до значних втрат під час експлуатації суден. Статичні налаштування контролерів не дозволяють швидко реагувати на зміни навантаження, що виникають через зовнішні фактори та режимні особливості роботи судна. Процес інтеграції супроводжується складністю узгодження технічних параметрів обладнання різних виробників. Недостатній рівень автоматизації ускладнює своєчасну діагностику стану енергетичної системи, що підвищує ризики аварійних зупинок. Виникає конфлікт між вимогами максимальної продуктивності та необхідністю зменшення паливної залежності судна. Відсутність адаптивних алгоритмів управління обмежує потенціал використання новітніх систем зберігання та генерації енергії. Необхідно вирішити суперечність між необхідністю модернізації та технічними обмеженнями наявних енергосистем.

Невирішеною залишається проблема розробки інструментів для оцінки техніко-економічної ефективності впровадження інновацій у масштабі всього судна. Це зумовлює необхідність проведення комплексного науково-прикладного дослідження з питань удосконалення суднової енергетичної інфраструктури.

Постановка завдання. Метою роботи є розробка теоретичних основ та прикладних методів інтеграції інноваційних технологій в енергетичну інфраструктуру судна для забезпечення максимальної ефективності експлуатації. Дослідження спрямоване на оптимізацію розподілу енергопотоків між споживачами за допомогою впровадження інтелектуальних систем керування. Результатом має стати концептуальна модель оновленої енергосистеми з підвищеними показниками надійності та екологічності.

Об'єктом дослідження є процеси функціонування та перетворення енергії в судовій енергетичній інфраструктурі в умовах експлуатації.

Предметом дослідження виступають методи та засоби інтеграції інноваційних технологій для оптимізації режимів роботи енергетичних систем суден.

Виклад основного матеріалу дослідження. Суднова енергетична інфраструктура у XXI столітті трансформується з автономної енергосистеми на складний інтелектуальний мережевий комплекс. Структура цієї інфраструктури включає систему генерації, систему накопичення, інтелектуальну шину розподілу та адаптивні системи споживання. Генерація базується на комбінації ДВЗ, паливних елементів та відновлюваних джерел. Накопичення здійснюється за рахунок високоефективних акумуляторних батарей або суперконденсаторів. Інтелектуальна шина керується центральним контролером, який забезпечує пріоритезацію енергопотоків. Споживачі поділяються на критичні та другорядні, що дозволяє динамічно перерозподіляти потужність.

Класифікація інноваційних технологій передбачає розподіл на апаратні, програмні та гібридні рішення. Апаратні рішення включають високоефективні генератори, перетворювачі частоти та нові типи накопичувачів. Програмні рішення охоплюють цифрові двійники, системи штучного інтелекту для прогнозування навантажень та алгоритми предиктивної діагностики. Гібридні рішення – це інтегровані модулі, що поєднують обладнання з інтелектуальним керуванням.

Для опису динаміки системи використовується енергетичний баланс, що визначається як:

$$P_{gen}(t) + P_{sto}(t) = P_{load}(t) + \Delta P_{loss}(t);$$

де P_{gen} – потужність генерації;

P_{sto} – потужність від накопичувачів;

P_{load} – потужність споживання;

ΔP_{loss} – втрати.

Ефективність системи E визначається відношенням корисної роботи до витрат енергоресурсів:

$$E = \frac{\int_0^T P_{luse}(t) dt}{\int_0^T C_{fuel}(t) dt}.$$

Оптимізація досягається мінімізацією функції втрат:

$$J = \int_0^T \left(P_{loss}(t) + \lambda \left| \frac{dP}{dt} \right| \right) dt.$$

Нижче наведено огляд ключових технологічних груп та їхнього впливу на ефективність.

Системи оптимізації руху та автоматизації. Сучасні автоматизовані системи управління дозволяють суттєво підвищити паливну ефективність без капітальних змін у конструкції судна.

- Принцип роботи: система автоматично регулює роботу головного двигуна в реальному часі, реагуючи на зовнішні фактори (хвилювання, вітер, обростання корпусу) та забезпечуючи оптимальну потужність.

- Ефективність: дозволяє точно вимірювати економію палива та усуває людський фактор при управлінні. В комбінації з вітрильними системами вона автоматично враховує отриману від вітру тягу та зменшує навантаження на двигун.

- Додаткові переваги: використання аналітичних платформ для моніторингу, звітності та порівняльного аналізу ефективності всього флоту.

Гібридні системи та інтелектуальні енергомережі. Перехід від традиційних змінних до постійних мереж дозволяє гнучко інтегрувати різні джерела енергії та значно підвищити загальну ефективність судна.

- Тверdotільні трансформатори: розробка мереж середньої напруги постійного струму на основі тверdotільних трансформаторів забезпечує передачу електроенергії з мінімальними втратами, що критично важливо для великих суден. Це дозволяє створювати універсальну платформу для підключення паливних елементів, батарей та відновлюваних джерел енергії.

- Гібридні генеруючі установки: проекти, такі як Nautilus, передбачають поступову заміну традиційних двигунів внутрішнього згоряння на гібридні системи на основі твердооксидних паливних

елементів та батарей. Це дозволяє забезпечити всі потреби судна в електроенергії та теплі з вищим ККД.

- Інтелектуальне управління: застосування AI та предиктивних алгоритмів для оптимізації використання енергосистеми з метою мінімізації витрат палива та викидів.

Вітрильні технології як додаткове джерело енергії. Вітрильні технології, зокрема роторні вітрила, стають "безризиковим" рішенням для підвищення ефективності.

- Особливості: вони є "паливно-нейтральними", тобто працюють з будь-яким типом палива (від важкого палива до аміаку або водню), зменшуючи потребу в основній енергетичній установці.

- Ефективність: вітрильні системи найбільш ефективні при сильному вітрі та хвилюванні, коли навантаження на двигун найбільше. Станом на 2025 рік встановлено понад 100 таких систем, а ІМО розробляє стандартизовані керівництва з безпеки для їх широкого впровадження.

- Переваги: можливість встановлення під час планового докування без кардинальної перебудови силової установки судна.

Альтернативні види палива та конструкційні модифікації. Перехід на нові види палива є найбільш радикальним, але необхідним кроком для досягнення нульових викидів.

- Паливні елементи: водневі паливні елементи забезпечують ефективність перетворення енергії до 75%, порівняно з 55-60% у традиційних дизельних двигунів. Проте, існують виклики щодо інфраструктури, безпеки та вартості.

- Газові турбіни: проект MARPOWER розробляє газотурбінні установки, здатні працювати на водні, аміаку, метанолі та інших чистих паливах. Вони поєднують в собі високу ефективність та можливість когенерації (виробництва електрики та тепла).

- Конструкційні модифікації: полімерні підшипники – зменшують втрати на тертя в гребних валах у 6...9 разів порівняно з традиційними металевими; системи рекуперації енергії – інтеграція водяних турбін в обтічники корпусу може генерувати додаткові 15...17 % чистої потужності.

Висновки і перспективи подальших досліджень. Отримані наукові та прикладні результати підтверджують високу ефективність запропонованого системного підходу до модернізації.

Практичне впровадження результатів проведеного науково-прикладного дослідження дозволить вирішити важливе завдання

інтеграції інноваційних технологій у суднову енергетичну інфраструктуру.

В роботі узагальнено науково-технічні підходи та розроблено концептуальну модель модернізації енергосистем. Класифіковано перспективні технології, які найбільш ефективно впливають на показники експлуатації. Розроблена класифікація полегшує процес вибору оптимальних технологічних рішень для різних типів суден.

Розроблено математичне та формульне описання енергетичного балансу для динамічних режимів роботи. Використання накопичувачів енергії дозволяє мінімізувати втрати та підвищити стабільність системи.

Розроблені рекомендації можуть бути використані проектувальниками та експлуатантами суден. Подальші дослідження доцільно спрямувати на вдосконалення алгоритмів штучного інтелекту для керування енергопотоками. Запропоновані рішення сприяють підвищенню екологічності та надійності морських перевезень.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Vicenzutti A., Sulligoi G. Electrical and energy systems integration for maritime environment-friendly transportation // *Energies*. 2021. Vol. 14, № 21. Article 7240. DOI: <https://doi.org/10.3390/en14217240>.

2. Ning D., Johanning L., Gao Z., Thies P. R., Shi W., Aviso K. Innovation and system integration for offshore renewable energy structures // *Frontiers in Marine Science*. 2021. Vol. 8. Article 742282. DOI: <https://doi.org/10.3389/fmars.2021.742282>.

3. Xing H., Stuart C., Spence S., Chen H. Integrated energy systems for low-emission shipping // *Journal of Cleaner Production*. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126651>.

4. Xie P., Sun Y., Li Z. Optimization-based power and energy management system in shipboard microgrid: A review // *IEEE Systems Journal*. 2022. Vol. 16, № 1. P. 578–590. DOI: <https://doi.org/10.1109/jsyst.2020.3047673>.

5. Animah I., Adjei P., Djamesi E. K. Techno-economic feasibility of integrating hybrid renewable energy systems into ship power systems // *Journal of Marine Engineering & Technology*. 2022. Vol. 22, № 1. P. 22–37. DOI: <https://doi.org/10.1080/20464177.2022.2087272>.

6. Roslan S.B. M., Konovessis D., Tay Z.Y. Sustainable hybrid marine power systems for power management optimisation: A review // *En-*

ergies. 2022. Vol. 15, № 24. Article 9622. DOI: <https://doi.org/10.3390/en15249622>.

7. Tay Z. Y., Konovessis D. Sustainable energy propulsion systems for sea transport // *Discover Sustainability*. 2023. Vol. 4. Article 20. DOI: <https://doi.org/10.1007/s43621-023-00132-y>.

8. Mylonopoulos F., Polinder H., Coraddu A. Modeling and optimization methods for ship energy systems // *IEEE Access*. 2023. Vol. 11. P. 32697–32707. DOI: <https://doi.org/10.1109/access.2023.3263719>

9. Niu L., Xiao L. Optimization of topology and energy management in fuel cell cruise ship hybrid power systems // *Intelligent Marine Technology and Systems*. 2024. Vol. 2. Article 12. DOI: <https://doi.org/10.1007/s44295-024-00026-3>.

10. Zhang Y., Wang J., Li X. Energy management system for hybrid ship: Status and perspectives // *Ocean Engineering*. 2024. Vol. 310. Article 118638. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.118638>.

11. 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. Vol. 127. P. 165–188. <https://doi.org/10.20858/sjsutst.2025.127.10>.

12. 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), 174. <https://doi.org/10.3390/drones9030174>.

13. 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. *J. Mar. Sci. Eng.* 2022, 10, 1331. <https://doi.org/10.3390/jmse10091331>.

14. Sagin, S.; Madey, V.; Sagin, A.; Stoliaryk, T.; Fomin, O.; Kučera, P. Ensuring Reliable and Safe Operation of Trunk Diesel Engines of Marine Transport Vessels. *J. Mar. Sci. Eng.* 2022, 10, 1373. <https://doi.org/10.3390/jmse10101373>.

DOI: 10.31653/smf52.2026.97-106

дата першого надходження: 24.01.26
дата прийняття статті до друку після
рецензування: 21.02.26
дата публікації: 05.05.26

Сандлер А.К., Опришко М.О.

¹ORCID 0000-0002-0709-0542, ²ORCID 0000-0002-9385-8676

Національний університет «Одеська морська академія»

ВОЛОКОННО-ОПТИЧНИЙ ВІЗКОЗІМЕТР ДЛЯ СУДНОВИХ ЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК

Постановка проблеми в загальному вигляді. Постійні коливання світових цін на вуглеводневе паливо для двигунів внутрішнього згоряння, разом із непередбачуваністю завантаження суден через торгові війни та санкції, висувають нові виклики щодо ефективного використання паливних ресурсів. Це включає перехід на часткові режими роботи двигунів внутрішнього згоряння, модернізацію конструкцій корпусу суден та інші заходи. До того ж дедалі значущішими стають вимоги до зменшення шкідливих викидів суднових малооборотових двигунів, які використовують "важке" паливо чи суміші різних фракцій.

Зниження експлуатаційних витрат і екологічного впливу суднових двигунів, особливо дизелів, що працюють на "важкому" паливі, досягається завдяки конструктивним змінам, а також впровадженню електронного управління процесами упорскування палива. Поряд із цим триває вдосконалення систем регулювання в'язкості "важкого" палива, яке має різні характеристики динамічної в'язкості навіть за умов однакових температур для ідентичних марок. Окрім того, ці технічні рідини можуть проявляти властивості "неньютонівських" матеріалів із тиксотропними ефектами в триботехнічних вузлах двигуна. "Неньютонівські" властивості проявляються у зменшенні в'язкості при збільшенні швидкості зсуву, тоді як тиксотропні характеристики виявляються у зменшенні в'язкості з часом під постійною швидкістю деформації. Наприклад, підвищення в'язкості палива за інших однакових умов погіршує якість розпилювання, створює проблеми для роботи прецизійних пар паливних насосів, сприяє посиленню утворення нагару на деталях циліндро-поршневої групи і газоповітряного тракту, а також впливає на моменти подачі палива. Навпаки, зниження в'язкості призводить до розширення кута розпилю-

вання та скорочення довжини факела, що при існуючій конструкції форсунок і камер згоряння ускладнює формування оптимальної паливо-повітряної суміші та збільшує витрати палива. Окрім регулювання в'язкості палива, існує також гостра проблема з підтримкою оптимальної в'язкості мастильних рідин у циркуляційних системах. "Неньютонівські" тиксотропні рідини у фрикційних вузлах можуть суттєво впливати на рівень змащування елементів ЦПП, збільшувати коефіцієнт тертя, скорочувати моторесурс і навіть генерувати аварійні ситуації в роботі об'єктів енергетичної установки.

При цьому автоматичні системи для регулювання в'язкості палива вже широко використовуються на судах, але технології для аналогічного регулювання в мастильних системах наразі не отримали належного розвитку [1 - 3].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На сьогоднішній день розроблено безліч різних типів віскозиметрів, проте багато з них висувають специфічні вимоги до характеристик контрольованої рідини і мають обмежений динамічний діапазон. До того ж більшість пристроїв відрізняється складною механічною конструкцією, що значно збільшує гідродинамічний опір потоку. Волоконно-оптичні віскозиметри виділяються своїми незаперечними перевагами, такими як відсутність електричних струмів і напруги у чутливій зоні приладу, стійкість до зовнішніх електромагнітних впливів, а також абсолютна екологічність, безпека для навколишнього середовища та виключення ризику пожеж і вибухів [4 - 6].

Відомий п'єзоелектричний віскозиметр, який містить реверсивний лінійний п'єзоелектричний двигун з осцилятором та оптичними датчиками представлений на рис. 1 [7].

Недоліки пристрою, які обумовлені застосуванням лінійного п'єзоелектричного двигуна полягають у такому:

- наявність електричних ліній живлення та поверхонь тертя;
- необхідність постійної підтримки геометрії вимірювальної камери в умовах впливу експлуатаційних факторів;
- необхідність додаткових оптичних датчиків для забезпечення роботи приладу;
- відсутність термокомпенсації впливу контрольованого та навколишнього середовища.

Більш досконалим є п'єзооптичний віскозиметр, основу якого складають сенсорний елемент з кварцового волокна та п'єзокерамічний генератор коливань (рис. 2) [8].

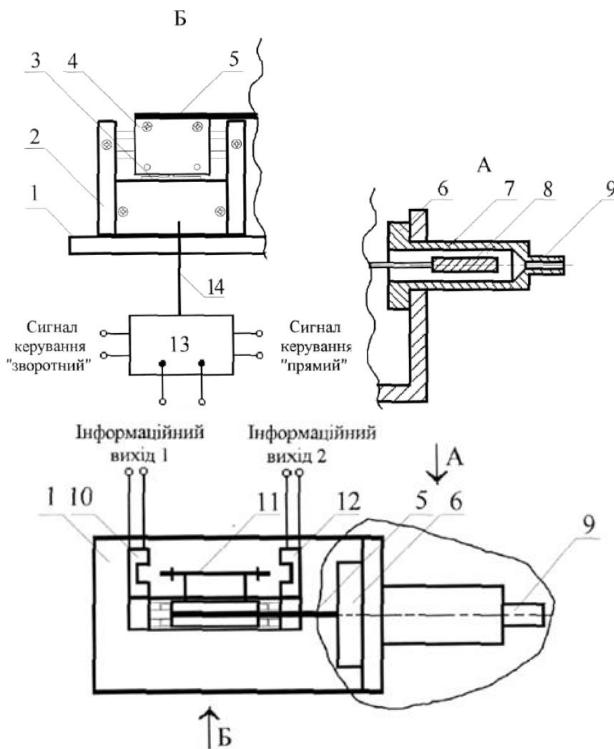


Рис. 1. П'єзоелектричний віскозиметр: 1 – основа; 2 – реверсивний лінійний п'єзоелектричний двигун; 3 – осцилятор двигуна; 4 – рухома частина; 5 – напрямна; 6 – вимірювальний зонд; 7 – вимірювальна камера; 8 – поршень; 9 – штуцер; 10, 12 – оптичні датчики; 11 – шторка; 13 – перетворювач напруги; 14 – кабель

У той же час можливості пристрою суттєво обмежують особливості, обумовлені наявністю електричних ліній енергопостачання і розташуванням вимірювального світловода сенсорного елемента, а саме:

- необхідність додаткових заходів щодо захисту світловода сенсорного елемента від впливу коливальних процесів, що генеруються судновим обладнанням, з частотами близькими до робочих частот віскозиметра;
- необхідність ретельного позиціонування світловода сенсорного елемента щодо осьової лінії потоку контрольованого середови-

ща;

- неможливість урахування впливу експлуатаційних факторів на результати вимірювання;
- відсутність термокомпенсації впливу контрольованого та навколишнього середовищ;
- складність заміни та очищення світловоду.

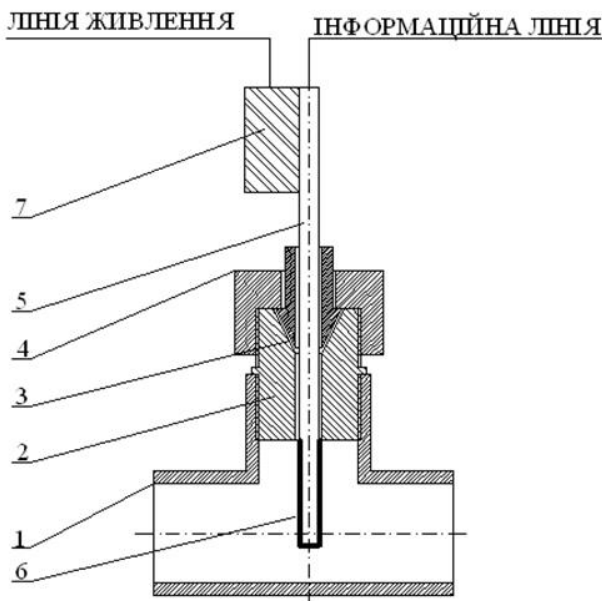


Рис. 2. П'єзооптичний віскозиметр: 1 – корпус, 2 – вквіт, 3 – термоусадочна герметична муфта, 4 – фіксуюча гайка, 5 – сенсорний елемент з кварцового волокна, 6 – віддзеркалюючий шар, 7 – п'єзокерамічний генератор коливань

Постановка завдання. Таким чином, схематехнічних рішень в області волоконно-оптичних віскозиметрів, які повною мірою задовольняють вимогам до якості вимірювання змащувальних матеріалів, до останнього часу не було відомо. Таким чином, розробка та дослідження нового волоконно-оптичного віскозиметра є актуальним науково-технічним завданням.

Виклад основного матеріалу дослідження. Аналіз конструкцій відомих віскозиметрів дозволив конкретизувати вимоги до нового

схемотехнічного рішення вимірювального пристрою. Для усунення недоліків, властивих [7, 8] у розроблюваному віскозиметрі:

вимірювальний та контрольний оптичні канали розташовані в ідентичних умовах щодо потоку контрольованої рідини;

відсутні електричні лінії енергопостачання;

є можливість компенсації коливань температури зовнішнього середовища;

збережено надійність, чутливість та простота схемотехнічних рішень віскозиметрів відомих типів.

Відповідно до вищевикладених вимог розроблено модернізований волоконно-оптичний віскозиметр. Схему вимірювального пристрою наведено на рис. 3.

Для реалізації схемотехнічного рішення застосовано комбінацію оптико-механічних елементів.

У статичному режимі, коли потік мастила відсутній, у блоці реєстрації записуються дані та коригування, що враховують температуру навколишнього середовища, а також втрати у всіх складових вимірювальної системи.

У динамічному режимі вимірювання випромінювання джерела проходить через мультиплексор, де відбувається поділ на дві довжини хвиль, після чого потрапляє в основний і контрольний світловоди. Під впливом потоку рідини на профільовані лопаті основи виникає динамічна деформація зсуву, яка передається на пов'язаний із основою чутливий світловід. Ця деформація породжує аналогічні зміни у коаксіальному чутливому світловіді. В наслідок деформації зсуву світловоду змінюється його показник заломлення, що зумовлює порушення умов повного внутрішнього відбиття світла. Це викликає тунелювання частини випромінювання з основного світловода до чутливого. Отже, частина світла виходить за межі основного світловода. У контрольному світловіді реєструються лише втрати випромінювання, пов'язані з впливом зовнішніх дестабілізуючих факторів [9 - 11].

Частина випромінювання, яке не залишає основного та чутливого світловодів, відбивається від шару сапфірового скла і повертається через демультіплексор та відповідну гілку розгалужувача до фотоприймача [12].

Сигнали, що надходять у фотоприймач від основного та додаткового світловодів, компаруються у блоці обробки.

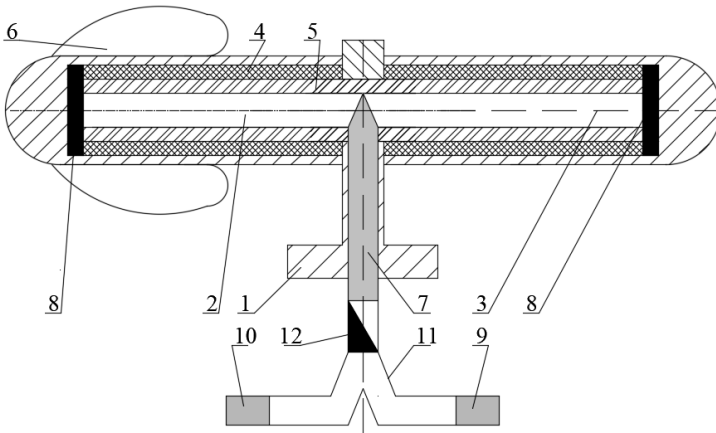


Рис. 3. Волоконно-оптичний віскозиметр: 1 - основа; 2 – основний світловод; 3 – контрольний світловод; 4 – оболонка; 5 – чутливий світловод; 6 – профільовані лопаті; 7 – термокомпенсаційний біскляний світловод; 8 – віддзеркалюючий шар з сапфірового скла; 9 – джерело випромінювання; 10 – фотоприймач; 11 – волоконно-оптичний розгалужувач; 12 - мультиплексор/демультиплексор

Відносна потужність, яка залишиться у основному світловоді, має майже лінійну залежність від кута крутіння світловода (рис. 4).

Для врахування впливу температури навколишнього середовища на компоненти пристрою використовується термокомпенсаційний світлодіод. Його вигин змінюється пропорційно до температури, що дозволяє компенсувати заздалегідь внесені втрати випромінювання у світловоді.

В результаті сигнал, що отримується, буде пропорційний величині в'язкості контрольованого середовища в трубопроводі, при цьому вплив неконтрольованих експлуатаційних факторів буде компенсовано.

Пропонована конструкція віскозиметра характеризується тим, що основний і контрольний елементи є єдиним світловодом, виготовленим із сапфірового скла, а коаксіально з ним розташовується чутливий світловод. Крім того, у вимірювальну схему введено термокомпенсаційний біскляний світловод.

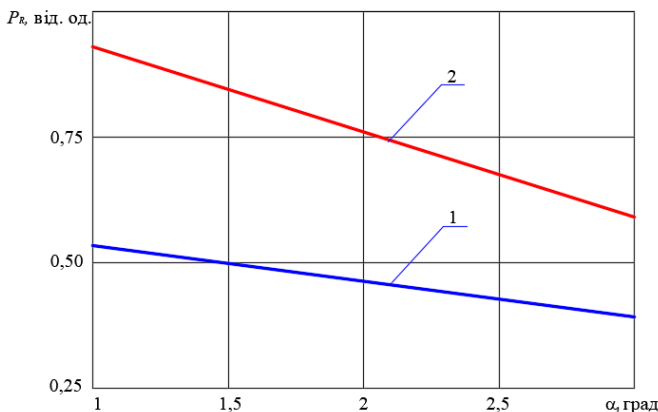


Рис. 4. Залежність відносної оптичної потужності, яка залишиться у основному світловоді, від кута крутіння світловода, який виконано з: 1 – кварцового скла; 2 – сапфірового скла [9]

Висновки. Розроблений вимірювальний пристрій має наступні переваги:

- компенсація впливу неконтрольованих експлуатаційних факторів на результати вимірів;
- відсутність потреби в електричних лініях енергопостачання;
- захист чутливих елементів пристрою від зовнішнього впливу;
- збереження постійної геометрії оптичного каналу навіть за впливу несприятливих експлуатаційних чинників;
- ідентичне розташування основного та додаткового каналів щодо потоку контрольованої рідини;
- покращені показники чутливості та точності пристрою.

Застосування пропонованого віскозиметра в системах мащення суднових двигунів внутрішнього згорання дозволить ефективно, надійно та безпечно оцінювати кількісні характеристики в'язкості маслянистих матеріалів.

Крім того, волоконно-оптичний віскозиметр може бути інтегрований до інтелектуальні розподілені інформаційно-вимірювальні системи (ІРІВС) є сучасними комплексами, що поєднують різноманітні волоконно-оптичні вимірювальні пристрої та системи. Вони забезпечують можливість отримання достовірної інформації про стан контрольованих об'єктів і процесів у реальному часі. Основна перевага ІРІВС полягає в їх принциповій відмінності від раніше створених аналогів, де фізичні величини вимірювалися лише у визначених

точках і незалежно одна від одної за допомогою окремих приладів. У випадку з ІРІВС реалізується інтегрований підхід, який дозволяє одночасно аналізувати, порівнювати контрольовані фізичні величини, а також встановлювати закономірності їх взаємодії та просторово-часові розподіли [13 - 20].

Одночасно, технічне вдосконалення та автоматизація суден призводять до суттєвого зниження випадків аварійності. Зростання рівня автоматизації суден, комп'ютеризація процесів управління суттєво вплине на зміни умов трудової діяльності людини взагалі, та вимоги до суднового персоналу [21].

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Бережний, К. Ю. Моделі та засоби побудови комп'ютерної системи визначення реологічних характеристик суднових технічних рідин. – автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.13.05 / Національний університет "Одеська морська академія". – Одеса, 2018. – 35 с.

2. Никольский, В. В., Сандлер, А. К. Моделирование процессов в вискозиметре с пьезоэлектрическим приводом // Автоматика, автоматизация, электротехнические комплексы и системы. – 2003. – № 1 (11). – С. 95 -100.

3. Никольский, В. В., Сандлер, А. К. Моделирование свойств тиксотропных жидкостей в среде ELECTRONICS WORKBENCH // Вестник СевГТУ. Автоматизация процессов и управление. – 2004. – Вып. 57. – Севастополь: СевГТУ. – С. 159 - 162.

4. Wilson, T. L. Viscosity and density values from excitation level response of piezoelectric-excited cantilever sensors // [Sensors and Actuators A: Physical](#). 2007. – [Vol. 138](#). – [Issue 1](#). – pp. 44-51. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sna.2007.04.050>

5. Hongbin Yu. Capacitive micromachined ultrasonic transducer (cmut) based micro viscosity sensor // [Sensors and Actuators B: Chemical](#). – 2016. – [Vol. 227](#). – pp. 346-351. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.snb.2015.12.061>

6. Chan Jasmine. Photoacoustic Imaging with Capacitive Micromachined Ultrasound Transducers: Principles and Developments / J. Chan, Z. Zheng, K. Bell, M. Le, P. Reza, J. Yeow // [Sensors](#). – 2019. – № 19(16). – pp. 3617. DOI: 3617. 10.3390/s19163617

7. Патент України № 119814. МПК G01N 11/10 (2006.01). Вискозиметр / В. В. Нікольський, К. Ю Бережний, М. В. Нікольський; зая-

вник та володар патенту Національний університет "Одеська морська академія". – u2017 03735. – заявл. 8.04.2017; опубл. 10.10.2017, Бюл. № 19. – 3 с.

8. Патент України № 41993. МПК (2009) G01M 11/00. П'єзооптичний віскозиметр / А. К. Сандлер, О. А. Сандлер; заявники та володарі патенту Сандлер, А. К., Сандлер, О. А. – u200812868. – заявл. 04.11.2008; опубл. 25.06.2009, бюл. № 12. – 3 с.

9. Сандлер, А. К. Метод підвищення ефективності діагностування технічного стану суднових газотурбінних установок на основі волоконно-оптичних технологій: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.22.20 / Київський університет інфраструктури та технологій. – К., 2021. – 20 с.

10. Snyder, A., Love, D. Theory of optical waveguides. URL: <https://epdf.tips/optical-waveguide-theory.html>.

11. Сандлер, А. К., Карпилов, А. Ю. Применение волоконно-оптических датчиков в системах автоматического диагностирования судовых газотурбинных установок. // Автоматизация технологических і бізнес-процесів. – 2019. – Т. 11. – №. 2. – Одесса: ОНАХТ. – С. 46 - 52.

12. Сандлер, А. К., Сандлер, А. А. Волоконно-оптический датчик давления для высокотемпературных систем топливподготовки // Судовые энергетические установки. – 2009. – Вып. 23. – Одесса: ОНМА. – С. 17 - 22.

13. Сандлер, А. К. Чувствительный элемент волоконно-оптического акселерометра на основе сапфирового стекла // IX міжнародна науково-методична конференція "Суднова електроінженерія, електроніка і автоматика", 05-06 листопада 2019 р.: матеріали конференції. – Одеса: НУ "ОМА". – 2019. – С. 27 – 33.

14. Сандлер, А. К., Цюпко, Ю. М., Каменева, А. В. Схемотехнічне рішення датчика швидкості потоку // Автоматизация судовых технических средств. – 2016. – Вып. 22. – Одесса: НУ "ОМА". – С. 86 - 92.

15. Сандлер, А. К., Батинський, А. І. Волоконно-оптичний пристрій контролю рівня для високотемпературних систем паливопідготовки // Автоматизация технологических і бізнес-процесів. – 2020. – Т. 12. – №. 2. – Одеса: ОНАХТ. – С. 9 -13. DOI: <https://doi.org/10.15673/atbp.v12i2.1802>.

16. Sandler, A., Bondarenko, A., Romanovska, O. Potential opportunities for the use of alternative fuels in marine steam boilers // Moderniza-

tion of today's science: experience and trends: Collection of Scientific Papers «SCIENTIA» with Proceedings of the IX International Scientific and Theoretical Conference, November 28, 2025. Glasgow, Scotland, UK: International Center of Scientific Research. – 2025. – P. 358 – 364. DOI: <https://doi.org/10.36074/scientia-28.11.2025>.

17. Сандлер, А. К., Рябцов, О. В. Застосування спеціальних оптичних волокон для вдосконалення навігаційного обладнання // Automation of Technological and Business Processes. – 2025. – № 17 (4). – С. 11 - 17. DOI: [10.15673/atbp.v17i4.3271](https://doi.org/10.15673/atbp.v17i4.3271).

18. Бондаренко, А. В., Сандлер, А. К. Волоконно-оптичні засоби контролю параметрів альтернативних палив суднових енергетичних установок // ГРААЛЬ НАУКИ: міжнар. наук. журнал. – Вінниця: ГО "Європейська наукова платформа"; НУ "Інститут науково-технічної інтеграції та співпраці", 2024. – № 42. – С. 404 - 409. DOI: [10.36074/grail-of-science.02.08.2024](https://doi.org/10.36074/grail-of-science.02.08.2024).

19. Сандлер, А. К., Макачук, Є. В. Схемотехнічне рішення високотемпературного датчику тиску // XI міжнародна науково-методична конференція "Суднова електроінженерія, електроніка і автоматика", 23.11.2021 - 24.11.2021 р.: матеріали конференції. – Одеса: НУ "ОМА". – 2021. – С. 90 - 194. DOI: [10.31653/2706-7874.SEEEE-2021.11.1-238](https://doi.org/10.31653/2706-7874.SEEEE-2021.11.1-238).

20. Сандлер, А. К., Опрышко, М. О. Волоконно-оптический датчик контроля состояния технических жидкостей и газов // X міжнародна науково-методична конференція "Суднова електроінженерія, електроніка і автоматика", 24.11.2020 - 25.11.2020 р.: матеріали конференції. – Одеса: НУ "ОМА". – 2020. – С. 63 - 68. DOI: [10.31653/2706-7874.SEEEE-2020.11.1-245](https://doi.org/10.31653/2706-7874.SEEEE-2020.11.1-245).

21. Кузьменко, К. М., Сандлер, А. К. Особливості формування трудових резервів в умовах автоматизації суден // Education and science of today: intersectoral issues and development of sciences: Collection of scientific papers "ΛΟΓΟΣ" with Proceedings of the VI International Scientific and Practical Conference, Cambridge, March 29, 2024. Cambridge-Vinnitsia: P.C. Publishing House & UKRLOGOS Group LLC. – 2024. – P. 79 - 82. DOI: [10.36074/logos-29.03.2024.01](https://doi.org/10.36074/logos-29.03.2024.01).

DOI: 10.31653/smf52.2026.107-115

дата першого надходження: 18.02.26
дата прийняття статті до друку після
рецензування: 24.03.26
дата публікації: 05.05.26

Стукаленко О.М.¹, Дулдiєр А.П.²¹ORCID: 0000-0002-3025-7013, ²ORCID: 0000-0009-4844-777X

Національний університет «Одеська морська академія»

ЕФЕКТИВНІСТЬ ФРИКЦІОНА У ЗДВОЄНОМУ ПІДВІСІ СУДНОВОГО ВАНТАЖОПІДЙОМНОГО ПРИСТРОЮ ПРИ ВІДМОВІ ШКЕНТЕЛЯ ПІД ЧАС ОПУСКАННЯ ВАНТАЖУ

Постановка проблеми в загальному вигляді.

Однією із загроз, що виникають під час технічної експлуатації суднових вантажопідйомних пристроїв (СВПП), є пошкодження вантажу внаслідок обриву троса під час виконання навантажувально-розвантажувальних чи ремонтно-монтажних робіт у машинному відділенні крупнотоннажних суден.

Наслідки подібних аварій включають не лише матеріальні втрати, пов'язані з пошкодженням вантажу, простоем судна під час ліквідації наслідків, витратами на ремонт СВПП та елементів судна, що постраждали від вантажу, але й трагічні людські жертви та серйозні екологічні катастрофи. Наприклад, у 1998 році під час підйому південного верхнього модуля платформи Petronius стався обрив троса, внаслідок чого модуль упав у Мексиканську затоку. Вартість оцінювалася приблизно у 116 мільйонів доларів США. У період з 1999 року по 2013 більш 60 чоловік загинули внаслідок обриву тросів і більш 65 пов'язаних з ними травмовано [1].

Проблему запобігання аваріям у СВПП із напрямними вирішують шляхом використання уловлювачів, які забезпечують утримання вантажу чи вантажонесучих елементів у разі несправності підйомного механізму. У конструкції суднових підйомників із гнучким підвісом платформи, відповідно до вимог Регістру [2], передбачено застосування чотирьох підвісів. У разі обриву одного із тросів платформа залишається утриманою на трьох, що дозволяє перемістити її до положення, де можна безпечно виконати розвантаження та провести заміну пошкодженого троса.

Для СВПП з вільним підвісом вантажу завдання ускладнюється. Одним із можливих рішень є підвищення надійності таких систем

шляхом впровадження часткового навантаженого резервування за допомогою подвійного поліспастового підвісу. У цьому випадку передбачається використання двох окремих тросів: якщо один з них обривається, навантаження автоматично перерозподіляється на другий. Завдяки такому підходу пристрій переходить із стану несправного і непрацездатного до стану несправного, але працездатного, що дозволяє уникнути аварійної ситуації та успішно завершити вантажну операцію. Під час перерозподілу навантажень у елементах вантажного пристрою можуть виникати значні динамічні зусилля. Відомі запропоновані технічні рішення можна класифікувати на чотири групи. Перша група не містить засобів для зниження динамічних навантажень у разі обриву троса – характерне рішення. У другу групу входять здвоєні підвіси, обладнані зрівняльними пристроями, що мають амортизаційні елементи, які сприяють зменшенню динамічних навантажень при аварійному утриманні вантажу. Третя група технічних рішень передбачає зрівняльні пристрої, оснащені гідравлічним демпфером. Четверта група представлена конструкціями, до складу яких входить фрикціон, призначений для обмеження зусилля.

Для реалізації перелічених технічних рішень необхідне визначення величини зусиль, які можуть виникнути під час перехідних процесів після обриву троса за різних режимів роботи вантажопідйомного пристрою. Недостатність результатів досліджень процесів, що відбуваються у силовому ланцюзі СВПП з вільним підвісом вантажу після обриву троса, обумовлює відсутність ефективних засобів для запобігання падіння вантажу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дослідження перехідних процесів під час перерозподілу зусиль у силовому ланцюзі вантажних пристроїв після обриву троса, якими займалися автори робіт [3-9], містили результати визначення ефективності використання здвоєних підвісів із постійним опором фрикціона зрівняльного пристрою у вантажних пристроях мостового типу у випадку обриву троса при підйомі вантажу з жорсткої основи «з підхопленням».

Інші дослідники провели дослідження перехідних процесів у вантажних пристроях при обриві троса здвоєного підвісу без урахування впливу податливості металоконструкції вантажного пристрою. Результати, що отримані вказаними авторами, можна застосовувати лише для випадків, коли механізм підйому знаходиться на

жорсткій основі – у ліфтах, підйомних платформах, або у випадку знаходження вантажного візка крана біля опори.

Стукаленко М. І. [10] визначив розрахункові динамічні зусилля у силовому ланцюзі мостового крана у випадку відмови троса у зведеному підвісі з балансиrom під час опускання вантажу у режимі генераторного гальмування. Визначено, що за роботи з номінальним вантажем розрахункові коефіцієнти динамічності перевищують запаси міцності, що не дає змоги запобігти руйнуванню елементів крана. Однак є можливість утримати після обриву вантаж, вагою меншою за номінальну, яку і було знайдено під час досліджень.

Стосовно ефективності використання фрикціону з постійним опором для утримання вантажу після обриву троса під час опускання вантажу мостовим краном досліджень не проведено.

Постановка завдання. Метою даної роботи є визначення ефективності використання фрикціону з постійним опором у зрівняльному пристрої зведеного вантажного підвісу для забезпечення утримання вантажу після обриву троса під час опускання вантажу в режимі генераторного гальмування.

Для цього необхідно:

- скласти динамічну модель вантажопідйомного пристрою при утриманні вантажу після обриву троса;

- виконати математичне моделювання поведінки динамічної моделі;

- вибрати метод дослідження математичної моделі та провести ці дослідження;

- визначити розрахункові динамічні зусилля та коефіцієнти динамічності у силовому ланцюзі при утриманні вантажу;

- порівняти отримані коефіцієнти динамічності і коефіцієнти запасу міцності елементів пристрою;

- провести аналіз отриманого математичного результату.

Виклад основного матеріалу дослідження. Досліджений випадок обриву троса безпечного зведеного поліспасти з постійним опором фрикціону зрівняльного пристрою при сталому опусканні вантажу в режимі генераторного гальмування.

Динамічна модель для даного випадку представлена на рис.1, де m_1 – маса обертових частин механізму підйому, приведена до поступального переміщення y_1 , кг; y_1 – переміщення маси m_1 , приведене до переміщення вантажу, м; m_2 – маса вантажу, кг; G – вага вантажу, Н; y_2 – переміщення вантажу, м; m_3 – приведена маса метало-

конструкції крана, кг; F – зусилля у металоконструкції, яке визначається за формулою

$$F = c_3 y_3,$$

де c_3 – жорсткість металоконструкції крана, Н/м; y_3 – переміщення маси m_3 , м;

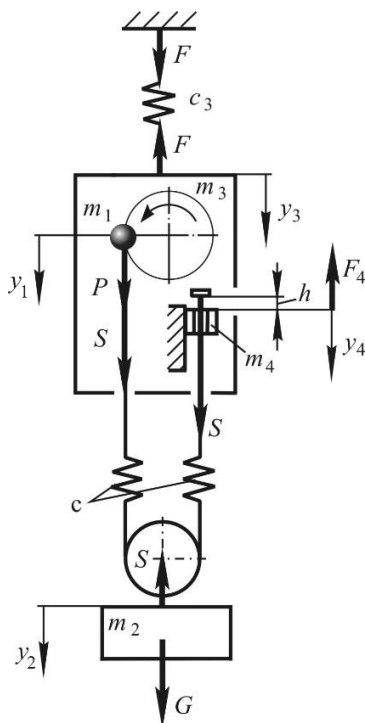


Рис. 1. Динамічна модель опускання вантажу після обриву троса здвоєного поліспастового підвісу

P — рушійне зусилля привода, приведене до вантажу

$$P = P_0 + \beta \dot{y}_1,$$

де P_0 – зусилля в момент пуску двигуна при нерухомому роторі; β – коефіцієнт жорсткості механічної характеристики двигуна; \dot{y}_1 – швидкість маси m_1 ; c – жорсткість поліспастового підвісу після обриву троса, Н/м. m_4 – маса рухливих частин фрикціону зрівняльного пристрою, приведена до вантажу, кг; h – приведена до переміщення вантажу довжина ділянки вільного ходу зрівняльного елемента, м;

y_4 – приведенне до переміщення вантажу переміщення рухливих частин демпфера, м; S – зусилля в поліспастовому підвісі, Н; F_4 – зусилля опору фрикціону зрівняльного пристрою, приведенне до вантажу, Н,

$$F_4 = kG,$$

де k – заданий коефіцієнт опору фрикціону.

Рух мас після обриву троса складається з чотирьох етапів.

На першому етапі відбувається рух мас після обриву одного з тросів під час вибору слабину, що утворилася, у цілому тросі. Рівняння, що описують рух мас на першому етапі, мають вигляд

$$\left. \begin{aligned} m_3 \ddot{y}_3 + c_3 y_3 &= 0 \\ m_1 \ddot{y}_1 + \beta_1 \dot{y}_1 &= P_0; \\ m_2 \ddot{y}_2 &= G. \end{aligned} \right\}$$

Початкові умови для першого етапу

$$\begin{aligned} t_1 = 0, \quad y_3 &= \frac{G}{c_3}, \quad \dot{y}_3 = 0, \\ y_1 &= 0, \quad \dot{y}_1 = v_{20}, \\ y_2 &= 0 \quad \dot{y}_2 = v_{20}, \end{aligned}$$

де v_{20} – швидкість опускання вантажу у сталому режимі, м/с.

Після вибору ділянки вільного ходу зрівняльного елемента відбувається прикладення навантаження до поліспастового підвісу – починається другий етап руху мас.

Умова переходу до другого етапу

$$v_{20}t + \frac{gt^2}{2} = h - \frac{G}{2c} + y_1 - \left(\frac{G}{c_3} - y_3 \right).$$

Рух мас на другому етапі описується системою рівнянь

$$\left. \begin{aligned} m_3 \ddot{y}_3 + c_3 y_3 - c(y_2 - y_3 - y_1) &= 0; \\ m_1 \ddot{y}_1 + \beta_1 \dot{y}_1 - c(y_2 - y_3 - y_1) &= P_0; \\ m_2 \ddot{y}_2 + c(y_2 - y_3 - y_1) &= G. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Зусилля, що діє на поліспастовий підвіс, визначається за формулою

$$S = c(y_2 - y_3 - y_1). \quad (2)$$

Початкові умови для другого етапу

$$\begin{aligned} t_2 = 0, \quad y_3 &= (y_3)_1, \quad \dot{y}_3 = (\dot{y}_3)_1 \\ y_1 &= 0, \quad \dot{y}_1 = (\dot{y}_1)_1, \\ y_2 &= (y_2)_1, \quad \dot{y}_2 = (\dot{y}_2)_1, \end{aligned}$$

де $(y_3)_1$ – переміщення маси m_3 в кінці першого етапу; $(\dot{y}_3)_1, (\dot{y}_1)_1, (\dot{y}_2)_1$ – швидкості мас m_3, m_1 і m_2 кінці першого етапу.

При досягненні зусилля у поліспастовому підвісі величини спрацьовування фрикціона починається третій етап руху мас. В цей час зусилля у поліспастовому підвісі обмежується силами тертя фрикціона.

Умова переходу від другого етапу до третього

$$S = F_4.$$

Рівняння, що описують рух мас на третьому етапі мають вигляд

$$\left. \begin{aligned} m_3 \ddot{y}_3 + c_3 y_3 - c(y_2 - y_3 - y_4 - y_1) &= 0; \\ m_1 \ddot{y}_1 + \beta \dot{y}_1 - c(y_2 - y_3 - y_4 - y_1) &= P_0; \\ m_4 \ddot{y}_4 - c(y_2 - y_3 - y_4 - y_1) &= -kG; \\ m_2 \ddot{y}_2 + c(y_2 - y_3 - y_4 - y_1) &= G. \end{aligned} \right\}$$

Зусилля в поліспастовому підвісі визначається за формулою

$$S = c(y_2 - y_3 - y_4 - y_1).$$

Початкові умови для третього етапу

$$\begin{aligned} t_3 = 0, \quad y_3 &= (y_3)_2, \quad \dot{y}_3 = (\dot{y}_3)_2, \\ y_1 &= (y_1)_2, \quad \dot{y}_1 = (\dot{y}_1)_2, \\ y_2 &= (y_2)_2, \quad \dot{y}_2 = (\dot{y}_2)_2, \\ y_4 &= 0, \quad \dot{y}_4 = 0. \end{aligned}$$

Четвертий етап починається після зупинки рухомих частин фрикціону і відбуваються пружні коливання мас.

Умова переходу до етапу, на якому відбувається рух мас після вимикання фрикціону з роботи

$$\dot{y}_4 = 0.$$

Рух мас на четвертому етапі описується системою рівнянь (1). Зусилля, що діє на поліспастовий підвіс, визначається за формулою (2).

Початкові умови для четвертого етапу

$$\begin{aligned}
 t_4 = 0, \quad y_3 = (y_3)_3, \quad \dot{y}_3 = (\dot{y}_3)_3, \\
 y_1 = (y_1)_3, \quad \dot{y}_1 = (\dot{y}_1)_3, \\
 y_2 = (y_2)_3 - (y_4)_3, \quad \dot{y}_2 = (\dot{y}_2)_3.
 \end{aligned}$$

Математична модель реалізована у формі програми для ЕОМ з використанням розв'язання рівнянь методом Рунге-Кутта 4-го порядку.

Результати обчислювальних експериментів для мостового крана вантажопідйомністю 20 т приведені на рис. 2 у вигляді графіків залежностей зусиль у поліспастовому підвісі й у металоконструкції від часу: $S(t)$ і $F(t)$.

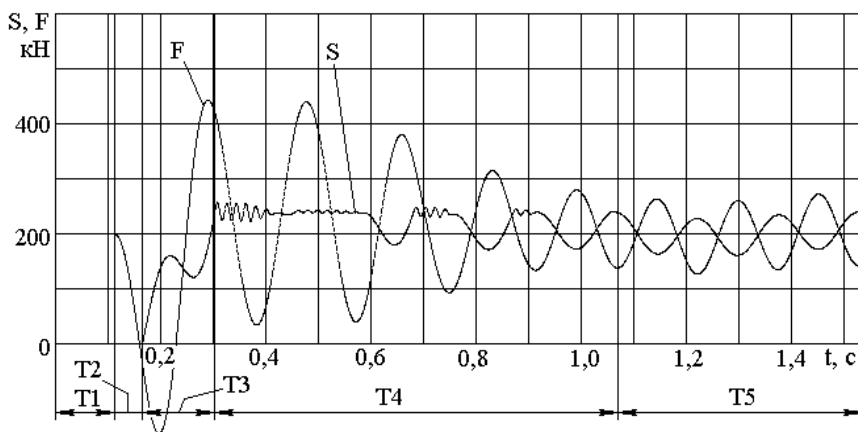


Рис. 2. Графіки залежностей $F(t)$ і $S(t)$ для випадку обриву троса безпечного зведеного поліспасти при опусканні вантажу

На графіках ділянка T1 відповідає стану системи до обриву троса. Ділянка T2 показує стан системи під час вільного руху вантажу, коли зусилля у підвісі відсутнє, а металоконструкція здійснює пружні вільні коливання. На ділянці T3 показані зусилля у підвісі та металоконструкції під час зростання навантаження до моменту спрацювання фрикціону зрівняльного пристрою. Ділянка T4 відповідає етапу, на якому фрикціон поглинає енергію, що виникла під час вільного руху вантажу. На ділянці T5 показані зусилля у пружних зв'язках після виключення фрикціону з роботи.

Максимальне зусилля $S = 250$ кН, коефіцієнт динамічності 1,25. Максимальне зусилля $F = 450$ кН, коефіцієнт динамічності 2,25. У досліджуваній конструкції крана коефіцієнт запасу міцності троса 5.

Отже для нового неспрацьованого цілого троса коефіцієнт запасу міцності після відмови другого складе 2,5. Аналіз результатів свідчить про те, що застосування фрикціону з постійним опором у зрівняльному пристрої здвоєного поліспасти для даної конструкції крана дозволяє знизити динамічні навантаження на поліспастовий підвіс до величин, при яких коефіцієнт динамічності навантаження поліспастового підвісу менше існуючих запасів міцності троса. Однак розрахункові динамічні навантаження в металокопструкції крана виявляються такими, що величина коефіцієнту запасу міцності металокопструкції виявляється недостатньою для запобігання аварії крана. Запас міцності металокопструкції розглянутого крана, відповідно до вимог Регістра, 2,18. Тобто розрахункові напруження перевищать границі плинності матеріалу R_{eH} , що призведе до пластичних деформацій та втрати остійності копструкції.

Висновки і перспективи подальших досліджень.

Забезпечення виключення руйнування металокопструкції вимагає подальших досліджень динамічних процесів у силовому ланцюзі крана після обриву троса вантажного поліспасти, та визначення необхідних законів опору руху зрівняльних елементів.

Отримані диференційні рівняння можна використовувати для створення графічної моделі перехідних процесів у силовому ланцюзі мостового крана при утриманні вантажу після обриву троса при опусканні вантажу за допомогою здвоєного підвісу з постійним опором фрикціону у зрівняльному пристрої.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Vickress D. J. Steel Wire Rope Failures Who Is Accountable? / 2013. URL: <https://www.maintworld.com/HSE/Steel-Wire-Rope-Failures-Who-Is-Accountable>.
2. Регістр судноплавства України. Правила щодо вантажопідіймальних пристроїв морських суден. Вид. 2026.
3. Jiao, Qq., Li, Bl., Qin, Yx. *et al.* Research on Dynamic Characteristics of Lifting Rope-Breaking for the Nuclear Power Crane. *J Fail. Anal. and Preven.* 21, 1220–1230 (2021). <https://doi.org/10.1007/s11668-021-01154-2>
4. Torkar M., Arzenšek B. Failure of crane wire rope // *Engineering Failure Analysis.* 2002. Vol. 9. No. 2. P. 227–233. [https://doi.org/10.1016/S1350-6307\(01\)00016-3](https://doi.org/10.1016/S1350-6307(01)00016-3)

5. Mapelli C., Barella S. Failure analysis of a cableway rope // *Engineering Failure Analysis*. 2009. Vol. 16. No. 5. P. 1666–1673. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2008.12.011>
6. Mojallizadeh M. R., Brogliato B., Prieur C. Modeling and control of overhead cranes: A tutorial overview and perspectives // *Annual Reviews in Control*. 2023. Vol. 56. Art. 100877. <https://doi.org/10.1016/j.arcontrol.2023.03.002>.
7. Maghsoudi M., Ramli L., Sudin S., Mohamed Z., Husain A., Wahid H. Improved unity magnitude input shaping scheme for sway control of an underactuated 3D overhead crane with hoisting // *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2019. Vol. 123. P. 466–482. <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2018.12.056>
8. Швачунов А.С., Дорохов Н.Ю. Проектування пристроїв, що запобігають аваріям вантажопідіймальних кранів у разі обриву каната // УПА. Машинобудування: зб. наук. пр. 2013. № 11. С. 76-81.
9. Дорохов М. Ю., Вовненко О. Є. Удосконалення конструкції механізму головного підйому ливарного крана, що запобігає падінню вантажу при обриві каната // Вісник Донбаської державної машинобудівної академії. 2018. № 2 (44). С.90 – 95. Режим доступу: [http://www.dgma.donetsk.ua/science_public/ddma/Herald_2\(44\)_2018/article/19.pdf](http://www.dgma.donetsk.ua/science_public/ddma/Herald_2(44)_2018/article/19.pdf).
10. Стукаленко М. І., Стукаленко О. М., Василюк Д. І. Запобігання аварії мостового крана при обриві каната здвоєного поліспасти з балансиrom // Вісник Одес. держ. акад. будівн. та архітект. Одеса, 2019. Вип. 74. С. 67-74.

DOI: 10.31653/smf52.2026.116-124

дата першого надходження: 11.01.26
дата прийняття статті до друку після
рецензування: 21.02.26
дата публікації: 05.05.26

Фомін О.В.¹, Щербина Ю.В.², Мартиненко В.І.³, Мартиненко Д.І.⁴

¹ORCID: 0000-0003-2387-9946, ²ORCID: 0000-0002-9574-2757,

³ORCID: 0009-0005-9803-4421, ⁴ORCID: 0009-0006-3186-8082

Національний транспортний університет

КОМПЛЕКСНИЙ ПІДХІД ДО ПРОЕКТУВАННЯ СИСТЕМ «СУДНО – ВАГОН-ЦИСТЕРНА» З ОПТИМІЗАЦІЄЮ РЕЖИМІВ РОБОТИ СУДНОВИХ ЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК

Постановка проблеми у загальному вигляді. Сучасний розвиток мультимодальних перевезень вимагає впровадження високоефективних технологічних рішень для інтеграції водного та залізничного транспорту. Створення систем «судно – вагон-цистерна» є стратегічно важливим напрямком для оптимізації логістики рідких вантажів та скраплених газів.

Енергетичні установки сучасних суден мають значний потенціал для оптимізації при взаємодії з береговою або залізничною інфраструктурою. Використання комплексного підходу дозволяє розглядати судно та залізничний склад як єдину техніко-технологічну систему. В умовах глобальної цифровізації інтеграція інтелектуальних систем управління режимами роботи суднових енергетичних установок стає критичною перевагою.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дослідження режимів роботи двигунів та допоміжних механізмів у зв'язці з гідравлічними параметрами вагонів-цистерн забезпечує синергетичний ефект. Теоретичне обґрунтування таких систем дозволяє зменшити експлуатаційні ризики та ймовірність аварійних ситуацій. Розробка нових алгоритмів проектування сприятиме підвищенню конкурентоспроможності вітчизняних логістичних вузлів. Науковий пошук у цьому напрямку відповідає світовим трендам розвитку «зеленого» судноплавства та смарт-інфраструктури.

У роботі [1] досліджено підходи до забезпечення надійності паливної апаратури дизелів, що є ключовим фактором стабільної роботи суднових енергетичних установок (СЕУ). Автори обґрунтовують

необхідність системного технічного обслуговування з урахуванням експлуатаційних режимів. У статті [2] розглянуто сучасні методи оптимізації енергоефективності суден з урахуванням складних навігаційних умов. Проведено систематичний аналіз факторів, що впливають на витрати енергії, включаючи погодні умови та маршрути. Отримані висновки можуть бути використані для узгодження режимів роботи суден із графіками перевезень вагонів-цистерн. У публікації [3] досліджено перспективи розвитку відновлюваної енергетики у суднопластві. Автори аналізують технологічні рішення, що сприяють зменшенню викидів і підвищенню екологічності транспортних систем. Отримані результати важливі для створення екологічно орієнтованих систем «судно – вагон-цистерна». У роботі [4] розглянуто застосування байпасу відпрацьованих газів для підвищення екологічних характеристик суднових дизелів. Дослідження спрямоване на оптимізацію робочих процесів двигунів без значних конструктивних змін. Отримані результати можуть бути використані при проектуванні енергоефективних суден у складі мультимодальних перевезень. У статті [5] представлено інтегрований метод оптимізації енергоефективності гібридних суден із вітровою підтримкою. Автори розглядають поєднання різних джерел енергії для досягнення декарбонізації суднопластва. Результати дослідження можуть бути застосовані при створенні енергоефективних ланцюгів транспортування рідких вантажів. У роботі [6] запропоновано двоетапну оптимізацію маршруту, швидкості та енергоменеджменту гібридних суден. Метод враховує змінні морські умови та дозволяє мінімізувати енергоспоживання. Отримані результати мають значення для синхронізації морських і залізничних перевезень. У дослідженні [7] розглянуто оптимізацію енергоспоживання у системах керування рухом суден за складних морських умов. Автори застосовують методи адаптивного керування для підвищення ефективності пропульсивних систем. Результати можуть бути інтегровані у системи управління мультимодальними перевезеннями. Це дозволяє підвищити надійність і економічність транспортних процесів. У статті [8] досліджено оптимізацію енергоефективності та оцінку ризиків у мультимодальних екологічно орієнтованих перевезеннях. Автори пропонують підхід до інтеграції енергетичних та логістичних параметрів. Отримані результати є важливими для проектування систем «судно – вагон-цистерна». Вони дозволяють підвищити безпеку та ефективність транспортування. У роботі [9] проаналізовано інноваційні технології та нормативну базу

оптимізації енергоспоживання у морському транспорті. Автори розглядають сучасні вимоги до енергоефективності та екологічності. Результати можуть бути використані при створенні інтегрованих транспортних систем. У статті [10] проведено аналіз методів управління екологічною безпекою судноплавства. Автори досліджують підходи до зменшення негативного впливу суден на навколишнє середовище.

Проведений аналіз наукових публікацій засвідчив, що більшість існуючих робіт фокусуються або на судових установках, або на залізничній логістиці окремо. Питанням формування єдиного методологічного базису для системи «судно – вагон-цистерна» з точки зору енергетичної взаємодії приділено недостатньо уваги. Дослідники часто ігнорують динамічну зміну режимів роботи судових агрегатів під час циклічного навантаження цистерн, що створює прогалини в оптимізаційних моделях. Відсутність комплексних алгоритмів проектування, які б враховували взаємозалежність гідродинамічних процесів у цистернах та паливної ефективності судна, стримує розвиток галузі. Таким чином, існує об'єктивна потреба у створенні цілісної наукової концепції, що заповнить виявлений дефіцит знань у цій специфічній сфері.

Постановка завдання. Проблема полягає у відсутності єдиної методології проектування, що об'єднує параметри судна та вагонів-цистерн в спільну енергетичну модель. Традиційні підходи розглядають ці ланки як ізольовані об'єкти, що призводить до енергетичних втрат на стику інтермодальних переходів.

Існує значне розходження між потенційною потужністю судових енергетичних установок та фактичним споживанням енергії системами терміналу. Необхідність стабілізації режимів роботи дизель-генераторів та котлоагрегатів під час перевалки вантажу вимагає нових математичних рішень.

Висока вартість енергоносіїв робить критичним кожен відсоток перевитрати під час технологічних стоянок. Також проблемою є складність прогнозування навантаження на судову мережу при зміні в'язкості вантажу або температурних умов. Відсутність уніфікованих систем управління заважає досягненню максимального коефіцієнту корисної дії (ККД) енергетичного комплексу. Технічні обмеження існуючих насосних станцій часто не узгоджуються з характеристиками залізничних ємностей. Це створює затримки в графіках оборотів транспортних одиниць та збільшує собівартість перевезень.

Потребує вирішення питання синхронізації продуктивності судових систем з пропускною здатністю залізничного фронту. Екологічні норми стають жорсткішими, що змушує переглядати режими холостого ходу та перехідних процесів. Розв'язання цієї проблеми забезпечить створення наукового підґрунтя для проектування транспортних систем нового покоління.

Метою дослідження є розробка науково обґрунтованого комплексного підходу до проектування системи «судно – вагон-цистерна» на основі математичного моделювання. Основна увага приділяється оптимізації режимів роботи судових енергетичних установок для мінімізації енерговитрат та часу вантажних операцій. Досягнення мети забезпечить підвищення загальної ефективності транспортно-логістичного процесу при перевалці наливних вантажів.

Об'єктом дослідження є процеси енергетичної та технологічної взаємодії в інтегрованій системі «судно – вагон-цистерна».

Предметом дослідження є закономірності формування режимів роботи судових енергетичних установок та методи їх оптимізації при проектуванні таких систем. Досліджуються функціональні залежності, що визначають ефективність використання ресурсів.

Виклад основного матеріалу дослідження. Проектування системи «судно – вагон-цистерна» є складним комплексним завданням, що включає узгодження технічних параметрів суден та вагонів-цистерн, оптимізацію логістичних процесів у портах перевантаження та, що особливо важливо, забезпечення ефективної роботи судових енергетичних установок в різних режимах експлуатації [11].

Система «судно – вагон-цистерна» являє собою складний технічний комплекс, який можна представити у вигляді взаємопов'язаних підсистем:

1) транспортний флот – судна різних типів (танкери, газовози), обладнані вантажними системами та власними енергетичними установками;

2) залізничний компонент – вагони-цистерни різної вантажопідйомності та спеціалізації, які використовуються для доставки вантажів від порту до споживачів;

3) перевантажувальний термінал – комплекс споруд та обладнання для передачі рідкого вантажу між судном та вагонами-цистернами;

4) система управління – включає засоби контролю, диспетчеризації та оптимізації всіх процесів.

Ключовою особливістю такої системи є нерівномірність режимів роботи її елементів. Якщо суднова енергетична установка в основному працює в сталому ходовому режимі, то під час вантажних операцій вона часто функціонує в режимі «холостого ходу» або забезпечує роботу вантажних насосів.

Аналіз показує, що на загальну ефективність системи «судно – вагон-цистерна» впливають наступні групи факторів: технічні: продуктивність перевантажувального обладнання, місткість вагонів-цистерн, вантажопідйомність суден, характеристики СЕУ; технологічні: схема перевантаження, режими роботи насосного обладнання, способи підігріву в'язких вантажів; організаційні: графіки подачі вагонів, режим роботи порту, черговість обслуговування суден; енергетичні: питомі витрати палива, ККД енергетичних установок, можливість утилізації вторинних енергоресурсів [12].

Особливу увагу слід приділити енергетичному фактору, оскільки він визначає як економічну (вартість транспортування), так і екологічну (обсяги викидів) складові.

Суднова енергетична установка в складі розглянутого комплексу функціонує в таких основних режимах:

1) ходовий режим – забезпечення руху судна з оптимальною швидкістю. Цей режим характеризується сталою потужністю та максимальним ККД головного двигуна;

2) маневровий режим – робота при підході до терміналу, швартуванні та відході. Характеризується частими змінами навантаження та роботою на перехідних режимах;

3) вантажний режим – робота допоміжних дизель-генераторів для забезпечення роботи вантажних насосів, підігрівачів та іншого технологічного обладнання;

4) стоянковий режим – мінімальне енергоспоживання для забезпечення життєдіяльності судна.

Аналіз сучасних досліджень в області оптимізації роботи енергетичних систем на морських об'єктах показує перспективність використання системного підходу до розподілу навантажень між окремими енергоблоками. Стосовно до судових енергетичних установок це означає необхідність оптимізації кількості та режимів роботи паралельно працюючих дизель-генераторів.

Оптимальний розподіл навантаження між агрегатами СЕУ повинен забезпечувати:

- мінімальну питому витрату палива при заданому сумарному навантаженні
- рівномірне вироблення моторесурсу двигунів
- резервування потужності для критичних споживачів
- мінімізацію викидів шкідливих речовин

Математично задача оптимізації може бути сформульована наступним чином:

$$\min \sum_{i=1}^n b_i(P_i) \cdot P_i;$$

де $b_i(P_i)$ – питома витрата палива i -го агрегату як функція його потужності P_i при обмеженнях:

$$\sum_{i=1}^n P_i = P_{\text{зар}}, \quad P_{i,\text{min}} \leq P_i \leq P_{i,\text{max}}.$$

Особливістю систем «судно – вагон-цистерна» є те, що вантажні операції створюють специфічний режим споживання електроенергії на судні. Потужність вантажних насосів може досягати сотень кіловат, що вимагає роботи кількох допоміжних дизель-генераторів.

Дослідження показують, що традиційний підхід, коли всі необхідні насоси запускаються одночасно на максимальну продуктивність, є неефективним. Значно кращих результатів можна досягти, застосовуючи: каскадне регулювання – послідовне включення насосів у міру збільшення потреби в продуктивності; частотне регулювання – зміна швидкості обертання насосів за допомогою перетворювачів частоти; синхронізацію режимів – узгодження продуктивності судових насосів з пропускнуою здатністю залізничного терміналу [13].

Для комплексної оптимізації системи розроблено математичну модель, яка враховує взаємозв'язки між її елементами. Цільова функція включає складові:

$$1) \text{ економічну: } F_1 = C_{\text{паливо}} + C_{\text{аморт}} + C_{\text{обслуг}} + C_{\text{еколог}} \rightarrow \min;$$

$$2) \text{ енергетичну: } F_2 = \sum E_{\text{спож}} - \sum E_{\text{утил}} \rightarrow \min;$$

$$3) \text{ екологічну: } F_3 = \sum m_{\text{CO}_2} + \sum m_{\text{NO}_x} + \sum m_{\text{SO}_x} \rightarrow \min.$$

Загальна оптимізаційна задача є багатокритеріальною. Важливим аспектом комплексного підходу є оптимізація графіків подачі вагонів-цистерн під перевантаження. Дослідження в галузі оптимізації логістики морських операцій демонструють, що використання мето-

дів кластеризації та багатоетапного планування дозволяє суттєво знизити витрати ресурсів. Для системи «судно – вагон-цистерна» це означає: узгодження часу прибуття вагонів з періодами вантажних операцій судна; групування подач для зменшення кількості маневрових операцій; врахування обмежень по одночасному знаходженню вагонів на терміналі.

Результати моделювання показують, що оптимальне планування дозволяє скоротити час стоянки судна під вантажними операціями, що безпосередньо впливає на ефективність роботи СЕУ [14, 15].

На основі проведеного аналізу сформульовано рекомендації щодо вибору обладнання для створення нових або модернізації існуючих систем «судно – вагон-цистерна»:

- суднова складова: впровадження частотно-регульованих приводів вантажних насосів; використання систем утилізації тепла вихлопних газів головних двигунів для підігріву вантажів; встановлення систем моніторингу паливної ефективності.

- берегова складова: обладнання терміналу системами частотного регулювання залізничних насосних станцій; впровадження автоматизованих систем комерційного обліку; використання накопичувальних ємностей для вирівнювання пікових навантажень.

- організаційна складова: запровадження єдиної диспетчерської системи управління; розробка оптимальних режимних карт для різних умов експлуатації; впровадження системи прогнозного аналізу та адаптивного планування.

Висновки і перспективи подальших досліджень. Отримані результати підтверджують гіпотезу про необхідність розгляду судна та залізничної інфраструктури як єдиного енергетичного ланцюга.

Порівняння з існуючими методами проектування показало перевагу комплексного підходу в питаннях паливної економічності. Встановлено, що оптимізація режимів СЕУ дозволяє не лише економити ресурси, а й подовжувати моторесурс агрегатів.

Результати вказують на важливість використання частотних перетворювачів у системах високої потужності. Виявлені закономірності можуть бути використані для автоматизації процесів на наливних терміналах.

Розроблена комплексна методика дозволяє об'єднати технічні характеристики судна та вагонів-цистерн у спільну модель. Оптимізація режимів роботи судових енергетичних установок забезпечує значне зниження витрати палива.

Встановлено, що ключовим фактором ефективності є підтримка роботи двигунів у зоні мінімальної питомої витрати палива. Результати дослідження є базою для створення нових галузевих стандартів проектування інтермодальних терміналів. Даний підхід відкриває перспективи для подальшого розвитку інтелектуальних транспортних систем.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Sagin A.S., Zablotskiy Yu.V. Reliability maintenance of fuel equipment on marine and inland navigation vessels // *Austrian Journal of Technical and Natural Sciences. Scientific journal*. 2021. № 7-8. P. 14-17. <https://doi.org/10.29013/AJT-21-7.8-14-17>.

2. Wang K., Wang Y., Liang H. та ін. Ship energy efficiency optimization considering the influences of multiple complex navigational environments: A review // *Marine Pollution Bulletin*. 2025. Vol. 216. 117976. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2025.117976>.

3. 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. Vol. 127. P. 165–188. <https://doi.org/10.20858/sjsutst.2025.127.10>.

4. Sagin S., Kuropyatnyk O. Determination of optimal operating modes of the selective catalytic reduction system for marine diesel exhaust gases // *Technology Audit and Production Reserves*, 2025, 5(3(85)), 12–22. <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2025.340411>.

5. Liu X., Wang K., Guo X. та ін. An integrated energy efficiency optimization method of the wind-assisted hybrid ship for the shipping decarbonization // *Marine Pollution Bulletin*. 2025. Vol. 212. 117579. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2025.117579>.

6. Luo X., Wang J., Wang X., Guan X. Two-stage optimization of route, speed, and energy management for hybrid energy ship under sea conditions // *Energy*. 2025. Vol. 4, No. 3. P. 174–192. DOI: <https://doi.org/10.23919/IEN.2025.0017>.

7. Yang Z., Qu W., Zhuo J. Optimization of energy consumption in ship propulsion control under severe sea conditions // *Journal of Marine Science and Engineering*. 2024. Vol. 12, No. 9. 1461. DOI: <https://doi.org/10.3390/jmse12091461>.

8. Ibrahim A. M., Klevtsov K. M. Optimization of energy efficiency and risk assessment for its implementation in marine multimodal eco-oriented transportation // *Transport Development*. 2025. No. 3(26). DOI: <https://doi.org/10.33082/td.2025.3-26.02>.

9. Bulgakov M. P., Melnyk O. M., Pulyaev I. O. Innovative technologies and regulatory framework for optimizing energy consumption in maritime transport // *Transport Development*. 2025. No. 2(25). DOI: <https://doi.org/10.33082/td.2025.2-25.05>.

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, 12, 1440. <https://doi.org/10.3390/jmse12081440>.

11. Zablotsky Y.V., Sagin S.V. Enhancing Fuel Efficiency and Environmental Specifications of a Marine Diesel When using Fuel Additives // *Indian J. Sci. Technol.* 2016, 9, 353–362. DOI: [10.17485/ijst/2016/v9i46/107516](https://doi.org/10.17485/ijst/2016/v9i46/107516).

12. 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, 589. <https://doi.org/10.3390/jmse13030589>.

13. Fomin O., Gorbunov M., Lovska A., Gerlici J., Kravchenko K. Dynamics and Strength of Circular Tube Open Wagons with Aluminum Foam Filled Center Sills // *Materials*. 2021, 14, 1915. <https://doi.org/10.3390/ma14081915>.

14. Sagin S., Kuropyatnyk O., Rusnak D. Improvement of the process of cleaning exhaust gases of marine diesels from sulfur oxides // *Technology Audit and Production Reserves*. 2025. 4(1(84)), 72–79. <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2025.337616>.

15. Sagin S., Chymshyr V., Karianskyi S., Kuropyatnyk O., Madey V., Rusnak D. Using Ultrasonic Fuel Treatment Technology to Reduce Sulfur Oxide Emissions from Marine Diesel Exhaust Gases // *Energies*. 2025, 18, 4756. <https://doi.org/10.3390/en18174756>.

DOI: 10.31653/smf52.2026.125-151

дата першого надходження: 13.02.26
дата прийняття статті до друку після
рецензування: 21.02.26
дата публікації: 05.05.26

Vychuzhanin V.V.¹, Vychuzhanin A.V.²¹ORCID: 0000-0002-6302-1832, ²ORCID: 0000-0001-8779-2503

Odesa Polytechnic National University

DYNAMIC FAILURE RISK ASSESSMENT IN SHIP POWER PLANTS USING COGNITIVE DIGITAL TWINS

Statement of the problem in general terms. Modern ship power plants represent (SPPs) highly integrated complex technical systems (CTSs) operating under uncertainty, dynamic loads, and continuously changing environmental and operational conditions [1, 2]. The increasing level of automation and the transition toward autonomous and remotely operated vessels significantly intensify the requirements for reliability assessment, fault prediction, and real-time failure risk management.

In recent years, digital technologies for system monitoring and predictive maintenance [3, 4], including digital twins (DTs) [5], intelligent sensor platforms, and data-driven models, have been активно developed in various engineering domains [6, 7, 8]. Qi and Tao provided a comprehensive overview of DT applications and demonstrated their potential for lifecycle management and failure prediction in complex industrial systems [6]. Semeraro et al. conducted a systematic review of the DT paradigm and highlighted methodological gaps related to the formalization of cause-and-effect relationships and system-level integration [7]. Lv et al. analyzed the implementation of DTs in the marine industry and emphasized the early stage of methodological maturity and the lack of unified frameworks for maritime applications [8]. For complex cyber-physical systems, including power plants, reliability analysis and control architectures based on cyber-physical system technologies and industrial automation frameworks have been proposed [9]. However, such approaches are mainly architecture-oriented and do not provide dynamic risk assessment mechanisms or integrated failure propagation modeling. Recent research on engineering dynamics and DT modeling indicates the need for advanced simulation frameworks capable of capturing nonlinear system behavior and dynamic structural-functional interactions [10]. Nevertheless, existing approaches primarily focus on structural modeling and simulation accuracy.

cy and do not integrate cognitive models and real-time telemetry-driven risk assessment.

Therefore, a scientific and technical problem exists in developing integrated methods for dynamic assessment of structural and functional failure risks in SPPs based on the integration of DTs, cognitive modeling, and real-time telemetry data. This gap determines the relevance and necessity of the present study.

Analysis of recent studies and publications. The rapid development of Industry 4.0 technologies has significantly transformed approaches to monitoring, diagnostics, and prognostics of complex technical systems. Among these technologies, the concept of the DT has emerged as a key enabler for transitioning from traditional schedule-based maintenance toward intelligent condition-based and predictive maintenance strategies. By providing continuously updated virtual representations of physical assets, DTs support improved decision-making, enhanced reliability, and proactive risk mitigation.

In recent years, DTs have increasingly been recognized not only as monitoring tools but also as essential instruments for safety analysis and risk assessment. Zio and Miqueles emphasized that DT-based frameworks are becoming central in emergency management and reliability engineering, while also highlighting persistent challenges related to uncertainty quantification, model validation, and real-time risk propagation in interconnected systems [11]. These limitations are particularly critical in complex infrastructures, where failures may cascade across subsystems. The integration of DT technology into industrial and infrastructure projects introduces multidimensional risk dynamics. Ibrahim et al. provided a causal analysis of DT implementation, identifying governance, data reliability, and operational complexity as major factors influencing risk during DT adoption [12]. Similarly, comprehensive reviews of DT applications in infrastructure management underline the importance of combining IoT, AI, and simulation capabilities, yet point out that many existing studies remain focused on monitoring rather than adaptive risk-oriented decision support [13]. To address risk evaluation within DT environments, researchers have proposed extensions of classical reliability assessment methods. Li et al. demonstrated how improved FMEA techniques can be incorporated into DT project operation to strengthen risk identification and prioritization [14]. However, such approaches often remain limited to static evaluation schemes and do not fully capture the dynamic evolution of risks under real-time telemetry updates. Probabilistic DT frameworks

have recently gained attention as a means to support reliability-based maintenance optimization. For instance, probabilistic DT models have been successfully applied to offshore wind turbine maintenance planning, integrating reliability metrics with cost-aware decision-making [15]. Nevertheless, these methods are frequently domain-specific and do not directly address highly coupled safety-critical energy systems such as ship power plants, where structural dependencies play a dominant role. Emerging research further highlights the development of risk-aware DT paradigms. The concept of “Risk Twin” has been introduced to enable real-time visualization and control of structural risks, demonstrating the growing interest in DT-based risk analytics [16]. Risk-aware DT applications have also been explored in intelligent transportation and mobility systems, where real-time driver and infrastructure risk assessment becomes essential for operational safety [17]. In parallel, adaptive planning strategies for predictive DTs have been proposed, emphasizing the need for dynamic and self-updating risk management mechanisms [18]. Despite this progress, major gaps remain in the integration of cognitive reasoning and dynamic risk propagation modeling within DT architectures. Recent studies confirm that DT adoption for predictive maintenance is expanding rapidly, yet many implementations still lack robust mechanisms for holistic system-level risk assessment and explainable decision support [19]. Furthermore, security and trustworthiness issues, including cyber-physical vulnerabilities and AI-driven uncertainty, represent additional challenges for reliable DT deployment in critical infrastructures [20, 21].

These unresolved limitations are particularly evident in ship energy systems, where ship power plants consist of strongly interconnected subsystems such as fuel supply, lubrication, and cooling networks. Failures in such environments may propagate rapidly, requiring adaptive and cognitively informed risk assessment models beyond conventional diagnostics.

To address these challenges, the present study proposes a cognitive DT framework for the dynamic assessment of failure risks in ship power plants. By integrating cognitive simulation modeling with graph-based representations of structural and functional dependencies, the proposed approach enables real-time adaptive updating of risk indicators using telemetry-driven information. This methodology provides a practical foundation for improving operational safety, resilience, and proactive maintenance decision-making in complex maritime energy systems.

Setting the task. The objective of this paper is to develop and justify an integrated method for dynamic failure risk assessment of SPPs based

on a cognitive DT that combines DT technology and cognitive simulation modeling, using real-time telemetry data to quantitatively evaluate structural and functional risks and to predict cascading failure scenarios.

Presentation of the main research material. The analysis and assessment of failure risks in CTSs, in particular SPPs, in modern conditions require the integration of classical reliability assurance methods with modern approaches to digitalization. Stream analytics and intelligent diagnostic models form the information base for monitoring and predicting technical condition, expanding the capabilities of traditional methods. The basis remains a conceptual model that formalizes the interdependencies between elements, processes, and factors that influence failure risk. It is based on a systemic representation of the CTS as a set of interconnected elements interacting under conditions of uncertainty. In this approach, the risk of CTS equipment failure is considered as a function of the probability of failure and potential damage, and the assessment is carried out taking into account both structural and functional interrelationships between CTS subsystems. To formalize these interdependencies, a cognitive simulation model (CSM) is used, representing the system as a directed graph where nodes correspond to aggregates, subsystems and functional states, and arcs correspond to cause-and-effect relationships. This approach allows describing the structure of interaction and modelling the propagation of disturbances and failures through the hierarchy of elements. In the context of digital monitoring, diagnostics and forecasting of the technical condition of CTSs, CSM can use data from digital platforms and remote control systems to refine the parameters and relationships between elements. However, its main goal is to formalize the cause-and-effect relationships between failures, impacts and consequences, which allows for scenario analysis of risk development and forecasting of their temporal dynamics. The source of input data for CSM is digital monitoring platforms and the DT of the CTS. The DT accumulates the results of diagnostics, forecasting and assessment of the remaining service life of CTS equipment, forming a stream of parameters used to update the nodes and connections of the cognitive model. Thus, CSM does not duplicate the functions of DT, but uses it as a source of reliable data on the state of objects and external influences, thereby ensuring the realism of CTS equipment failure risk analysis scenarios. To ensure the practical applicability of CSM, it is important to establish a link between the abstract elements of the model and real operational data. In the context of digitalization, this role is performed by DT, which provides the cognitive model with reliable

information about the actual technical condition of the system. DT accumulates telemetry data streams and the results of diagnostic and predictive models (e.g., DCT, RUL estimates), forming a unified digital representation of the dynamic state of the object. This data is fed into the cognitive model in real time, where it is used to update cause-and-effect relationships, revise factor weights, and refine risk indicators. Thus, the integration of DT and CSM creates a closed-loop risk analysis cycle: from diagnostics to impact assessment and the formation of risk management recommendations.

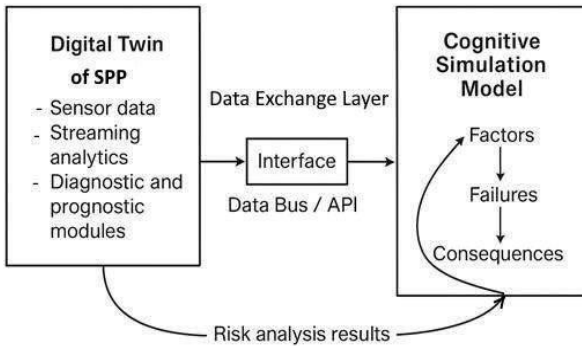


Fig. 1. Interaction between the DT and the CSM for risk assessment

Mechanism of dynamic linkage between DT and cognitive model.

The conceptual interaction architecture presented in Figure 1 requires a robust mathematical formalization of the processes within the data exchange layer. To transform the CSM from a static graph into a dynamic predictive tool, a multi-stage algorithm for real-time weight recalculation is implemented. This algorithm ensures that telemetry data from the DT directly influences the propagation characteristics of the destructive modeling impulse (DMI).

1. Data transformation and normalization pipeline

The linkage between the physical state (DT) and the risk model (CSM) is established through a four-stage pipeline:

1.1. Diagnostic vector acquisition – the DT continuously streams a high-frequency telemetry vector $S(t) = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$. For the ship's fuel system, these parameters include pump discharge pressure, fuel temperature, motor vibration levels, and filter differential pressure;

1.2. Standardized degradation mapping – to ensure comparability across different physical units, each parameter p_i is converted into a dimensionless degradation index $d_i \in [0, 1]$;

1.3. Sensor fusion and aggregation - multiple diagnostic signals affecting a single component are aggregated into a composite health index using importance weights;

1.4. Dynamic weight adaptation – the transition matrix of the CSM is updated, altering the "conductivity" of the graph for the DMI simulation.

2. Mathematical formalization of weight recalculation:

2.1. Parameter normalization

The degradation index d_i for each sensor is calculated based on its proximity to the operational limits:

$$d_i = \begin{cases} 0, & \text{if } p_{fact} \text{ is with in noinal range} \\ \frac{|P_{fact} - P_{nom}|}{P_{crit} - P_{nom}}, & \text{if } p_{fact} \text{ exceeds } p_{nom} \\ 1, & \text{if } p_{fact} \geq P_{crit} \end{cases}$$

where p_{fact} is the current value, p_{nom} is the manufacturer's recommended setting, and p_{crit} is the safety shutdown threshold

2.2. The weight update function

The cognitive weight $\omega_{a(v)j}$, which represents the probability or intensity of failure propagation through an edge or node, is updated using a non-linear exponential function. This function mimics the "tipping point" behavior of mechanical systems where risk increases rapidly as limits are approached:

$$\omega_{a(v)j}(t+1) = \omega_{a(v)j}^{base} \cdot \exp\left(\alpha \sum_{i=1}^k \beta_{i,j} \cdot d_{i,j}(t)\right),$$

where $\omega_{a(v)j}(t+1)$ – is the updated weight of the j -th element (node or arc) at time $t+1$;

$\omega_{a(v)j}^{base}$ – is the initial topological weight based on system design and redundancy;

j – is the unique index of the component in the system graph;

i – is the index of a specific diagnostic sensor $\sum_{i=1}^k \beta_{i,j}$ linked to component j ;

α – is the global sensitivity coefficient (controls how aggressively the model reacts to any degradation);

β_{ij} – is the local importance coefficient of the i - th sensor for the j -th component, satisfying $\sum_{i=1}^k \beta_{i,j}$

The integrated reliability indicator of CTS elements - technical risk - is a combination of the probabilities of occurrence of hazards of a certain class (P_{wi}) and the losses resulting from accidents and undesired events caused by technical imperfections or violations of the operational rules of technical systems (Y_{wi}):

$$R \equiv [(P_1, Y_1), (P_2, Y_2), \dots, (P_{wi}, Y_{wi})].$$

The probability assessment of a node (edge) failure in the CTS CSM is determined based on the Bayesian method of CTS analysis [22]:

$$P(C|D) \equiv \frac{P(D|C) \cdot P(C)}{P(D)},$$

where $P(C)$ – is the prior probability of hypothesis C of node (edge) failure;

$P(C/D)$ – is the probability of hypothesis C given event D occurs (posterior probability);

$P(D/C)$ – is the probability of event D given hypothesis C is true;

$P(D)$ – is the total probability of occurrence of event D

To evaluate the functional operability and the corresponding damage of a CTS, a normalizing impact (NI) is applied to the nodes and edges of the CTS CSM digraph. The NI is defined in accordance with the Birnbaum criterion [23]. The NI in terms of evaluating the functional operability of the system $F(t)$ and an individual edge (node) $f_{a(v)}(t)$ is defined as follows:

$$\Theta b_{a(v)}(i|t) = \frac{\partial F(t)}{\partial f_{a(v)}(t)}.$$

The evaluation of the CTS functional operability using NI is carried out in three stages. At the first stage, the operability of the CTS in a fully functional (fault-free) state is assessed. At the second stage, the sequential failure of individual elements and inter-element links (IL) of the CTS CSM is simulated, and the assessment of a partially faulty system is determined for each structural component (SC). At the third stage, quantita-

tive estimates of the functional damages of an element and IL are performed. The quantitative estimate of the functional damage of a CTS element under F (nominal operability), F_i (system operability under failure of the i -th element (v_i)) is determined as follows:

$$Y_{f_{v_i}} = F - F_i.$$

Quantitative assessment of the functional damage of the subsystem under F_j – the operability of the system with the j -th subsystem being faulty (a_j):

$$Y_{f_{a_j}} = F - F_j.$$

For the CTS CSM, the risk assessment of the failure of the affected vertex (edge) of the model is determined as the product of the probability values of failure of the vertex (edge) of the CTS CSM and the corresponding assessment of the functional damage of the affected vertices (edges) of the digraph. The CTS digraph $G(V,A)$ consists of n vertices (nodes) and m arcs (directed edges). The set of graph vertices is V ($V=\{v_i\}, i=1,n$) The set of (ordered) pairs of vertices, called arcs (directed edges) of the graph, is A ($A=\{a_j\}=\{v_i, w_j\}, j=1,m$), where vertex v is called the start, and w the end of the arc. The reliability value of the CTS aggregate corresponding to vertex v_i is determined by

$$v_i(t) = P_{v_i}(t < T).$$

If it is possible to distinguish constructive or functional aggregates of the CTS, the graph vertices correspond to the structural aggregates of the system, and the graph edges correspond to the interconnections (IC). If it is difficult to distinguish aggregates, the graph vertices correspond to the system parameters, and the graph edges represent the cause-and-effect relationships between the parameters. Multiple edges may enter or leave a node. In this case, one speaks of a set of edges incident to a given node of the graph. Each edge is incident to two nodes located at its ends. The qualitative representation of the state of the CTS aggregates and ICs is expressed by a functional dependency between the states of the aggregates or ICs, as well as by a certain type of loading from external or internal influences. Assessments in emergency scenarios of structural and functional failure risk of the CTS, taking into account the interconnection and interaction of its elements, include the following stages:

1) identification of interconnection and interaction of SC within the hierarchy and topology of the CTS, taking into account the used resource of ESI (energy, substance, information);

- 2) construction and analysis of the CTS CSM;
- 3) assessment of structural and functional damages of the CTS;
- 4) assessment of structural and functional risks of the CTS.

State parameter set of CTS elements:

$$v = \left[F_{v,n}; F_{v,1}; a_{zi}; a_{zj}; H_m^v(t); K_{V.d.b} \right],$$

where $F_{v,n}$ – is the nominal operability of the element;

$F_{v,1}$ – is the operability of the element in the case of its partial loss;

a_{zi}, a_{zj} – is the incoming and outgoing influences for the CTS element;

i, j – is the ordinal number of the incoming and outgoing influence for the CTS element;

K, m – is the total number of incoming and outgoing influences for the IL element;

$H_m^v(t)$ – is the transfer coefficient of the change in the amplitude of the destructive modeling impulse (DMI);

$$H_m^v(t) = \frac{m_{imp_r}^v(t+1)}{m_{imp_k}^v(t)}, m_{imp_k}^v(t), m_{imp_k}^v(t=1) \text{ – is the value of the ampli-}$$

tude of the DMI at moments in time t and $t+1$;

$K_{V.d.b}$ – is the coefficient of the degree of damage of the element

State parameter set of the IC of the CTS:

$$a = \left[F_{a,n}; F_{a,1}; v; w; H_m^a(t); K_{A.d.b} \right],$$

where $F_{a,n}$ is the nominal operability of the IC;

$F_{a,1}$ – is the operability of the IC under partial degradation;

z – is the type of ECI resource;

$H_m^a(t)$ – is the amplitude variation transmission coefficient IC

$$H_m^a(t) = \frac{m_{imp_r}^a(t+1)}{m_{imp_k}^a(t)}, m_{imp_k}^a(t), m_{imp_k}^a(t=1) \text{ is the value of the ampli-}$$

tude variation transmission of the DMI at moments in time t and $t+1$;

$K_{A.d.b}$ – is the coefficient of the damage degree of the IC

To assess the functional damage of the CTS, a normalizing influence is applied to the vertices and edges of the directed graph of the IC CTS. When assessing the structural damage of the CTS, it is assumed that the initial state of an element (CSM) corresponds to 0 if the DMI does not pass through the element (CSM), and to 1 if the IC passes through the element (CSM). Resetting the state values of the elements (IC) before

each subsequent iteration of DMI propagation through the IC is performed at. The influence of the DMI on a vertex (edge) of the directed graph of the CSM CTS at a discrete time moment t is defined as:

$$1 - \text{imp}_j(t) = \frac{w_{a(v)j}(t)}{w_{a(v)j}(t-1)K_{V.d.b}K_{A.d.b}},$$

where $\text{imp}_j(t)$ – is the impulse vector for the edge with index j ;

$w_{a(v)j}(t)$, $w_{a(v)j}(t-1)$ – is the weight value of the edge (vertex) at time moments t , $t-1$.

When passing through the IC from v_i vertex to vertex w_j , the impulses imp_j and imp_i are related by the relation:

$$\text{imp}_j(t+1) = \text{imp}_i(t) \cdot H_m^a(t).$$

When passing through a vertex from the i -th IC to the j -th IC, the impulses imp_j and imp_i are related as follows

$$\text{imp}_j(t+1) = \text{imp}_i(t) \cdot H_m^v(t).$$

The completion of DMI propagation (completion of the simulation cycle) over the directed graph is determined by the total residual energy of the impulses in the system. The simulation terminates when the sum of the magnitudes of all active impulses falls below a predefined sensitivity threshold ε :

$$S = \left[\sum_{j=1}^M \text{imp}_j(t) \right] < \varepsilon,$$

where M – is the total number of edges and nodes in the CSM;

$\text{imp}_j(t)$ – is the magnitude of the impulse at the j -th element at discrete time t ;

ε – is the sensitivity threshold (convergence criterion), typically set to $\varepsilon=10^{-4}$ or determined by the specific precision requirements of the digital twin's diagnostic modules.

Introducing the ε threshold prevents infinite computation loops and accounts for "insignificant" disturbances that no longer have a measurable impact on the structural or functional risk of the system. This approach aligns the cognitive model with the discrete-time data processing intervals of the DT. The DMI is generated at a conventionally defined affected vertex (edge), propagates to subsequent vertices (edges), sequentially disabling the interconnected SC of the CSM. The degree of damage from

the DMI to an element (CSM) of the CTS is determined by the damage degree coefficient of the element (IC):

$$K_{V.d.b} = \frac{w_v(t+1)}{w_v(t) \cdot (1 - m_{imp_k}^v(t))};$$

$$K_{A.d.b} = \frac{w_a(t+1)}{w_a(t) \cdot (1 - m_{imp_k}^a(t))};$$

where $w_v(t)$, $w_a(t)$, $w_v(t+1)$, $w_a(t+1)$ – is the value of the weight of an element (CSM) at time moment before t and $t+1$ after the impact of the DMI

A gradation of damage degree coefficient values by the level of damaging influence of each element on the structure of the CSM is assumed as follows: greater than 0.7 – maximum emergency; from 0.7 to 0.3 – preemergency; less than 0.3 – non-emergency. The values of structural damages resulting from the affected i -th vertex, j -th edge of the directed graph for the total number of affected vertices (b), edges (c) of the CSM:

$$Y_{S(V_i)} = \frac{b}{N}, Y_{S(A_j)} = \frac{c}{M}.$$

The quantitative assessment of structural damage from an affected vertex (edge) of the CSM CTS is determined by the damage due to loss of connectivity of the CTS topological structures as the ratio of the affected aggregates to the total number of aggregates (ICs) of the CTS under a single aggregate (IC) failure and unobstructed propagation of the CSM through the CTS. The quantitative assessment of functional damage from an affected vertex (edge) of the IC CTS is determined by the damage due to the disruption of the functioning of aggregates (ICs) as the ratio of the CTS operability under its partial degradation by an aggregate (IC) to the nominal operability of the CTS. The failure risk assessment of an affected vertex (edge) of the IC CTS is defined as the product of the probability values of failure of the vertex (edge) of the IC CTS and the corresponding assessments of the structural and functional damages of the affected vertices (edges) of the directed graph.

To assess the functional damage of the CTS during the propagation of the harmful influence (HI) along the directed graph of the IC CTS, a matrix of values is formed, where each vertex and each edge is assigned a numerical value of the HI magnitude. Initially, all HI magnitude values are assumed equal to 1. During the propagation of the HI along the di-

rected graph, they change proportionally to the weighted values of the SC. Based on Birnbaum's criterion, the HI magnitude value for a selected vertex (edge) of the directed graph of the IC CTS is expressed as the product of the HI magnitude value for the preceding vertex (edge) and the weight value of the selected vertex (edge). For a vertex of the directed graph of the IC CTS, into which several edges enter, the HI magnitude values of

$$m_i(t) = \sum_{i=1}^N m_j(t);$$

$$m_i(t) = s_i \cdot m_i(t-1) + s_j \cdot m_j(t-1);$$

where s_i, s_j – is the weight of the i -th vertex and the j -th edge;

$m_i(t), m_j(t-1)$ – is the magnitude of the HI passing through a vertex or edge at time moments t and $t-1$.

Quantitative assessments of functional damages are determined for: a failed element (v_i) as the difference between the nominal operability of the CTS and the operability of the system under failure of element (v_i); a failed IC (a_j) as the difference between the nominal operability of the CTS and the operability of the system under failure of IM (a_j). Structural failure risk of the i -th element and the j -th IC of the CTS is determined as

$$R_{sv_i} = Y_{sv_i} \cdot p_{v_i}(t);$$

$$R_{sa_j} = Y_{sa_j} \cdot p_{a_j}(t);$$

where $p_{v_i}(t), p_{a_j}(t)$ – is the are the probabilities of failure of the affected i -th element and j -th IC of the CTS

The structural failure risk of all elements and ICs of the CTS is

$$R_s^v = \sum_{ij}^M R_{sv_i} \cdot p_{v_i}(t);$$

$$R_s^a = \sum_j^M R_{sa_j} \cdot p_{a_j}(t).$$

The failure risk assessment under structural damage from the affected i -th vertex of the CSM CTS is

$$R_{sv_i} = k_{sv_i} \cdot p_{v_i}(t);$$

where k_{sv_i} – is the structural damage assessment from the affected i -th vertex of the CSM CTS

The failure risk assessment under structural damage from the affected j -th edge of the CSM CTS is

$$R_{sa_j} = k_{sa_j} \cdot p_{a_j}(t),$$

where k_{sa_j} – is the structural damage assessment from the affected j -th edge of the CSM CTS

The functional failure risk of the i -th element and j -th IC of the CTS is

$$R_{fv_i} = Y_{fv_i} \cdot p_{v_i}(t), \quad R_{fa_j} = Y_{fa_j} \cdot p_{a_j}(t).$$

The functional failure risk of all elements and ICs is

$$R_{Ffv_i}^v = \sum_j^N R_{fv_i} \cdot p_{v_i}(t), \quad R_{Ffa_j}^a = \sum_j^M R_{fa_j} \cdot p_{a_j}(t).$$

The failure risk assessment under functional damage from the affected i -th vertex of the CSM CTS is

$$R_{fv_i} = k_{fv_i} \cdot p_{v_i}(t),$$

where k_{fv_i} – is the functional damage assessment from the affected i -th vertex of the CSM CTS

The failure risk coefficient under functional damage from the affected j -th edge of the CSM CTS is

$$R_{fa_j} = k_{fa_j} \cdot p_{a_j}(t),$$

where k_{fa_j} – is the functional damage assessment from the affected j -th edge of the CSM CTS

The probability of failure of elements and ICs is determined as

$$P_{v_i} = \frac{n_{v_i}}{\tau}, \quad P_{a_j} = \frac{n_{a_j}}{\tau},$$

where P_{v_i} – is the probability of failure of the i -th element of the CTS;

P_{a_j} – is the probability of failure of the j -th IC of the CTS;

n_{v_i} – is the number of failures of the i -th element of the CTS;

n_{a_j} – is the number of failures of the j -th IC of the CTS;

τ – is the duration of statistical testing.

As a basis for determining the values of failure probabilities of elements and ICs of the CTS, the data from [24] may be used. The depend-

encies of the total structural and functional failure risks on the probabilities of complete and partial failures of all elements and ICs of the CTS servicing systems are determined by the total values of failure risks and the total probabilities of failure of elements and ICs of the CTS as

$$P_V = \frac{\sum_i^N P_{V_i}}{N}, P_A = \frac{\sum_j^M P_j}{M},$$

where P_V is the sum of failure probability values of the CTS elements;

P_A – is the total failure probability value of the CSM ICs;

N – is the number of CTS elements;

M – is the number of CTS ICs

To rank the obtained assessment of structural and functional failure risks of the CTS in emergency scenarios, the generalized Harrington desirability function is used to evaluate the failure risk level: 0–0.2 – minimal, the consequences of the accident are minimal and do not have a significant impact on the operation of the CTS; 0.2–0.37 – acceptable, the consequences of the accident are insignificant, allowing the CTS to operate without repair; 0.37–0.63 – maximal, the consequences of the accident allow CTS operation after repair works are performed; 0.63–1 – critical, the consequences do not allow the CTS to be operated.

Let us consider the functional diagram of the fuel system (Fig. 2) of the main engine of a SPP that uses diesel fuel and heavy fuel oil. It consists of storage tanks for diesel fuel (F1, FS1) and heavy fuel oil (F2, FS2), pumps F3 and FS3, heaters F4 and FS4, two heavy fuel oil separators (F6, FS6) and one diesel fuel separator (F5), separator pumps (F7, FS7, FN7), the diesel fuel service system (F8) and the heavy fuel oil service system (F9, FS9), circulation tank F10, booster pumps F11 and FS11, heater F12, bypass pipeline section F13, filters F14 and FS14, and a high-pressure pump. Redundancy is provided for pumps F3 and F11 (FS3 and FS11 respectively) and for separators F5 and F6 together with heaters F4 and pumps F7. Tanks F1, FS1, F2, FS2 and filters F14, FS14 can operate according to a continuously energized standby scheme. In the event of failure of any of the standby elements of the system, the main engine can be switched to diesel fuel. Expert and statistical assessment of SPP operation indicates that approximately 40% of failures are attributable to the diesel fuel equipment and fuel system, with the majority of failures being associated with breakdown of components operating under high pressure

conditions (high-pressure fuel pumps, injectors, etc.). Redundancy is provided for pumps F3 and F11 (FS3 and FS11 respectively) and for separators F5 and F6 together with heaters F4 and pumps F7. Tanks F1, FS1, F2, FS2 and filters F14, FS14 can operate according to a continuously energized standby scheme. In the event of failure of any of the standby elements of the system, the main engine can be switched to diesel fuel. Expert and statistical assessment of SPP operation indicates that approximately 40% of failures are attributable to the diesel fuel equipment and fuel system, with the majority of failures being associated with breakdown of components operating under high pressure conditions (high-pressure fuel pumps, injectors, etc.).

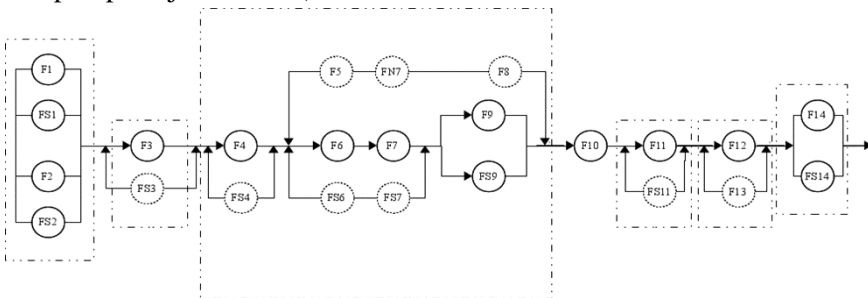


Fig. 2. Structural diagram of the ship power plant fuel system

The study of the effects of the DMI and HI on the CSM CTS was carried out in a developed software package based on the cross-platform Python language. To represent the input data of the elements and ICs when modeling emergency scenarios in the CSM CTS, the JSON format was used. The visualization of the graphs was performed using the Graphviz software product. MS Office and OpenOffice were used to analyze the research results. To test the method for assessing the structural and functional failure risks of the CTS in emergency scenarios (Fig. 3).

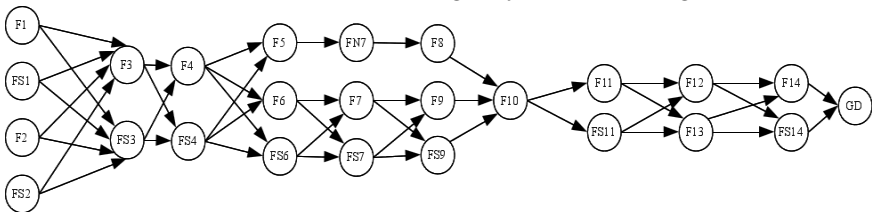


Fig. 3. Graph of the ship power plant fuel system

The modeling process for assessing the functional failure risks of the CTS elements and IMs was carried out in accordance with the algorithm shown in Fig. 4.

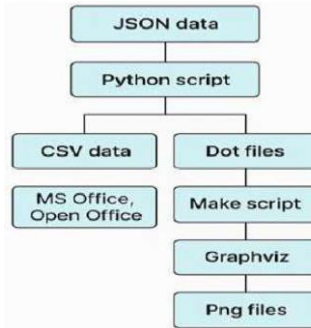


Fig. 4. Algorithm of the CTS operating conditions simulation process

To complement the workflow illustrated in Figure 4, it is necessary to specify the internal data structure of the JSON input file used by the Python simulation script. This specification acts as a standardized interface between the diagnostic telemetry gathered by the DT and the risk calculation engine of the cognitive model. Providing this schema is crucial for the scientific reproducibility of the study and its practical scalability.

Purpose of the JSON schema - the implementation of a structured data format serves three primary objectives:

- decoupling of systems - it separates the data acquisition layer (sensors/DT) from the analytical layer (CSM), allowing the risk model to be updated without altering the underlying telemetry hardware;

- dynamic reconfiguration – it enables the simulation engine to rebuild the system graph "on-the-fly" whenever a redundant component is activated or deactivated;

- standardization: it follows modern industrial IoT standards, facilitating integration with cloud-based monitoring platforms.

JSON data schema example - the system graph is represented as a structured object containing lists of nodes (components) and edges (inter-element connections).

```

{
  "system_id": "SPP_Fuel_System_v2",
  "nodes": [
    {
      "id": "F11",
    }
  ]
}
    
```

```

    "label": "Booster Pump",
    "p_failure": 0.002,
    "base_weight": 1.0,
    "type": "mechanical"
  },
  { "id": "F12", "label": "Fuel Heater", "p_failure": 0.005,
"base_weight": 1.0 }
],
"edges": [
  {
    "source": "F10",
    "target": "F11",
    "resource": "fuel_flow",
    "weight": 0.85
  },
  { "source": "F11", "target": "F12", "resource": "fuel_flow",
"weight": 0.90 }
]
}

```

Data field description:

nodes – a list of objects representing system components: id - unique identifier (e.g., "F10") corresponding to the functional scheme and the DTs sensor mapping; base_weight - the initial cognitive weight of the node, which is dynamically recalculated based on real-time telemetry updates;

edges – a list of directed arcs representing functional interdependencies: source / target: origin and destination nodes of the destructive modeling impulse (DMI) propagation; weight: the strength of the cause-and-effect relationship, determining the rate of failure propagation across the system topology.

This technical detail, combined with the methodology in Figure 4, provides a complete roadmap for deploying the risk assessment framework within a digital shipboard environment.

The recalculated weights are then compared against the Harrington desirability scale. If $w_{a(v)j}(t+1) > 0.63$, the system automatically triggers a high-intensity DMI to simulate the "worst-case" cascading failure scenario starting from that specific component. The selection of nodes F10, F12, and GD as critical points in risk analysis is обусловлено their topological position in the graph and functional. To illustrate the algorithm, consider

the booster pump F11. The DT monitors two primary signals: discharge pressure (p_1) and vibration velocity (p_2).

Scenario 1. Nominal operation: telemetry: $p_1=4.0$ bar (Nominal: 4.0), $p_2=2.5$ mm/s (Nominal: 2.0, Crit: 7.0); Indices: $d_1=0$, $d_2=0.1$; result: $w\{F11\}$ remains near its base value. Risk levels in Figures 4 and 6 remain in the "Safe" zone (<0.37).

Scenario 2. Impending cavitation or bearing wear: telemetry: pressure drops to 3.2 bar ($d_1=0.4$), vibration rises to 5.5 mm/s ($d_2=0.7$); aggregation: with $\beta_1=0.4$ and $\beta_2=0.6$, the composite degradation $D=0.5$. Impact: The weight of the outgoing edge $F11 \rightarrow F12$ more than doubles. In the next CSM iteration, the DMI propagates more aggressively through the fuel line, causing the functional risk R_{fa} for the entire SPP to cross the critical threshold of 0.63.

This detailed mechanism bridges the gap between low-level sensor data and high-level strategic risk assessment, allowing the SPP operator to visualize how a minor mechanical deviation in one pump increases the structural vulnerability of the entire power plant. The results of the calculated values of the structural and functional risk assessment for the vertices and edges of the CSM CTS are presented in Figs. 5-7. This section provides the simulation results for the structural and functional risks of the SPPs fuel system, based on the developed CSM. The results are interpreted according to Harrington's desirability scale, where values below 0.37 indicate a "Safe/Acceptable" zone, 0.37–0.63 represent a "Maximum/Pre-emergency" zone, and values above 0.63 denote a "Critical/Emergency" zone.

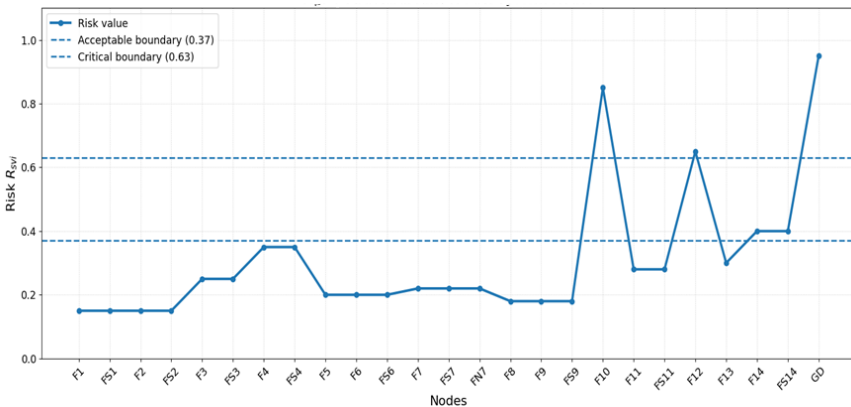


Fig. 5. Structural risk of system elements

Figure 5 illustrates the structural risk distribution across 25 nodes of the fuel system. The analysis reveals that nodes with built-in redundancy, such as the fuel transfer pumps (F3, FS3) and the separators (F5, F6, FS6), maintain risk levels within the "Safe" zone ($R_{svi} < 0.37$). This confirms that the system's topological connectivity is robust in its initial stages. However, a significant spike is observed at node F10 (Circulation Tank), reaching a critical value of 0.85. As a non-redundant convergence point for both diesel and heavy fuel lines, F10 represents the most vulnerable bottleneck in the system's architecture. Similarly, the main engine node (GD) and the pre-filter heater (F12) exceed the 0.63 threshold. The results suggest that any failure at these "serial" points directly compromises the connectivity of the entire fuel supply chain, necessitating prioritized monitoring through the DT.

The risk assessment of the inter-element connections (Figure 6) shifts the focus from the components to the integrity of the transport channels. While the initial supply lines from the storage tanks (e.g., F1→F3) show minimal risk due to the abundance of alternative paths, the risk escalates sharply in the distribution manifold. The connections following the circulation tank (F10→F11) and the final delivery line to the engine (F14→GD) are identified as critical, with values exceeding 0.90. This indicates that the "structural health" of these specific pipeline segments is as vital as the performance of the pumps themselves. The high risk associated with the F12→F14 segment highlights the criticality of maintaining the thermal state of the fuel before filtration; a breach or blockage in this segment leads to immediate functional degradation of the SPP.

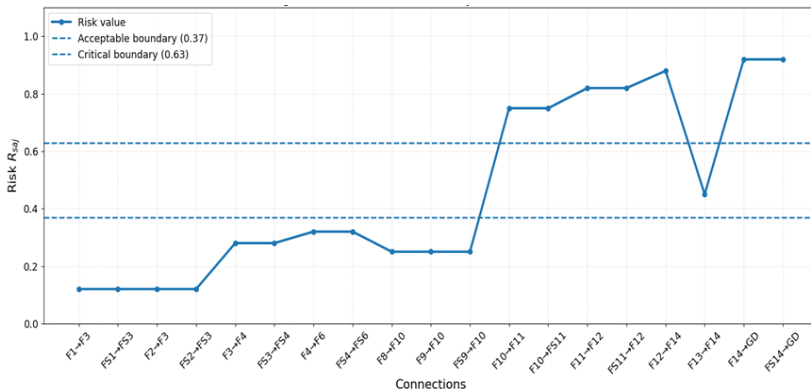


Fig.6. Structural risk of inter-element connections

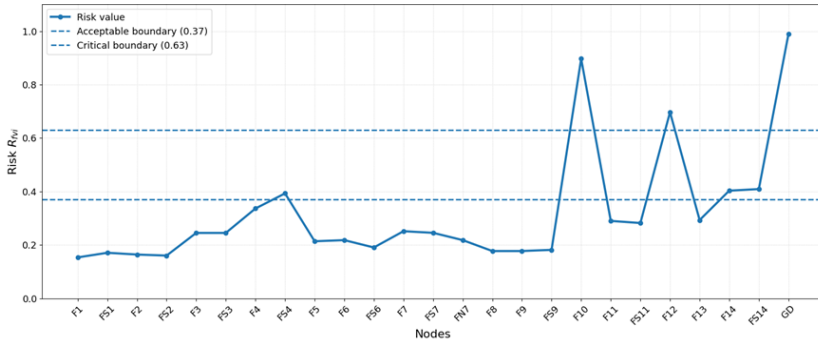


Fig.7. Functional risk of system components

Figure 7 presents the functional risk, which integrates structural connectivity with the severity of operational consequences. Following the statistical data cited in the study, which attributes approximately 40 % of failures to high-pressure fuel apparatus, the model shows elevated risk levels for the booster pumps (F11/FS11) and the main engine (GD). Unlike the purely structural analysis, the functional risk for node GD reaches its peak (0.95+), reflecting the catastrophic impact of a failure in fuel injection or atomization. The "Maximum risk" zone (0.37–0.63) encompasses the filtration unit (F14), suggesting that while the system might remain connected, a loss of filtering capacity significantly degrades the quality of the combustion process. These findings emphasize that risk management strategies in a Digital Twin environment must prioritize not just the existence of a flow path, but the operational parameters (pressure, purity, temperature) maintained by these critical components.

Based on the cognitive simulation of the SPPs fuel system, the most significant elements were identified and ranked by their impact on system reliability. Table 1 provides a quantitative summary of the structural and functional risks, categorized by the Harrington desirability scale.

The data in Table 1 clearly distinguishes between the "redundant safety" and "serial vulnerability" of the system:

critical zone ($R > 0.63$): the GD, F10, and F12 elements represent the highest risk. The Main Engine (GD) shows the peak functional risk due to the statistical severity of high-pressure equipment failures. The Circulation Tank (F10) is identified as the primary structural bottleneck; its non-redundant nature makes it a single point of failure that compromises the entire fuel supply chain;

Table 1. Risk assessment summary for key fuel system components

Element ID	Component name	Structural risk (R_{svi})	Functional risk (R_{fvi})	Harrington scale level	Element ID
F10	Circulation tank	0.85	0.91	Critical	F10
F12	Final fuel heater	0.65	0.72	Critical	F12
F14/FS14	Fine filters (parallel unit)	0.40	0.52	Maximum	F14/FS14
F11/FS11	Booster pumps (redundant)	0.28	0.44	Maximum/preemergency	F11/FS11
F4/FS4	Primary heaters	0.35	0.38	Maximum/acceptable	F4/FS4
F3/FS3	Transfer pumps (redundant)	0.25	0.28	Acceptable	F3/FS3
F1/ S1	Diesel oil storage tanks	0.15	0.18	Minimal	F1/FS1

maximum risk zone (0.37–0.63): components such as F14 and F11 fall into this category. While they possess some level of redundancy or bypass capability (e.g., F13 for the heater or parallel filters), their degradation significantly increases the system's operational stress;

safe zone ($R < 0.37$): redundant pumps (F3/FS3) and storage tanks show minimal risk levels, confirming that traditional hardware redundancy effectively mitigates topological vulnerabilities in the early stages of fuel processing.

This summary allows the DTs diagnostic system to prioritize alarm thresholds and maintenance schedules, focusing on the top three critical nodes to prevent cascading SPP failures. The developed method, validated through cognitive simulation modeling, makes it possible to identify the interrelated and interacting elements, interelement connections, as well as the degree of their influence on the assessment of the structural and functional risk of CTS failures, which in turn enables the automation of decision-making processes in emergency scenarios during CTS operation. The identified interdependencies and interactions of structural components within the hierarchy and topology of the CTS make it possible to determine the magnitude of the damaging influence of each system component in emergency scenarios on the structure of the CTS. The method's procedures are easily formalized and transformed into a computational algo-

rithm and model for the assessment of structural and functional risks, which is important for CTS with a large number of elements and inter-element connections.

Discussion and comparative analysis of risk assessment methods.

The effectiveness of the proposed integrated approach (DT-CSM) is best demonstrated by comparing it with traditional reliability assessment methods widely used in the maritime and industrial sectors, such as failure mode and effects analysis (FMEA) and fault tree analysis (FTA). The integration of DTs with CSMs provides a paradigm shift from static reliability estimation to dynamic risk management. Unlike FMEA/FTA, the DT-CSM method treats risk as a dynamic variable. By utilizing the algorithm described, the cognitive weights of the system graph are updated every few milliseconds based on actual telemetry (vibration, pressure, temperature). This allows the system to detect an escalating risk before a failure occurs. By employing the destructive modeling impulse (DMI) and the Harrington desirability scale, the proposed method identifies "gray zones"—conditions that are neither fully operational nor failed, but exhibit maximum structural risk. This granularity allows for condition-based maintenance (CBM) rather than fixed-interval maintenance. The shift from traditional methods to DT-CSM facilitates an evolution in how shipboard systems are maintained: reactive (traditional) – repair after failure (High risk for SPP); preventive (FMEA-based) – periodic maintenance based on average statistics (Leads to over-maintenance or missed early wear); predictive (DT-CSM-based) – maintenance triggered by the functional risk threshold $R_{jvi} > 0.63$. This ensures that resources are focused on critical bottlenecks like node F10 or F12 only when real degradation is detected by the DT. A key differentiator of the CSM is its ability to model non-linear interdependencies. In an FTA, dependencies are hard-coded via logic gates. In the proposed CSM: feedback loops – the graph naturally represents circular dependencies (e.g., fuel heating affecting pump efficiency, which in turn affects heating stability); impulse propagation – the DMI mimics the physical flow of a disturbance. A vibration spike in pump F11 doesn't just "fail" that node; it weakens the "structural health" of all subsequent nodes (F12, F14, GD) proportionally to the weights of the arcs, providing a more realistic "heat map" of system vulnerability.

The proposed method leverages a modern software stack (Python, JSON, Graphviz), providing significant advantages in terms of computational efficiency and integration: computational complexity – while large fault trees suffer from exponential state space explosion, the impulse

propagation algorithm in the CSM operates with a complexity of $O(N+M)$ per iteration, where N and M are the numbers of nodes and edges, respectively. This allows for near-instantaneous risk recalculation for systems with hundreds of components; data interoperability – the use of JSON-based configuration files allows for seamless integration with industrial IoT platforms and DT databases, unlike the static spreadsheets typical of FMEA

The comprehensive comparison of the technical, methodological, and operational attributes of the discussed is summarized in Table 2.

Table 2. Comparative summary

Feature	FMEA	FTA	Proposed DT-CSM Method
Data source	Expert judgment / history	Statistical probability	Real-time telemetry + DT
Update frequency	Monthly / yearly audits	Periodic updates	Continuous (ms intervals)
Failure modeling	Independent modes	Logic gates (AND/OR)	Impulse propagation (DMI)
Interdependencies	Poorly addressed	Difficult to model	Naturally represented via graph
Computational basis	Manual entry / tables	Boolean algebra	Python-based graph engine
Data format	Static docs / excel	Diagram files	Structured JSON / live stream
Decision support	Manual report analysis	Probabilistic estimation	Automated risk alerts
Risk metric	Risk priority number (RPN)	Failure probability	Structural/functional risk (R_s, R_f)

Analysis of Table 2 highlights the fundamental shift from document-centric reliability engineering (FMEA/FTA) to data-centric risk management (DT-CSM). The primary advantage of the proposed method lies in its computational basis and update frequency. While traditional methods rely on discrete, human-led audits, the DT-CSM engine operates autonomously in millisecond intervals. Furthermore, the transition from risk priority numbers (RPN) to a dual-metric approach (structural and functional risk) allows for a more nuanced understanding of system health. For instance, a high structural risk in a pipeline (e.g., the line to the engine GD) can be identified even if the individual pumps are functioning nominally, a scenario that is often overlooked in traditional independent-mode FMEA. This integration of real-time telemetry with graph-based impulse

modeling provides the necessary technological foundation for autonomous decision support systems in modern ship power plants. The transition to a DT-CSM framework enables the automation of decision-making. In emergency scenarios, while an FMEA report would be buried in documentation, the DT-CSM system provides the operator with an immediate visualization of the "at-risk" path (e.g., the critical line from F10 to GD), allowing for preventive intervention and mitigating the 40 % of failures typically associated with high-pressure fuel systems.

Conclusions and prospects for further research. The results of the study confirm the high efficiency of integrating DT technologies and cognitive simulation modeling, enabling automated risk assessment with a system response time within 50–100 ms, which meets the requirements for real-time control. The developed method for dynamic failure risk assessment ensured the identification of critical nodes in the SPP fuel system, where functional risk values reach 0.98 for the main engine (GD) and 0.91 for the circulation tank (F10), exceeding the criticality threshold of the Harrington scale (0.63) by 45 %. The practical value of the work is confirmed by the model's ability to identify "hidden risk zones" (0.37–0.63) for elements with partial degradation that are typically ignored by traditional binary FTA methods, while the presence of structural redundancy in the F11/FS11 pumps reduced local risk by 62 % compared to single lines. The use of the Python-based software package with an impulse convergence criterion of $\varepsilon=10^{-4}$ guarantees computational stability for graphs with more than 25 nodes, creating a foundation for reducing unplanned SPP downtime, 40 % of which is statistically linked to high-pressure fuel equipment failures. Prospects for future work involve expanding the model to other general ship systems, implementing neural network algorithms for the adaptation of importance coefficients β_i , and full integration of the developed "cognitive digital twin" into the onboard decision support systems of autonomous marine vessels.

REFERENCES

1. Vychuzhanin V., Vychuzhanin A. Intelligent diagnostics of ship power plants: Integration of case-based reasoning, probabilistic models, and ChatGPT. A universal approach to fault diagnosis and prognostics in complex technical systems : monograph. – Lviv–Torun : Liha-Pres, 2025. – DOI: <https://doi.org/10.36059/978-966-397-516-0>.

2. Vychuzhanin V., Vychuzhanin A. Dynamics of Failure Probabilities in Ship Power Plant Equipment Considering Cascade Effects // Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля. – 2025. – № 9(295). – С. 5–17. – DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2025-295-9-5-17>.

3. V. Vychuzhanin and A. Vychuzhanin, “Integrated approach to creating a case-based database for diagnosing failures in ship power plants,” *Informatics and Mathematical Methods in Simulation*, vol. 15, no. 2, pp. 155–165, 2025, <https://doi.org/10.15276/imms.v15.no.2.155>.

4. Vychuzhanin V., Vychuzhanin A. Three-scenario analysis of fault diagnosis accuracy in complex technical systems. *Information Technologies and Computer Engineering* Vol. 22, No. 3. 2025. P23-40 <https://doi.org/10.31649/vitce/3.2025.23>.

5. Vychuzhanin V., Vychuzhanin A. Digital methods and models for control and survivability of complex technical systems : monograph. – Lviv–Torun : Liha-Pres, 2025. – 366 p. – DOI: <https://doi.org/10.36059/978-966-397-556-6>.

6. Qi Q., Tao F. Digital twin and big data towards smart manufacturing and Industry 4.0: 360-degree comparison // *IEEE Access*. – 2018. – Vol. 10. – P. 673–701. – DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2793265>.

7. Semeraro C., Lezoche M., Panetto H., Dassisti M. Digital twin paradigm: A systematic literature review // *Computers in Industry*. – 2021. – Vol. 130. – Article 103469. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compind.2021.103469>.

8. Lv Z., Lv H., Fridenfalk M. Digital Twins in the Marine Industry // *Electronics*. – 2023. – Vol. 12, № 9. – Article 2025. – DOI: <https://doi.org/10.3390/electronics12092025>.

9. Leitão P., Colombo A. W., Karnouskos S. Industrial automation based on cyber-physical systems technologies: Prototype implementations and challenges // *Computers in Industry*. – 2015. – Vol. 81. – P. 11–25. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compind.2015.08.004>.

10. Wagg D., Worden K., Barthorpe R., Gardner P. Digital Twins: State-of-The-Art Future Directions for Modelling and Simulation in Engineering Dynamics Applications // *Mechanical Engineering Research*. – 2020. – Vol. 6, № 3. – DOI: <https://doi.org/10.1115/1.4046739>.

11. Zio E., Miqueles L. Digital twins in safety analysis, risk assessment and emergency management // *Reliability Engineering & System*

Safety. – 2024. – Vol. 246. – Article 110040. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.res.2024.110040>.

12. Ibrahim A., Kineber A. F., Mohandes S. R., Lan Y. et al. Understanding risk dynamics in digital twin integration: A causal analysis for smart infrastructure projects // *Expert Systems with Applications*. – 2026. – Vol. 297. – Article 129533. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2025.129533>.

13. Qiu S., Zaheer Q., Ali F., Wajid S., Chen H., Ai C., Wang J. Exploring the impact of digital twin technology in infrastructure management: A comprehensive review // *Journal of Civil Engineering and Management*. – 2025. – Vol. 31, № 4. – P. 395–417. – DOI: <https://doi.org/10.3846/jcem.2025.23718>.

14. Li L., You J., Xu T. Risk analysis of digital twin project operation based on improved FMEA method // *Systems*. – 2025. – Vol. 13, № 1. – Article 48. – DOI: <https://doi.org/10.3390/systems13010048>.

15. Zhang X., Tao J., Noshadravan A. Probabilistic digital twin for reliability-based maintenance optimization of offshore wind turbines // *Renewable Energy*. – 2026. – Vol. 256. – Article 123777. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2025.123777>.

16. Wang Z., Wang Z. Risk Twin: Real-time risk visualization and control for structural systems // *arXiv*. – 2024. – Preprint arXiv:2403.00283. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2403.00283>.

17. Li T., Bian Z., Lei H. et al. Digital Twin-based Driver Risk-Aware Intelligent Mobility Analytics for Urban Transportation Management // *arXiv*. – 2024. – Preprint arXiv:2407.15025. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2407.15025>.

18. Tezzele M., Carr S., Topcu U., Willcox K. E. Adaptive planning for risk-aware predictive digital twins // *arXiv*. – 2024. – Preprint arXiv:2407.20490. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2407.20490>.

19. Villegas W. Digital twin integration in metalworking: Enhancing efficiency and predictive maintenance // *Frontiers in Mechanical Engineering*. – 2025. – DOI: <https://doi.org/10.3389/fmech.2025.1655565>.

20. Homaei M., Mogollón-Gutiérrez Ó., Sancho J. et al. A review of digital twins and their application in cybersecurity based on artificial intelligence // *Artificial Intelligence Review*. – 2024. – Vol. 57. – Article 201. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s10462-024-10805-3>.

21. Vychuzhanin V., Vychuzhanin A. Adequacy and verification of an intelligent diagnostic model for ship power plants // *Informatics and*

Mathematical Methods in Simulation. – 2025. – Vol. 15, № 3. – P. 312–326. – DOI: <https://doi.org/10.15276/imms.v15.no3.312>.

22. Madni A. M., Madni C. C., Lucero S. D. Leveraging digital twin technology in model-based systems engineering // *Systems*. – 2019. – Vol. 7, № 1. – Article 7. – DOI: <https://doi.org/10.3390/systems7010007>.

23. Hossain M. N., Rahman M. M., Ramasamy D. Artificial Intelligence-Driven Vehicle Fault Diagnosis to Revolutionize Automotive Maintenance: A Review // *Computer Modeling in Engineering & Sciences*. – 2024. – Vol. 141, № 2. – P. 951–996. – DOI: <https://doi.org/10.32604/cmescs.2024.056022>.

24. Dalzochio J. et al. Machine learning and reasoning for predictive maintenance in Industry 4.0: Current status and challenges // *Computers in Industry*. – 2020. – Vol. 123. – Article 103298. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compind.2020.103298>.

DOI: 10.31653/smf52.2026. 152-164

дата першого надходження: 03.02.26
дата прийняття статті до друку після
рецензування: 11.04.26
дата публікації: 05.05.26

Zhuravlov Yu.I.¹, Bogach V.M.²¹ORCID: 0009-0005-5975-8371, ²ORCID: 0000-0002-0822-0003

National University «Odessa Maritime Academy»

PREDICTION OF THE ONSET OF FATIGUE FAILURE OF SHIP PROPELLER SHAFTS

Statement of the problem in general form

Most ship structural components operate under cyclic loading, which creates favorable conditions for the development of fatigue cracks. Restoration, repair, and replacement of these components, particularly the underwater section, are performed only after the vessel is decommissioned.

With the increase in cargo transportation volumes, ship sizes, particularly tanker fleets, significantly increase. This leads to increased power of ship propulsion systems and, consequently, increased loads on ship propeller shafts. It should be noted that failures of ship propeller shafts cause damages that far exceed the cost of the shaft. They can entail vessel downtime costs and loss of operating profits; vessel repair (dock) costs; replacement of the shafts themselves; and, in some cases, lost propellers.

Furthermore, failures of this kind can affect the ship's controllability and, under certain conditions, lead to the loss of the vessel. Therefore, ensuring the strength of propeller shafts is essential for reducing accidents at sea.

As practice shows, contact of the propeller shaft with seawater is unavoidable. To protect against corrosion and reduce the coefficient of friction, propeller shaft liners (jackets) are used. These are metal cylinders tightly fitted to the shaft journals.

When exposed to seawater, the propeller shaft surface is subject to severe corrosion. Identified causes of propeller shaft damage indicate that the majority of damage (over 60% of cases) are due to fatigue and corrosion fatigue of the propeller shafts.

Statement of the problem

The objective of this study is to predict the initial stage of fatigue failure of a propeller shaft, which allows us to determine the moment when a fatigue crack enters the macrocrack development stage.

1. Analysis of the latest researches and publications

The problem of damaged and broken propeller shafts has been around for a long time; the first statistical data on this issue were published by foreign classification societies back in the 1930s.

Figure 1 shows a comparative analysis of the economic costs to a shipowner for a scheduled propeller shaft replacement and the damage caused by its failure, using the example of a propeller shaft of a 3,500-ton deadweight tanker built in Vietnam with a diameter of 290 mm and a length of 7,850 mm [1]. This tanker is transporting crude oil from the Bach Ho (White Tiger) offshore field to the Dung Quat refinery in central Vietnam (a distance of approximately 500 km). The shipowner's earnings in this case are approximately \$242,000.

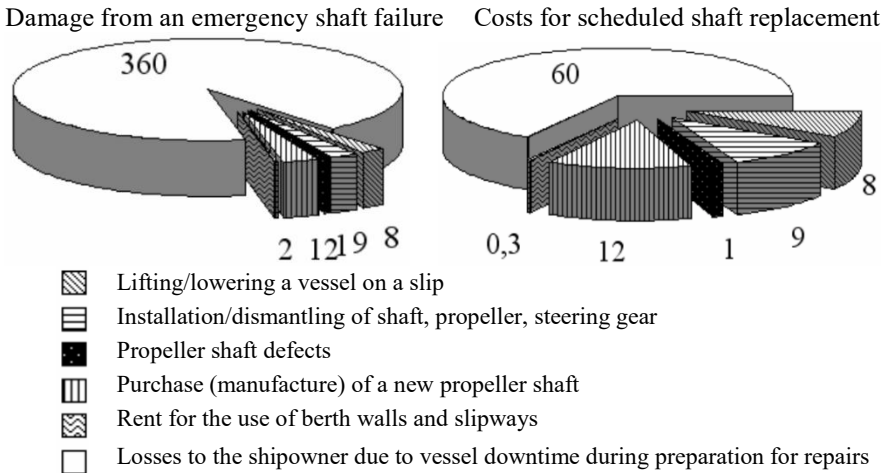


Fig. 1. Analysis of economic costs for emergency failure and scheduled replacement of a propeller shaft (in thousands of US dollars)

Figure 1 shows that the main difference, in terms of economic costs, is the amount of damage to the shipowner due to vessel downtime. In the case of a shaft failure, this figure is six times higher than the damage due to downtime due to a scheduled propeller shaft replacement. Summarizing statistical data on propeller shaft damage is a rather complex task, as the data from various sources relate to different time periods and vessel types.

Furthermore, most of this data is incomplete, often failing to indicate the causes and locations of cracks.

Contribution of the main material of the investigation.

The main places of origin of cracks in propeller shafts

An analysis of literature sources [2-13] showed that cracks in propeller shafts can be categorized by location into the following main types (Fig. 2):

1. directly in the shaft body;
2. in or near the keyway extending into the shaft body, including near the keyway mounting holes;
3. at the shaft transition from a cone to a cylinder at the aft end;
4. directly in the liners;
5. at the edges of the liners (at the bow and aft ends of the liners);
6. in the welds and weld-affected zones of the liners.

The formation of cracks in the area of the keyway (Fig. 2 a, b) and the keyway mounting holes is quite typical for propeller shafts and is caused by the keyway and holes acting as stress concentrators within the propeller shaft. The presence of cracks in the large diameter of the propeller shaft seating cone is caused by the greatest loads in this section of the shaft.

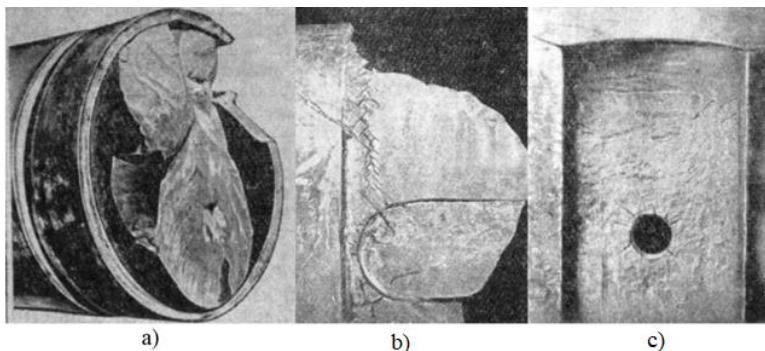


Fig. 2. Cracks and damage in the area of the keyway.

The large diameter of the propeller shaft cone essentially serves as the sealing point for the cantilever portion of the propeller shaft within the ship's hull, via the sterntube support. The primary cause of cracks at the edges of the liners is electrochemical corrosion due to the formation of a galvanic couple (in the case of liners made of non-ferrous metals). This results in large corrosion pits (10-12 mm deep [2]) forming around the shaft circumference near the ends of the liners, reducing the fatigue limit

due to stress concentration. Cracks in the welds and weld-affected zones of the liners are a consequence of changes in the mechanical properties of the material due to thermal effects during the welding process. Cracks directly in the shaft body or liner may be the result of poor machining or the presence of metallurgical defects in the material. Studies have shown [1] that, when cracks were found directly in the shafts, 67.5% of shafts were replaced and 32.5% were repaired; due to cracks in the linings, 34.5% of shafts were replaced and 65.5% were repaired.

Analysis of these data (Table 1) allowed us to plot graphs of changes in the specific crack detection rates (in shafts and linings) and propeller shaft replacements for different diameters (Fig. 3).

Table 1. Shaft damage statistics for different shaft diameters.

Shaft diameter, mm	Number of vessels	Number of dockings	Cracks in the shaft body	Cracks in the cladding	Shaft replacements
to 400	449	3113	63	79	39
400 - 500	88	730	19	13	20
500 - 600	75	590	15	20	10
over 600	44	262	3	6	1

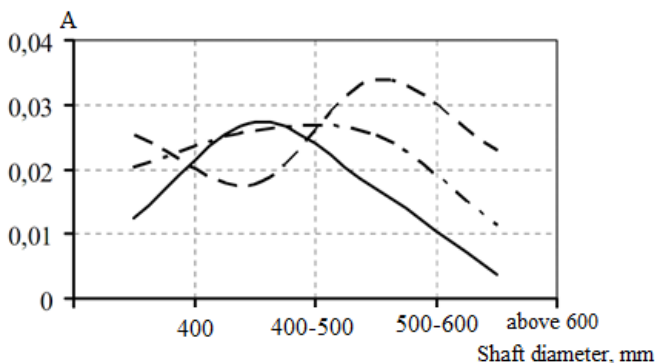


Fig. 3 Specific value of crack detection in shafts and linings and shaft replacements per one docking

The diagram (Fig. 3) shows that the majority of damage occurs to shafts with diameters of 400–600 mm, which is consistent with statistics from Veritas France [14]. However, as shaft diameter increases, damage rates decrease. Furthermore, it should be noted [15, 16] that in recent

years, instances of propeller shaft failures on ships have increased sharply. During this period, there were 73 cases of propeller shaft damage, accounting for 15% of the total number of damages to ships and their components across all supervised vessels.

This is due to the high degree of wear on mixed (river-sea) navigation vessels, excess operating hours of propeller shafts, violations of repair procedures and poor quality inspection, fatigue and corrosion-fatigue processes, and changes in the navigation conditions of the vessels. Thus, it can be concluded that the problem of damage and breakage of propeller shafts, according to data [18], remains relevant today, especially for mixed-navigation vessels, which may be due to the design features, operating conditions, and high degree of wear of the tanker fleet (river-sea type vessels). The main sites of crack initiation in propeller shafts [17, 19] are the shaft seat cone and the keyway area. Fatigue and corrosion fatigue are the main causes of damage to propeller shafts.

2. The fatigue failure process, existing energy criteria for fatigue failure

2.1 Stages of the fatigue failure process.

The entire process of fatigue failure development cannot be described by a single criteria equation. Most existing criteria are based on the relationships of linear fracture mechanics theory, which cannot be applied to the description of small crack growth kinetics [20 - 22].

Crack growth is a staged process, but the division of this process into stages varies. One such option is the following [17]:

- Stage one is the number of loading cycles to which a structural element is subjected until a small crack capable of propagating develops;
- Stage two is the number of loading cycles during which the small cracks develop until a macrocrack appears;
- Stage three is the number of loading cycles during which macrocracks develop until the structural element fails.

Thus, the entire process of fatigue failure of carbon steels can be divided into several stages:

$$N_p = N_j + N_{jj} + N_{jjj} + N_{jjj},$$

Where N_p is the overall life of the structural element; N_j is the number of cycles corresponding to the initiation and growth of microcracks within a single microstructural grain; N_{jj} is the number of cycles corresponding to crack propagation from a size corresponding to the grain diameter to the appearance of a macrocrack; N_{jjj} is the number of cycles corresponding to

the development of a macrocrack; N_{jy} is the number of cycles corresponding to the fracture process.

The first stage of fatigue failure is associated with the initiation and growth of a microcrack within a single microstructural grain of the material. In this case, we are talking about a microcrack of the order of one to two tens of micrometers, and for each specific material, this will be determined by the average grain diameter of the microstructure.

The second stage is the stage of small crack development. Experience shows [18, 19] that the second stage of fatigue failure accounts for approximately 40-60% of the total service life, and for some materials, this figure can reach 80-90% [20]. During this stage, abrupt changes in crack velocity are observed, which is due to the influence of microstructural barriers on crack growth. Crack sizes in the second stage reach approximately 0.5-1 mm, which corresponds to the possibility of detection using dye or magnetic flaw detection.

The third stage, which, as a rule, is also quite lengthy, is associated with the development of macrocracks, i.e., cracks whose growth is not affected by microstructural barriers, and is described by the equations of linear fracture mechanics. Cracks at this stage are generally visible to the naked eye and can have various sizes, depending on the dimensions and geometric parameters of the structural element being examined. The fourth stage is associated with the fatigue failure of the structural element; this stage can occur very quickly, almost instantaneously. The fourth stage may be absent for some materials or structural elements with certain geometric parameters and operating load conditions, and is typically characterized by the absence of a second vertical segment on the crack growth rate curve.

Thus, it can be noted that for a number of critical components and structural elements (such as propeller shafts) of seagoing vessels, the operation of which is prohibited if cracks are present, the most pressing issue is determining the duration of the first and second stages, rather than predicting the overall service life of the element. Therefore, to ensure the safe operation of the propulsion system of seagoing vessels, studying the initiation and growth of small cracks is particularly important. The presence of a macrocrack in a propeller shaft or liner, the growth of which is described by linear fracture mechanics, suggests the need for urgent replacement of the shaft.

2.2 Analysis of existing energy criteria for fatigue failure

Energy criteria are most suitable for the mathematical description of the initial stage of fatigue failure. Energy criteria for fatigue failure are based on the assumption that the ultimate limit state is determined by the critical value of irreversibly dissipated energy. In this case, the energy per loading cycle, the total number of cycles to failure, or other parameters derived from these are considered.

The parameter of specific irreversibly dissipated energy per cycle is calculated using the formula:

$$D = K_f \sigma_a \Delta \varepsilon_n,$$

Where K_f is the hysteresis loop shape factor; σ_a is the stress amplitude of the cycle; $\Delta \varepsilon_n$ is the inelastic strain of the material.

Figure 4 shows a series of dependences of the specific dissipated energy per cycle on the number of cycles to failure. According to these data, the number of cycles to failure increases with decreasing specific dissipated energy per cycle. It should be noted that, for the same number of cycles to failure, the absolute energy values change significantly, even for alloys with the same base material.

The parameter of total dissipated energy is also of interest in developing energy criteria for fatigue failure. Figure 4 shows the dependences of total dissipated energy on the number of cycles to failure in bending [21].

The data in Fig. 5 show that with an increase in the number of cycles till failure, the total dissipated energy increases significantly for most of the alloys studied.

Various relationships have been proposed to describe these relationships. Thus, in addition to the assumption that all dissipated energy goes toward fatigue failure:

$$\sum_1^{N_p} D = const,$$

In the works of Goltsev [22], Hanstock [15], and other authors, it is assumed that only the difference between the total energy and the energy dissipated at stresses equal to the fatigue limit is used for the development of fatigue damage.

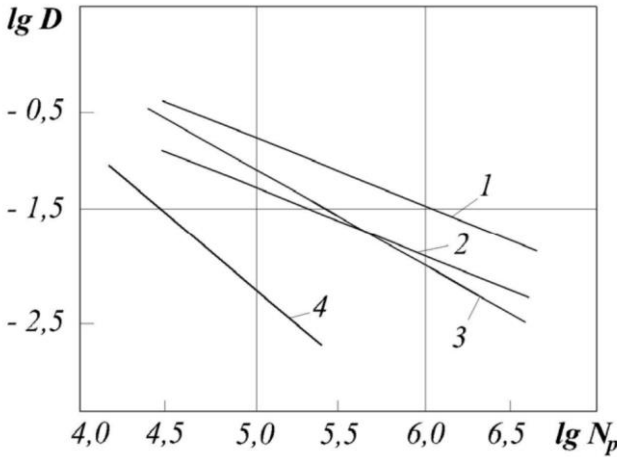


Fig. 4. D - N_p dependence in logarithmic coordinates: 1 - EI726 steel; 2 - 20Kh steel; 3 - 25 steel; 4 - 45 steel.

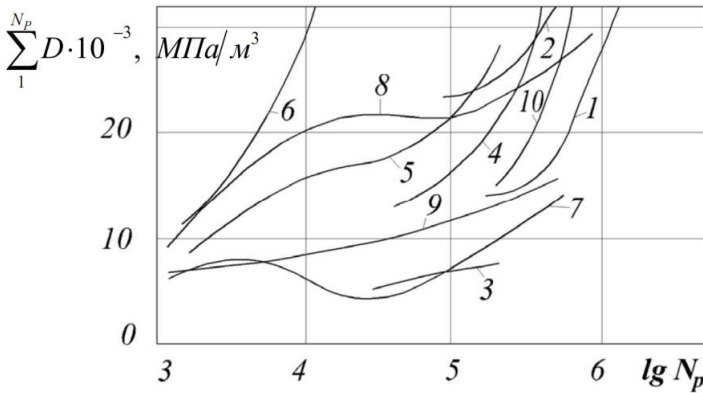


Fig. 5. Change in energy depending on the number of cycles before failure in bending: 1 - steel 20X; 2 - steel 25; 3 - steel 45(II); 4 - steel EI726; 5 - steel 12X13; 6 - steel 45; 7 - steel 40X; 8 - steel 45 (hardening and high tempering); 9 - steel 45 (hardening and low tempering); 10 - copper.

The remaining energy per cycle remains constant at stresses above the fatigue limit.

$$\sum_1^{N_p} (D - D_r) = const,$$

where D_r is the specific energy dissipated per cycle, when stresses equal to the fatigue limit.

Troshchenko [14] suggests that the portion of the energy that does not contribute to the development of fatigue damage is not constant, but increases with increasing dissipated energy per cycle:

$$\sum_1^{N_p} \left[D - D_r \left(\frac{D}{D_r} \right)^\alpha \right] = const,$$

Where α is a parameter characterizing the rate of increase of that portion of the energy that does not contribute to the development of fatigue damage.

The parameter α varies between 0 and 1. At $\alpha = 0$, Equation 5 becomes Equation 4; at $\alpha = 1$, all dissipated energy does not contribute to the development of fatigue damage in the material. It was also noted that the energy values determined according to Equation 5 are close to the energy equivalent to the latent heat of fusion of metals.

Feltner and Morrow [5] suggested that fatigue failure is associated with the parameter of critical irreversibly dissipated energy, which is equal to the ultimate work of deformation under static loading. It was assumed that the mechanical hysteresis loop has constant dimensions during cyclic loading.

$$D_c = 2N \int_0^{\Delta \varepsilon_i} \sigma d\varepsilon,$$

where D_c is the ultimate energy value.

Morrow subsequently proposed [6] that the total dissipated energy is inversely proportional to the fourth power of the ratio of the true tensile strength to the stress amplitude:

$$D_c = S_u \left(\frac{\sigma_p}{\sigma_a} \right)^4, \quad S_u = \frac{1}{1 + m_0} \sigma_p e_p,$$

where S_u is the fracture energy with a monotonic increase in load; m_0 is the strain hardening coefficient.

This equation is also valid for torsion. Morrow's controversial points include the dependence of dissipated energy on stress, which is essentially constant for all materials and stress ranges.

Stall, in his work [7], proposed describing the stress-strain diagram for both static and cyclic loading using the following formula:

$$e = \frac{\sigma_u}{E} + e_0 sh \frac{\sigma_u}{\sigma_0},$$

where e_0 and σ_0 are constants, and σ_u is the true voltage.

The hysteresis loop area adopted by Stoll for a pulsating cycle is written as follows:

$$D = \sigma_e - 2 \int_0^{\sigma_B} ed\sigma_u,$$

Considering the variable nature of the hysteresis loop, that in an axisymmetric cycle only the half-cycle of stretching is taken into account, we obtain:

$$D_{cp} = \frac{1}{2} \sigma_0 e_0 \left[\frac{\sigma_u^2}{\sigma_0^2} sh - \left(2ch \frac{\sigma_u}{\sigma_0} - 1 \right) \right],$$

Thus, the failure condition for a pulsating loading cycle will have the form:

$$N_p D_{cp} = S_u,$$

Chang in his work proposes the following condition for fatigue failure:

$$N_p (D - D_r) = D_c,$$

Martin, Muratov, and others consider the total hardening energy as a fatigue failure criterion. Thus, in Martin's work:

$$N_p E_T^{II} \Lambda \varepsilon_u = D_c,$$

$$E_{Th}^{II} = tg\beta, E = tg\alpha.$$

Muratov's energy dissipated during the cycle, associated with hardening:

$$D = (\sigma_a - \sigma_{III}^{II})^2 \frac{E - E_T^{II}}{EE_T^{II}}, D_c = DN_p,$$

In Ivanova's work, the energy expended in destruction is compared with the parameter of latent heat of fusion:

$$D_{cp} (N_p - N_i) = L_{pl},$$

where D_{cp} is the average energy value per loading cycle; N_i is the number of cycles at which crack initiation begins; N_p is the number of cycles until failure; L_{pl} is the latent heat of fusion of the metal.

In the works of Troshchenko [17, 18], the following energy criterion is presented:

$$D_c = S_u \left(\frac{\sigma_p}{\sigma_0} \right),$$

where b is a parameter characterizing the intensity of the increase in the total dissipated energy compared to the value S_u with a decrease in the stresses σ_a .

Conclusions

1 The problem of damage and breakage of propeller shafts remains relevant nowadays. Propeller shafts of river-sea vessels, with shaft diameters of approximately 200 mm, are particularly susceptible to damage.

2 The main causes of damage to ship propeller shafts are fatigue and corrosion fatigue, with the primary damage sites being the propeller seat cone and the keyway area, which is consistent with calculation data.

3 A calculation model for the initial stage of fatigue failure, developed based on the elastic deformation energy parameter of the material, allows us to determine the duration of the initial stage of fatigue failure of a propeller shaft and determine the need for scheduled replacement, as current regulations prohibit the operation of cracked propeller shafts on seagoing vessels.

4 The data obtained during the experiment allow us to conclude that the specific elastic deformation energy accumulated per unit length of the resulting crack is a constant value, independent of the level of applied stresses.

5 Timely replacement of the propeller shaft allows the shipowner to avoid costs associated with lost operating profits due to vessel downtime, which can occur in the event of a propeller shaft failure. These costs amount to approximately \$300,000.

REFERENCES

1. Луценко, В. Т. Конструктивно-технологічне забезпечення надійності елементів підводної частини морських суден. Львів: Вид-во Фенікс, 2023. 126 с.
2. Bourceau G., Loupere A. Investigations a la mer en vue d'ameliorer le comportement des arbres porte. Bulletin ATMA, № 61, 2021. DOI: 10.32641/jmse1204492.
3. Vedeler B. On Stresses and Failures in Propeller Shafts of Single Screw Vessels. European Shipbuilding, vol. 11, № 2, 2022. DOI:10.3253/2517-9051-2022-41-2.

4. Zhuravlov Yu.I., Kostyuchenko Ye.F., Povar A.I. Assessment of the thermal and stress-strain state of cylindrical surfaces of ship parts with wear-resistant coatings // Суднові енергетичні установки: наук.-техн. зб. – 2024. – Вип. 47. – С. 244-258. doi: 10.31653/smf47.2024.244-258.

5. Zhuravlov Yu.I., Korkh M. V. Development of a model for the destruction process of crankshafts of marine diesel engines taking into account their stress-strain state // Суднові енергетичні установки: наук.-техн. зб. – 2025. – Вип. 51. – С. 126-143. DOI: 10.31653/smf51.2025.126-143.

6. Німець Я. Розвиток втомних тріщин // Проблеми міцності. - 2023, № 7. с. 7 – 9. DOI:10.38845/2412-9148-2023-48-1.

7. Прокопенко О.В., Черниш О.М. розвиток коротких поверхневих втомних тріщин у сталі 20X13 і сплаві ВТ9 // Проблеми міцності. - 2024. - № 5. с. 12 - 16. DOI:10.33725/2332-8138-2024-42-1.

8. Трощенко В.Т. Втома та непружність металів. – Київ: Наук. думка, 2023. – 267с.

9. Гольцев Д.І. Про умови міцності при змінних навантаженнях та складному напруженому стані. – Питання динаміки та динамічної міцності, 2021, вип. 1, с. 23 – 29.

10. Hanstock R.F. Damping capacity strain hardening and fatigue. - Proc. Phis. Soc., 2018, 59, p. 275 - 287.

11. Трощенко В.Т. Критерии усталостной прочности металлов и сплавов, основанные на учете рассеяния энергии. - Киев: Наук. думка, 2025, с. 168 - 177.

12. Feltner C.E., Morrow J.D. Microplastic strain hysteresis energy as a criterion for fatigue fracture. - Trans. ASMED, 2021, 83 N 1. p. 15 - 22.

13. Haljord G.R., Morrow J.D. Low-cycle fatigue in torsion. - Proc. ASTM, 2022, 62, p. 695 - 707.

14. Stowell E. A study of the energy criterion for fatigue. - Nucl. Eng. And Des., 2018, N 3, p. 32 - 40. DOI:10.35615/2582-8148-2018-41-1.

15. Chang C.S., Pimbley W.T., Cunway H.D. An analysis of metal fatigue based on histeresis energy. - Exp. Mech., 2019, 8, № 3. DOI:10.34825/2812-8528-2019-45-1.

16. Martin D.E. An energy criterion for low-cycle fatigue. - J. Basic Eng., Trans. ASME, 2023, Dec., p. 565 - 571.

17. Трощенко В.Т., Хамаза Л.А. Дослідження деяких енергетичних критеріїв втомного руйнування металів. Проблеми міцності, 2017, № 4, с. 3 – 8.

18. Трощенко В.Т., Хамаза Л.А., Цибанєв Г.В. Методи прискореного визначення меж витривалості металів на основі деформаційних та енергетичних критеріїв. – Київ: Наук. думка, 2018. – 105 с.

19. Баженов В.А., Дашенко А.Ф., Оробей В.Ф., Сур'янінов Н.Г. Численні методи в механіці. - М: ДМК Прес. – 2021. – 564 с.

20. Zhuravlov Yu.I., Dovidenko Yu.N., Latysh O.M. Analysis of the thermomechanical condition of the working surface of "shaft-sliding bearing" joints' parts in ship repair// Суднові енергетичні установки: наук.-техн. зб. – 2024. – Вип. 48. – С. 158-169. DOI: 10.31653/smf51.2024.158-169.

21. Вейбулл В. Втомні випробування та аналіз їх результатів – Київ: Наук. думка, 2015. – 275 с.

22. Школяр Л.М. Методика втомних випробувань: довідник – Київ: Вища школа, 2018. – 304 с.

РЕФЕРАТИ

Голікова В.В., Крайнова В.І., Розлуцький О.М. Інтегрована проактивна модель забезпечення професійної діяльності під час експлуатації морських суден в умовах використання альтернативних палив і цифровізації

У статті обґрунтовано необхідність формування інтегрованої проактивної моделі безпеки праці на морському транспорті в умовах енергетичного переходу, цифровізації суднових систем і посилення кіберфізичних загроз. Показано, що традиційна реактивна модель, орієнтована переважно на аналіз уже реалізованих інцидентів, не повною мірою відповідає сучасним умовам експлуатації суден нового покоління. Встановлено, що ефективне забезпечення охорони праці на морі потребує переходу до системи завчасного виявлення, оцінювання та попередження небезпечних станів, які виникають під впливом технічних, людських, організаційних, енергетичних і цифрових чинників. Проаналізовано сучасні наукові дослідження, аналітичні звіти та нормативні документи, присвячені цифровим двійникам, штучному інтелекту, VR/AR-технологіям, моніторингу функціонального стану моряків, психосоціальним аспектам безпеки праці, управлінню ризиками альтернативних палив і кіберризиків. Методологічною основою дослідження визначено концепцію Safety-II, у межах якої безпека трактується як здатність соціотехнічної системи підтримувати кероване функціонування в умовах мінливого середовища. Запропоновано синергетичну структуру інтегрованої проактивної моделі безпеки праці, що поєднує імерсивну підготовку екіпажів, цифровий моніторинг, предиктивну аналітику, використання цифрових двійників, механізми психосоціальної підтримки та інтегроване управління ризиками альтернативних палив і кіберзагроз. Обґрунтовано, що реалізація такого підходу створює передумови для зниження професійного ризику, підвищення адаптивної стійкості суднової системи та вдосконалення практики охорони праці на морському транспорті.

Ключові слова: охорона праці на морському транспорті; проактивна модель безпеки праці; Safety-II; цифровізація суднових систем; цифрові двійники; штучний інтелект; VR/AR-технології; альтернативні суднові палива; кіберфізичні ризики; психосоціальна стійкість екіпажу.

Golikova V.V., Krainova V.I., Rozlutskiy O.M. An Integrated Proactive Model for Ensuring Professional Activity in the Operation of Seagoing Ships under Conditions of Alternative Fuel Use and Digitalization

The article substantiates the need to develop an integrated proactive occupational safety model in maritime transport under the conditions of energy transition, digitalization of ship systems, and the growing impact of cyber-physical threats. It is shown that the traditional reactive model, which is mainly focused on investigating incidents that have already occurred, no longer fully meets the operating conditions of new-generation vessels. The study argues that effective occu-

pational safety management at sea requires a transition to a system based on the early identification, assessment, and prevention of hazardous conditions caused by technical, human, organizational, energy-related, and digital factors. The paper analyzes contemporary scientific studies, analytical reports, and regulatory documents dealing with digital twins, artificial intelligence, VR/AR technologies, monitoring of seafarers' functional condition, psychosocial aspects of occupational safety, as well as risk management related to alternative fuels and cybersecurity. The methodological basis of the study is the Safety-II concept, within which safety is understood as the ability of a socio-technical system to maintain controlled and acceptable performance under changing conditions. A synergistic structure of an integrated proactive occupational safety model is proposed, combining immersive crew training, digital monitoring, predictive analytics, digital twins, psychosocial support mechanisms, and integrated management of alternative fuel and cyber risks. It is argued that the implementation of such an approach creates the prerequisites for reducing occupational risk, enhancing the adaptive resilience of the ship system, and improving occupational safety practices in maritime transport.

Keywords: occupational safety in maritime transport; proactive occupational safety model; Safety-II; digitalization of ship systems; digital twins; artificial intelligence; VR/AR technologies; alternative marine fuels; cyber-physical risks; psychosocial resilience of the crew.

Кривий М. О., Кривий О. Ф. Критерій режимів роботи підшипників ковзання суднового пропульсивного комплексу із урахуванням ньютонівської поведінки мастил

Підшипники ковзання (ПК) є важливим динамічним вузлом суднового пропульсивного комплексу, вони присутні в головній і допоміжних енергетичних установках, а також забезпечують передачу кутових переміщень на гвинт і стерно. Аварійні ситуації, які можуть виникнути в підшипниках ковзання, можуть призвести до суттєвих пошкоджень інших елементів і вузлів суднового пропульсивного комплексу і завдати значних збитків. Причому вказані пошкодження, як правило, не можуть бути усунутими в умовах рейсу. Тому постійний моніторинг і діагностика роботи підшипників ковзання є важливими практичними і складними теоретичними задачами. Моніторинг і діагностика роботи суднових пар ковзання відбувається різними методами і способами, але всі вони спираються на дослідження гідродинамічних процесів, які відбуваються в підшипниках ковзання в процесі експлуатації. Вказанні дослідження, як правило, відбуваються на основі розв'язків диференціального рівняння Рейнольдса, за допомогою яких визначають розподіл питомого гідродинамічного тиску в робочій зоні мастильного шару підшипника ковзання. При рідинному терті питомий гідродинамічний тиск в робочій зоні пари ковзання є обмеженим. Порушення цієї умови призводить до аварійних ситуацій при роботі підшипників ковзання.

В даному дослідженні враховано неньютонівську поведінку мастил в робочій зоні підшипника ковзання, що дозволило отримати новий критерій рідинного режиму роботи ПК. Отримана математична модель для числа критерію, яке залежить від відносного ексцентриситету між вкладишем і цапфою. Вхідний параметр критерію – коефіцієнт впливу залежить від параметрів роботи підшипника ковзання: частоти обертання, відносного радіального зазору, а також від в'язкістних характеристик мастил: динамічної в'язкості і п'єзоефіцієнту в'язкості мастил. Проведена валідація отриманого критерію для рамових і шатунних підшипників ковзання десяти основних суднових двигунів.

Ключові слова. Підшипник ковзання, судновий пропульсивний комплекс, критерій рідинного тертя, неньютонівські мастила, математична модель

Круви М. О., Круви О. Ф. Criterion for the operating regimes of plain bearings in a marine propulsion system taking into account the non-newtonian

Plain bearings are important dynamic units of a marine propulsion system. They are used in the main and auxiliary power plants and also ensure the transmission of angular motion to the propeller and rudder. Emergency situations that may arise in plain bearings can lead to substantial damage to other components and units of the marine propulsion system and cause significant losses. Moreover, such damage usually cannot be eliminated during a voyage. Therefore, continuous monitoring and diagnostics of plain bearing operation are important practical tasks and, at the same time, complex theoretical problems. The monitoring and diagnostics of marine sliding pairs are carried out using various methods and techniques; however, all of them rely on the study of hydrodynamic processes occurring in plain bearings during operation. These studies are generally based on solutions of the Reynolds differential equation, which make it possible to determine the distribution of specific hydrodynamic pressure within the working zone of the lubricant film in a plain bearing. Under fluid friction conditions, the specific hydrodynamic pressure in the working zone of the sliding pair is limited. Violation of this condition leads to emergency situations during the operation of plain bearings. In this study, the non-Newtonian behaviour of lubricants in the working zone of a plain bearing was taken into account, which made it possible to obtain a new criterion for the fluid-friction operating regime of plain bearings. A mathematical model was developed for the criterion number, which depends on the relative eccentricity between the bearing shell and the journal. The input parameter of the criterion, namely the influence coefficient, depends on the operating parameters of the plain bearing, including rotational speed and relative radial clearance, as well as on the viscosity characteristics of the lubricant, namely dynamic viscosity and the piezoviscosity coefficient. The obtained criterion was

validated for the main and connecting-rod plain bearings of ten marine main engines.

Keywords: plain bearing, marine propulsion system, fluid-friction criterion, non-Newtonian lubricants, mathematical model.

Korban V.H., Shumilova K.V. Ефективність очищення випускних газів суднових енергетичних установок електромагнітною хвилею кругової поляризації

Техніко-економічний аспект очищення викидів відпрацьованих газів і твердих частинок згоряння палива в суднових енергетичних установках полягає в раціональному виборі технології виробничого процесу і технічних засобів, що забезпечують при найменших економічних витратах реалізацію необхідних природоохоронних заходів. Значна кількість шкідливих викидів з вихлопних труб суднових енергетичних установок, що надходить в атмосферу і морську воду, зумовлює необхідність удосконалювати технологію захисту навколишнього середовища від їх шкідливого впливу. Основна маса шкідливих компонентів викидається на висоту 200-300 м і поширюється на досить великі відстані до гранично-допустимих концентрацій в залежності від конкретних кліматичних ситуацій.

Нейтралізація шкідливих викидів вихлопних труб суднових енергетичних установок до теперішнього часу в повному обсязі не здійснено. У даній роботі розглянута нейтралізація шкідливих компонентів, що викидаються з вихлопних труб суднових енергетичних установок, СВЧ-методом. Сутність СВЧ-методу полягає в створенні хвилі кругової поляризації, електромагнітне поле якої, обертає газоподібні, рідкі та тверді компоненти на виході вихлопної труби суднової енергетичної установки і направляє їх в певну ємкість, де відбувається їх осадження і нейтралізація.

При обертанні твердих, рідких і газоподібних частинок за круговою орбітою електромагнітної хвилі враховується дія сили Лоренца в магнітному полі хвилі. Визначено радіус спірального обертання частинок у хвилі кругової поляризації. Представлена швидкість падіння частки при обертанні в кінці спіралі з використанням формули Стокса.

Ключові слова: електромагнітна хвиля, кругова поляризація, обертання електромагнітного вектору, шкідливі хімічні викиди, параметри електромагнітної хвилі.

Korban V.H., Shumilova K.V. Efficiency of clearing of final gases of ship power plants by hertzian wave of circular polarization

The technical and economic aspect of the purification of emissions of exhaust gases and particulate matter combustion in ship power plants consists in a rational choice of the production process technology and technical means that ensure the implementation of necessary environmental measures at the lowest economic cost. A significant amount of harmful emissions from the exhaust pipes of ship

power plants entering the atmosphere and seawater, leads to the need to improve the technology of environmental protection from their harmful effects. The bulk of harmful components is emitted to a height of 200-300 m and spreads over fairly large distances to the maximum permissible concentrations, depending on the specific climatic situations.

Neutralization of harmful emissions from exhaust pipes of ship power plants has not yet been fully implemented. In this paper we consider the neutralization of harmful components emitted from the exhaust pipes of ship power plants using the microwave method. The essence of the microwave method is to create a wave of circular polarization, the electromagnetic field of which rotates the gaseous, liquid and solid components at the exit of the exhaust pipe of the ship's power plant and sends them to a specific container, where they are deposited and neutralized.

When solid, liquid and gaseous particles rotate in a circular orbit of an electromagnetic wave, the effect of the Lorentz force in the magnetic field of the wave is taken into account. The radius of the spiral rotation of particles in a wave of circular polarization is determined. The rate of particle incidence during rotation at the end of the helix using the Stokes formula is presented

Keywords: electromagnetic wave, circular polarization, rotation of the electromagnetic vector, harmful chemical emissions, parameters of the electromagnetic wave.

Парменова Д.Г., Кулешов І.М. Цифрові засоби забезпечення декарбонізації морського транспорту

У статті досліджено роль цифрових інструментів у декарбонізації морського транспорту в умовах посилення міжнародних і регіональних екологічних вимог. Обґрунтовано, що скорочення викидів у судноплаванні залежить не лише від переходу на альтернативні палива, модернізації енергетичних установок і розвитку берегового електропостачання, а й від цифровізації судових, портових і логістичних процесів. Систематизовано основні групи цифрових інструментів: системи моніторингу й аналітики паливоспоживання, викидів і вуглецевої інтенсивності судна; засоби оптимізації рейсу, швидкості та погодної маршрутизації; цифрові двійники; інструменти штучного інтелекту, машинного навчання та прогнозного технічного обслуговування; портові цифрові платформи. Показано, що їх використання забезпечує точніше планування рейсу, контроль паливоспоживання і викидів, раннє виявлення погіршення технічного стану обладнання, підвищення енергоефективності та узгодження судових операцій із регуляторними вимогами. Визначено основні обмеження цифрової декарбонізації, серед яких якість даних, точність сенсорів, стандартизація інформаційного обміну, сумісність систем, кібербезпека та підготовленість персоналу. Зроблено висновок, що цифрові інструменти є системною основою переходу від

декларативних цілей декарбонізації до конкретних експлуатаційних рішень у морському транспорті.

Ключові слова: декарбонізація морського транспорту, цифровізація судноплавства, вуглецева інтенсивність судна, енергоефективність, цифровий двійник, штучний інтелект, машинне навчання, погодна маршрутизація, портові цифрові платформи.

Parmenova D. G., Kuleshov I.M. Digital Tools for the Decarbonization of Maritime Transport

The article examines the role of digital tools in the decarbonization of maritime transport under increasingly strict international and regional environmental requirements. It is argued that emission reduction in shipping depends not only on alternative fuels, modernization of ship power systems, and the development of onshore power supply, but also on the digitalization of shipboard, port, and logistics processes. The study systematizes the main groups of digital instruments: monitoring and analytical systems for fuel consumption, emissions, and ship carbon intensity; voyage, speed, and weather routing optimization tools; digital twins; artificial intelligence, machine learning, and predictive maintenance tools; and port digital platforms. It is shown that these instruments improve voyage planning, support continuous control of fuel consumption and emissions, enable early detection of equipment deterioration, increase energy efficiency, and help align ship operations with regulatory requirements. The main limitations of digital decarbonization are also identified, including data quality, sensor accuracy, standardization of information exchange, system interoperability, cybersecurity, and personnel readiness. The article concludes that digital tools constitute a systemic basis for moving maritime decarbonization from general policy objectives to specific operational decisions.

Keywords: maritime transport decarbonization, shipping digitalization, ship carbon intensity, energy efficiency, digital twin, artificial intelligence, machine learning, weather routing, port digital platforms.

Sagin A.C., Zabloцький Ю.В. Особливості експлуатації паливної апаратури високого тиску під час переведення судових дизелів на паливо з низьким вмістом сірки

Розглянути питання щодо особливостей експлуатації паливної апаратури високого тиску під час експлуатації судових дизелів на паливі з низьким вмістом сірки. Зазначено, що однією з головних труднощів, що виникає під час переведення дизелів на роботу з використанням палива з низьким вмістом сірки підвищення температури наприкінці згоряння. Це пов'язано зі зменшенням кута затримки самозаймання, збільшенням кута початку горіння та вищою ефективністю процесу згоряння в районі верхньої мертвої точки. За умови більш раннього самозаймання палива збільшується кількість палива, що згорає до верхньої мертвої точки. Це призводить до підви-

щення швидкості згоряння палива та ступеня наростання тиску під час згоряння. Дане явище є найбільш негативним для двотактних дизелів, які характеризуються підвищеною масою деталей кривошипно-шатунного механізму. У зв'язку з цим різко зростають ударні навантаження на крейцкопфні та мотильові підшипники. Запобігання цьому явищу можливо шляхом перерегулювання паливної апаратури високого тиску та визначення оптимальних кутів випередження подачі палива до циліндру дизеля. Експерименти, проведені на судновому дизелі MAN Energy Solutions 8K80MC-8.2-ТІІ, підтвердили, що у разі переведення дизеля з палива RMG380 (із вмістом сірки 0,48 %) на паливо DMA (із вмістом сірки 0,055 %) за рахунок зміни кутів випередження подачі палива можливо: забезпечити зниження тиску згоряння з 14,45 МПа до 14,03 МПа; досягти зменшення температури випускних газів з 394 °С до 375 °С; знизити ступінь підвищення тиску під час згоряння з 1,335 до 1,303; зменшити емісію оксидів азоту з випускними газами з 13,75 г/(кВт·год) до 12,82 г/(кВт·год). Це забезпечує підвищення: екологічної стійкості на 3,61...10,97 %; теплової стійкості до 2,54 %; динамічної стійкості — до 4,82 %.

Ключові слова: динамічна стійкість, екологічна стійкість, екологічні показники, експлуатаційні показники, кут випередження подачі палива, морський транспорт, паливна апаратура високого тиску, суднове паливо, судновий дизель, тепла стійкість.

Sagin A.S.V., Zablotskiy Y.V. Features of operation of high-pressure fuel equipment during conversion of marine diesel engines to low-sulfur fuel

To consider the issue of features of operation of high-pressure fuel equipment during operation of marine diesel engines on low-sulfur fuel. It is noted that one of the main difficulties that arise when converting diesel engines to work with low-sulfur fuel is an increase in temperature at the end of combustion. This is due to a decrease in the autoignition delay angle, an increase in the combustion start angle and a higher efficiency of the combustion process in the area of top dead center. With earlier autoignition of fuel, the amount of fuel that burns to top dead center increases. This leads to an increase in the fuel combustion rate and the degree of pressure build-up during combustion. This phenomenon is most negative for two-stroke diesel engines, which are characterized by an increased mass of crank-and-connecting mechanism parts. In this regard, shock loads on cross-head and butterfly bearings increase sharply. This phenomenon can be prevented by readjusting the high-pressure fuel equipment and determining the optimal fuel advance angles to the diesel cylinder. Experiments conducted on the MAN Energy Solutions 8K80MC-8.2-ТІІ marine diesel engine confirmed that in the case of switching the diesel from RMG380 fuel (with a sulfur content of 0.48 %) to DMA fuel (with a sulfur content of 0.055 %) by changing the fuel advance angles, it is possible to: reduce the combustion pressure from 14.45 MPa to 14.03 MPa; achieve a decrease in exhaust gas temperature from 394 °C to

375 °C; reduce the degree of pressure increase during combustion from 1.335 to 1.303; reduce the emission of nitrogen oxides with exhaust gases from 13.75 g/(kWh) to 12.82 g/(kWh). This provides an increase in: environmental stability by 3.61–10.97%; thermal stability by 2.54%; dynamic stability by 4.82%.

Keywords: dynamic stability, environmental indicators, environmental stability, fuel advance angle, high-pressure fuel equipment, marine diesel, marine fuel, maritime transport, operational indicators, thermal stability.

Сазін С.В., Мадей В.В., Даніленко Д.В. Використання біопалива з олії каранджі у суднових дизелях

Розглянути питання щодо використання біопалива з олії каранджі у суднових дизелях. Зазначено, що постійне підвищення рівня емісії шкідливих компонентів, що входять до складу випускних газів дизелів суден морського транспорту, а також підвищення кількості випускних газів, що потрапляють в атмосферу внаслідок морських перевезень, є актуальною проблемою. Суднові дизелі надають значний внесок у викиди випускних газів, включаючи оксид СО і діоксид вуглецю CO_2 , вуглеводні, що не згоріли НС, оксиди азоту NO_x . Одним із варіантів зниження емісії зазначених шкідливих компонентів є використання біодизельного палива, зокрема такого, що складається зі олії каранджі.

Дослідження спрямоване на експериментальне вивчення сумішей палива нафтового походження та олії каранджі в судовому чотиритактному дизельному двигуні з метою визначення оптимального складу сумішей палива нафтового та біологічного походження, а також оптимальних режимів експлуатації суднових дизелів при використанні подібних сумішей.

Дослідження виконували на трьох однотипних суднових чотиритактних дизелях 6Н21/32 Hyundai HiMSEN. Один із дизелів працював на дизельному паливі нафтового походження DMB20. Два інших – на суміші палива DMB20 та палива біодизельного паливі, яке складає метиловий ефір олії каранджі (Karanja oil methyl ester – КОМЕ). При цьому вміст палива КОМЕ у суміші становив 5 %, 10 %, 15 %, 20 %. Основні екологічні показники дизеля (оксид СО і діоксид вуглецю CO_2 , вуглеводні НС, що не згоріли, оксиди азоту NO_x) вимірювалися за допомогою каліброваного газоаналізатора Seitron.

Аналіз емісії оксиду СО і діоксиду CO_2 вуглецю, незгорілих вуглеводнів НС, а також оксидів азоту NO_x виявив наявність оптимальної концентрації біодизельного палива КОМЕ в його суміші з паливом нафтового походження DMB20, а також оптимальних експлуатаційних режимів роботи дизеля за якими забезпечується мінімальних рівень вказаних шкідливих компонентів у складі випускних газів. Експериментально встановлено, що суміші дизельного палива DMB20 та біодизеля КОМЕ з олії каранджі є екологічно

сприятливими альтернативами традиційному паливу нафтового походження для двигунів внутрішнього згорання.

Ключові слова: випускні газі, екологічні показники, емісія шкідливих речовин, морський транспорт, олії паранджі, паливо біологічного походження, паливо нафтового походження, судновий дизель.

Sagin S.V., Madey V.V., Danilenko D.V. Use of biofuel from caranja oil in marine diesel engines

To consider the issue of using biofuel from caranja oil in marine diesel engines. It is noted that the constant increase in the level of emissions of harmful components that are part of the exhaust gases of diesel engines of marine transport vessels, as well as the increase in the amount of exhaust gases entering the atmosphere as a result of maritime transportation, is a pressing problem. Marine diesel engines make a significant contribution to exhaust gas emissions, including CO oxide and carbon dioxide CO₂, unburned hydrocarbons HC, nitrogen oxides NO_x. One of the options for reducing the emission of these harmful components is the use of biodiesel fuel, in particular, one consisting of caranja oil. The research is aimed at experimentally studying mixtures of petroleum fuel and Karanja oil in a marine four-stroke diesel engine in order to determine the optimal composition of mixtures of petroleum and biological fuel, as well as optimal operating modes of marine diesel engines when using such mixtures. The research was carried out on three identical marine four-stroke diesel engines 6H21/32 Hyundai HiMSEN. One of the diesel engines operated on petroleum diesel fuel DMB20. The other two operated on a mixture of DMB20 fuel and biodiesel fuel, which is Karanja oil methyl ester (KOME). The content of KOME fuel in the mixture was 5 %, 10 %, 15 %, 20 %. The main environmental indicators of diesel (CO and carbon dioxide CO₂, unburned hydrocarbons HC, nitrogen oxides NO_x) were measured using a calibrated Seitron gas analyzer. The analysis of the emission of CO and CO₂ carbon dioxide, unburned hydrocarbons HC, and nitrogen oxides NO_x revealed the presence of an optimal concentration of biodiesel KOME in its mixture with DMB20 petroleum fuel, as well as optimal diesel engine operating modes that ensure the minimum level of these harmful components in the exhaust gases. It was experimentally established that mixtures of DMB20 diesel fuel and KOME biodiesel from karanja oil are environmentally friendly alternatives to traditional petroleum fuel for internal combustion engines.

Keywords: emission of harmful substances, environmental indicators, exhaust gases, fuel of biological origin, fuel of petroleum origin, marine diesel, maritime transport, parangji oils.

Склярєнко І.Ю., Ганношина І.М., Клочков Ю.П., Роздобудько В.В. Інтеграція інноваційних технологій в суднову енергетичну інфраструктуру для підвищення ефективності експлуатації

У статті детально розглянуто актуальну науково-прикладну проблему підвищення ефективності експлуатації морських суден шляхом інтеграції інноваційних технологій у суднову енергетичну інфраструктуру. Обґрунтовано, що сучасні умови функціонування морського транспорту характеризуються жорсткими екологічними вимогами, зростанням вартості енергоресурсів та необхідністю підвищення енергоефективності, що зумовлює потребу переходу від традиційних енергетичних систем до інтелектуальних інтегрованих комплексів. Визначено, що існуючі підходи до проєктування та експлуатації суднових енергетичних установок не забезпечують достатнього рівня адаптивності та ефективності в умовах змінних режимів роботи, що обмежує можливості їх модернізації.

Метою дослідження є розробка теоретичних положень і практичних рекомендацій щодо інтеграції інноваційних технологій у суднові енергетичні системи для забезпечення максимальної ефективності їх функціонування. У роботі використано підходи до формалізації енергетичного балансу системи з урахуванням генерації, накопичення, споживання та втрат енергії, що дозволяє оцінювати ефективність функціонування енергетичної інфраструктури в динамічних умовах експлуатації.

У результаті дослідження розроблено концептуальну модель інтегрованої суднової енергетичної інфраструктури, яка включає підсистеми генерації (на основі двигунів внутрішнього згорання, паливних елементів та відновлюваних джерел енергії), накопичення (акумуляторні батареї, суперконденсатори), розподілу (інтелектуальні енергетичні шини) та споживання енергії з урахуванням пріоритетності навантажень. Запропоновано класифікацію інноваційних технологій на апаратні, програмні та гібридні рішення, що дозволяє систематизувати підходи до модернізації енергетичних систем суден. Розглянуто особливості впровадження гібридних енергетичних установок, інтелектуальних систем керування, цифрових двійників, предиктивної діагностики, а також альтернативних джерел енергії, включаючи водневі технології та вітрильні енергетичні системи.

Наукова новизна отриманих результатів полягає у формуванні інтегрованого підходу до побудови суднових енергетичних інфраструктур, який, на відміну від існуючих, враховує взаємозв'язок між усіма елементами системи та динамічний характер їх функціонування.

Практична значимість результатів дослідження полягає у можливості їх використання при проєктуванні нових та модернізації існуючих суден, що забезпечує підвищення енергоефективності, зниження експлуатаційних витрат та зменшення негативного впливу на навколишнє середовище.

Ключові слова: транспорт, водний транспорт, суднові енергетичні установки, інновації, інфраструктура, підвищення ефективності експлуатації.

Skliarenko I.Yu., Hannoshyna I.M., Klochkov Yu.P., Rozdobudko V.V. Integration of innovative technologies into ship energy infrastructure to increase operating efficiency

The article examines in detail the current scientific and applied problem of increasing the efficiency of the operation of seagoing vessels by integrating innovative technologies into ship energy infrastructure. It is substantiated that the modern conditions of maritime transport are characterized by strict environmental requirements, increasing the cost of energy resources and the need to increase energy efficiency, which necessitates the transition from traditional energy systems to intelligent integrated complexes. It is determined that existing approaches to the design and operation of ship energy installations do not provide a sufficient level of adaptability and efficiency in conditions of variable operating modes, which limits the possibilities of their modernization.

The purpose of the study is to develop theoretical provisions and practical recommendations for the integration of innovative technologies into ship energy systems to ensure maximum efficiency of their operation. The work uses approaches to formalizing the energy balance of the system taking into account generation, storage, consumption and losses of energy, which allows assessing the efficiency of the operation of the energy infrastructure in dynamic operating conditions.

As a result of the study, a conceptual model of an integrated ship energy infrastructure was developed, which includes subsystems of generation (based on internal combustion engines, fuel cells and renewable energy sources), storage (batteries, supercapacitors), distribution (intelligent energy buses) and energy consumption taking into account the priority of loads. A classification of innovative technologies into hardware, software and hybrid solutions was proposed, which allows systematizing approaches to the modernization of ship energy systems. The features of the implementation of hybrid energy installations, intelligent control systems, digital twins, predictive diagnostics, as well as alternative energy sources, including hydrogen technologies and sailing energy systems, were considered.

The scientific novelty of the results obtained lies in the formation of an integrated approach to the construction of ship energy infrastructures, which, unlike existing ones, takes into account the relationship between all elements of the system and the dynamic nature of their functioning.

The practical significance of the research results lies in the possibility of their use in the design of new and modernization of existing vessels, which ensures increased energy efficiency, reduced operating costs, and reduced negative impact on the environment.

Keywords: transport, water transport, ship power plants, innovations, infrastructure, increasing operational efficiency.

Сандлер А. К., Опришко М. О. Волоконно-оптичний віскозиметр для суднових енергетичних установок

Основними вимогами, що пред'являються до віскозиметрів, є висока точність, надійність, довговічність, стійкість до агресивних середовищ, економичність, здатність видавати сигнал в цифровій формі. Більшість віскозиметрів, що дозволяють вимірювати контрольований параметр, характеризуються дуже складною механічною конструкцією, що створюють великий гідродинамічний опір потоку. Волоконно-оптичні віскозиметри, безсумнівно, мають незаперечні властивості і переваги: відсутність електричних струмів і напруги в чутливій зоні приладу, неприйнятністю до зовнішніх електромагнітних впливів, абсолютну екологічну та пожежевибухонебезпечність. У той же час досконаліх схемотехнічних рішень в області волоконно-оптичних віскозиметрів для контролю рідин до останнього часу не було відомо. Таким чином, розробка і дослідження нового вихрового волоконно-оптичного віскозиметра є актуальною науково-технічною задачею. Аналіз конструкцій відомих вимірювачів в'язкості дозволив конкретизувати вимоги до нового схемотехнічного рішення вимірювального пристрою. Пропонована конструкція віскозиметра відрізняється тим, що основний і контрольний світловоди є по суті одним світловодом, виготовленим з сапфірового скла, коаксіально до якого розташований чутливий світловод. А також в схему вимірювача введена термокомпенсуюча біметалева пластина. Розроблених вимірювальних пристрій забезпечить компенсацію впливу неконтрольованих експлуатаційних факторів на вимірювальний і додатковий канал; захищеність чутливих елементів пристрою; постійність геометрії оптичного каналу в умовах впливу неконтрольованих експлуатаційних факторів; ідентичність розташування основного і додаткового каналів відносно потоку контрольованої рідини; підвищену чутливість і точність приладу. Використання пропонованого віскозиметра, в системах контролю систем мащення дозволить адекватно, достовірно і безпечно оцінювати кількісні показники мастильних матеріалів.

Ключові слова: віскозиметр, світловод, випромінювання

Sandler A., Opryshko M. O. Fiber optic viscometer for ship power plants

The main requirements for viscometers are high accuracy, reliability, durability, resistance to aggressive environments, cost-effectiveness, and the ability to output a signal in digital form. Most flow meters that allow measuring the controlled parameter are characterized by a very complex mechanical design, which creates a large hydrodynamic resistance to the flow. Fiber-optic viscometers undoubtedly have undeniable properties and advantages: the absence of electric currents and voltages in the sensitive zone of the device, insensitivity to external electromagnetic influences, absolute environmental and fire-explosion hazard. At the same time, until recently, there were no perfect circuit solutions in the field of fiber-optic viscometers for controlling liquids. Thus, the development and re-

search of a new vortex fiber-optic viscometer is an urgent scientific and technical task. Analysis of the designs of known viscosity meters allowed to specify the requirements for a new circuit-technical solution of the measuring device. The proposed design of the viscometer differs in that the main and control optical fibers are essentially one optical fiber made of sapphire glass, coaxially to which the sensitive optical fiber is located. Also, a thermally compensating bimetallic plate is introduced into the meter circuit. The developed measuring device will provide: compensation for the influence of uncontrolled operational factors on the measuring and additional channels; protection of the sensitive elements of the device; constancy of the geometry of the optical channel under the influence of uncontrolled operational factors; identity of the location of the main and additional channels relative to the flow of the controlled liquid; increased sensitivity and accuracy of the device. The use of the proposed viscometer in lubrication system control systems will allow for adequate, reliable and safe assessment of the quantitative indicators of lubricants.

Keywords: viscometer, fiber optic, radiation.

Стукаленко О.М., Дулдієр А.П. Ефективність постійного опору фрикціону у здвоєному підвісі суднового вантажопідйомного пристрою при відмові шкентеля під час опускання вантажу

Проаналізовані особливості конструкції суднових вантажопідйомних пристроїв та вимоги Регістра до забезпечення безпеки після відмови елементів їх конструкції. Проведено класифікацію основних типів відомих технічних рішень безпечних здвоєних поліспаствів з різними типами зрівняльних пристроїв для забезпечення утримання вантажу після обриву троса та успішного завершення вантажної операції.

Розроблені математичні моделі процесу утримання вантажу після обриву троса за наявності пружної металокопункції з урахуванням впливу швидкості вантажу та пружної деформації металокопункції в момент обриву шкентеля.

Для суднового мостового крана вантажопідйомністю 20 т виконано чисельне розв'язання отриманих рівнянь руху мас.

Визначені максимальні розрахункові динамічні навантаження на поліспастовий підвіс та металокопункцію після обриву шкентеля здвоєного поліспаства з фрикційним зрівняльним пристроєм.

Встановлено, що максимальні розрахункові динамічні зусилля у металокопункції при використанні постійного опору фрикціону зрівняльного пристрою досягають величин, за яких коефіцієнти динамічності зусиль у металокопункції перевищують регламентований запас її міцності. Для досліджуваної конструкції крана вантажопідйомністю 20 т при утриманні вантажу у процесі підйому максимальне розрахункове навантаження на металокопункцію становить 450 кН, що відповідає коефіцієнту динаміч-

ності 2,25. Для розглянутої конструкції крана коефіцієнт запасу міцності металоконструкції 2.

Ключові слова: судновий вантажопідіймний пристрій; обрив троса; безпечний здвосний поліспаст; утримання вантажу; зрівняльний фрикційний пристрій.

Stukalenko O.M., Duldier O.P. The efficiency of a constant drag of the leveling device in the double-pulley system of a ship's lifting device after breaking the pendant during lowering the load

The design features of ship lifting devices and the requirements of the Register for ensuring safety after failure of their structural elements are analyzed. The classification of the main types of well-known technical solutions safe double tackle, designed to ensure the retention of cargo after breaking the cable and the successful completion of the cargo operation.

Mathematical models of the process of holding the cargo after the break of the pendant in the presence of an elastic metal structure are made taking into account the influence of the speed of the load and the elastic deformation of the metal structure at the time of the break of the pendant.

For a ship bridge crane with a lifting capacity of 20 tons, the obtained equations of mass motion are solved using the Runge-Kutta method.

The maximum calculated dynamic loads on the chain hoist and metal structure after breaking the pendant of the double pulley with the friction leveling device are determined.

It has been established that the maximum calculated dynamic forces in the metal structure using constant drag of the leveling device and working with a load of nominal load capacity reach values at which the dynamic factors of the force in the metal structure exceed the regulated margin of its strength. For the investigated design of the crane with a lifting capacity of 20 tons while holding the load during lifting, the maximum design load on the metal structure is 450 kN, which corresponds to a dynamic coefficient of 2.25. For the considered crane design, the safety factor of the metal structure is 2.

Key words: ship lifting device; cable break; safe double pulley block; cargo retention; leveling friction device.

Фомін О.В., Щербина Ю.В., Мартиненко В.І., Мартиненко Д.І. Комплексний підхід до проектування систем «судно – вагон-цистерна» з оптимізацією режимів роботи суднових енергетичних установок

У статті розглянуто проблему підвищення ефективності мультимодальних перевезень шляхом створення інтегрованих систем «судно – вагон-цистерна». Актуальність дослідження обумовлена необхідністю узгодження роботи водного та залізничного транспорту, а також зниження енерговитрат і екологічного навантаження під час перевалки наливних вантажів. Встано-

влено, що існуючі підходи до проектування таких систем є фрагментарними та не враховують енергетичну взаємодію їх складових.

Метою роботи є розробка комплексного науково обґрунтованого підходу до проектування системи «судно – вагон-цистерна» на основі математичного моделювання з урахуванням оптимізації режимів роботи судових енергетичних установок. Об'єктом дослідження визначено процеси енергетичної та технологічної взаємодії в інтегрованій транспортній системі, а предметом — закономірності формування ефективних режимів роботи енергетичних установок суден.

У роботі проаналізовано сучасні наукові підходи до забезпечення енергоефективності суден, оптимізації їх енергетичних режимів, а також інтеграції екологічних та логістичних факторів у мультимодальних перевезеннях. Виявлено, що більшість досліджень зосереджуються окремо на морському або залізничному транспорті, що обмежує можливості комплексної оптимізації. Обґрунтовано необхідність формування єдиної методології, яка поєднує параметри судових енергетичних установок і характеристик вагонів-цистерн.

Запропоновано розглядати систему «судно – вагон-цистерна» як єдиний техніко-технологічний комплекс, що включає транспортний флот, залізничний компонент, перевантажувальний термінал та систему управління. Визначено основні режими роботи судових енергетичних установок (ходовий, маневровий, вантажний і стоянковий) та їх вплив на загальну ефективність системи. Особливу увагу приділено оптимальному розподілу навантаження між дизель-генераторами з метою мінімізації питомої витрати палива та зниження викидів.

Розроблено математичну модель багатокритеріальної оптимізації, яка враховує економічні, енергетичні та екологічні показники. Показано, що застосування сучасних методів керування, зокрема частотного регулювання насосів, каскадного включення обладнання та синхронізації роботи судових і берегових систем, дозволяє значно підвищити ефективність вантажних операцій. Також доведено доцільність оптимізації графіків подачі вагонів-цистерн із використанням методів планування та кластеризації.

Результати дослідження свідчать, що комплексний підхід до проектування дозволяє зменшити час стоянки суден, знизити витрати палива та підвищити надійність функціонування транспортної системи. Встановлено, що ключовим фактором ефективності є підтримання роботи енергетичних установок у зоні мінімальної питомої витрати палива.

У висновках підкреслено, що запропонована методика створює наукову основу для проектування інтермодальних транспортних систем нового покоління. Практична цінність роботи полягає у можливості її використання при модернізації існуючих та створенні нових перевантажувальних терміналів, а також у розробці інтелектуальних систем управління транспортними процесами. Перспективи подальших досліджень пов'язані з розвитком

адаптивних алгоритмів керування та впровадженням цифрових технологій у сфері мультимодальних перевезень.

Ключові слова: транспорт, залізничний транспорт, водний транспорт, суднові енергетичні установки, вагон-цистерна, оптимізація.

Fomin O.V., Shcherbyna Yu.V., Martynenko V.I., Martynenko D.I. A comprehensive approach to the design of ship-tank car systems with optimization of operating modes of ship power plants

The article considers the problem of increasing the efficiency of multimodal transportation by creating integrated systems "ship - tank car". The relevance of the study is due to the need to coordinate the operation of water and rail transport, as well as reduce energy consumption and environmental load during the transshipment of bulk cargo. It has been established that existing approaches to the design of such systems are fragmentary and do not take into account the energy interaction of their components.

The purpose of the work is to develop a comprehensive scientifically sound approach to the design of the "ship - tank car" system based on mathematical modeling, taking into account the optimization of the operating modes of ship power plants. The object of the study is the processes of energy and technological interaction in the integrated transport system, and the subject is the regularities of the formation of effective operating modes of ship power plants.

The work analyzes modern scientific approaches to ensuring the energy efficiency of ships, optimizing their energy modes, as well as the integration of environmental and logistical factors in multimodal transportation. It was found that most studies focus separately on sea or rail transport, which limits the possibilities of complex optimization. The need to form a single methodology that combines the parameters of ship power plants and the characteristics of tank cars is substantiated.

It is proposed to consider the "ship - tank car" system as a single technical and technological complex that includes the transport fleet, railway component, transshipment terminal and control system. The main operating modes of ship power plants (running, shunting, cargo and parking) and their impact on the overall efficiency of the system are determined. Special attention is paid to the optimal load distribution between diesel generators in order to minimize specific fuel consumption and reduce emissions.

A mathematical model of multi-criteria optimization is developed that takes into account economic, energy and environmental indicators. It is shown that the use of modern control methods, in particular frequency control of pumps, cascade switching of equipment and synchronization of ship and shore systems, allows to significantly increase the efficiency of cargo operations. The feasibility of optimizing tank car supply schedules using planning and clustering methods has also been proven.

The results of the study indicate that an integrated approach to design allows to reduce the time of vessel parking, reduce fuel consumption and increase the reliability of the transport system. It has been established that the key factor of efficiency is maintaining the operation of power plants in the zone of minimum specific fuel consumption.

The conclusions emphasize that the proposed methodology creates a scientific basis for the design of new generation intermodal transport systems. The practical value of the work lies in the possibility of its use in the modernization of existing and creation of new transshipment terminals, as well as in the development of intelligent transport process management systems. Prospects for further research are related to the development of adaptive control algorithms and the introduction of digital technologies in the field of multimodal transportation.

Keywords: transport, rail transport, water transport, ship power plants, tank car, optimization.

Vychuzhanin V.V., Vychuzhanin A.V. Dynamic failure risk assessment in ship power plants using cognitive digital twins

This paper addresses the critical problem of ensuring the operational reliability of complex technical systems (CTSs), using ship power plants (SPP) as a primary example. The authors have identified significant limitations in traditional risk analysis methods, such as FMEA and FTA, including their static nature, binary evaluation logic, and lack of real-time sensor data processing capabilities. As a solution, the concept of a "Cognitive Digital Twin" is proposed, which integrates Digital Twin (DT) technology with Cognitive Simulation Modeling (CSM). The scientific novelty of this research lies in the development of an algorithm for the dynamic recalculation of system graph weight coefficients based on incoming telemetry, enabling the transformation of a static topological scheme into an adaptive predictive model. The study provides a detailed description of the Destructive Modeling Impulse (DMI) mechanism and the mathematical apparatus for diagnostic parameter normalization using non-linear activation functions. The practical implementation of the method was carried out in Python, utilizing structured JSON interfaces to ensure data interoperability. The proposed method was tested on a 25-node graph of an SPP fuel system. The simulation results allowed for a quantitative assessment of structural and functional risks according to the Harrington desirability scale. It was established that the most critical nodes are the main engine (risk of 0.98) and the circulation tank (risk of 0.91), which exceed the emergency threshold by 45 %. The results demonstrate that the system provides a response time within 50–100 ms, allowing for the identification of "hidden risk zones" prior to the occurrence of a failure. The application of this developed approach establishes a foundation for the transition to condition-based maintenance (CBM) and can be integrated into the decision support systems of autonomous vessels.

Keywords: Digital Twin, cognitive simulation, risk assessment, ship power plant, fuel system, impulse modeling, reliability, predictive maintenance, Harrington scale, Python.

Вичужанін В.В., Вичужанін А.В. Динамічна оцінка ризику відмови в судових енергетичних установках із використанням когнітивних цифрових двійників

У статті розглядається критична проблема забезпечення експлуатаційної надійності складних технічних систем на прикладі судових енергетичних установок (СЕУ). Автори виявили суттєві обмеження традиційних методів аналізу ризиків, таких як FMEA та FTA, включаючи їхню статичність, бінарну логіку оцінювання та відсутність можливості обробки даних датчиків у режимі реального часу. Як рішення пропонується концепція «когнітивного цифрового двійника», яка інтегрує технологію цифрових двійників (DT) із когнітивним імітаційним моделюванням (CSM). Наукова новизна цього дослідження полягає в розробці алгоритму динамічного перерахунку вагових коефіцієнтів графа системи на основі вхідної телеметрії, що дозволяє трансформувати статичну топологічну схему в адаптивну прогностичну модель. Дослідження містить детальний опис механізму деструктивного моделюючого імпульсу (DMI) та математичного апарату для нормалізації діагностичних параметрів з використанням нелінійних функцій активації. Практична реалізація методу була виконана мовою Python з використанням структурованих JSON-інтерфейсів для забезпечення інтероперабельності даних. Запропонований метод був протестований на графі паливної системи СЕУ, що складається з 25 вузлів. Результати моделювання дозволили провести кількісну оцінку структурних та функціональних ризиків за шкалою бажаності Харрінгтона. Встановлено, що найбільш критичними вузлами є головний двигун (ризик 0,98) та циркуляційна цистерна (ризик 0,91), що на 45 % перевищує аварійний поріг. Результати демонструють, що система забезпечує час відгуку в межах 50...100 мс, дозволяючи ідентифікувати «приховані зони ризику» до моменту виникнення відмови. Застосування розробленого підходу створює підґрунтя для переходу до технічного обслуговування за станом (CBM) і може бути інтегроване в системи підтримки прийняття рішень автономних суден.

Ключові слова: цифровий двійник, когнітивне моделювання, оцінка ризику, суднова енергетична установка, паливна система, імпульсне моделювання, надійність, предиктивне обслуговування, шкала Харрінгтона, Python.

Zhuravlov Yu.I., Bogach V. M. Prediction of the onset of fatigue failure of ship propeller shafts

The article demonstrates that most ship structural components operate under cyclic loading, which creates favorable conditions for the development of fatigue cracks. Restoration, repair, and replacement of these components, particularly

those in the underwater section, are performed only after the ship is decommissioned.

For example, failures of ship propeller lines cause damages many times greater than the cost of the shaft. They can entail vessel downtime costs and loss of operating profits; repair (dock) costs; replacement of the shafts themselves; and, in some cases, lost propellers.

Failures of this kind can affect the ship's controllability and, under certain conditions, lead to the loss of the vessel. Therefore, ensuring the strength of propeller shafts is essential for reducing accidents at sea.

Given the contact of the propeller shaft with seawater, propeller shaft liners (jackets) are used to protect against corrosion and reduce the coefficient of friction. These liners are metal cylinders tightly fitted to the shaft journals. When exposed to seawater, the propeller shaft surface is subject to severe corrosion. The identified causes of propeller shaft damage indicate that the majority of the damage (over 60% of cases) is due to fatigue and corrosion fatigue of the propeller shafts.

Therefore, predicting the onset of fatigue failure of marine propeller shafts is a relevant issue in the operation of marine technical components.

The study revealed that fatigue and corrosion are the main causes of damage to ship propeller shafts, with the primary damage sites being the propeller seat cone and the keyway area.

A computational model for the initial stage of fatigue failure has been developed, allowing for the duration of the initial stage of fatigue failure of a propeller shaft to be determined and the time when scheduled replacement is required. It has been established that the specific elastic deformation energy accumulated per unit length of the resulting crack is a constant value, independent of the level of applied stresses.

Keywords: cyclic loading, fatigue cracks, fatigue failure, elastic deformation, energy criteria, surface wear.

Журавльов Ю.І., Богач В.М. Прогнозування початку втомного руйнування суднових гребних валів.

У статті показано, що більшість конструктивних елементів судна працює в умовах циклічного навантаження, що створює сприятливі умови для розвитку тріщин втоми. Відновлення, ремонт та заміна цих елементів, особливо щодо підводної частини судна, виробляють лише після виведення судна з експлуатації.

Наприклад, поломки суднових валопроводів завдають шкоди, що у багато разів перевищує вартість валу. Вони можуть спричинити витрати по простоя судна і втрати експлуатаційного прибутку; витрати на ремонт (докування) судна; заміну самих валів, а деяких випадках і загублених гребних гвинтів.

Такі поломки можуть вплинути на керуваність судна і за певних умов призвести до загибелі судна. Ось чому забезпечення міцності валів гребних має важливе значення для зменшення аварійності суден на морі.

Враховуючи контакт гребного валу з морською водою для захисту від корозії та зменшення коефіцієнта тертя використовують облицювання (сорочки) гребних валів, які є щільно насаджені на шийки валу металеві циліндри.

При дії забортної води поверхня гребного валу схильна до сильної корозії. Виявлені причини пошкоджень гребних валів показують, що більшість ушкоджень (понад 60% випадків) стали наслідком втоми та корозійної втоми гребних валів.

Ось чому прогнозування початку втомного руйнування суднових гребних валів є актуальним завданням експлуатації деталей суднових технічних засобів.

В результаті дослідження встановлено, що причинами пошкодження гребних валів судів є втома та корозійні руйнування, при цьому основні місця пошкоджень - посадковий конус гребного гвинта та район паза шпо-ни.

Розроблено розрахункову модель початкової стадії втомного руйнування, яка дозволяє визначити тривалість початкової стадії втомного руйнування гребного валу та визначити момент необхідності його планової заміни.

Встановлено, що величина питомої енергії пружної деформації, накопичена на одиницю довжини тріщини, що утворилася, є величиною постійної, незалежної від рівня діючих напруг,

Ключові слова: циклічне навантаження, втомні тріщини, руйнування втоми, пружна деформація, енергетичні критерії, знос поверхонь.

ПРАВИЛА ОФОРМЛЕННЯ І ПОДАННЯ РУКОПИСІВ ДЛЯ ЗБІРНИКА «СУДНОВІ ЕНЕРГЕТИЧНІ УСТАНОВКИ»

Науково-технічний збірник національного університету «Одеська морська академія» «Суднові енергетичні установки» є науковим виданням, в якому можуть публікуватись основні результати дисертаційних робіт зі спеціальностей 271 «Морський та внутрішній водний транспорт» та 275 «Транспортні технології (за видами)».

Стаття повинна відповідати правилам оформлення наукових статей і містити постановку проблеми в загальному вигляді та її зв'язок з важливими науковими або практичними завданнями, аналіз останніх досліджень і публікацій за темою статті, формулювання цілей статті (постановку завдання), виклад основного матеріалу з необхідними обґрунтуваннями, висновки та перспективи подальших досліджень.

Рукопис подається на електронному носії у форматі *.doc з паперовою копією і рефератами на українській та англійській мовах, підписаною всіма авторами, з контактною інформацією: адреси, телефони. Обсяг статті — до 0,5 авторського аркуша з урахуванням ілюстрацій, підписункових підписів і реферату.

Реферат двома мовами – українською та англійською – наводиться наприкінці рукопису та повинен містити: ФІО авторів, назву статті, скорочений зміст та ключові слова. Обсяг реферату кожною мовою повинен складати не менше 1800 знаків (з пробелами), включаючи ключові слова.

Формат паперу А5 (148×210) Усі поля — 16 мм. Текст - через 1 інтервал, Times New Roman, 11 пт; таблиці, заголовки таблиць, підписункові підписи — 10 пт.

На першій сторінці рукопису повинні бути вказані наступні елементи: ФІО авторів; найменування закладу, в якому виконувалася робота; назва статті. Заголовок статті оформляти за стилем Заголовок 1, кегль 11 пт, без переносу слів, усі прописні.

При необхідності робиться перенос тексту, але не в заголовку статті.

Усі формули повинні бути набрані в Mathtype. Змінні, функції, вектори, матриці і т.п. оформляються латинським шрифтом. Змінні виконуються похилим шрифтом, вектори — напівжирним, без нахилу; грецькі символи — у всіх випадках без нахилу; індекси: латинські — з нахилом, кириличні — без нахилу. Розміри в Mathtype: основ-

ний — 11 пт, збільшений — 16,5 пт, індекс — 7 пт, субіндекс — 6 пт. Нумеруються тільки ті формули, на які є посилання в тексті. Формули відділяються від тексту рядками висотою 2 пт. Одиниці фізичних величин повинні відповідати ДСТУ 3651.0-97, ДСТУ 3651.1-97, ДСТУ 3651.2-97 "Метрологія. Одиниці фізичних величин" і мати загальноприйняті позначення.

Таблиці слід розташовувати на одній сторінці крім випадків, коли таблиця займає більше 1 сторінки. Заголовок — 10 пт, без переносу, інтервал перед — 8 пт, після — 2 пт, основний шрифт таблиці — 10 пт.

Рисунки відділяються від тексту зверху інтервалом 8 пт, від назви — 2 пт. Назва рисунку — кегль 10 пт, без переносу, інтервал після — 8 пт. На всі таблиці і рисунки повинні бути посилання в тексті статті у скороченому вигляді (рис., табл.).

Ілюстрації, які підготовлені в графічних редакторах, додаються в якості окремих файлів у вихідному форматі. Розмір написів повинен забезпечувати їхню читаність (8-10 пт).

Посилання на літературні джерела у тексті оформлюються у квадратних дужках з вказанням номера джерела.

Бібліографічний опис оформлюється з урахуванням Національного стандарту України ДСТУ 8302:2015 «Інформація та документація. Бібліографічне посилання. Загальні положення та правила складання».

Приклад оформлення списку літератури наведено нижче:

Книги одного, двох або трьох авторів

Заблоцький Ю.В., Сагін С.В. Робочий цикл судових двигунів внутрішнього згоряння. Теорія та розрахунок основних параметрів: навчальний посібник. Одеса: НУ «ОМА», 2018. 108 с.

Книги чотирьох і більше авторів

Колегаєв М.О., Парменова Д.Г., Мамкічев М.А., Ніколаєва Г.В., Розлуцький О.М., Роман Г.Г., Сваричевська А.П., Осадчук Д.Д. Безпека та охорона на морі: навчальний посібник. Одеса: Фенікс, 2020. 832 с.

або

Безпека та охорона на морі: навчальний посібник / М.О. Колегаєв та ін. Одеса: Фенікс, 2020. 832 с.

Стаття у періодичному виданні, розділ книги

Сагін С.В., Столярик Т.О. Аналіз експлуатаційних характеристик моторних мастил судових дизелів. *Суднові енергетичні установки.*

2021. Вип. 43. С. 69-80. <https://doi.org/10.31653/smf343.2021.69-80>.

Shestopalov K., Khliyeva O., Ierin V., Konstantinov O., Khliiev N., Neng G., Kozminykh M. Novel marine ejector-compression waste heat-driven refrigeration system: technical possibilities and environmental advantages. *International Journal of Refrigeration*. 2024. Vol. 158. P. 202-215. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2023.11.015>

Праці конференції

Голіков В.А., Данілов К.С., Сінюта К.О. Експлуатація і ремонт транспортних засобів морського та річкового флоту. *Науково-техн. конф. «Морський та річковий флот: експлуатація і ремонт»*, Одеса, 22-23 березня 2023 р. Одеса: НУ "ОМА". С. 10-13.

Дисертації

Будашко В. В. Підвищення ефективності функціонування суднових енергетичних установок комбінованих пропульсивних комплексів: дис. д-ра техн. наук: 05.22.20. Одеса, 2017. 422 с.

Законодавча та нормативна документація, стандарти

Міжнародна конвенція про підготовку і дипломування моряків та несення вахти 1978 року (консолідований текст з манільськими поправками). К.: ВПК «Експрес-Поліграф», 2012. 568 с.

ДСТУ 7152:2010 (ISO 8:2019, NEQ; ISO 18:1981, NEQ; ISO 215:1986, NEQ). Видання. Оформлення публікацій у журналах і збірниках. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2020. 11 с. (Інформація та документація)

Електронні ресурси

Marine Environment Protection Committee progress on GHG Strategy and next set of GHG reduction measures, adopts SOx control area. *International Maritime Organisation*: website. URL: <https://www.imo.org/en/MediaCentre/PressBriefings/pages/MEPC-79.aspx> (date: 01.12.2023)

Про освіту: Закон України від 01.07.2014 р. № 1556-VII. Дата оновлення: 28.09.2018. URL:<http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/1556-18> (дата звернення: 15.11.2018).

Контактна інформація - e-mail: ivanovich1zh@gmail.com

Суднові енергетичні установки:
науково-технічний збірник.
Випуск 52.

Підписано до друку 30.04.2026. Формат 60×84/16.
Ум. друк. арк. 11,20. Наклад 100. Зам. № И12-12 52.

НУОМА, центр „Видавінформ”
Свідчення ДК № 1292 від 20.03.2003
65029, м. Одеса, вул. Дидрихсона, 8
тел./факс: 048-234-14-12
publish@ma.odessa.ua