

ISSN-print 2313-4763
ISSN-online 3041-1939

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХЕРСОНСЬКА ДЕРЖАВНА МОРСЬКА АКАДЕМІЯ

НАУКОВИЙ ВІСНИК
ХЕРСОНСЬКОЇ ДЕРЖАВНОЇ МОРСЬКОЇ АКАДЕМІЇ

Науковий журнал

Виходить двічі на рік

№ 1 (32)

Видається з 2009 року

Херсон
2026

Науковий вісник Херсонської державної морської академії : науковий журнал. – Херсон : Херсонська державна морська академія, 2026. № 1 (32). – 198 с.

Засновник і видавець – Херсонська державна морська академія

*Рекомендовано до друку на засіданні Вченої ради Херсонської державної морської академії
(протокол № 13 від 28.05.2026 р.)*

РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ:

Головний редактор – **Бень Андрій Павлович**, доктор наук, професор, проректор з науково-педагогічної роботи, Херсонська державна морська академія, Україна.

Зінченко Сергій Миколайович, доктор наук, доцент, професор кафедри навігації та управління судном, Херсонська державна морська академія, Україна.

Букетов Андрій Вікторович, доктор наук, професор, завідувач кафедри транспортних технологій та механічної інженерії, Херсонська державна морська академія, Україна.

Сапронов Олександр Олександрович, доктор наук, професор, професор кафедри транспортних технологій та механічної інженерії, Херсонська державна морська академія, Україна.

Піпченко Олександр Дмитрович, доктор наук, доцент, професор, Національний університет «Одеська морська академія», Україна.

Носов Павло Сергійович, кандидат наук, доцент, завідувач кафедри технічної кібернетики й інформаційних технологій ім. проф. Р. В. Меркта, Одеський національний морський університет, Україна.

Žaglinskis Justas, PhD, Associate professor, Director VILNIUS TECH Lithuanian Maritime Academy, Lithuania.

Онищенко Олег Анатолійович, доктор наук, професор, професор кафедри управління судном Національний університет «Одеська морська академія», Україна.

Шевченко Валерій Анатолійович, доктор наук, доцент, завідувач кафедри Центру підготовки та атестації плавскладу, Національний університет «Одеська морська академія», Україна.

Мельник Олексій Миколайович, доктор наук, професор, завідувач кафедри судноводіння і морської безпеки, Одеський національний морський університет, Україна.

Maskeliūnaitė Lijana, PhD, Associate professor, Faculty of Transport Engineering, VILNIUS TECH, Lithuania.

González Almeida José Agustín, Doctor Sc., Professor Universidad de La Laguna, Spain.

Lukauskas Valdas, PhD, Associate professor, VILNIUS TECH Lithuanian Maritime Academy, Lithuania.

Belev Blagovest, PhD, professor, Nikola Vaptsarov Naval Academy, Bulgaria.

Адреса редакційної колегії: 73003, м. Херсон, просп. Незалежності, 20, тел.: (0552) 22-35-69, email: journalnvksma@gmail.com. Ідентифікатор медіа R30-03323 (рішення Національної ради України з питань телебачення та радіомовлення від 21.03.2024 №853). ЄДРПОУ 35219930.

Журнал внесено до Переліку наукових фахових видань України категорії «Б» (Наказ МОН України № 928 від 11.06.2026 р.)

Журнал індексується українською загальнодержавною реферативною базою даних «**Україніка наукова**», міжнародною реферативною базою даних **Google Scholar**, міжнародною наукометричною базою **Researchbib**, представлений у **Науковій електронній бібліотеці Національної бібліотеки України імені В. І. Вернадського**, міжнародній реферативній базі даних **Crossref**.

ISSN-print 2313-4763
ISSN-online 3041-1939

MINISTRY OF EDUCATION AND SCIENCE OF UKRAINE
KHERSON STATE MARITIME ACADEMY

SCIENTIFIC BULLETIN
KHERSON STATE MARITIME ACADEMY

Science journal

Published twice a year

№ 1 (32)

Issued from 2009

Kherson
2026

Founder and publisher – Kherson State Maritime Academy

*Recommended to the publishing in a panel session of Kherson State Maritime Academy Academic Board
(minutes of the panel session № 13 from 28.05.2026)*

EDITORIAL STAFF:

Editor-in-Chief – **Ben Andrii Pavlovych**, Doctor Sc., Professor, Vice-Rector for Research, Kherson State Maritime Academy, Ukraine.

Zinchenko Serhii Mykolaiovych, Doctor Sc., Associate professor, Professor of the Department of Navigation and Ship Handling, Kherson State Maritime Academy, Ukraine.

Buketov Andrii Viktorovich, Doctor Sc., Professor, Head of the Department of Transport Technologies and Mechanical Engineering, Kherson State Maritime Academy, Ukraine.

Sapronov Oleksandr Oleksandrovych, Doctor Sc., Professor, Professor of the Department of Transport Technologies and Mechanical Engineering, Kherson State Maritime Academy, Ukraine.

Pipchenko Oleksandr Dmytrovych, Doctor Sc., Professor, National University “Odesa Maritime Academy”, Ukraine.

Nosov Pavlo Serhiiovych, PhD, Associate Professor, Head of the Department of Technical Cybernetics and Information Technologies named after Prof. R. V. Merkt, Odesa National Maritime University, Ukraine.

Žaglinskis Justas, PhD, Associate Professor, Director of VILNIUS TECH Lithuanian Maritime Academy, Lithuania.

Onyshchenko Oleh Anatoliiovych, Doctor Sc., Professor of the Department of Ship Handling, National University “Odesa Maritime Academy”, Ukraine.

Shevchenko Valerii Anatoliiovych, Doctor Sc., Associate Professor, Head of the Department of the Center for Training and Certification of Seafarers, National University “Odesa Maritime Academy”, Ukraine.

Melnyk Oleksii Mykolaiovych, Doctor Sc., Professor, Head of the Department of Navigation and Maritime Safety, Odesa National Maritime University, Ukraine.

Maskeliūnaitė Lijana, PhD, Associate Professor, Faculty of Transport Engineering, VILNIUS TECH, Lithuania.

González Almeida José Agustín, Doctor Sc., Professor, Universidad de La Laguna, Spain.

Lukauskas Valdas, PhD, Associate Professor, VILNIUS TECH Lithuanian Maritime Academy, Lithuania.

Belev Blagovest, PhD, Professor, Nikola Vaptsarov Naval Academy, Bulgaria.

Address of the editorial board: 73003, Nezalezhnosti avenue, 20, Kherson city, Phone: (0552) 22-35-69, email: journalnvksma@gmail.com. Media identifier R30-03323 (decision of the National Council of Ukraine on Television and Radio Broadcasting dated 03/21/2024 No. 853). ЄДРПОУ 35219930.

The journal has been brought into the list of scientific professional editions of Ukraine of category “B” (the Order of the Ministry of Education and Science of Ukraine № 928 from 11.06.2026).

The journal is being indexed by Ukrainian national abstract database «**Ukrainika Scientific**», international abstract database **Google Scholar**, international scientometric database **Researchbib**, presented at the **Scientific E-library of Vernadsky National Library of Ukraine**, international fulltext scientific database **Crossref**.

ІНЖЕНЕРІЯ У ТРАНСПОРТНІЙ ГАЛУЗІ
ENGINEERING IN TRANSPORT INDUSTRY

ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ СОПЛОВОГО КІЛЬЦЯ ТУРБОНАГНІТАЧА ДВОПАЛИВНОГО СУДНОВОГО ДИЗЕЛЯ НА ОСНОВІ ТЕРМОМЕХАНІЧНОГО ТА ГАЗОДИНАМІЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ

Баловнєв А. І., магістр з експлуатації суднових енергетичних установок EUROCREW Manning Agency, вахтовий механік, м. Одеса, Україна, e-mail: a.balovniev@gmail.com, ORCID: 0009-0002-5224-2880;

Врублевський Р. Є., к.т.н., доцент, доцент кафедри експлуатації суднових енергетичних систем Херсонської державної морської академії, м. Херсон, Україна, e-mail: amor-vr@ukr.net, ORCID: 0000-0001-8686-3488;

Левінський М. В., к.т.н., доцент, доцент кафедри «Теорії автоматичного управління та обчислювальної техніки» Національного університету «Одеська морська академія», м. Одеса, Україна, e-mail: maxlevinskiy@gmail.com, ORCID: 0000-0002-6544-5110;

Нікольський М. В., к.т.н., старший механік, LSCgroup, м. Рига, Латвія, e-mail: markdezert@ukr.net, ORCID: 0000-0002-3387-7402;

Нікольський В. В., д.т.н., професор, професор кафедри технічної експлуатації флоту Національного університету «Одеська морська академія», м. Одеса, Україна, e-mail: prof.nikolskiy@ukr.net, ORCID: 0000-0002-8123-4233;

Слободянюк М. В., к.т.н., доцент, старший викладач кафедри корабельної енергетики Інституту Військово-Морських Сил Національного університету «Одеська морська академія», м. Одеса, України, e-mail: nikgavr1234@gmail.com, ORCID: 0000-0003-2248-0255.

Стаття присвячена підвищенню надійності соплового кільця турбонагнітача Napier NT1-10 двопаливного суднового дизеля Wärtsilä W6L34DF у складі енергетичної установки танкера-газовоза. Актуальність дослідження зумовлена широким поширенням двопаливних середньообертових дизелів типу DF на судах для перевезення скрапленого газу, а також значною частотою відмов соплового кільця турбонагнітача, спричинених термомеханічними навантаженнями та твердочастинковою ерозією. Методологічну основу дослідження становлять тривимірне геометричне моделювання в середовищі AutoCAD та чисельне моделювання за допомогою хмарної CAE-платформи SimScale: CFD-аналіз (OpenFOAM) для оцінки газодинамічних процесів у проточній частині та метод скінченних елементів (Code Aster) для аналізу статичних і термомеханічних напружень. Результати моделювання показали, що зони максимальних напружень концентруються у місцях переходу «лопатка–корінь» та «корпус–опора». На основі виявлених закономірностей запропоновано модернізовану конструкцію: введено округлені геометричні переходи (галтелі) у критичних зонах, що дало змогу значно знизити пікові концентрації термомеханічних напружень і зменшити ризик зародження втомних тріщин без зміни газодинамічних характеристик потоку та схеми кріплення елемента. Висновки: запропонований комплексний підхід – поєднання 3D-моделювання, CFD та структурного аналізу – забезпечує надійну оцінку ресурсу і може бути застосований для вдосконалення інших елементів суднових енергетичних установок.

Ключові слова: двопаливний дизель; турбонаддування; надійність; соплове кільце; обчислювальна гідрогазодинаміка; CFD-моделювання; SimScale; Wärtsilä W6L34DF.

DOI: 10.33815/2313-4763.2026.1.32.006-019

Вступ. Сучасний розвиток морського транспорту супроводжується посиленням екологічних вимог та необхідністю підвищення енергоефективності суднових енергетичних установок. У цьому контексті двопаливні середньообертові дизелі типу DF компанії Wärtsilä набули широкого застосування на судах для перевезення скрапленого природного газу (LNG), оскільки забезпечують зниження викидів оксидів азоту та вуглекислого газу. Водночас забезпечення їх надійної та безперебійної роботи є критично важливим фактором безпеки судноплавства та економічної ефективності експлуатації суден [1, 2].

Практика експлуатації двопаливних дизелів у газовому режимі роботи свідчить про підвищену частоту відмов елементів системи турбонаддування, зокрема соплового кільця турбінної частини турбонагнітача.

У дослідженні основну увагу приділено роботі двигуна у газовому режимі при номінальному навантаженні, що є характерним для експлуатації LNG-танкерів.

Соплове кільце турбінної частини турбонагнітача працює в умовах інтенсивних термомеханічних навантажень, включаючи високі температури вихлопних газів (500–630 °C), значні градієнти температур, пульсації тиску та вплив твердочастинкової ерозії (Solid Particle Erosion, SPE). Згідно з результатами аналізу відмов методом Fault Tree Analysis, ерозійні та забруднювальні процеси турбінної частини є одними з основних причин виходу турбонагнітачів з ладу, з імовірністю відмов на рівні 0,08–0,12 [9].

Аналіз наукових джерел показує, що проблематика надійності турбонагнітачів суднових двигунів активно досліджується. Зокрема, у роботах [6, 7] систематизовано типові відмови та їх діагностичні ознаки, а в [9] проведено кількісну оцінку ймовірностей відмов елементів системи турбонаддування. CFD-дослідження газодинамічних процесів у соплових апаратах представлені у [12, 13], тоді як у роботах [16, 17] виконано аналіз міцності та втомної довговічності соплових кілець з урахуванням термомеханічних навантажень і твердочастинкової ерозії.

Водночас більшість існуючих досліджень розглядають газодинамічні та міцнісні аспекти ізольовано, без комплексного врахування взаємодії теплових і механічних навантажень у реальних умовах експлуатації суднових енергетичних установок. Крім того, у науковій літературі практично відсутні роботи, спрямовані на оптимізацію геометрії соплового кільця турбонагнітачів типу Napier NT1-10 для двопаливних двигунів Wärtsilä W6L34DF.

Метою роботи є підвищення надійності соплового кільця турбонагнітача Napier NT1-10 шляхом удосконалення його геометрії на основі комплексного чисельного моделювання.

Для досягнення поставленої мети вирішуються такі задачі: аналіз умов роботи елемента та ідентифікація зон критичних навантажень; розробка та верифікація тривимірної геометричної моделі; проведення CFD-аналізу газодинамічних процесів у проточній частині; виконання термомеханічного аналізу методом скінченних елементів (FEM); розробка та оцінка ефективності модернізованої конструкції.

Наукова новизна роботи полягає у комплексному поєднанні CFD-аналізу та термомеханічного моделювання для оцінки напружено-деформованого стану соплового кільця, виявленні критичних зон концентрації напружень з урахуванням реальних температурних градієнтів, а також обґрунтуванні геометричної модифікації (введення раціональних галтелів), що забезпечує зниження рівня напружень без погіршення газодинамічних характеристик потоку.

З огляду на викладене, для досягнення поставленої мети було обрано об'єкт дослідження, що відповідає типовим умовам експлуатації двопаливних суднових дизелів, та розроблено методологію комплексного чисельного моделювання, яка поєднує CFD-аналіз газодинамічних процесів із термомеханічним аналізом методом скінченних елементів.

Матеріали та методи. Об'єктом дослідження є двопаливний середньообертовий дизель Wärtsilä W6L34DF у складі енергетичної установки танкера-газовоза. Як дослідницький прототип обрано судно MARAN GAS CHIOS (IMO: 9753014) – танкер-газовоз (LNG carrier) типу Segregated Ballast Tanker, побудований у 2019 році на верфі Daewoo Shipbuilding & Marine Engineering (Південна Корея). Допоміжна енергетична установка судна включає два дизель-генератори Wärtsilä W6L34DF потужністю 2880 кВт кожний [3].

Технічні характеристики двигуна W6L34DF: 4-тактний рядний 6-циліндровий двопаливний двигун; діаметр циліндра 340 мм; хід поршня 400 мм; номінальна потужність 2880 кВт при 720 об/хв; викиди у газовому режимі – відповідають IMO Tier III; у дизельному

режимі – IMO Tier II. Система контролю наддуву складається з клапана перепуску вихлопних газів (Waste Gate) та байпасного клапана повітря [3].

Турбонагнітач Napier NT1-10 (Frame FJ, Specification FJA051, серійний номер 712899) конструктивно містить одноступеневу осьову турбіну та відцентровий компресор, об'єднані спільним ротором. Максимальна швидкість обертання – 31200 об/хв, максимальна температура газів на вході – 650 °C.

На основі технічних характеристик обраного об'єкта дослідження сформовано систему граничних умов для чисельного моделювання. Оскільки достовірність результатів CFD- та термомеханічного аналізу безпосередньо залежить від коректності вхідних параметрів, вхідні параметри визначались відповідно до реальних режимів роботи двигуна W6L34DF при 100% навантаженні – з урахуванням особливостей газового режиму двопаливного циклу та характеристик турбонагнітача Napier NT1-10.

Вхідні параметри та граничні умови моделювання. Вхідні параметри для чисельного експерименту визначено відповідно до стендових випробувань двигуна W6L34DF при 100% навантаженні [3]. Температура вихлопних газів перед турбонагнітачем варіює в діапазоні 396–551 °C, середнє значення – близько 508 °C; характерна нерівномірність між циліндрами сягає 155 °C (різниця осереднених за циклом температур вихлопних газів на виході з окремих циліндрів згідно з даними стендових випробувань [3]), що є причиною нерівномірного теплового впливу на конструкцію.

Такий режим з максимальною міжциліндровою нерівномірністю обрано цілеспрямовано як консервативний сценарій навантаження: він відповідає реально зафіксованому стендовим даним виробника [3] і забезпечує оцінку напружено-деформованого стану соплового кільця за найбільш термічно несприятливих умов, що є стандартною практикою при розрахунку на міцність відповідних елементів енергетичних установок.

Масовий потік вихлопних газів для 6L34DF у газовому режимі становить $\dot{m} = 4,58$ кг/с; тиск наддувного повітря – 3,35 бар; частота обертання турбонагнітача – 26 718 об/хв [2]. Статичний тиск на вихідній межі встановлено $P = 1,2 \cdot 10^5$ Па.

Характерне значення числа Рейнольдса становить $Re \approx 1,2 \cdot 10^6$, що відповідає повністю турбулентному режиму течії.

Для моделювання теплообміну склад вихлопних газів дизеля у режимі переважної роботи на метані приведено до еквівалентної моделі CO₂ з метою збереження основних теплофізичних властивостей (з певним спрощенням).

Обґрунтування вибору триатомного газу. Для моделювання потоку вихлопних газів двигуна використано еквівалентну модель на основі CO₂. Вибір обумовлений тим, що CO₂ є одним із основних триатомних компонентів вихлопних газів поряд із H₂O та характеризується теплофізичними властивостями, близькими до властивостей реальної газової суміші за досліджуваних температур. Незважаючи на те, що найбільшу масову частку у складі вихлопних газів становить N₂, саме CO₂ було обрано як розрахунковий газ для забезпечення збереження ключових теплофізичних характеристик середовища, зокрема теплопровідності, динамічної в'язкості та питомої теплоємності, які визначають інтенсивність конвективного теплообміну у проточній частині. За температур вихлопних газів 500–630 °C домінуючим механізмом теплопередачі є конвекція, тоді як внесок радіаційного теплообміну є незначним і в даному дослідженні не враховувався. Проведений аналіз показує, що вплив вибору конкретного газу-еквівалента на результати розрахунку є несуттєвим у межах поставленої задачі. Разом із тим заміна реального багатокомпонентного складу вихлопних газів еквівалентною моделлю на основі CO₂ розглядається як припущення дослідження і потребує подальшої експериментальної верифікації.

CFD-розрахунок виконано у стаціонарній постановці із використанням турбулентної моделі k- ω SST. На вході задано масову витрату (mass flow inlet), на виході – статичний тиск (pressure outlet). Граничні умови на стінках прийняті як adiabatic no-slip.

Параметри матеріалу соплового кільця – жароміцний нікелевий сплав: модуль Юнга $E = 2,05 \cdot 10^{11}$ Па; коефіцієнт Пуассона $\nu = 0,28$; густина $\rho = 8150$ кг/м³; коефіцієнт теплового

розширення $\alpha = 1,25 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$; питома теплоємність $c_p = 435 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{K)}$; теплопровідність $\kappa = 12 \text{ Вт/(м} \cdot \text{K)}$. Модель поведінки матеріалу – лінійно-пружна ізотропна.

Встановлені граничні умови реалізуються в рамках відповідного математичного апарату, що описує фізичні процеси у проточній частині соплового кільця. Для коректного відтворення взаємодії газодинамічних та термомеханічних явищ використовується система диференціальних рівнянь збереження, викладена нижче.

Математична модель. Газодинамічні процеси у проточній частині турбонагнітача описуються системою рівнянь збереження маси та імпульсу [10]. Рівняння нерозривності:

$$\nabla \cdot u = 0.$$

Рівняння імпульсу (Нав'є–Стокса):

$$\rho \cdot (\partial u / \partial t + (u \cdot \nabla) \cdot u) = -\nabla p + \mu \cdot \nabla^2 u + f,$$

де u – вектор швидкості; p – тиск; t – час; ρ – густина; μ – динамічна в'язкість; f – вектор об'ємних сил; ∇ – оператор набла.

Граничні умови теплообміну на поверхні лопатки задаються законом конвективної тепловіддачі (закон Ньютона–Ріхмана):

$$q = h \cdot (T_{\text{газу}} - T_{\text{стілки}})$$

де q – щільність теплового потоку на поверхні, Вт/м^2 ; h – коефіцієнт тепловіддачі, $\text{Вт/(м}^2 \cdot \text{K)}$; $T_{\text{газу}}$ – температура газового потоку; $T_{\text{стілки}}$ – температура поверхні стінки. Значення коефіцієнта тепловіддачі визначається з CFD-розрахунку та передається як граничні умови до термомеханічної моделі.

Статичний структурний аналіз виконується на основі рівняння рівноваги твердого тіла:

$$\nabla \cdot \sigma + b = 0,$$

де σ – тензор напружень; b – вектор об'ємних сил.

Для лінійно-пружного матеріалу використовується закон Гука:

$$\sigma = C : \varepsilon,$$

де σ – тензор напружень; C – тензор пружних констант (тензор жорсткості); ε – тензор деформацій.

Теплові деформації враховуються як:

$$\varepsilon_{th} = \alpha \cdot \Delta T \cdot I$$

де ε_{th} – тензор теплових деформацій; α – коефіцієнт теплового розширення; ΔT – приріст температури; I – одиничний тензор.

Оскільки температури вихлопних газів досягають 550–630 °С, структурний аналіз доповнено термомеханічним [16]. Теплові процеси описуються рівнянням теплопровідності:

$$\rho \cdot c_p \cdot (\partial T / \partial t) - \nabla \cdot (k \cdot \nabla T) = Q$$

де ρ – густина; c_p – питома теплоємність при постійному тиску; T – температура; t – час; k – коефіцієнт теплопровідності; Q – об'ємна потужність теплового джерела; ∇ – оператор набла.

Наведена система рівнянь є теоретичною основою для проведення чисельного експерименту, однак її практична реалізація потребує спеціалізованого програмного середовища та коректно побудованої розрахункової сітки. Точність дискретизації визначальних рівнянь, якість апроксимації криволінійних поверхонь лопаток і достатня щільність сітки у зонах очікуваних концентрацій напружень є ключовими факторами, що забезпечують відповідність чисельного розв'язку реальним фізичним процесам. З огляду на це, вибір програмних засобів та параметрів розрахункової сітки здійснювався цілеспрямовано – з урахуванням специфіки досліджуваної геометрії та характеру термомеханічних навантажень.

Програмне забезпечення та розрахункова сітка. Тривимірна геометрична модель соплового кільця та кутового патрубка розроблена в середовищі AutoCAD на основі натурних вимірів досліджуваного елемента. Чисельне моделювання виконувалось на хмарній САЕ-платформі SimScale з використанням розв'язувачів OpenFOAM (CFD) та Code Aster (FEA), що дозволяє проводити серійні ітераційні симуляції без необхідності у локальних обчислювальних серверах [16]. Розрахункова сітка – гібридна шестигранно-домінантна з базовим розміром комірки 3 мм, загальна кількість елементів – 621 386. Вибір параметрів сітки ґрунтується на компромісі між точністю обчислення градієнтів тиску й температури та доступними обчислювальними ресурсами, з обов'язковим аналізом збіжності (дослідження конвергенції сітки) у зонах криволінійних каналів і кромek лопаток.

Валідація чисельної моделі виконувалась шляхом порівняння отриманих результатів з даними, наведеними у [16, 17], що показало узгодженість у межах 5–10% для ключових параметрів напруженого стану.

Результати валідації чисельної моделі наведено в табл. 1. Порівняння з літературними даними [16] показує, що відхилення ключових параметрів не перевищує 5%, що підтверджує адекватність обраної моделі та граничних умов.

Таблиця 1 – Порівняння результатів моделювання з літературними даними

<i>Параметр</i>	<i>Present study</i>	<i>Reference [16]</i>	<i>Deviation, %</i>
Максимальні напруження (Фон Мізес), МПа	342	360	5,0
Максимальна температура, °C	612	590	3,7

Середнє відхилення становить 4,35%, що знаходиться в межах допустимих похибок CFD-моделювання для турбулентних течій.

Описаний комплекс програмних засобів і параметрів розрахункової сітки забезпечив необхідну підготовку до проведення чисельного експерименту. Отримані результати моделювання розглядаються послідовно: спочатку аналізуються газодинамічні характеристики течії у проточній частині соплового кільця, що є основою для подальшого термомеханічного аналізу.

Результати. Газодинамічний аналіз – поля швидкостей. Візуалізація результатів CFD-розрахунку базової конструкції виявила характерний розподіл швидкостей у проточній частині соплового кільця (рис. 1). Перед входом у лопатки газу мають низьку швидкість і підвищений статичний тиск; у звуженні між лопатками відбувається різке прискорення потоку – формується реактивний струмінь, що перетворює потенційну енергію тиску на кінетичну. Максимальні швидкості спостерігаються на виході з міжлопаткового каналу і відповідають зонам зеленого, жовтого та червоного кольорів на кольоровій карті. Нерівномірність поля швидкостей є закономірним наслідком геометрії профілю лопатки: різна кривизна, змінний радіус і локальні «горла» каналу формують неоднакові швидкісні поля вздовж висоти профілю.

У внутрішніх кутових зонах лопатки зафіксовано локальні рециркуляції та вихрові структури, що відображаються як повільні зони на візуалізації. Їх наявність зумовлена різкою зміною форми каналу та неідеальним кутом входу потоку. Такі зони відриву підвищують аеродинамічні втрати, збільшують турбулентність і сприяють нерівномірному тепловому навантаженню на поверхню матеріалу.

Максимальні швидкості газового потоку на виході з міжлопаткового каналу складають ~300 м/с, що відповідає типовим значенням для соплових апаратів суднових турбонагнітачів [12, 13].

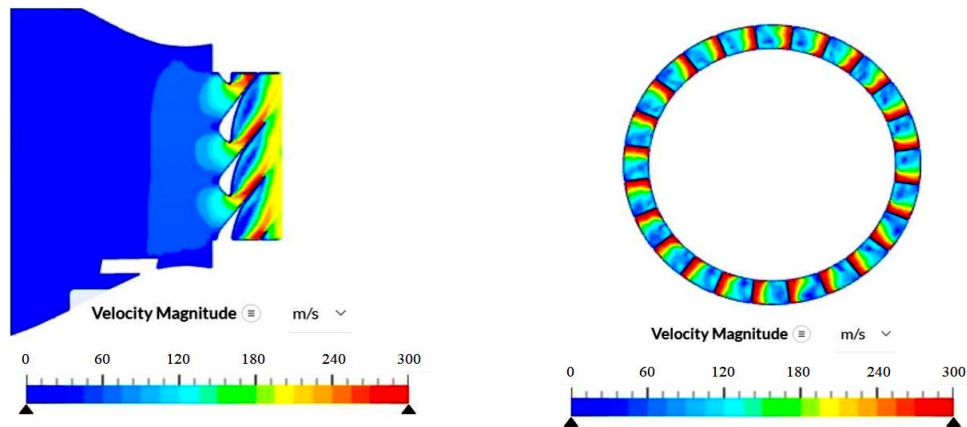


Рисунок 1 – Розподіл швидкостей потоку у міжлопаткових каналах соплового кільця (ліворуч – поздовжній переріз, праворуч – фронтальна площина)

Отримана картина полів швидкостей є необхідною передумовою для інтерпретації розподілу статичного тиску: відповідно до рівняння Бернуллі, зони максимального прискорення потоку відповідають локальним мінімумам статичного тиску, тоді як уповільнення течії у вхідній частині каналу супроводжується його підвищенням. Таким чином, нерівномірність поля швидкостей, зафіксована у підрозділі 3.1, закономірно проявляється у характерному розподілі тиску вздовж профілю лопатки – що і є предметом наступного етапу аналізу.

Розподіл статичного тиску. Аналіз поля тиску виявив різкий перепад між вхідною (лівою) частиною каналу, де тиск є максимальним, та вихідною (правою) зоною, що відповідає заданому статичному тиску на виході. Значення статичного тиску на передній кромці лопатки суттєво перевищує тиск на задній кромці, що створює згинальний момент і підвищені напруження у кореневій зоні профілю (рис. 2).

Значення тиску на рис. 2 представлені в абсолютній шкалі відповідно до граничних умов моделювання. Статичний тиск на вихідній межі встановлено $P_{\text{вих}} = 1,2 \cdot 10^5$ Па (абсолютний), що відповідає умовам після соплового апарату з урахуванням витрат у випускному тракті. Перепад тиску між входом і виходом із міжлопаткового каналу формує прискорення газового потоку та є рушійною силою для турбінного ступеня. Характерний перепад статичного тиску між передньою та задньою кромками лопатки становить за результатами CFD-розрахунку порядку 150–190 кПа, що є фізично обґрунтованим для соплового апарату турбонагнітач при заданому тиску наддуву 3,35 бар.

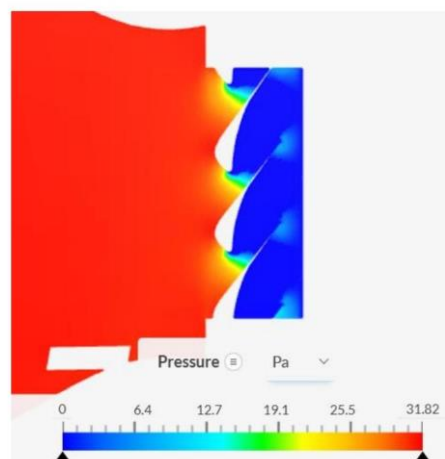


Рисунок 2 – Розподіл статичного тиску на поверхнях лопаток соплового кільця (абсолютний тиск, Па)

Встановлений розподіл статичного тиску слугує вхідними даними для оцінки механічної відповіді конструкції: перепад тиску між передньою та задньою кромками лопатки формує згинальний момент, величина якого визначає рівень статичних напружень у несучих елементах соплового кільця.

Статичний аналіз напружень базової конструкції. За результатами CFD-розрахунку виконано аналіз статичних навантажень, що діють на елементи соплового кільця. Отримані дані свідчать, що навантаження не перевищують допустимих меж для матеріалу конструкції. Профіль лопаток не зазнає критичного згинального моменту від перепаду тисків, а максимальні напруження залишаються нижчими за межу текучості та помітно нижчими за граничні значення термовтоми сплаву (рис. 3).

Для оцінки працездатності конструкції використано критерій еквівалентних напружень за Мізесом. Максимальні еквівалентні напруження становлять $\sigma_{\max} = 342$ МПа, що становить близько 57% від межі текучості матеріалу ($\sigma_y \approx 600$ МПа для жароміцного нікелевого сплаву при робочих температурах), що підтверджує наявність достатнього запасу міцності та відсутність ризику пластичної деформації в умовах експлуатації.

Отримане співвідношення $\sigma_{\max}/\sigma_y < 0,6$ відповідає допустимим критеріям міцності для елементів, що працюють в умовах термоциклічного навантаження.

На рис. 3 представлено розподіл повних переміщень соплового кільця під дією статичних навантажень від перепаду тиску між входом і виходом міжлопаткового каналу. Максимальне переміщення зафіксовано на вихідних кромках лопаток і становить $u_{\max} = 0,01\text{--}0,15$ мм, що є незначним за характерними розмірами елемента. Розподіл переміщень є рівномірним, без локальних концентрацій, які могли б свідчити про потенційні осередки зародження тріщин у режимі статичного навантаження.

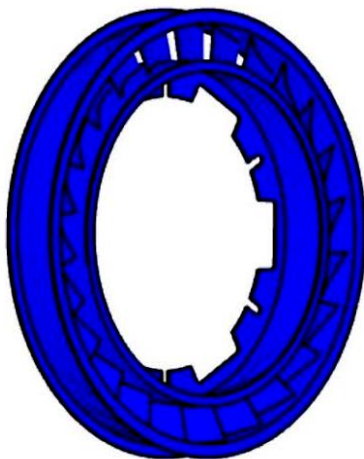


Рисунок 3 – Розподіл повних переміщень соплового кільця під статичними навантаженнями від перепаду тиску (максимальне переміщення $u_{\max} = 0,01\text{--}0,15$ мм)

Попри те, що статичний аналіз не виявив критичних напружень за умов нормального навантаження, він враховує лише механічну складову силового впливу на конструкцію. У реальних умовах експлуатації соплове кільце одночасно зазнає інтенсивного теплового впливу вихлопних газів, що суттєво змінює напружено-деформований стан елемента порівняно з ізотермічним випадком.

Термомеханічний аналіз. Термомеханічний аналіз виконувався відповідно до методики, описаної у [16], із застосуванням реалістичних температурних сценаріїв зі змінним тепловим навантаженням у часі. Значення теплового потоку на внутрішній поверхні соплового кільця змінювалися відповідно до реального термічного режиму: від $225 \cdot 10^3$ Вт/м² у стабільному стані до максимального $q_{\max} = 312 \cdot 10^3$ Вт/м² у момент різкого підвищення навантаження двигуна. Температурні цикли та швидкість нагріву/охолодження прийнято згідно з [16]. Зведені параметри граничних умов та матеріалу моделювання наведено в табл. 2.

Таблиця 2 – Зведені параметри граничних умов та матеріалу моделювання

Параметр	Значення	Джерело
Масова витрата газів $\dot{m}$	4,58 кг/с	[2]
Температура газів (середня)	508 °C	[3]
Тиск на виході	$1,2 \cdot 10^5$ Па	[3]
Кількість елементів сітки	621386	–
Модуль Юнга матеріалу E	$2,05 \cdot 10^{11}$ Па	[16]
Коефіцієнт Пуассона ν	0,28	[16]
Тепловий потік $q_{\max}$	$3,12 \cdot 10^5$ Вт/м ²	[16]

Встановлено, що найбільш різкий температурний градієнт спостерігається на вихідній кромці лопатки соплового кільця (рис. 4). Зазначена зона є критичною з точки зору термовтоми: поєднання швидкого охолодження газовим потоком, пікової температури на вході та локальних змін швидкості зумовлює інтенсивні температурні градієнти. Практична статистика відмов підтверджує, що саме вихідна кромка найчастіше потерпає від мікротріщин, ерозійно-термічних пошкоджень та локальних деформацій [17].

Підвищені термомеханічні напруження зафіксовано також у місцях примикання лопаток до зовнішнього та внутрішнього кільцевих поясів, у вузьких корневих областях переходу профілю в опорну частину, а також по периметру кріплення соплових сегментів до корпусу. Саме ці перехідні геометричні зони характеризуються різким перепадом жорсткості, що сприяє концентрації напружень. Характер розподілу напружень у симуляції повністю збігається з типовими місцями руйнування, зафіксованими в реальному експлуатаційному середовищі [16].

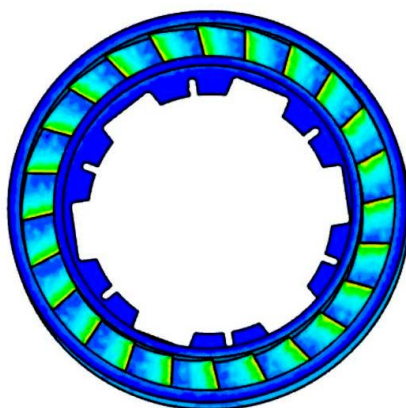


Рисунок 4 – Розподіл температурного градієнта на поверхні лопаток соплового кільця

Проведений термомеханічний аналіз дав змогу не лише кількісно оцінити рівень напружень у досліджуваному елементі, а й чітко локалізувати зони їх максимальної концентрації – перехід «лопатка–корінь», з'єднання «корпус–опора» та вихідні кромки лопаток. Саме ця просторова визначеність критичних зон є ключовою передумовою для розробки адресного конструктивного рішення: замість загального підсилення конструкції або зміни матеріалу, що потребувало б суттєвих технологічних і економічних витрат, стає можливим локальне вдосконалення геометрії елемента у виявлених осередках концентрації напружень. На цій основі запропоновано модернізовану конструкцію соплового кільця, ефективність якої перевірено повторними симуляціями.

Модернізована конструкція соплового кільця. На підставі виявлених закономірностей напружено-деформованого стану запропоновано конструктивні заходи зниження пікових концентрацій напружень у критичних зонах. Ключовим інженерним

рішенням є введення округлених геометричних переходів галтелів з раціонально підібраним радіусом у місцях «лопатка–корінь» та «корпус–опора». Така модифікація зменшує локальні градієнти жорсткості й рівномірно розподіляє напруження по більшій площі поперечного перерізу (рис. 5).

За результатами повторних симуляцій, пікові значення еквівалентних напружень (Фон Мізес) знизилися приблизно на 18–25% у критичних зонах, або зникли повністю, що підтверджує доцільність запропонованого рішення. Важливо, що зміна геометрії не потребує модифікації схеми кріплення елемента чи будь-яких інших компонентів турбоагнітача. Загальна аеродинамічна ефективність соплового каналу при цьому не погіршується, оскільки радіус галтелі обрано з урахуванням аеродинамічних вимог до пропускної здатності каналу [19, 21].

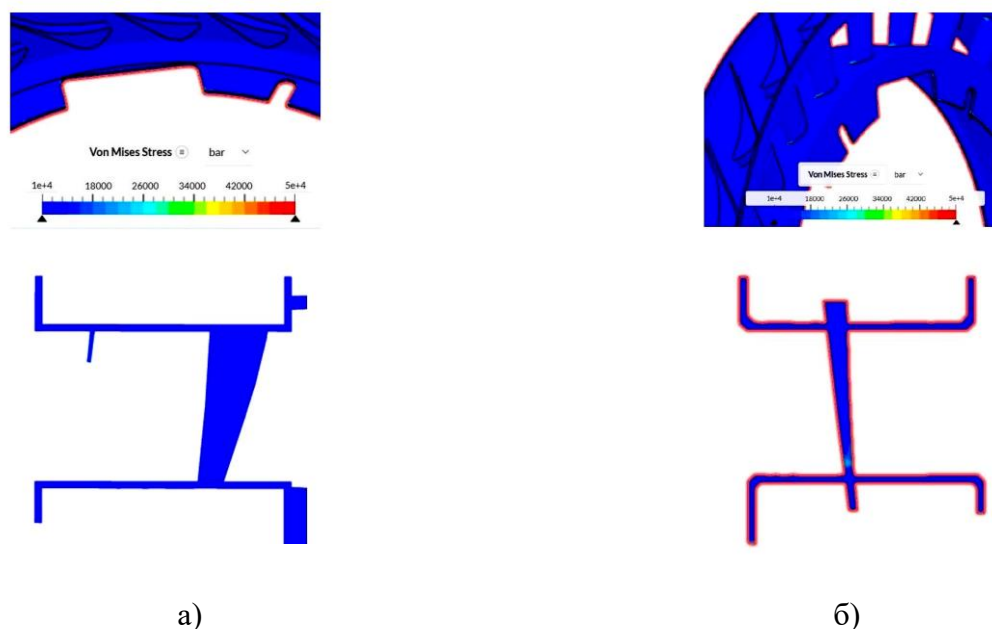


Рисунок 5 – Порівняння розподілу напружень (Фон Мізес):
а) оригінальна конструкція; б) модернізована конструкція з галтелями

Сукупність результатів, отриманих на всіх етапах чисельного моделювання – від газодинамічного аналізу полів швидкостей і тиску до статичного та термомеханічного аналізу напружено-деформованого стану і верифікації модернізованої конструкції – дозволяє перейти до комплексного обговорення виявлених закономірностей. Наступний розділ присвячений інтерпретації отриманих даних у зіставленні з результатами попередніх досліджень, оцінці фізичних механізмів руйнування соплового кільця, обґрунтуванню запропонованого конструктивного рішення, а також визначенню обмежень дослідження та перспективних напрямів його подальшого розвитку.

Обговорення. Отримані результати підтверджують, що основною причиною утворення тріщин у сопловому кільці є сукупна дія нерівномірного теплового поля та механічних навантажень від перепаду тиску. Нерівномірність температур між циліндрами, що досягає 155 °С, призводить до неоднорідного теплового розширення різних секторів кільця, внаслідок чого виникають радіальні та кільцеві напруження – передумова для розвитку радіальних і циркулярних тріщин [16, 20]. Це узгоджується з типовими дефектами, описаними у практиці технічного обслуговування двигунів типу DF.

Стаціонарна постановка CFD-задачі є свідомим спрощенням, прийнятим відповідно до мети дослідження – оцінки середньостатистичного напружено-деформованого стану, а не миттєвих пульсаційних ефектів. Нерівномірність температури між циліндрами (155 °С) враховується через задання осередненого теплового потоку на поверхні соплового кільця, що відповідає консервативному підходу при стаціонарному аналізі. Динамічні ефекти пульсації тиску і температури визначено як напрям подальших досліджень.

Тривале перебування матеріалу за температур 550–630 °С викликає явища високотемпературної повзучості та зниження межі плинності, що є характерним і для нікелевих суперсплавів при циклічних нагріваннях і охолодженнях [22]. Ерозійні пошкодження від твердих частинок золи, що містяться у вихлопних газах, додатково ініціюють зародження мікротріщин на вихідних кромках лопаток [17, 18]. У роботі [16] показано, що при навантаженні двигуна 85% пошкодження від втоми у зоні з'єднання лопатки з кільцем досягають граничного стану – що цілком узгоджується з виявленими в нашому дослідженні зонами максимальних напружень.

Запропоноване рішення – введення галтелів у перехідних зонах – підтримується широкою науково-технічною практикою. Зокрема, Bednar та Misiólek [21] показують, що поверхневе зміцнення та геометрична оптимізація ефективно підвищують опір зародженню втомних тріщин. Водночас для максимальної надійності доцільно розглянути додаткове застосування поверхневих зміцнювальних технологій (дробоструменеве або лазерне шокове зміцнення), що забезпечують формування стиснених залишкових напружень, а також використання гарячого ізостатичного пресування (HIP) при виготовленні нових елементів для підвищення однорідності мікроструктури матеріалу [22].

Обмеженнями дослідження є відсутність експериментальної верифікації на натурному об'єкті та спрощення складу вихлопних газів до еквівалентної моделі CO₂. Подальший розвиток роботи передбачає втомний аналіз методом stress-life, оцінку швидкості ерозії за допомогою CFD-моделювання траєкторій частинок золи, а також оцінку ефективності різних захисних покриттів.

Проведене обговорення підтверджує достовірність отриманих результатів та інженерну обґрунтованість запропонованого рішення. Узагальнення виявлених закономірностей і оцінка досягнутих ефектів дозволяють сформулювати основні висновки дослідження.

Висновки. Проведено комплексний аналіз умов роботи соплового кільця турбоагнітача Napier NT1-10 двопаливного суднового дизеля Wärtsilä W6L34DF методами обчислювальної гідрогазодинаміки та скінчених елементів. Встановлено, що зони максимальних термомеханічних напружень концентруються у місцях переходу «лопатка–корінь» та «корпус–опора», а також на вихідних кромках лопаток, які є основними осередками зародження втомних тріщин в умовах реальної експлуатації.

Запропоновано модернізовану конструкцію соплового кільця з введенням округлених переходів у критичних зонах. Повторні симуляції підтвердили суттєве зниження пікових концентрацій напружень без погіршення газодинамічних характеристик потоку та без змін у схемі кріплення елемента.

Застосований підхід – поєднання 3D-геометричного моделювання у AutoCAD, CFD-аналізу та термомеханічного аналізу у хмарній платформі SimScale – забезпечує комплексну оцінку ресурсу конструкції і може бути використаний для вдосконалення інших елементів судових енергетичних установок.

Подальші дослідження будуть спрямовані на експериментальну перевірку отриманих результатів та врахування багатокомпонентного складу вихлопних газів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Hristov D. Dual-Fuel Four-Stroke Lean-Burn Engine Supercharging System: Operational Features. MTM – Marine Technology and Management 2022. <https://stumejournals.com/journals/mtm/2022/8/263.full.pdf>.
2. Stoumpos S., Theotokatos G., Boulougouris E., Vassalos D., Lazakis I., Livanos G. Marine dual-fuel engine modelling and parametric investigation of engine settings effect on performance–emissions trade-offs. Ocean Engineering 2018. https://strathprints.strath.ac.uk/63557/1/Stoumpos_etal_OE_2018_Marine_dual_fuel_engine_modelling_and_parametric_investigation_of_engine_settings_effect.pdf.
3. Wärtsilä Corporation. Wärtsilä W6L34DF Dual-Fuel Engine – Product Guide / Technical Manual. Wärtsilä, Vaasa, Finland, 2019. <https://www.wartsila.com/products/marine-oil-gas/engines-generating-sets/dual-fuel-engines/wartsila-34df>.
4. Li H., Zhang X., Xu F. Experimental Investigation on Centrifugal Compressor Blade Crack Classification Using the Squared Envelope Spectrum. Sensors 2013. <https://doi.org/10.3390/s130912548>. <https://www.mdpi.com/1424-8220/13/9/12548>.
5. Lei Y. G., Lin J., He Z. J., Kong D. T. A method based on multisensor data fusion for fault detection of planetary gearboxes. Sensors 2012, 12, 2005–2017. https://www.researchgate.net/publication/221967648_A_Method_Based_on_MultiSensor_Data_Fusion_for_Fault_Detection_of_Planetary_Gearboxes.
6. Michalec G., Polanowski S., Łutowicz M. A Marine Engine Turbocharger as a Diagnostic Object. Proceedings of the 10th Conference on Diagnostics of Operational Machines and Vehicles, Bydgoszcz–Borówno, 1999. <https://repository.am.szczecin.pl/handle/123456789/395>.
7. Adamkiewicz A. An Analysis of Cause and Effect Relations in Diagnostic Relations of Marine Diesel Engine Turbochargers. Scientific Journal of the Maritime University of Szczecin 2012, 31(103), 5–13. <https://repository.am.szczecin.pl/handle/123456789/395>.
8. Adamkiewicz A., Michalec G. Problematyka eksploatacji turbosprężarek okrętowych tłokowych silników spalinowych. Budownictwo Okrętowe i Gospodarka Morska 2001, 4(501), 23–25.
9. Knežević V., Orović J., Stazić L., Čulin J. Fault Tree Analysis and Failure Diagnosis of Marine Diesel Engine Turbocharger System. Journal of Marine Science and Engineering 2020, 8(12), 1004. <https://doi.org/10.3390/jmse8121004>. <https://www.mdpi.com/2077-1312/8/12/1004>.
10. Anantharaman M., Islam R., Sardar A., Garaniya V., Khan F. Impact of Defective Turbocharging System on the Safety and Reliability of Large Marine Diesel Engine. International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation 2021, 15, 189–194. https://www.transnav.eu/Article_Impact_of_Defective_Turbocharging_Anantharaman,57,1109.html.
11. Lus T. Marine Diesel Engines Turbochargers Diagnostic Methods. Applied Structural Health, Usage and Condition Monitoring 2012, 3, 49–54. https://www.academia.edu/64517128/Marine_diesel_engines_turbochargers_diagnostic_methods.
12. Borovkov A., Voinov I., Galerkin Y., Kaminsky R., Drozdov A., Solovyeva O., Soldatova K. Design, Plant Test and CFD Calculation of a Turbocharger for a Low-Speed Engine. Applied Sciences 2020, 10, 8344. <https://doi.org/10.3390/app10228344>.
13. Hoffren J., Talonpoika T., Larjola J., Siikonen T. Numerical Simulation of Real-Gas Flow in a Supersonic Turbine Nozzle Ring. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power 2002, 124, 395–403.
14. Choi I., Kim H. K., Yoo B. W. An Analytical Study on the Turbocharger-Engine Matching of the Marine Four-Stroke Diesel Engine. Proceedings of the Korean Society of Marine Engineering Fall Conference, Busan, Korea, 2005.
15. Witek L., Stachowicz F. Modal Analysis of the Turbine Blade at Complex Thermomechanical Loads. Strength of Materials 2016, 48, 474–480. <https://scispace.com/pdf/modal-analysis-of-the-turbine-blade-at-complex-33djh8isku.pdf>.

16. Jeon W. S., Jeong H. Structural Safety Assessment Based on Stress-Life Fatigue Analysis for T/C Nozzle Ring Blade. *Journal of Marine Science and Engineering* 2025, 13(6), 1174. <https://www.mdpi.com/2077-1312/13/6/1174>.
17. Jeon W. S., Park I. C. Fatigue Analysis and Solid Particle Erosion Behavior of Nozzle Ring for Marine Turbocharger. *Journal of Marine Science and Engineering* 2025, 13(7), 1230. https://www.researchgate.net/publication/393084119_Fatigue_Analysis_and_Solid_Particle_Erosion_Behavior_of_Nozzle_Ring_for_Marine_Turbocharger.
18. Park I. C., Han M. S. Solid Particle Erosion Behavior of Inconel 625 Thermal Spray Coating Layers. *Journal of the Korean Society for Marine Environmental Safety* 2021, 27, 521–528. <https://koreascience.kr/article/JAKO202120941785310.page>.
19. Liu C., He S., Zhang S., Rüdell U. Research on the Influence of Turbine Blade Fillet Geometry by Strength and Modal Analysis. *Proceedings of GPPS Montreal*, 2018. <https://gpps.global/wp-content/uploads/2021/02/GPPS-NA-2018-0111.pdf>.
20. Ryzhkov S. S. Separation Gradient Aerosol Technologies in Power Plants. Admiral Makarov National University of Shipbuilding: Mykolaiv, Ukraine, 2017. <http://onma.edu.ua/wp-content/uploads/2016/09/Doktorskaya-Dyssertatsyya-Ryzhkov-dlya-sajta.pdf>.
21. Bednarz A., Misiólek W. Z. Assessment of the Impact of Shot-Peening on the Fatigue Life of a Compressor Blade Subjected to Resonance Vibrations. *Materials* 2020, 13(24), 5726. <https://doi.org/10.3390/ma13245726>. <https://www.mdpi.com/1996-1944/13/24/5726>.
22. Zheng X.-G., et al. Healing Process of Casting Pores in a Ni-based Superalloy by Hot Isostatic Pressing. *Journal of Materials Science & Technology* 2015. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1005030215001097>.

REFERENCES

1. Hristov, D. (2022). Dual-Fuel Four-Stroke Lean-Burn Engine Supercharging System: Operational Features. *MTM – Marine Technology and Management*. <https://stumejournals.com/journals/mtm/2022/8/263.full.pdf>.
2. Stoumpos, S., Theotokatos, G., Boulougouris, E., Vassalos, D., Lazakis, I., Livanos, G. (2018). Marine dual-fuel engine modelling and parametric investigation of engine settings effect on performance–emissions trade-offs. *Ocean Engineering*. https://strathprints.strath.ac.uk/63557/1/Stoumpos_etal_OE_2018_Marine_dual_fuel_engine_modelling_and_parametric_investigation_of_engine_settings_effect.pdf.
3. Wärtsilä Corporation (2019). Wärtsilä W6L34DF Dual-Fuel Engine – Product Guide / Technical Manual. Wärtsilä, Vaasa, Finland. <https://www.wartsila.com/products/marine-oil-gas/engines-generating-sets/dual-fuel-engines/wartsila-34df>.
4. Li, H., Zhang, X., Xu, F. (2013). Experimental Investigation on Centrifugal Compressor Blade Crack Classification Using the Squared Envelope Spectrum. *Sensors*. <https://doi.org/10.3390/s130912548>. <https://www.mdpi.com/1424-8220/13/9/12548>.
5. Lei, Y. G., Lin, J., He, Z. J., Kong, D. T. (2012). A method based on multisensor data fusion for fault detection of planetary gearboxes. *Sensors*, 12, 2005–2017. https://www.researchgate.net/publication/221967648_A_Method_Based_on_Multi-Sensor_Data_Fusion_for_Fault_Detection_of_Planetary_Gearboxes.
6. Michalec, G., Polanowski, S., Łutowicz, M. (1999). A Marine Engine Turbocharger as a Diagnostic Object. *Proceedings of the 10th Conference on Diagnostics of Operational Machines and Vehicles, Bydgoszcz–Borówno*. <https://repository.am.szczecin.pl/handle/123456789/395>.
7. Adamkiewicz, A. (2012). An Analysis of Cause and Effect Relations in Diagnostic Relations of Marine Diesel Engine Turbochargers. *Scientific Journal of the Maritime University of Szczecin*, 31(103), 5–13. <https://repository.am.szczecin.pl/handle/123456789/395>.

8. Adamkiewicz, A., Michalec, G. (2001). Problematyka eksploatacji turbosprężarek okrętowych tłokowych silników spalinowych. *Budownictwo Okrętowe i Gospodarka Morska*, 4(501), 23–25.
9. Knežević, V., Orović, J., Stazić, L., Čulin, J. (2020). Fault Tree Analysis and Failure Diagnosis of Marine Diesel Engine Turbocharger System. *Journal of Marine Science and Engineering* 2020, 8(12), 1004. <https://doi.org/10.3390/jmse8121004>. <https://www.mdpi.com/2077-1312/8/12/1004>.
10. Anantharaman, M., Islam, R., Sardar, A., Garaniya, V., Khan, F. (2021). Impact of Defective Turbocharging System on the Safety and Reliability of Large Marine Diesel Engine. *International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, 15, 189–194. https://www.transnav.eu/Article_Impact_of_Defective_Turbocharging_Anantharaman,57,1109.html.
11. Lus, T. (2012). Marine Diesel Engines Turbochargers Diagnostic Methods. *Applied Structural Health, Usage and Condition Monitoring*, 3, 49–54. https://www.academia.edu/64517128/Marine_diesel_engines_turbochargers_diagnostic_methods.
12. Borovkov, A., Voinov, I., Galerkin, Y., Kaminsky, R., Drozdov, A., Solovyeva, O., Soldatova, K. (2020). Design, Plant Test and CFD Calculation of a Turbocharger for a Low-Speed Engine. *Applied Sciences* 2020, 10, 8344. <https://doi.org/10.3390/app10228344>.
13. Hoffren, J., Talonpoika, T., Larjola, J., Siikonen, T. (2002). Numerical Simulation of Real-Gas Flow in a Supersonic Turbine Nozzle Ring. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 124, 395–403.
14. Choi, I., Kim, H. K., Yoo, B. W. (2005). An Analytical Study on the Turbocharger-Engine Matching of the Marine Four-Stroke Diesel Engine. *Proceedings of the Korean Society of Marine Engineering Fall Conference*, Busan, Korea.
15. Witek, L., Stachowicz, F. (2016). Modal Analysis of the Turbine Blade at Complex Thermomechanical Loads. *Strength of Materials*, 48, 474–480. <https://scispace.com/pdf/modal-analysis-of-the-turbine-blade-at-complex-33djh8isku.pdf>.
16. Jeon, W. S., Jeong, H. (2025). Structural Safety Assessment Based on Stress-Life Fatigue Analysis for T/C Nozzle Ring Blade. *Journal of Marine Science and Engineering*, 13(6), 1174. <https://www.mdpi.com/2077-1312/13/6/1174>.
17. Jeon, W. S., Park, I. C. (2025). Fatigue Analysis and Solid Particle Erosion Behavior of Nozzle Ring for Marine Turbocharger. *Journal of Marine Science and Engineering*, 13(7), 1230. https://www.researchgate.net/publication/393084119_Fatigue_Analysis_and_Solid_Particle_Erosion_Behavior_of_Nozzle_Ring_for_Marine_Turbocharger.
18. Park, I. C., Han, M. S. (2021). Solid Particle Erosion Behavior of Inconel 625 Thermal Spray Coating Layers. *Journal of the Korean Society for Marine Environmental Safety*, 27, 521–528. <https://koreascience.kr/article/JAKO202120941785310.page>.
19. Liu, C., He, S., Zhang, S., Rüdel, U. (2018). Research on the Influence of Turbine Blade Fillet Geometry by Strength and Modal Analysis. *Proceedings of GPPS Montreal*. <https://gpps.global/wp-content/uploads/2021/02/GPPS-NA-2018-0111.pdf>.
20. Ryzhkov, S. S. (2017). Separation Gradient Aerosol Technologies in Power Plants. Admiral Makarov National University of Shipbuilding: Mykolaiv, Ukraine. <http://onma.edu.ua/wp-content/uploads/2016/09/Doktorskaya-DySSERTatsyya-Ryzhkov-dlya-sajta.pdf>.
21. Bednarz, A., Misiołek, W. Z. (2020). Assessment of the Impact of Shot-Peening on the Fatigue Life of a Compressor Blade Subjected to Resonance Vibrations. *Materials*, 13(24), 5726. <https://doi.org/10.3390/ma13245726>. <https://www.mdpi.com/1996-1944/13/24/5726>.
22. Zheng, X.-G., et al. (2015). Healing Process of Casting Pores in a Ni-based Superalloy by Hot Isostatic Pressing. *Journal of Materials Science & Technology*. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1005030215001097>.

Balovniev A. I., Vrublevskyi R. Ye., Levinskyi M. V., Nikolskyi M. V., Nikolskyi V. V., Slobodianiuk M. V. IMPROVING THE RELIABILITY OF A DUAL-FUEL MARINE DIESEL ENGINE TURBOCHARGER NOZZLE RING BASED ON THERMOMECHANICAL AND GAS-DYNAMIC MODELING

The article focuses on improving the reliability of the Napier NT1-10 turbocharger nozzle ring used in the Wärtsilä W6L34DF dual-fuel marine diesel engine as part of a gas carrier's power plant. The relevance of this study is driven by the widespread adoption of medium-speed dual-fuel (DF) engines on liquefied gas carriers, as well as the high failure rate of turbocharger nozzle rings caused by thermomechanical loading and solid particle erosion. The methodological framework of the study comprises three-dimensional geometric modeling within the AutoCAD environment and numerical simulation using the cloud-based CAE platform SimScale: CFD analysis (OpenFOAM) to evaluate gas-dynamic processes in the flow passage, and finite element analysis (Code_Aster) to analyze static and thermomechanical stresses. The simulation results revealed that the zones of maximum stress are concentrated in the blade-to-root and casing-to-support transition areas. Based on the identified patterns, a modernized design is proposed: rounded geometric transitions (fillets) are introduced in the critical zones, which significantly reduces peak thermomechanical stress concentrations and lowers the risk of fatigue crack initiation without altering the gas-dynamic flow characteristics or the component's mounting arrangement. Conclusions: A modernized nozzle ring design featuring rounded transitions in critical zones is proposed. Re-simulation confirmed a substantial reduction in peak stress concentrations with no degradation of gas-dynamic flow characteristics and no modifications to the component's mounting arrangement. The applied approach — combining 3D geometric modeling in AutoCAD, CFD analysis, and thermomechanical analysis within the cloud-based SimScale platform — provides a comprehensive structural life assessment and can be utilized to improve other components of marine power plants.

Key words: dual-fuel engine; turbocharging; reliability; nozzle ring; computational fluid dynamics; CFD simulation; SimScale; Wärtsilä W6L34DF.

© Баловнєв А. І., Врублевський Р. Є., Левінський М. В., Нікольський М. В.,
Нікольський В. В., Слободянюк М. В.

Статтю прийнято до редакції 18.05.2026

ОЦІНЮВАННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ СУДЕН ВНУТРІШНЬОГО ПЛАВАННЯ ЗА ЕКСПЛУАТАЦІЙНИМИ ПАРАМЕТРАМИ СУДНОВИХ ДВИГУНІВ

Тарасенко Т. В., к.т.н., доцент, завідувачка кафедри інженерних дисциплін Дунайського інституту Національного університету «Одеська морська академія», м. Ізмаїл, Україна, e-mail: tarasenko@dinuoma.com.ua, ORCID: 0000-0001-8107-3524;
Залож В. І., д.т.н., доцент кафедри інженерних дисциплін Дунайського інституту Національного університету «Одеська морська академія», м. Ізмаїл, Україна, e-mail: zalozh@dinuoma.com.ua, ORCID: 0000-0002-5213-6896.

Показники енергоефективності суден внутрішнього плавання, що перебувають в експлуатації, залишаються недостатньо регламентованими. Вони продовжують активно досліджуватися як на регуляторних, так і на науково-дослідних рівнях. Стаття присвячена аналізу сучасних підходів до визначення показників енергоефективності самохідних суден внутрішнього плавання та штовхачів-буксирів. Особливу увагу приділено європейському контексту та специфічним умовам дунайського судноплавства. Більшість відомих підходів ґрунтуються на адаптації морського індексу EEDI до умов внутрішніх водних шляхів. Виконано порівняльний аналіз існуючих методів оцінювання експлуатаційних показників енергоефективності з визначенням їхніх основних припущень та обмежень. Розглянуто, зокрема, метод Белградського університету та метод DST, розроблений на замовлення Федерального міністерства транспорту Німеччини. Показано, що більшість сучасних підходів не враховують належним чином фактичний технічний стан головних двигунів. Технічний стан суттєво впливає на реальне споживання палива, ефективну потужність і, відповідно, на експлуатаційну енергоефективність судна. Розглянуто застосування параметричного діагностування головних двигунів для уточнення експлуатаційних параметрів робочого процесу. Такий підхід забезпечує фізично обґрунтовану основу для безперервного моніторингу енергоефективності судна в умовах експлуатації. Обґрунтовано необхідність розроблення трансформаційного методу, який інтегрує результати параметричного діагностування у розрахунок показників енергоефективності. Метод передбачає поетапний аналіз рейсу з диференційованим застосуванням уточнених навантажувальних характеристик головного двигуна. Типові етапи охоплюють рух на глибокій воді, проходження мілководдя, маневрування на перекатах і провідку частини каравану. На цій основі будуються реалістичні профілі витрати палива, потужності та швидкості суден внутрішнього плавання. Це підвищує достовірність і практичну значущість оцінювання енергоефективності у внутрішньому судноплавстві.

Ключові слова: внутрішній водний транспорт; енергоефективність; дунайське судноплавство; судновий дизельний двигун; параметричне діагностування; робочий процес двигуна; питома ефективна витрата палива; EEDI; штовхач з баржевим караваном.

DOI: 10.33815/2313-4763.2026.1.32.020-032

Вступ. Попри тривалий період, значні фінансові вкладення та суттєві зусилля, докладені на різних рівнях до розроблення програм зі скорочення шкідливих викидів [11–13], енергетичного переходу та досягнення цілей еконавігації й руху до концепції zero-emission, переважна більшість суден внутрішнього водного транспорту й надалі рухається за рахунок енергії, що виробляється двигунами внутрішнього згоряння під час спалювання викопного нафтового палива. Така ситуація зумовлена насамперед тим, що переобладнання наявного флоту є економічно неприйнятним і за відсутності зовнішніх інвестицій з боку державних фондів та відповідних регуляторних механізмів є фактично недосяжним для більшості судновласників в умовах сучасного стану ринку дунайських перевезень [15, 16]. Ті самі чинники пояснюють майже повну відсутність нових замовлень на будівництво суден, за поодинокими винятками, пов'язаними з реалізацією окремих проєктів за підтримки Європейського Союзу [2].

У найближчій перспективі основними засобами транспорту на внутрішніх водних шляхах Європи залишатимуться самохідні судна, оснащені двигунами внутрішнього згоряння, а на Дунаї – також штовхачі з баржевими караванами, що мають аналогічні силові

установки [1, 14]. Ефективність використання палива безпосередньо впливає як на експлуатаційні витрати, так і на обсяги шкідливих викидів під час навігації [3]. Внутрішнє судноплавство відзначається значною різноманітністю – від окремих самохідних суден до великотоннажних караванів різної структури та складу, – а його енергоефективність, на відміну від морського транспорту, додатково залежить від таких параметрів, як глибина води та суднового ходу, швидкість течії, гідрометеорологічні умови тощо [14]. Водночас внутрішній водний транспорт посідає вагоме місце на європейському ринку вантажних перевезень та ефективно конкурує з автомобільним і залізничним транспортом, передусім у сегменті масових навалочних вантажів [15, 16].

Мета дослідження – порівняльний аналіз існуючих підходів до розрахунку показників енергоефективності суден внутрішнього водного транспорту та обґрунтування можливостей застосування параметричного діагностування двигунів внутрішнього згоряння для підвищення достовірності такого оцінювання.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Оцінювання енергоефективності суден внутрішнього водного транспорту впродовж останніх років перебуває у фокусі уваги як міжнародних організацій, так і наукової спільноти. На основі морського індексу *EEDI* було запропоновано низку адаптованих підходів для внутрішніх водних шляхів [4], що враховують специфіку плавання в умовах обмеженого фарватеру – вплив мілководдя, річкової течії та конфігурації караванів.

Зокрема, дослідницька група Белградського університету (*Kalajdžić, Momčilović* та ін.) запропонувала підхід до оцінювання енергоефективності самохідних вантажних суден на основі адаптації *EEDI* до умов дунайського судноплавства [5, 6]. Було показано, що навіть у межах єдиної концепції *EEDI* різні варіанти математичних моделей – з урахуванням потужності двигуна, глибини води, осадки та течії дають суттєво різні значення енергоефективності й можуть призводити до суперечливих висновків щодо відповідності суден проєктним критеріям [5].

Паралельно, у дослідженні Центру розвитку суднобудівних технологій та транспортних систем для Федерального міністерства транспорту Німеччини для внутрішнього водного транспорту запропоновано спеціалізовані індекси – *EEDI_{inland}* / *EEDI_{Iwv}* – та індекс експлуатаційної енергоефективності (*EEO*) як адаптації морських *EEDI* та *EEOI* до умов річкової навігації [4, 7]. Показано, що індекс *EEO* є чутливим до варіацій глибини, швидкості течії, осадки та навантаження двигуна, проте демонструє значну варіативність результатів, що ускладнює порівняння суден за єдиними критеріями [6].

Окремий напрям становлять дослідження у сфері параметричного діагностування судових ДВЗ, де запропоновано методи контролю технічного стану за індикаторними параметрами, температурою та складом відпрацьованих газів, а також інструментальні системи для реалізації такого діагностування в реальних умовах експлуатації [10]. Дедалі більше досліджень пропонують уточнювати розрахунки індексів через використання скоригованих характеристик ДВЗ, отриманих за результатами натурних вимірювань, замість усереднених значень питомої витрати палива, закладених у базові формулювання індексів типу *EEDI* [8, 9]. Комплексні моделі енергетичних характеристик та маневрування суден на внутрішніх водних шляхах також підтверджують суттєвий вплив гідрологічних умов та експлуатаційних параметрів на витрату палива й обсяги викидів [18, 19].

Постановка проблеми. Зазначене обґрунтовує доцільність розроблення методів, що поєднують уточнені параметри ДВЗ із поетапним аналізом рейсу за характерними експлуатаційними режимами: плавання на глибокій воді, прохід мілководних ділянок, маневрування на перекатах, робота в розібраному караванному складі тощо. Перспективи альтернативних видів пропульсії на Дунаї у найближчій перспективі залишаються обмеженими [17], що додатково підсилює важливість енергоефективності існуючого флоту з ДВЗ. Водночас систематична інтеграція результатів параметричного діагностування у методики розрахунку індексів енергоефективності суден внутрішнього плавання

залишається недостатньо опрацьованою – саме ця прогалина визначає актуальність, наукову новизну та практичну значущість представленого дослідження.

Виклад основного матеріалу. Запропонована методологія оцінювання енергоефективності суден внутрішнього водного транспорту поєднує дві взаємопов'язані складові: параметричне діагностування головного двигуна внутрішнього згоряння в реальних умовах експлуатації та поетапний аналіз рейсу з урахуванням мінливості навігаційних умов [8, 9]. На відміну від підходів, що використовують усереднені або паспортні характеристики двигуна, запропонований метод передбачає отримання уточнених навантажувальних характеристик ДВЗ безпосередньо під час експлуатації судна та їх диференційоване застосування для кожного з виділених етапів рейсу.

Типовий рейс судна внутрішнього плавання – як самохідного вантажного судна, так і штовхача з баржевим караваном характеризується суттєвою неоднорідністю навігаційних умов, що безпосередньо впливає на навантаження головного двигуна та питому ефективну витрату палива [14]. З метою підвищення достовірності оцінювання енергоефективності рейс розбивається на такі типові експлуатаційні етапи:

- рух у глибокій воді при повному завантаженні та сталій швидкості ходу;
- рух в умовах мілководдя з обмеженою глибиною судноплавного ходу, що супроводжується зростанням гідродинамічного опору;
- проходження перекатів з виконанням різних маневрів, яке характеризується змінним режимом роботи двигуна та підвищеною витратою палива;
- проводка частини каравану із розділенням баржевого складу, що змінює масу та гідродинамічний профіль буксированого об'єкта.

Для кожного етапу визначаються характерні значення швидкості ходу, частоти обертання та навантаження головного двигуна, які використовуються як вхідні дані для розрахунку показників енергоефективності.

Безаварійну експлуатацію головних двигунів забезпечують шляхом регулярного контролю параметрів робочого процесу в окремих циліндрах. Систематичний аналіз цих параметрів дозволяє оптимізувати роботу двигуна, рівномірно розподіляти навантаження між циліндрами та своєчасно виявляти небезпечні тенденції у зміні технічного стану основних систем і вузлів [10, 20]. У контексті задачі оцінювання енергоефективності параметричне діагностування виконує ще одну ключову функцію – забезпечує отримання уточнених термодинамічних характеристик робочого процесу ДВЗ безпосередньо в умовах експлуатації, що є фізично обґрунтованою альтернативою використанню усереднених паспортних показників.

Періодичний контроль дає змогу виявити дефекти циліндрів та обслуговуючих систем двигуна, що зароджуються у процесі експлуатації. Частину з них ідентифікують за формою індикаторної діаграми на ділянках стиснення та згоряння, а також за значеннями основних параметрів робочого процесу: максимального тиску згоряння P_{max} , тиску кінця стиснення P_{comp} , середнього індикаторного тиску MIP , кута початку згоряння тощо. Типовими діагностичними ознаками є зниження MIP , P_{max} або P_{comp} відносно еталонних значень.

Методика проведення вимірювань передбачає встановлення датчика тиску на індикаторний кран після його попереднього продування. Вібродатчик послідовно встановлюється у трьох характерних точках: на торці форсунки, на відсічці паливного насоса високого тиску та, за потреби, на кришці циліндра. Для кожного положення вібродатчика синхронно реєструють індикаторну та вібраційну діаграми.

Паралельний аналіз індикаторної та вібраційних діаграм дозволяє визначити затримку самозаймання палива, а також розбіжність між геометричними та дійсними фазами паливоподачі. Ці величини несуть цінну діагностичну інформацію про процеси сумішоутворення та згоряння в циліндрі та дають змогу локалізувати першопричину дефекту. Запропонований алгоритм виявився особливо дієвим при діагностуванні паливної апаратури високого тиску та клапанів газорозподілу [21].

Зіставлення отриманих індикаторних діаграм з еталонними дає змогу виявити відхилення в роботі окремих циліндрів та оцінити рівномірність розподілу навантаження між ними, що є необхідною умовою коректного визначення фактичної ефективної потужності двигуна – одного з ключових вхідних параметрів для розрахунку експлуатаційних показників енергоефективності.

Приклад одночасної реєстрації індикаторної та вібраційної діаграм наведено на рис. 1. Експериментальні дані діагностування головного двигуна *SKL NVD48 (6VDS 48/42 AL-2)*, отримані за допомогою портативної системи *DEPAS D4.0H* [9, 22], подано на рис. 2.

На рис. 1 наведено типовий звіт системи діагностування *DEPAS D4.0H*, сформований за результатами індиціювання циліндра №1 середньообертного чотиритактного дизельного двигуна *SKL* типу *6VDS 48/42*. Звіт містить повний обсяг діагностичної інформації, що автоматично формується системою за цикл вимірювання: індикаторну діаграму в координатах $P(^{\circ}\text{ПКВ})$, розраховані параметри робочого процесу циліндра (P_{max} , P_{comp} , MIP), а також похідні показники, які надалі використовуються для оцінювання ефективної потужності двигуна та питомої ефективної витрати палива.

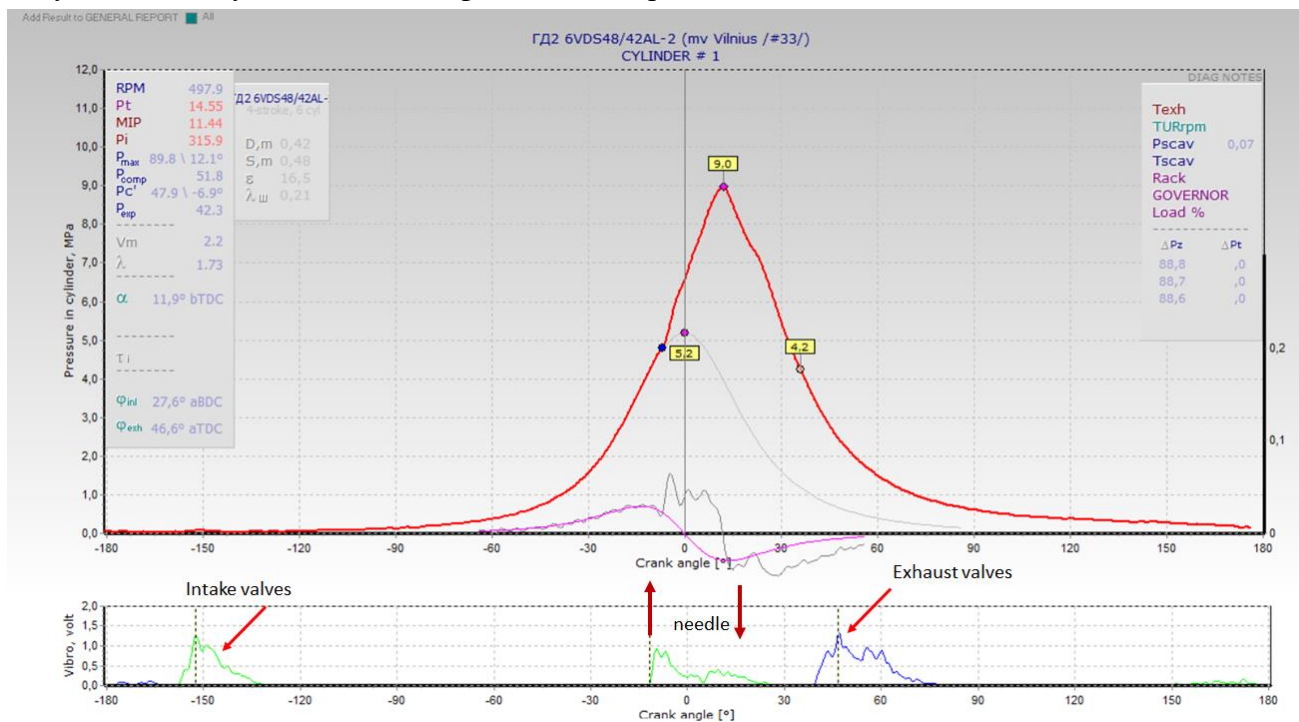


Рисунок 1 – Індикаторна та вібраційна діаграми циліндра №1 головного двигуна *SKL NVD48 (6VDS 48/42 AL-2)* [9]

Паралельно з індикаторною діаграмою (червона лінія) у функції кута повороту колінчастого вала реєструється вібродіаграма, на якій ідентифікуються характерні віброімпульси:

- *intake valves* закриття впускних клапанів;
- *needle up* початок впорскування палива (фаза підйому голки форсунки);
- *needle down* кінець впорскування палива (фаза посадки голки форсунки);
- *exhaust valves* закриття випускних клапанів (синя крива).

Окрім штатних параметрів робочого процесу, вібродіаграма дозволяє ідентифікувати дефекти механізму газорозподілу. На рис. 1 чітко спостерігається асинхронна робота випускних клапанів: віброімпульс *exhaust valves* є подвійним: спочатку реєструється удар одного клапана, а згодом, із певним запізненням за кутом ПКВ, удар другого. Роздвоєння імпульсу свідчить про розбалансування траверси приводу випускних клапанів. Для усунення дефекту траверсу необхідно відрегулювати таким чином, щоб обидва клапани закривалися одночасно, формуючи одинарний віброімпульс, вершина якого відповідає фазі закриття клапанів, зазначеній у паспортній документації двигуна. Виявлення асинхронної роботи

випускних клапанів має важливе практичне значення, оскільки їх несинхронне закриття спричиняє: нерівномірне зношування сідел і тарілок клапанів; підвищений рівень шуму та вібрації механізму газорозподілу; погіршення якості газообміну й, як наслідок, зниження індикаторної потужності циліндра та зростання питомої ефективної витрати палива.

На рис. 2 наведено зведений звіт (*general report*) системи діагностування DEPAS D4.0H, що містить комплексну інформацію про технічний стан усіх циліндрів двигуна SKL типу 6VDS 48/42. Звіт структурно поділено на декілька секцій.

У верхній секції розміщено індикаторні діаграми $P(\varphi)$ для всіх циліндрів, суміщені в єдиній системі координат зі зміщенням по осі абсцис для наочного візуального порівняння. Таке представлення дозволяє оперативно оцінити рівномірність розподілу навантаження між циліндрами та виявити відхилення у протіканні робочого процесу окремих циліндрів. На рис. 2 червоним і сірим кольором виділено діаграми 1-го та 6-го циліндрів, для яких зафіксовано відхилення максимального тиску згоряння P_{max} від середнього значення по всіх циліндрах понад 3,5 %.

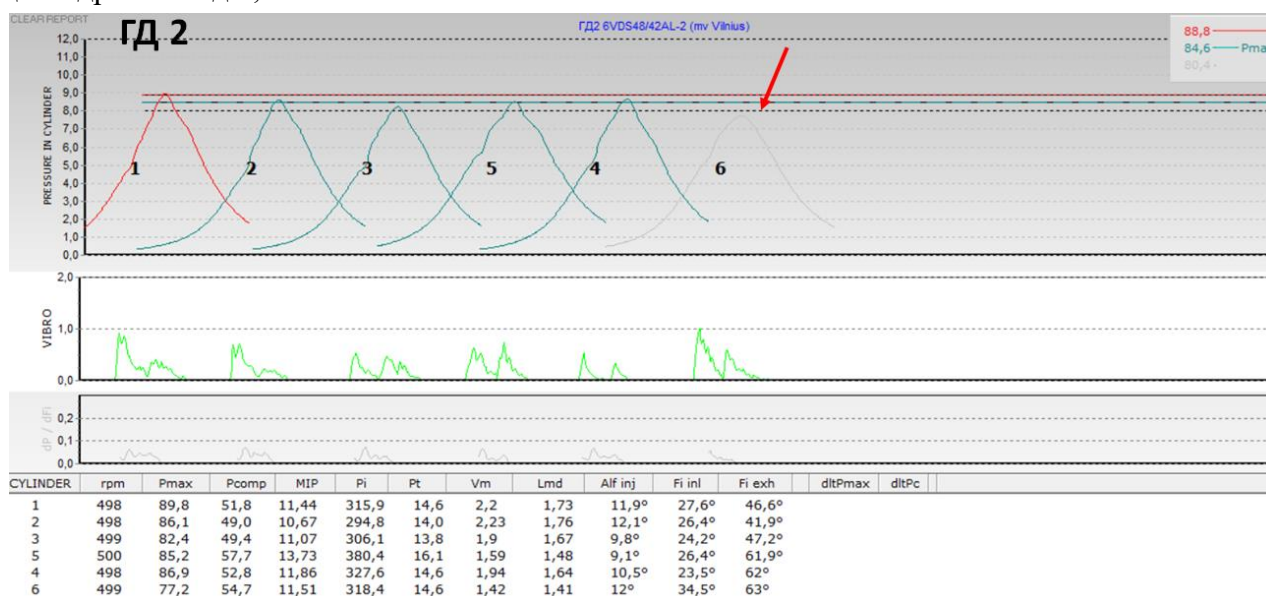


Рисунок 2 – Експериментальні дані діагностування головного двигуна SKL NVD48 (6VDS 48/42 AL-2) [9]

На підставі статистично оброблених результатів діагностичних вимірювань будуються уточнені навантажувальні характеристики головного двигуна – залежності питомої ефективної витрати палива SFC від ефективної потужності Ne та частоти обертання колінчастого вала n , що відображають фактичний технічний стан двигуна у конкретних умовах експлуатації. Такі характеристики суттєво відрізняються від паспортних заводських даних, оскільки враховують ступінь зношення та поточний технічний стан двигуна, режими часткового навантаження, характерні для річкового судноплавства, а також вплив якості застосовуваного палива й умов технічного обслуговування.

Отримані уточнені характеристики слугують вхідними даними для розрахунку показників енергоефективності на кожному з виділених етапів рейсу відповідно до методу трансформації, описаного далі.

Основні результати та їх обговорення. Для розрахунку показників енергоефективності суден внутрішнього плавання на кожному з виділених етапів рейсу у цій роботі проаналізовано два підходи, запропоновані в літературі, та обґрунтовано власний метод трансформації.

Метод, запропонований дослідницькою групою Белградського університету (*Kalajđić, Momčilović* та ін.) [5, 6], ґрунтується на адаптації морського індексу $EEDI$ до умов дунайського судноплавства та передбачає визначення двох показників – досяжного ($Attained EEDI^*$) і нормованого ($Required EEDI^*$) індексів енергоефективності.

Досяжний індекс розраховується за формулою:

$$EEDI^* = \frac{P_{Bref} \cdot SFC \cdot CF}{m_{DWT} \cdot v}, \quad (1)$$

де P_{Bref} – референсне значення потужності головного двигуна, необхідної для досягнення розрахункової швидкості v ; SFC – питома витрата палива; CF – конверсійний коефіцієнт CO_2 для відповідного виду палива; m_{DWT} – дедвейт судна або каравану; v – швидкість судна відносно води.

За своєю структурою вираз (1) майже повністю відповідає формулі морського індексу $EEDI$, проте має суттєву відмінність у застосуванні: референсна потужність P_{Bref} не прив'язується до 75 % MCR , як у підході IMO , а визначається як потужність, необхідна для досягнення розрахункової швидкості в конкретних навігаційних умовах. Метод застосовується для діапазонів швидкості $v = 10 \dots 22$ км/год, числа Фруда по глибині $Fr_H = 0,40 \dots 0,65$ та дедвейта $m_{DWT} = 100 \dots 3000$ т.

Нормований індекс визначається за емпіричною залежністю:

$$EEDI_{Req}^* = a \cdot m_{DWT}^c, \quad (2)$$

де a і c – емпіричні коефіцієнти, що розраховуються окремо для умов глибокої води та мілководдя, залежать від типу суден і є функціями швидкості v (для глибокої води) або числа Фруда по глибині Fr_H (для умов мілководдя). В оригінальному тексті [5] використано запис “ $a \cdot m_{DWT}^c$ ”; у даному випадку запис переписаний як “ $a \cdot m_{DWT}^c$ ” для виключення двозначності. Відповідність судна вимогам енергоефективності встановлюється шляхом порівняння: $EEDI^* \leq EEDI_{Req}^*$.

Метод, розроблений Центром розвитку суднобудівних технологій і транспортних систем (*Development Centre for Ship Technology and Transport Systems*, Дуйсбург) на замовлення Федерального міністерства транспорту Німеччини та *CESNI* [4, 7], також передбачає визначення досяжного та нормованого індексів енергоефективності.

Досяжний індекс для суден внутрішнього плавання розраховується як:

$$EEDI_{IWT} = \frac{P_D \cdot SFC \cdot CF}{m_{DWT} \cdot v}, \quad (3)$$

де P_D – доставлена потужність головного двигуна, що розраховується окремо для умов глибокої води та мілководдя із застосуванням системи з 33 емпіричних коефіцієнтів; решта позначень відповідає прийнятим у (1).

Принципова відмінність від методу Белграда полягає у способі визначення потужності: P_D розраховується на основі тягових характеристик корпусу та гвинта для базового значення швидкості судна з подальшим перерахунком в умовах течії зі швидкістю v_t . Метод застосовується для суден з осадкою $d = 2,0 \dots 3,2$ м (глибока вода) та $d = 2,0 \dots 2,8$ м (мілководдя), довжиною $L = 40 \dots 135$ м, шириною $B = 5 \dots 17$ м, дедвейтом $m_{DWT} = 250 \dots 6000$ т та швидкістю течії $v_t = 2 \dots 8$ км/год. Метод охоплює чотири типи суден: самохідні суховантажні та контейнерні судна, танкери, штовхачі з несамохідними секціями та пасажирські судна.

Нормований індекс для методу DST визначається за залежністю:

$$EEDI_{Req} = \alpha_4 + \beta_2 \cdot \exp\left(\frac{m_{DWT}}{-\gamma_2}\right) + v_1 \cdot \exp\left(\frac{m_{DWT}}{-\delta_1}\right), \quad (4)$$

де α_4 , β_2 , γ_2 , v_1 , δ_1 – емпіричні коефіцієнти, визначені окремо для кожного типу суден та навігаційної зони.

Слід зазначити, що в методі DST показники енергоефективності є функцією швидкості течії: $EEDI_{IWT} = f(v_t)$, що є його суттєвою перевагою порівняно з методом Університету Белграда, який течію не враховує. Водночас обмеження за осадкою, прив'язане до діаметра гребного гвинта як $d = 1.5D_p$, звужує практичну застосовність методу.

На відміну від розглянутих вище підходів, метод трансформації, запропонований авторами [8, 9], ґрунтується на принципово іншій концепції: замість використання усереднених або паспортних характеристик двигуна він передбачає отримання уточнених навантажувальних характеристик ДВЗ безпосередньо в умовах експлуатації на основі параметричного діагностування [10, 20, 21] та їх диференційоване застосування для кожного з виділених експлуатаційних етапів рейсу.

У загальному вигляді витрата палива за рейс є неперервним процесом, що описується інтегралом:

$$EEOI_{voyage} = \frac{CF}{m \cdot d_{total}} \int_0^T N_e(t) \cdot SFC(N_e(t), n(t)) dt, \quad (5)$$

де $N_e(t)$ – миттєва ефективна потужність головного двигуна, як функція часу t ; $SFC(N_e(t), n(t))$ – питома витрата палива як функція потужності та частоти обертання; T – тривалість рейсу; m – маса вантажу; d_{total} – відстань, на яку перевозиться вантаж (транспортна відстань), що може суттєво відрізнятися від фактичного шляху, пройденого самохідним судном з урахуванням маневрів, проводки частини каравану через перекати та павузок.

Оскільки рейс розбивається на скінченну кількість типових експлуатаційних етапів, кожен з яких характеризується статистично усередненими параметрами двигуна, отриманими за результатами параметричного діагностування, інтеграл (5) апроксимується дискретною сумою:

$$EEOI_{voyage} = \frac{CF}{m \cdot d_{total}} \sum_1^k N_{ei} \cdot SFC_i(N_{ei}, n_i) \cdot t_i, \quad (6)$$

де i – індекс експлуатаційного етапу рейсу; N_{ei} – ефективна потужність головного двигуна на i -му етапі; $SFC_i(N_{ei}, n_i)$ – питома витрата палива на i -му етапі, визначена за уточненими характеристиками ДВЗ; t_i – тривалість i -го етапу; k – загальна кількість етапів рейсу; d_{total} – транспортна відстань (визначення наведено вище).

Окремої уваги заслуговує коректне визначення транспортної відстані d_{total} у знаменнику формули (6). На відміну від морського судноплавства, де відстань рейсу, як правило, збігається з відстанню перевезення вантажу, для суден внутрішнього плавання, особливо штовхачів з баржевими караванами, ці величини можуть суттєво різнитися [14]. Фактичний шлях, пройдений судном, включає маневри на перекатах з численними проводками, багаторазові переходи між перекатом і місцем стоянки каравану під час павузки, а також переміщення судна без вантажу у процесі розділення та збирання складу. В усіх цих випадках судно витрачає паливо і виконує роботу двигуна, не пов'язану з транспортуванням вантажу на відповідну відстань. Методи Белградського університету та DST не розрізняють ці складові, оперуючи єдиною «відстанню рейсу», що може призводити до систематичного заниження питомих показників енергоефективності для штовхачів з великими й структурно складними караванами. Метод трансформації явно розрізняє транспортну відстань d_{total} та фактичний шлях судна, що забезпечує коректнішу оцінку енергетичної ефективності транспортної роботи.

На відміну від методів Белградського університету та DST, які визначають пару показників *Attained / Required* і тим самим одразу вбудовані в регуляторну рамку, метод трансформації на першому етапі забезпечує отримання достовірного експлуатаційного показника (*Operational*). Це принципово важливо: достовірність нормованого показника (*Required*) безпосередньо залежить від точності досяжного (*Attained*), а існуючі методи використовують для його розрахунку усереднені характеристики двигуна, що може призводити до систематичних похибок. Метод трансформації усуває це джерело похибки, забезпечуючи надійну основу для подальшого нормування.

Результати порівняльного аналізу трьох розглянутих методів зведено у таблиці 1. Аналіз виконано за такими критеріями: тип показника енергоефективності, застосовність до різних типів суден та умов навігації, спосіб визначення характеристик ДВЗ, врахування течії

й транспортної відстані, наявність і обсяг емпіричних коефіцієнтів, а також обмеження кожного методу [4–7].

Таблиця 1 – Порівняння методів розрахунку індексів енергоефективності для суден внутрішнього плавання

<i>Критерій</i>	<i>Метод Університету Белграда</i>	<i>Метод DST</i>	<i>Метод трансформації</i>
<i>Тип показника</i>	<i>Attained / Required</i>	<i>Attained / Required</i>	<i>Operational (Attained)</i>
<i>Застосовність</i>	Поодинокі самохідні судна; каравани дедвейтом 100...3000 т	Поодинокі самохідні судна; каравани довжиною до 135 м, шириною до 17 м	Поодинокі самохідні судна; каравани, в т. ч. великі; підтверджено для самохідного судна з караваном з 5 барж
<i>Навігаційні умови</i>	Глибока вода та мілководдя	Глибока вода та мілководдя	Глибока вода, мілководдя, перекати, проводка частини каравану
<i>Врахування течії</i>	Не враховується	Враховується	Враховується
<i>Характеристики ДВЗ</i>	Усереднені / паспортні значення <i>SFC</i>	Усереднені / паспортні значення <i>SFC</i>	Уточнені характеристики <i>SFC</i> , отримані за результатами параметричної діагностики в реальних умовах експлуатації
<i>Залежність «швидкість – потужність»</i>	Використовується	Не використовується (базове значення швидкості з перерахунком)	Використовується для кожного етапу рейсу
<i>Транспортна відстань</i>	Не розрізняється від фактичного шляху судна	Не розрізняється від фактичного шляху судна	Явно розрізняється: d_{total} – відстань перевезення вантажу
<i>Врахування допоміжних механізмів</i>	Не передбачено	Не передбачено	Передбачено (зупинки, маневрування)
<i>Використання даних RIS</i>	Не передбачено	Не передбачено	Передбачено
<i>Емпіричні коефіцієнти</i>	Присутні; розраховані для одного значення глибини фарватеру (5 м)	Присутні у великій кількості (33); вузького застосування	Не потребує емпіричних коефіцієнтів вузького застосування
<i>Обмеження</i>	Не враховує течію; емпіричні коефіцієнти розраховані для обмежених умов	Одне базове значення осадки ($d = 1,5D_p$); одне базове значення швидкості	Потребує верифікації на розширеній вибірці суден та типів каравану

Як видно з таблиці, методи Університету Белграда та *DST* мають спільну концептуальну основу – адаптацію морського індексу *EEDI* до умов річкового судноплавства – і обидва оперують парою показників *Attained / Required*. Проте вони суттєво різняться в підходах до визначення потужності двигуна та врахування навігаційних умов.

Метод Університету Белграда охоплює ширший діапазон швидкостей та не потребує великої кількості емпіричних коефіцієнтів для розрахунку потужності, проте не враховує швидкість течії. Метод *DST* враховує течію та охоплює ширший спектр типів суден, але обмежений одним базовим значенням осадки та швидкості, що звужує його практичну застосовність для реальних умов дунайського судноплавства.

Спільним і принциповим недоліком обох існуючих методів є використання усереднених або паспортних значень *SFC*, які не відображають фактичного технічного стану двигуна у конкретних умовах експлуатації. Оскільки *SFC* входить у чисельник розрахункової формули безпосередньо, будь-яке відхилення між паспортним і реальним значенням питомої витрати палива призводить до систематичної похибки у визначенні *Attained EEDI* – а отже, і у висновках щодо відповідності судна нормованому показнику.

Запропонований авторами метод трансформації усуває цей недолік шляхом інтеграції результатів параметричного діагностування ДВЗ у розрахунок показника енергоефективності. Додатковими перевагами методу є: поетапний аналіз рейсу, що дозволяє коректно врахувати всі характерні режими роботи двигуна; явне розрізнення транспортної відстані та фактичного шляху судна; врахування роботи допоміжних механізмів під час зупинок і маневрування; можливість використання даних Річкових інформаційних систем (*RIS*). Водночас метод потребує верифікації на розширеній вибірці суден і типів каравану, що визначає напрям подальших досліджень.

Висновки. Переважна більшість суден, що здійснюють перевезення на внутрішніх водних шляхах Європи – і зокрема на Дунаї, де основу флоту становлять самохідні вантажні судна та штовхачі з баржевими караванами – й надалі рухається за рахунок двигунів внутрішнього згоряння, що працюють на викопному паливі. За відсутності реальних перспектив масового переходу на альтернативні види тяги у найближчій перспективі достовірне оцінювання енергоефективності таких суден набуває першочергового практичного та регуляторного значення.

Порівняльний аналіз двох відомих методів розрахунку індексів енергоефективності – методу Белградського університету [5, 6] та методу *DST* [4, 7] – показав, що обидва ґрунтуються на адаптації морського індексу *EEDI* до умов річкового судноплавства й оперують парою показників *Attained / Required*. Водночас вони мають суттєві спільні обмеження: використання усереднених або паспортних значень питомої витрати палива, які не відображають фактичного технічного стану двигуна в експлуатації; відсутність поетапного аналізу рейсу з урахуванням характерних режимів роботи силової установки; а також відсутність явного розрізнення між транспортною відстанню та фактичним шляхом судна, що є особливо критичним для штовхачів з великими баржевими складами в умовах дунайського судноплавства. Додатково, метод Белградського університету не враховує швидкість течії, а метод *DST* обмежений вузьким діапазоном осадки та одним базовим значенням швидкості судна.

Запропонований авторами метод трансформації [8, 9] усуває зазначені недоліки шляхом інтеграції результатів параметричного діагностування ДВЗ – індикаторної діагностики та вібродіагностики [10, 20, 21] – у розрахунок показника енергоефективності. Метод передбачає поетапний аналіз рейсу з диференційованим застосуванням уточнених навантажувальних характеристик двигуна для кожного експлуатаційного етапу: руху на глибокій воді, проходження мілководних ділянок, маневрування на перекатах і проводки частини каравану. Транспортна відстань d_{total} визначається як відстань, на яку фактично перевозиться вантаж, що забезпечує коректне оцінювання питомої енергоефективності виконаної транспортної роботи.

Наукова новизна дослідження полягає в тому, що вперше запропоновано методологічний підхід, який поєднує параметричне діагностування судового ДВЗ із поетапним аналізом рейсу для отримання достовірного експлуатаційного показника енергоефективності суден внутрішнього плавання. На відміну від існуючих методів, які одразу вбудовані в регуляторну рамку *Attained / Required*, метод трансформації забезпечує

надійну діагностичну основу, без якої будь-яке нормування залишається методологічно вразливим.

Перспективи подальших досліджень. Результати дослідження верифіковано для самохідного судна з караваном із 5 барж в умовах дунайського судноплавства. Подальші дослідження мають бути спрямовані на верифікацію методу на розширеній вибірці суден різних типів і конфігурацій каравану, а також на розроблення на його основі нормованого показника (*Required*), придатного для застосування в регуляторній практиці дунайського судноплавства.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Guesnet G., Deußner R., Kirchmayr R., Novak R., Strasser C., Bačkalov I., Hofman M., Simić A. Innovative Danube Vessel: Main project results. DST – Development Centre for Ship Technology and Transport Systems, 2013. URL: <https://www.dst-org.de> (дата звернення: 10.02.2026).
2. PROMINENT – Promoting innovation in the inland waterways transport sector : project information note / STC-Group. 2018. URL: <https://www.waterborne.eu/projects/inland-navigation/prominent> (дата звернення: 11.01.2026).
3. De Vlieger I., Panis L. I., Joul H., Cornelis E. Fuel consumption and CO₂-rates for inland vessels. *WIT Transactions on the Built Environment*. 2004. Vol. 75. P. 637–646. <https://doi.org/https://doi.org/10.2495/UT040621>.
4. Evaluating the energy requirement of inland vessels using energy efficiency indices / CESNI/PT. 2021. URL: https://www.cesni.eu/wp-content/uploads/2021/03/cesnpt_energyindex_en.pdf (дата звернення: 09.10.2025).
5. Kalajdžić M., Vasilev M., Momčilović N. Evaluating an inland waterway cargo vessel's energy efficiency indices. *Polish Maritime Research*. 2022. Vol. 29, no. 2. P. 27–34. <https://doi.org/https://doi.org/10.2478/pomr-2022-0014>.
6. Kalajdžić M., Vasilev M., Momčilović N. Inland waterway cargo vessel energy efficiency in operation. *Brodogradnja*. 2023. Vol. 74, no. 3. P. 71–89. <https://doi.org/https://doi.org/10.21278/brod74304>.
7. Guesnet T. *Energy efficiency of inland water ships in the European Union Strategy for the Danube Region* [Conference presentation] 4th Meeting of the Steering Group, EUSDR PA1a, Vienna, Austria., 21 November 2013. URL: https://navigation.danube-region.eu/content/uploads/sites/10/2020/01/2013-11-21_EUSDR_PA1A_SG_CO2_emissions_DST.pdf.
8. Tarasenko T., Zalozh V., Maksymov S. The ways to improve energy efficiency and eco-friendliness of the specific Danube inland vessels: First stage. *Journal of Physics: Conference Series*. 2019. Vol. 1297, no. 1. Article 012019. <https://doi.org/https://doi.org/10.1088/1742-6596/1297/1/012019>.
9. Tarasenko T., Zalozh V., Varbanets R., Minchev D. Considerations regarding reducing Danube navigation emissions. *Scientific Bulletin of Naval Academy*. 2021. Vol. 24, no. 1. P. 174–183. <https://doi.org/https://doi.org/10.21279/1454-864X-21-I1-021>.
10. Varbanets R., Minchev D., Kucherenko Y., Zalozh V., Kyrylash O., Tarasenko T. Methods of real-time parametric diagnostics for marine diesel engines. *Polish Maritime Research*. 2024. Vol. 31, no. 3. P. 71–84. <https://doi.org/10.2478/pomr-2024-0037>.
11. Mannheim Declaration "150 years of the Mannheim Act for Rhine Navigation" / Central Commission for the Navigation of the Rhine. 2018. URL: <https://www.ccr-zkr.org> (дата звернення: 18.03.2025).
12. CCNR roadmap for reducing inland navigation emissions / Central Commission for the Navigation of the Rhine. 2018. URL: <https://www.ccr-zkr.org/12090000-en.html> (дата звернення: 10.01.2026).

13. NAIADES III: An inland waterway transport action plan for 2021–2027 / European Commission, Directorate-General for Mobility and Transport. 2021. URL: <https://transport.ec.europa.eu> (дата звернення: 18.01.2026).
14. Manual on Danube navigation / viadonau. 2023. URL: https://www.viadonau.org/fileadmin/user_upload/Manual_on_Danube_Navigation.pdf (дата звернення: 19.04.2026).
15. Market observation for Danube navigation: Results in 2024 / Danube Commission. 2025. URL: <https://www.danubecommission.org/dc/en/danube-navigation/market-observation-for-danube-navigation/market-observation-for-danube-navigation-results-in-2024/> (дата звернення: 20.01.2026).
16. Statistical yearbook 2022 / Danube Commission. 2025. URL: https://www.Danubecommission.org/uploads/doc/2025/Stat_2022/en_stat_2022.pdf (дата звернення: 17.01.2026).
17. Van der Linden E. Study on alternative propulsion on the Danube / Aristoi, viadonau. 2024. URL: https://www.viadonau.org/fileadmin/content/20241128_Aristoi_Study_Viadonau_final.pdf (дата звернення: 19.04.2026).
18. Zhang C. Energy performance and manoeuvring modelling of inland waterway vessels : doctoral thesis / Chalmers University of Technology. Gothenburg, 2023. URL: https://research.chalmers.se/publication/539162/file/539162_Fulltext.pdf (дата звернення: 11.02.2026).
19. Zhang C., Ringsberg J. W., Thies F. Development of a ship performance model for power estimation of inland waterway vessels. *Ocean Engineering*. 2023. Vol. 287. Article 115731. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.115731>.
20. Варбанець Р. А., Мінчев Д. С., Кучеренко Ю. М., Залож В. І. Параметрична діагностика суднових дизельних двигунів в режимі реального часу. *Двигуни внутрішнього згоряння*. 2024. Вип. 1 (2024). С. 69–75. <https://doi.org/https://doi.org/10.20998/0419-8719.2024.1.09>.
21. Залож В. І., Варбанець Р. А., Мінчев Д. С. Аналіз циклової нерівномірності для суднових дизельних двигунів в режимі реального часу. *Водний транспорт : збірник наукових праць Державного університету інфраструктури та технологій*. 2025. Вип. 1 (42). С. 37–45. <https://doi.org/https://doi.org/10.33298/2226-8553.2025.1.42.06>.
22. Суворов П. С., Тарасенко Т. В., Залож В. І. Деякі питання оцінки енергоефективності суден в умовах енергетичного переходу у внутрішньому судноплавстві. *Двигуни внутрішнього згоряння*. 2023. Вип. 2 (2023). С. 37–45. <https://doi.org/https://doi.org/10.20998/0419-8719.2023.2.05>.

REFERENCES

1. Guesnet, G., Deußner, R., Kirchmayr, R., Novak, R., Strasser, C., Bačkalov, I., Hofman, M., & Simić, A. (2013). *Innovative Danube Vessel: Main project results*. DST – Development Centre for Ship Technology and Transport Systems. <https://www.dst-org.de>.
2. STC-Group. (2018). *PROMINENT – Promoting innovation in the inland waterways transport sector: Project information note*. <https://www.waterborne.eu/projects/inland-navigation/prominent>.
3. De Vlieger, I., Panis, L. I., Joul, H., & Cornelis, E. (2004). Fuel consumption and CO₂-rates for inland vessels. *WIT Transactions on the Built Environment*, 75, 637–646. <https://doi.org/10.2495/UT040621>.
4. CESNI/PT. (2021). *Evaluating the energy requirement of inland vessels using energy efficiency indices*. CESNI. https://www.cesni.eu/wp-content/uploads/2021/03/cesnipt_energyindex_en.pdf.
5. Kalajdžić, M., Vasilev, M., & Momčilović, N. (2022). Evaluating an inland waterway cargo vessel's energy efficiency indices. *Polish Maritime Research*, 29(2), 27–34. <https://doi.org/10.2478/pomr-2022-0014>.
6. Kalajdžić, M., Vasilev, M., & Momčilović, N. (2023). Inland waterway cargo vessel energy efficiency in operation. *Brodogradnja*, 74(3), 71–89. <https://doi.org/10.21278/brod74304>.

7. Guesnet, T. (2013, November 21). *Energy efficiency of inland water ships in the European Union Strategy for the Danube Region* [Conference presentation]. 4th Meeting of the Steering Group, EUSDR PA1a, Vienna, Austria. https://navigation.danube-region.eu/content/uploads/sites/10/2020/01/2013-11-21_EUSDR_PA1A_SG_CO2_emissions_DST.pdf.
8. Tarasenko, T., Zalozh, V., & Maksymov, S. (2019). The ways to improve energy efficiency and eco-friendliness of the specific Danube inland vessels: First stage. *Journal of Physics: Conference Series*, 1297(1), Article 012019. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1297/1/012019>.
9. Tarasenko, T., Zalozh, V., Varbanets, R., & Minchev, D. (2021). Considerations regarding reducing Danube navigation emissions. *Scientific Bulletin of Naval Academy*, 24(1), 174–183. <https://doi.org/10.21279/1454-864X-21-I1-021>.
10. Varbanets, R., Minchev, D., Kucherenko, Y., Zalozh, V., Kyrylash, O., & Tarasenko, T. (2024). Methods of real-time parametric diagnostics for marine diesel engines. *Polish Maritime Research*, 31(3), 71–84. <https://doi.org/10.2478/pomr-2024-0037>.
11. CCNR (2018). *Mannheim Declaration "150 years of the Mannheim Act for Rhine Navigation"*. Central Commission for the Navigation of the Rhine. <https://www.ccr-zkr.org>.
12. CCNR (2018). *CCNR roadmap for reducing inland navigation emissions*. Central Commission for the Navigation of the Rhine. <https://www.ccr-zkr.org/12090000-en.html>.
13. European Commission. (2021). *NAIADES III: An inland waterway transport action plan for 2021–2027*. Directorate-General for Mobility and Transport. <https://transport.ec.europa.eu>.
14. Viadonau (2023). *Manual on Danube navigation*. https://www.viadonau.org/fileadmin/user_upload/Manual_on_Danube_Navigation.pdf.
15. Danube Commission (2025). *Market observation for Danube navigation: Results in 2024*. <https://www.danubecommission.org/dc/en/danube-navigation/market-observation-for-danube-navigation/market-observation-for-danube-navigation-results-in-2024/>.
16. Danube Commission (2025). *Statistical yearbook 2022*. https://www.danubecommission.org/uploads/doc/2025/Stat_2022/en_stat_2022.pdf.
17. Van der Linden, E. (2024). *Study on alternative propulsion on the Danube*. Aristoi / viadonau. https://www.viadonau.org/fileadmin/content/20241128_Aristoi_Study_Viadonau_final.pdf.
18. Zhang, C. (2023). *Energy performance and manoeuvring modelling of inland waterway vessels* [Doctoral thesis, Chalmers University of Technology]. https://research.chalmers.se/publication/539162/file/539162_Fulltext.pdf.
19. Zhang, C., Ringsberg, J. W., & Thies, F. (2023). Development of a ship performance model for power estimation of inland waterway vessels. *Ocean Engineering*, 287, Article 115731. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.115731>.
20. Varbanets, R. A., Minchev, D. S., Kucherenko, Yu. M., & Zalozh, V. I. (2024). Real-time parametric diagnostics of marine diesel engines. *Internal Combustion Engines*, 1(2024), 69–75. <https://doi.org/https://doi.org/10.20998/0419-8719.2024.1.09>.
21. Zalozh, V. I., Varbanets, R. A., & Minchev, D. S. (2025). Real-time analysis of cycle-to-cycle variations for marine diesel engines. *Water Transport: Proceedings of State University of Infrastructure and Technologies*, 1(42), 37–45. <https://doi.org/https://doi.org/10.33298/2226-8553.2025.1.42.06>.
22. Suvorov, P. S., Tarasenko, T. V., Zalozh, V. I. (2023). Some issues of vessels energy efficiency assessment in the inland shipping energy transition conditions. *Internal Combustion Engines*, 2(2023), 37–45. <https://doi.org/https://doi.org/https://doi.org/10.20998/0419-8719.2023.2.05>.

Tarasenko T. V., Zalozh V. I. ENERGY EFFICIENCY ASSESSMENT OF INLAND VESSELS VIA OPERATIONAL PARAMETERS OF MARINE ENGINES

The study addresses the assessment of energy efficiency of inland vessels in service, with main engine operational parameters as the physical basis for the calculation. The research targets self-propelled cargo vessels and push-tow convoys of the Danube inland waterway system, where the operational regulatory framework remains incomplete. The objective is to substantiate a diagnostics-informed assessment method and compare it with two established approaches – the University of Belgrade method and the DST (Duisburg) method – both derived from the maritime EEDI. The methodology combines parametric diagnostics of the main internal combustion engine under real operating conditions with phase-by-phase voyage decomposition covering deep-water navigation, shallow-water passage, shoal manoeuvring, and split-convoy operations. For each phase, refined engine load characteristics – specific fuel consumption as a function of effective power and shaft speed – are obtained from in-cylinder indication and vibration diagnostics with statistical processing. The scientific novelty consists in the first-time integration of parametric diagnostics results into energy efficiency calculation for inland vessels, together with an explicit distinction between transport distance and actual vessel track – a distinction ignored by existing methods and particularly consequential for large Danube convoys. The approach yields a reliable operational (Attained) indicator that eliminates the systematic error introduced by averaged nameplate SFC values. Practical applications include in-service monitoring, CESNI-aligned regulatory reporting, and retrofit decision support. The method has been verified for a self-propelled vessel with a five-barge convoy under Danube conditions.

Key words: inland waterway transport; energy efficiency; Danube navigation; marine diesel engine; parametric diagnostics; engine working process; specific fuel consumption; EEDI; operational indicator; push-tow convoy.

© Тарасенко Т. В., Залож В. І.

Статтю прийнято до редакції 20.04.2026

СУДНОВОДІННЯ ТА ЕНЕРГЕТИКА СУДЕН
NAVIGATION AND SHIP POWER ENGINEERING

GENERALIZED MODEL OF CONTROL OF ERGATIC NAVIGATIONAL SUPPORT SYSTEMS WITH AN INTEGRAL INDICATOR OF THE INFLUENCE OF THE HUMAN FACTOR

Nosov P. S., PhD, Associate Professor, Head of the Department of Technical Cybernetics and Information Technologies named after Professor R. V. Merkt, Odesa National Maritime University, Odesa, Ukraine, email: pason@ukr.net, ORCID: 0000-0002-5067-9766.

The article develops a generalized model of the control of ergatic navigational support systems with an integral indicator of the influence of the navigator's human factor. The relevance of the study is determined by the need for a formalized consideration of the behavioral, cognitive-temporal, and dynamic manifestations of the navigator's activity within the contours of risk assessment, decision support, and automated control of vessel motion. The aim of the work is to construct an integrated model that combines the systemic representation of the ergatic system, the formalization of AIS/ECDIS data, the fractal-episodic representation of vessel micromotions, the cognitive-temporal states of the navigator, the gravitational-inertial interpretation of stability, and a risk-oriented control contour. The scientific novelty consists in the introduction of an integral indicator of the influence of the human factor on the increase in the risk of the ergatic navigational support system, which combines episodic behavioral, cognitive-temporal, dynamic-stability, and control-risk components into a unified information-analytical contour. The numerical approbation of the proposed indicator is intended to be carried out using the Monte Carlo method, which makes it possible to evaluate variability, sensitivity, and the probability of transition of the system to strained and critical operating modes. The practical significance of the work lies in the possibility of using the proposed model in decision support systems, the diagnostics of the navigator's state, and the automated formation of safe modes of control of vessel motion.

Key words: ergatic system; navigational support; human factor; safety of navigation; navigator; AIS/ECDIS data; fractal-episodic analysis; integral risk indicator; automated motion control.

DOI: 10.33815/2313-4763.2026.1.32.034-057

Introduction. The contemporary development of maritime transport is accompanied by an increase in shipping intensity, the complication of the navigational situation, the expansion of the use of automated and intelligent control systems, as well as higher requirements for the safety of navigation. Under such conditions, the safety of navigation is determined no longer only by the technical level of individual navigational means, but by the coherence of the functioning of an integral ergatic system in which the navigator, the vessel, the navigational and information environment, data display means, and decision-support contours form a unified functional space. For this very reason, the human factor of the navigator should be considered not as an external source of random errors, but as an internal systemic parameter that directly affects the quality of navigation situation assessment, the timeliness of the navigator's response, and the integral risk level of the functioning of the ergatic system [1, 3, 7, 9].

The analysis of contemporary scientific works shows that research in this field of knowledge is developing mainly along several interrelated but insufficiently integrated directions. The first of them covers the issues of the human factor, organizational causes of navigational errors, and approaches to the safe operation of vessels [1, 3]. The second is associated with the development of ECDIS, the assessment of its influence on the navigator's situational awareness, and the risks of excessive reliance on navigational information systems and electronic cartography [7, 9]. The third direction is focused on the use of AIS data as a source of intelligent analysis of vessel movement through the classification of their trajectories, anomaly detection, and risk assessment [2, 4, 5]. The fourth direction concerns the identification of the behavioral, cognitive, and temporal characteristics of the navigator-operator in ergatic navigational support systems, including attention analysis, subjective time distortion, prediction of the navigator's actions, and analysis of his or her functional state [6, 8, 10–12].

At the same time, most of the existing approaches remain fragmentary. Within some works, the technical-navigational or information-system aspect predominates, while within others the

analysis of the human factor, qualification, attention, or risk prevails; however, there is no integral model that would combine the observed AIS/ECDIS data, the microdynamics of the trajectory, the behavioral features of the navigator's actions, the cognitive-temporal states, and the dynamics of risk change within a single analytical contour. This gives rise to the scientific problem of integrating heterogeneous layers of description – from trajectory data and features of micromovements to models of the navigator's state, his or her qualification parameters, and procedures of risk-oriented control [2, 6, 10–13].

This problem becomes especially relevant under the conditions of transition from passive recording of navigational events to the intelligent interpretation of the navigator's actions on the basis of informational control features. The availability of large volumes of AIS/ECDIS data creates prerequisites for the construction of formalized models capable not only of describing the vessel's movement trajectory, but also of revealing hidden features of micromovements, operator instability, deterioration in the quality of situation perception, and the transition of the system to strained or critical operating modes.

All this determines the necessity for a unified integral indicator that would combine behavioral, cognitive-temporal, dynamic-stability, and control-risk components within the framework of a generalized model of the ergatic navigational support system.

Analysis of recent research and publications. In research on navigation safety problems, an approach is increasingly dominating according to which automated systems are considered not in isolation, but in close connection with the human factor, the operator's cognitive workload, and the specific features of human-machine interaction. Thus, paper [14] investigates the impact of human-automation interaction in maritime operations, which emphasizes the need to assess not only technical reliability, but also the operator's ability to correctly recognize the development of potentially dangerous modes. In paper [15], the problematics of the human factor in remote ship operations are considered as interdisciplinary, with emphasis placed on issues of cognitive support, communication, and the organization of supervision. Research [16] complements this direction, as it shows that, in the transition to remote monitoring and control of autonomous unmanned vessels, the key problem remains the preservation of adequate operator situational awareness. Taken together, these works confirm that the human factor is not removed from the safety loop with the growth of automation, but, on the contrary, acquires new forms of manifestation under conditions of remote control and complex information interfaces.

A separate block of contemporary works is devoted to cooperative decision-support systems for navigators during maneuvering and collision avoidance. Paper [17] proposes a collision avoidance system specifically oriented toward human-machine cooperation in decision-making in conflict navigation situations. Paper [18] reveals this issue from the perspective of the end user, as it analyzes navigators' attitudes toward a collision avoidance decision-support system and in fact shows that the effectiveness of such solutions is determined not only by the algorithm, but also by the extent to which the system is consistent with the operator's mental model. In research [19], the collision avoidance task for autonomous ships is considered directly under conditions of human-machine cooperation, which once again emphasizes the need to integrate into safety models not only formal criteria of encounter, but also the nature of human participation in maneuver selection. Taken together, these works demonstrate a transition from purely computational schemes to interpretable cooperative approaches in which an automated decision must be understandable and acceptable to the navigator.

An important direction of recent research is connected with the explainability of artificial intelligence and the consideration of the human factor in autonomous or remotely controlled shipping systems. Paper [20] substantiates the need for human-centered explainable artificial intelligence for maritime autonomous surface vessels, that is, for an approach under which an algorithm must be not only functionally effective, but also understandable to the user. Research [21] develops a related problematic, focusing on the influence of the human factor on the safety of remotely controlled merchant vessels. Paper [22] proposes an analysis of the influence of the human-machine cooperation factor on risk in maritime transport based on historical data on errors

and violations. These publications are important for the present article, since they confirm that, even under conditions of a high level of informatization and automation, navigation safety is determined not only by the technical capabilities of the system, but also by the quality of interface design, the level of trust in system decisions, and the human ability to correctly interpret the information received.

At a more generalized level, recent research is moving from the analysis of individual tasks to a systemic understanding of the safety of human-machine interaction in the maritime field. Paper [23] proposes an integrated framework for assessing the safety and efficiency of human-MASS interactions, which indicates the maturity of this direction in the contemporary international literature. Taken together, these works show that international research has already accumulated sufficient material on HMI, remote control, decision support, explainable AI, and collision avoidance.

At the same time, the unresolved part of the problem remains the construction of a unified analytical model that would combine the behavioral manifestations of the navigator, his or her cognitive-temporal states, trajectory features of vessel movement, and integral risk assessment within a single formalized contour.

Purpose and objectives of the research.

The purpose of the article is to develop a generalized model for controlling ergatic navigational support systems with an integral indicator of the influence of the navigator's human factor.

To achieve the stated purpose, it is necessary to solve the following objectives:

- to formalize the ergatic system as a unified functional space of states;
- to present AIS/ECDIS data as an external informational image of this system;
- to identify fractal-episodic features of vessel micromotions and to integrate cognitive, temporal, and behavioral characteristics of the navigator's activity;
- to form an integral indicator of the influence of the human factor on the increase in risk;
- to outline an approach to the numerical approbation of the proposed model by the Monte Carlo method.

Main material of the research. Thus, the relevant scientific task is to develop a generalized model for controlling ergatic navigational support systems in which the navigator's human factor is introduced into the structure of the model as an internal parameter associated with trajectory manifestations of control, cognitive-temporal states, and changes in the risk level. Such a formulation makes it possible to move from a fragmented analysis of individual factors to a unified risk-oriented space of assessment and control.

Theoretical and methodological foundations of the generalized model.

The generalized control model should be considered as a state space:

$$E(t) = \langle X_O(t), X_V(t), X_N(t), X_R(t) \rangle, \quad (1)$$

where $X_O(t)$ is the state of the navigator-operator, $X_V(t)$ is the state of the vessel, $X_N(t)$ is the navigational-information environment, and $X_R(t)$ is the regulatory-situational constraints. Such a representation of the model fundamentally establishes that the navigator is not an external user of the system, but enters its internal structure as one of the key control variables.

The observable informational layer of the system is defined by the relation:

$$Y(t) = H(E(t)) + \varepsilon(t), \quad (2)$$

where $Y(t)$ is the vector of observed navigational data, $H(\cdot)$ is the operator of mapping the internal state of the ergatic system into measurable parameters, and $\varepsilon(t)$ is the observation error. In turn, AIS/ECDIS data acquire a clear methodological status: they are not the system itself, but rather its external informational image.

The conceptual-structural model of the navigator's information field sets the context for this system formulation. The information field is considered as a multi-level, functionally ordered set of navigational, communication, procedural, spatio-temporal, and risk-oriented data that ensure the

formation of a situational model of the environment, the assessment of the vessel's state, the selection of a control mode, and the monitoring of the results of implemented actions.

Thus, at the theoretical and methodological level, an integrated contour “navigator – information field – technical means – external environment – control modes” is formed. It is precisely this that determines the necessity of proceeding to the formalization of navigational observations as the analytical layer of the system.

Formalization of navigational data and construction of the analytical space.

The basic unit is not an individual AIS/ECDIS message, but a time-ordered vessel movement trajectory or its fragment corresponding to a certain control mode. It is the trajectory that preserves the causal-temporal structure of the navigation process, the sequence of micro-corrections, and local deviations from the reference line of motion.

In its minimal form, the trajectory can be represented as:

$$T_f = \{(t_i, \varphi_i, \lambda_i)\}_{i=1}^{N_f}, \quad f \in \Phi, \quad (3)$$

where Φ is the set of vessel passages, t_i is a time stamp, φ_i, λ_i are geographic coordinates, and N_f is the number of observations.

Formally, the task of normalization and unification is represented as the mapping:

$$F^{(k)} \rightarrow S^{(k)}, \quad (4)$$

where $F^{(k)}$ is the initial INS file of the k -th passage, and $S^{(k)}$ is the unified series suitable for mathematical analysis.

The standardized trajectory series is defined as:

$$S^k = \{(t_i, x_i, y_i, COG_i, ROT_i, XTE_i)\}_{i=1}^{N_k^*} \quad (5)$$

where t_i is time on a unified scale, (x_i, y_i) are coordinates in a local metric system, COG_i is the course, ROT_i is the angular rate of turn, and XTE_i is the cross-track deviation from the reference trajectory.

The temporal and spatial unification of data is formalized by the operators:

$$\Phi_t : Time_i \rightarrow t_i, \quad t_i \in \text{sec}, \quad (6)$$

$$\Phi_{xy} : (Lat_i, Lon_i) \rightarrow (X_i, Y_i) \in \check{Y}^2. \quad (7)$$

The methodological completeness of the unified representation is determined not only by the composition of variables, but also by the system of requirements it must satisfy. Such a system is expediently represented as:

$$\Re(S^{(k)}) = \{R_t, R_s, R_c, R_d, R_q, R_i\}, \quad (8)$$

where R_t is the requirement of temporal unification, R_s is the requirement of spatial and metric consistency, R_c is the requirement of kinematic compatibility of motion parameters, R_d is the requirement of correctness in constructing derived features, R_q is the requirement of data quality control, and R_i is the requirement of interpretive suitability for the tasks of analyzing the navigator's actions. In this formulation, the unified series acts not merely as a data format, but as a structured environment for further analytical and intelligent processing.

As a result, a unified temporal-spatial analytical space is formed in which the observed vessel movement can already be interpreted as a carrier not only of geometric, but also of kinematic and behavioral features.

Intelligent processing of AIS/ECDIS and identification of hidden features of the navigator's actions.

The generalized model cannot be limited only to the standardized series $S^{(k)}$, since such a series by itself still does not provide an answer to the question of the structure of the navigator's local actions. For this very reason, a fractal-episodic approach is used, within which the trajectory is

analyzed not as a continuous curve, but as a sequence of local episodes of micromotions with their own fractal and dynamic characteristics.

The formalization of the micromotion episodes constructed at the previous stages is as follows:

$$\varepsilon_{f,i} = (t_{f,i}^{start}, t_{f,i}^{end}, X_{f,i}^{peak}, Y_{f,i}^{peak}, B_{f,i}), \quad (9)$$

which have temporal boundaries, duration, spatial reference, and a set of fractal-dynamic characteristics.

Then, for each episode, a vector of primary fractal-dynamic features is formed:

$$z_{f,i}^{raw} = (h_X^{raw}, h_Y^{raw}, \mu_X^{raw}, \mu_Y^{raw}, h_R^{raw}, h_C^{raw}), \quad (10)$$

which constitutes the primary signature of the micromotion episode.

Next, a sample of feature values is formed:

$$\{z_n\}_{n=1}^N = \{Z(\varepsilon_{f,i})\}, \quad (11)$$

after which decile binning is applied.

As a result, the six basic features of the episode are encoded by six digits, and the fractal code of the episode is defined as:

$$FC - abcdef = FC - (hX, hY, \mu X, \mu Y, hR, hC), \quad (12)$$

where $a, \dots, f \in \{0, \dots, 9\}$ characterize the corresponding fractal-dynamic groups of features.

For the further typologization of episodes, the concept of a code family is also used:

$$family = ab \in \{00, \dots, 99\}. \quad (13)$$

In parallel with fractal coding, a continuous risk indicator is calculated for each episode. This forms the contextual component of risk and is completed by a three-level categorization into High, Medium, and Low, where:

$$High \Leftrightarrow (hX \geq 8 \wedge hY \geq 8 \vee hR \geq 8 \vee hC \geq 8) \wedge D_{f,i} \geq D_{high}, \quad (14)$$

$$Medium \Leftrightarrow (hX + hY \geq 12) \vee (hR + hC \geq 12). \quad (15)$$

All other episodes are automatically assigned to the Low category. In its completed form, each micromotion episode is described by the triple:

$$(FC - abcdef, R_{f,i}^{tot}, RiskLevel_{f,i}). \quad (16)$$

Thus, the vessel trajectory is transformed into a behavioral-risk space in which local movement fragments become formalized carriers of features of the navigator's actions.

Integration of the cognitive, temporal, and psychophysiological states of the navigator.

The generalized model must take into account not only the external trajectory manifestations of the navigator's activity, but also the internal cognitive mechanisms that determine the distribution of attention, the temporal organization of actions, and the psychophysiological state of the operator.

The distribution of the navigator's attention is represented as a metrized space in which changes in the focus of perception are described by the metric:

$$ds^2 = e^2 dR^2 - a^2 d\theta^2 + \sin^2 \theta [d\psi^2 + \sin^2 R d\tau^2]. \quad (17)$$

At the same time, the complexity of the navigational situation lies in the fact that all v_i are independent of one another and cannot be mutually substituted:

$$v\{f : f \in F, (x, y, z) \in f(v_1), \dots, (x, y, z) \in f(v_n)\} = \prod_{i=1}^n p_{(x,y,z)}(v_i) \quad (18)$$

Let the tendency in the 3D space of alternatives be denoted as P_j , where $j = 1, \dots, |\mathfrak{R}|$; then the tendency along the x -axis, “vision,” will take the form:

$$X_j(x, y, z) = \begin{cases} \lambda \in [0, 5; 1], & \text{if } (x, \bar{y}, \bar{z}) \in P_j, \\ 1 - \lambda, & \text{if } (\bar{x}, y, z) \in P_j, \\ 0, & \text{if } (x, y, z) \notin P_j. \end{cases} \quad (19)$$

where the probability that the attention object v_i will have the tendency is P_j :

$$p_j(v_i) = v \{ f : f \in F, f(v_i) = P_j \}. \quad (20)$$

Then the generalized model for all objects and individual tendencies of perception will take the form (21):

$$p_{(x,y,z)}(v) = \sum_{j=1}^{|\mathfrak{R}|} X_j(x, y, z) p_j(v). \quad (21)$$

It follows from this model that, under conditions of an insufficient level of training, overload, or excessive complexity of the navigational situation, complete coverage of all attention objects becomes unlikely.

To describe the temporal organization of the operator cycle, a Markov approach is used. The probability of transition between temporal states is defined as:

$$P \{ S(t + \Delta t) = s_j | S(t) = s_i \} = p_{ij}(\Delta t), \quad (22)$$

and the evolution of the probabilities of these states is described by the Kolmogorov equations:

$$\frac{dp_i(t)}{dt} = \sum_{j \neq i} p_j(t) \lambda_{ji} - p_i(t) \sum_{j \neq i} \lambda_{ij}. \quad (23)$$

The interrelated quantities $\xi_1, \dots, \xi_n$ are represented through the corresponding relation of the measure of possibility:

$$\begin{aligned} \mu_{\xi_1, \dots, \xi_n}(x_1, \dots, x_n) &= \pi \{ \gamma \in \Gamma : \xi_1(\gamma) = x_1, \dots, \xi_n(\gamma) = x_n \} = \\ &= \pi \{ \xi_1^{-1}(x_1) \cap \dots \cap \xi_n^{-1}(x_n) \}, \quad \forall (x_1, \dots, x_n) \in R^n \end{aligned} \quad (24)$$

where π is the measure of possibility,
 Γ is the set of elements of the system,
 R is the modal value of the possibility of the quantity,
 γ is an atomic element of the system.

To normalize the quantities $\xi_1, \dots, \xi_n$, the criterion α is introduced, which is interpreted as the level of risk of erroneous distribution of the estimate. Accordingly, the form of the distribution of possible polar quantities $H(x)$ under the conditions of the fuzziness coefficient b' relative to the investigated parameter a' , which characterizes the manifestation of subjective time distortion, is described by the relations:

$$b' = \frac{\max_{1 \leq i \leq n} x_i - \min_{1 \leq i \leq n} x_i}{H_+^{-1}(\alpha) - H_-^{-1}(\alpha)}, \quad (25)$$

$$a' = \frac{1}{2} \left(\max_{1 \leq i \leq n} x_i - \min_{1 \leq i \leq n} x_i \right) + \frac{b'}{2} (H_+^{-1}(\alpha) - H_-^{-1}(\alpha)) \quad (26)$$

The cognitive-temporal block is completed by models of critical situations, contextual similarity, and p -adic complexity of the situation. For this purpose, in particular, the representation is used:

$$x = \alpha_0 + \alpha_1 p + \dots \alpha_{n-1} p^{n-1}, \quad (27)$$

which corresponds to the p -adic description of the level of structural complexity of perception.

Depending on the value of the degree of similarity, a logical relation arises between the current situation β and the situation α that is the closest in context and in the degree of past experience. Then the comparison of the two closest situations is defined as:

$$\text{Sim}(\alpha, \beta | \{\tau/T\}) = |\{\tau/T\}_\alpha \cap \{\tau/T\}_\beta| / |\{\tau\}|, \quad (28)$$

where τ is the terminal element of experience with respect to the operation being performed.

Further, it should be determined that the lower the threshold of the emotional surge of situation β , the more difficult it is to identify a coincidence with situation α , taking into account that:

$$\forall \alpha, \beta \text{ if } \{\tau/T\} \leq \{\tau/T'\} \Rightarrow 0 \leq \text{Sim}(\alpha, \beta | \{\tau/T\}) \leq \text{Sim}(\alpha, \beta | \{\tau/T'\}) \leq 1. \quad (29)$$

It is clear that, depending on the completeness of $\{G(\tau)\}$, the possibility arises of determining the maximum convergence of α and β :

$$\text{Sim}(\alpha, \beta | \{G(\tau)\}) = \max_{\{\tau/T\}^\wedge} \text{Sim}(\alpha, \beta | \{\tau/T\}), \quad M = \prod_{\tau \in \{\tau\}} [G(\tau)], \quad (30)$$

where M is the quantity of similarity, and $\{\tau/T\}^\wedge$ is the set of terminal domains.

Thus, there is a probability of an increase in the risk of maritime catastrophes due to the absence of the factor of “distinguishing” two situations $\{\tau/T\}_\alpha \approx \{\tau/T\}_\beta$. The only possible distinguishing feature remains the context of the situation with emotional bursts close in their intensity:

$$K^{em} = \langle \Omega(Z), \{G(\tau)\}, \{S\} \rangle, \quad (31)$$

then:

$$\text{Con}(\alpha, \beta | K^{em}) = 1 \Leftrightarrow z_\alpha = z_\beta, \text{ else } \text{Con}(\alpha, \beta | K^{em}) < 1, \quad (32)$$

where S is the set of formed experienced reactions.

In this form, the internal states of the navigator acquire a formalized status and can be included in procedures for risk assessment and the selection of a control mode.

Formalization of the influence of the human factor on the stability, unsteadiness, and risk of the ergatic system.

The proposed gravitational-inertial model, introducing a direct physical-analog representation of the human factor through the position of the internal center of gravity along the system axis, serves as the basic foundation for the analysis of the controlled dynamics of the navigational contour in the ergatic system.

Let us introduce the normalized coordinate of the center of gravity of the human factor:

$$z_h(t) \in [0, 1], \quad (33)$$

where $z_h(t) \rightarrow 0$ corresponds to the most stable functional state of the navigator, and $z_h(t) \rightarrow 1$ to the most destabilizing one.

The normative restoring moment is defined as:

$$M_N(\theta, t) = mG(t)l \sin \theta, \quad (34)$$

and the internal destabilizing moment of the human factor as:

$$M_H(\theta, t) = m_h g_h z_h(t) \sin \theta. \quad (35)$$

The resulting moment of the system is determined by the relation:

$$M_\Sigma(\theta, t) = M_{ext}(t) + M_H(\theta, t) - M_N(\theta, t), \quad (36)$$

and the angular dynamics of the system is described by the equation:

$$J_\theta \theta'' + c_\theta \theta' = M_\Sigma(\theta, t), \quad (37)$$

$$J_\theta \theta'' + c_\theta \theta' = M_{ext}(t) + (m_h g_h z_h(t) - mG(t)l) \sin \theta. \quad (38)$$

For small angles of deviation, when $\sin \theta \approx \theta$, the linearized form becomes:

$$J_\theta \theta'' + c_\theta \theta' + k_{eff}(t) \theta = M_{ext}(t). \quad (39)$$

The effective angular stiffness of the system is defined as:

$$k_{eff}(t) = mG(t)l - m_h g_h z_h(t), \quad (40)$$

and the critical position of the center of gravity of the human factor is given by the relation:

$$z_{h,crit}(t) = \frac{mG(t)l}{m_h g_h}, \quad (41)$$

while the relative stability margin is:

$$\mu_{st}(t) = \frac{k_{eff}(t)}{mG(t)l}. \quad (42)$$

Further accounting for the degradation of the functional resources of the system is carried out through the parameters:

$$I_{3,eff}(t) = I_{3,0}(1 - \alpha_I z_h(t)), \quad (43)$$

$$\omega_{3,eff}(t) = \omega_{3,0}(1 - \alpha_\omega z_h(t)), \quad (44)$$

$$L_{eff}(t) = I_{3,eff}(t) \omega_{3,eff}(t), \quad (45)$$

and the frequency of forced corrections is described as:

$$\Omega(t) = \frac{M_{dem}(t)}{L_{eff}(t)}. \quad (46)$$

Then the integral manifestation of risk can be represented as a normalized logistic function:

$$R(t) = \sigma(a_0 + a_1 |\theta(t)| + a_2 |\theta'(t)| + a_3 \Omega(t) + a_4 (1 - \mu_{st}(t))), \quad (47)$$

where $R(t) \in [0,1]$ is the integral risk level; $\sigma(\cdot)$ is the logistic normalization function; $a_0, \dots, a_4$ are the calibration parameters of the model.

In this formulation, the human factor enters the integral dynamics of the ergatic system as an internal destabilizing parameter, which makes it possible to move from a qualitative description of fatigue, tension, or overload to a formal mechanism of changes in stability and risk.

Risk-oriented control contour and applied output into automated modules.

The final level of the generalized model is the transition from the assessment of states and risk to the formation of control actions. This contour is unfolded through the p-adic structuring of the situation, multicriteria risk functionals, admissible control domains, automated multi-target collision avoidance, and the storm subcontour.

At the level of the p-adic description of the situation, the following representation is used:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} p^n y = x, \quad y \in Z_p, \quad (48)$$

and the function of generating the next point:

$$f_s(x) = x^s, \quad s = 2, 3, \dots, n. \quad (49)$$

This makes it possible to transition to the nearest p -adic systems along an ascending or descending trajectory depending on the situation:

$$U(\tau) = \left[\bigcap_{j=1, \dots, n} Gv^\uparrow(\tau|a_j) \right]. \quad (50)$$

At the same time, the transition process is symmetric regardless of direction:

$$Gv^\downarrow(\tau|b) = Gv^\uparrow(\tau|a) \Rightarrow \langle \tau, P \rangle_w \text{ при } Gv^\uparrow(\tau|a_i) \cap Gv^\uparrow(\tau|b_i) = \emptyset. \quad (51)$$

Proceeding from the proposed relations, it can be assumed that there exists a certain balance of p -adicities for which the following holds to an equal extent:

$$\begin{aligned} \forall x \in [Gv(\tau)] &\Rightarrow \exists a \in \{a\}, \\ x \in [Gv^\uparrow(\tau|a)] &\& \exists b \in \{b\}, x \in [Gv^\downarrow(\tau|b)]. \end{aligned} \quad (52)$$

Thus, the observed balance of transition to p -adic structures may depend both on the factors of the level of complexity of the navigational situation (necessity) and the level of qualification of the navigator (possibility):

$$Gv(\tau) = \bigcup_{a \in \{a\}} Gv^\uparrow(\tau|a) = \bigcup_{b \in \{b\}} Gv^\downarrow(\tau|b). \quad (53)$$

Based on the previously considered approaches and formal descriptions, a method for diagnosing the perception of the navigational situation is proposed, based on the accepted theory of p -adic systems and the metric: $\rho_p(x, y) = |x - y|_p, x \rightarrow |x|_p$.

The complexity of the situation requires from the navigator an appropriate level of perception, each of which can be expressed by the spaces $(X, \rho) \vee (Y, \rho')$. Thus, for example, decision-making in binary logic ($p = 2$) most closely corresponds to simple tasks requiring the switching on or off of the navigator's attention according to specified features. In turn, ($p = 3$) adds a linguistic variable according to the principle:

$$\rho'(j(x_{1_{p=2}}, j|x_{2_{p=2}})) = \rho(x_{1_{p=3}}, x_{2_{p=3}}), \quad (54)$$

and transfers it to a higher level. This means that tasks solved in space Y cannot be solved in space X . This process can be formally described using the term "subjective entropy" H_π :

$$H_\pi = - \sum_{i=1}^N \pi(\sigma_i) \cdot \ln \pi(\sigma_i), \quad (55)$$

Further, risk is considered as a controlled object. For this purpose, the condition of motion without an increase in risk is introduced:

$$\frac{d}{dt} \rho(p, t) = \nabla \rho(p, t) \cdot p'(t) + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0, \quad (56)$$

and in the quasi-stationary case:

$$\nabla \rho(p, t) \cdot p'(t) = 0. \quad (57)$$

For the multicriteria assessment of control quality, a vector functional is used:

$$J(x, u) = \begin{bmatrix} \int C_1(x(t), u_1(t)) dt \\ \int C_2(x(t), u_2(t)) dt \\ \dots \\ \int C_m(x(t), u_m(t)) dt \end{bmatrix}, \quad (58)$$

and a penalty functional of manual interventions:

$$C_H = \beta_1 + \beta_2 \int_{H \neq 0} u^2(t) dt. \quad (59)$$

Threshold constraints on the quality components or aggregated risk are specified by the formula:

$$C_i \leq C_i^{perm}, \text{ or } \sum \alpha_i C_i \leq R_p^{perm} \quad (60)$$

Since in real vessel traffic the problem has a multicriteria nature (interaction with a set of targets/vessels), it is expedient to use the target vector in the form:

$$s(x) = \begin{bmatrix} S_1(x) \\ S_2(x) \\ \dots \\ S_n(x) \end{bmatrix}, \quad (61)$$

which reflects the set of performance criteria that must be coordinated. To reinforce the consistency of the goals, a condition is applied that reflects the absence of mutual sensitivity of the criteria:

$$\frac{\partial C_i}{\partial C_j} = 0, \quad i \neq j \quad (62)$$

The formal formulation of the optimization problem under safety constraints is implemented through the Lagrangian construction and the Kuhn–Tucker conditions, where the Lagrange multipliers acquire the meaning of the “tension” of the vessel motion control process with respect to risk and resource constraints:

$$L(x, \lambda) = \lambda_0 S(x) - \lambda_1 \varphi_1(x) - \lambda_2 \varphi_2(x), \quad \nabla_x L(x, \lambda) = 0, \quad (63)$$

where $\varphi_1(x)$ may represent the risk corridor constraint $\rho(p, t) \leq \rho_A$, and $\varphi_2(x)$ may represent the constraint on dangerous approaches/intersections of risk domains. The implementation of the “onboard controller cycle,” as a continuous mechanism for tracking risk, is formalized through the formulation of optimal control on an interval and the use of the Hamiltonian:

$$(x^*, u^*, t^*) \rightarrow \text{extr} \int_{t_0}^{t_1} F(x, u, t) dt, \quad x' = f(x, u, t), \quad (64)$$

with the Lagrangian functional:

$$L^* = \int_{t_0}^{t_1} [f_0 \lambda_0 + \lambda^T f - \lambda^T x'] dt = \int_{t_0}^{t_1} L(x, x', u, \lambda) dt, \quad (65)$$

and the decomposition:

$$L(x, x', u, \lambda) = H(x, u, \lambda) - \lambda^T x'. \quad (66)$$

The optimality conditions in the controller contour may be represented as the choice of control by the navigator that minimizes the Hamiltonian at each step:

$$u^*(t) \in \arg \min_{u \in U} H(x(t), u, \lambda(t)), \quad \frac{\partial H}{\partial u} = 0, \quad (67)$$

together with the relations for the state and conjugate variables:

$$x' = \frac{\partial H}{\partial \lambda}, \quad \lambda' = -\frac{\partial H}{\partial x}. \quad (68)$$

The practical output into automated multi-target collision avoidance is implemented through admissible control domains. For each j -th target, the following is specified:

$$\Omega_j = \{(V, K) | \Delta V_j^T(V, K) \in SDC_j\}, \quad (69)$$

and the general admissible control domain is defined as:

$$\Omega = \bigcap_{j=1}^{N_g} \Omega_j. \quad (70)$$

The deficit of safe actions is estimated by the indicator:

$$\rho(t) = 1 - \frac{\mu(\Omega(t))}{\mu(\Omega_0)}, \quad \rho(t) \in [0,1], \quad (71)$$

and the target function for maneuver selection is written in the form:

$$J(V, K) = w_s \rho(t) + w_r |K - K_{plan}| + w_v |V - V_{plan}| + w_u U_{man}(V, K). \quad (72)$$

Another applied completion of the model is the storm subcontour, where the “imaginary” wave period is used:

$$\tau = \frac{\lambda}{1.25\sqrt{\lambda} + 0.514V \cos q}, \quad (73)$$

and the conditions of resonance-dangerous modes: $0.7T_B \leq \tau \leq 1.3T_B$, $0.7T_L \leq \tau \leq 1.3T_L$

The PID-like law for forming the rudder angle δ to achieve the desired course K^* and the normalized speed control command θ are given as follows:

$$\delta = k_\psi \cdot (\Psi_m - K^*) + k_\omega \cdot \omega_m + k_f \cdot \int (\Psi_m - K^*) dt, \quad \theta = (\pi/2) \cdot (V^* / V_{max}). \quad (74)$$

where Ψ_m and ω_m are the measured course and angular velocity, and V_{max} is the maximum permissible speed under current conditions. These equations close the contour “assessment of the risk state – choice of response – execution – repeated assessment,” which constitutes the content of operational risk management.

Unlike the manual interpretation of diagrams, the risk factor is calculated automatically in the contour of the onboard controller and is used as a criterion for monitoring the execution of the storm scenario.

In this sense, the functioning of the system should be described as a closed contour with a control object model and a measurement channel, where the general form of the vector model is described as:

$$\frac{dX}{dt} = f(X, U, W, T_B, T_L), \quad X_m = CX + \zeta, \quad U = F(X_m, X^*), \quad X^* \in \bar{\Omega}. \quad (75)$$

Here, X is the state vector (speed, course, angular velocity, etc.), U is the control inputs, W is the external disturbances (wave, wind), X_m is the measured state, C is the measurement matrix, ζ is the measurement error/noise, $\bar{\Omega}$ is the domain of nonresonant (admissible) modes, and X^* is the program (target) mode.

As a result, the generalized model extends not only into the plane of diagnostics and assessment, but also into the real contours of the automated formation of a safe vessel motion mode under normal and difficult conditions.

Integral indicator of the influence of the human factor on the increase in the risk of the ergatic navigational support system and its numerical approbation by the Monte Carlo method.

A logical stage in summarizing the research results is the construction of an integral indicator that combines the already formed levels of description: the systemic representation of the ergatic system, the formalization of AIS/ECDIS data, the fractal-episodic interpretation of vessel micromotions, models of the cognitive and temporal states of the navigator, the gravitational-inertial model of stability and risk, and risk-oriented control contours. As noted above, the human factor of the navigator should be considered not as a random external disturbing influence, but as an internal parameter of the ergatic system that determines the completeness of situation perception, the quality of danger assessment, the timeliness of reactions, the choice of control actions, and the integral level of vessel motion safety. This creates the basis for the introduction of a new integral indicator of a higher level of generalization.

Within the framework of this research, an integral indicator of the influence of the human factor on the increase in the risk of the ergatic navigational support system is proposed:

$$I_{HF \rightarrow R}(t) \in [0, 1], \quad (76)$$

which is interpreted as a normalized estimate of the total risk-generating influence of the navigator's actions, states, and internal dynamics on the functioning of the ergatic navigational contour at time t .

Structurally, this indicator must combine four groups of factors: the episodic behavioral factor $E(t)$, the cognitive-temporal factor $C(t)$, the dynamic-stability factor $S(t)$, and the control-risk factor $U(t)$. Such a decomposition corresponds to the directions of the research: fractal-episodic analysis forms the behavioral features of micromotions; then formalized cognitive, temporal, p -adic, and entropic characteristics are introduced; the gravitational-inertial model provides a dynamic mechanism for the transition from the navigator's state to a decrease in stability; and, at the final stage, a risk-oriented contour for the selection of control actions is formed.

The basis of the integral model is expediently represented in a logistic-normalized form:

$$I_{HF \rightarrow R}(t) = \sigma \left(\begin{aligned} &\theta_0 + \theta_E E(t) + \theta_C C(t) + \theta_S S(t) + \theta_U U(t) + \theta_{EC} E(t) C(t) + \\ &+ \theta_{CS} C(t) S(t) + \theta_{SU} S(t) U(t) + \theta_{EU} E(t) U(t) \end{aligned} \right), \quad (77)$$

where $\sigma(x) = (1 + e^{-x})^{-1}$ is the logistic normalization function; θ_0 is the basic shift; $\theta_E, \theta_C, \theta_S, \theta_U \geq 0$ are the coefficients of pairwise interaction. Unlike a simple linear sum, such a structure takes into account the amplification effect, when the simultaneous growth of several unfavorable factors brings the system into a strained or critical mode faster than would follow from the independent influence of each of them.

The first component, the episodic behavioral factor $E(t)$, is built on the results of fractal-episodic analysis of AIS/ECDIS trajectories. For this purpose, a vector of primary fractal-dynamic features of the episode is introduced:

$$z_{f,i}^{raw} = (h_X^{raw}, h_Y^{raw}, \mu_X^{raw}, \mu_Y^{raw}, h_R^{raw}, h_C^{raw}), \quad (78)$$

as well as decile coding and the $FC-abcdef$ code, which makes it possible to move from a continuous description of the track to a compact formal representation of local micromotions. In addition, a continuous full episodic risk $R_{f,i}^{tot}$ and its categorization into High–Medium–Low have been constructed. Therefore, it is natural to define the aggregated episodic factor as the weighted mean of the full episodic risk within the analyzed time window $\Omega(t)$:

$$E(t) = \frac{\sum_{i \in W(t)} \gamma_i R_{f,i}^{tot}}{\sum_{i \in W(t)} \gamma_i}, \quad (79)$$

where γ_i is the weight of the i -th episode. To take into account the duration, turning intensity, and danger category, we set:

$$\gamma_i = 1 + \eta_D \bar{D}_{f,i} + \eta_\omega \bar{\omega}_{rms,i} + \eta_H 1_{High,i} + \eta_M 1_{Medium,i}, \quad (80)$$

where $\bar{D}_{f,i} \in [0, 1]$ is the normalized duration of the episode; $\bar{\omega}_{rms,i} \in [0, 1]$ is the normalized RMS of the angular velocity; $1_{High,i}$ and $1_{Medium,i}$ are indicators of belonging to the risk categories; $\eta_D, \eta_\omega, \eta_H, \eta_M \geq 0$ are coefficients of significance. In such a formulation, $E(t)$ reflects not merely the average risk of local episodes, but the integrated behavioral instability of control. The construction of this factor directly relies on the fractal-episodic apparatus, including the features $z_{f,i}^{raw}$, the $FC-abcdef$ code, and the categorization of episodic risk.

The second component, the cognitive-temporal factor $C(t)$, must aggregate such elements of formalization as: the model of attention distribution, the temporal states of the operator cycle, subjective time distortion, the p -adic complexity of the situation, and subjective entropy. For this purpose, the following relation is proposed:

$$C(t) = \alpha_A A(t) + \alpha_T T(t) + \alpha_D D(t) + \alpha_P P(t) + \alpha_H H(t), \quad (81)$$

where $\alpha_A, \alpha_T, \alpha_D, \alpha_P, \alpha_H \geq 0, \alpha_A + \alpha_T + \alpha_D + \alpha_P + \alpha_H = 1$.

Here, $A(t) \in [0,1]$ is a normalized indicator of attention deficit or imbalance, which is formed on the basis of the model of its distribution in metric space; $T(t) \in [0,1]$ is an indicator of temporal instability, based on the probabilities of temporal states and the intensities of transitions between them; $D(t) \in [0,1]$ is an indicator of subjective time distortion; $P(t) \in [0,1]$ is an indicator of the p -adic complexity of the current situation; $H(t) \in [0,1]$ is an indicator of subjective entropy. Such a structure makes it possible to combine into one scalar parameter those cognitive and temporal mechanisms that are mathematically formalized separately – through the metric of attention space, Markov transitions between temporal states, fuzzy relations of subjective time distortion, the p -adic representation of situation complexity, and models of subjective entropy.

The third component, the dynamic-stability factor $S(t)$, is based on the updated gravitational-inertial model, where the human factor is introduced through the coordinate of the center of gravity $z_h(t)$, which affects the effective angular stiffness $k_{eff}(t)$, the critical boundary $z_{h,crit}(t)$, the relative stability margin $\mu_{st}(t)$, the effective characteristics $I_{3,eff}(t)$, $\omega_{3,eff}(t)$, the reserve $L_{eff}(t)$, the frequency of forced corrections $\Omega(t)$, and the integral risk $R(t)$. On this basis, the following is proposed:

$$S(t) = \beta_z \bar{z}_h(t) + \beta_\mu (1 - \mu_{st}(t)) + \beta_L (1 - \bar{L}_{eff}(t)) + \beta_\Omega \bar{\Omega}(t) + \beta_R \bar{R}(t), \quad (82)$$

where $\beta_z, \beta_\mu, \beta_L, \beta_\Omega, \beta_R \geq 0, \beta_z + \beta_\mu + \beta_L + \beta_\Omega + \beta_R = 1$.

Here, $\bar{z}_h(t) = \min\{1, z_h(t) / z_{h,crit}(t)\}$ is the normalized position of the center of gravity of the human factor relative to the stability boundary; $\mu_{st}(t)$ is the relative stability margin; $\bar{L}_{eff}(t) \in [0,1]$ is the normalized reserve of stable functioning; $\bar{\Omega}(t) \in [0,1]$ is the normalized frequency of forced corrections; $\bar{R}(t) \in [0,1]$ is the normalized integral risk of the dynamic layer.

Thus, $S(t)$ reflects no longer potential, but actual intrasystem destabilization caused by the human factor. The expediency of this approach is confirmed by simulation modeling, where, when moving from a low to a high position of $z_h(t)$, a consistent decrease in k_{eff} , μ_{st} , L_{eff} , and an increase in Ω and R , are observed, which corresponds to the transition from a stable mode to a limiting high-risk mode.

The fourth component, the control-risk factor $U(t)$, must reflect no longer internal states, but the consequences of their influence on the space of admissible decisions and the “cost” of control. For this purpose, the risk field $\rho(p,t)$, the condition of motion without an increase in risk, the vector quality functional, the penalty functional of manual interventions, the admissible control domains Ω_j , Ω , the indicator of deficit of safe actions $\rho(t)$, and the objective function $J(V,K)$ are introduced. On this basis, the following is proposed:

$$U(t) = \lambda_\rho \rho_\Omega(t) + \lambda_J \bar{J}(t) + \lambda_H \bar{C}_H(t), \quad (83)$$

where $\lambda_\rho, \lambda_J, \lambda_H \geq 0, \lambda_\rho + \lambda_J + \lambda_H = 1$.

Here, $\rho_\Omega(t)$ is the deficit of safe actions; $\bar{J}(t) \in [0,1]$ is the normalized integral control functional; $\bar{C}_H(t) \in [0,1]$ is the normalized intervention penalty. For $\rho_\Omega(t)$, the existing relation is used:

$$\rho_\Omega(t) = 1 - \frac{\mu(\Omega(t))}{\mu(\Omega_0)}, \quad (84)$$

where $\Omega(t)$ is the current admissible control domain, Ω_0 is the reference domain under a favorable mode, and $\mu(\cdot)$ is the measure of the admissible action domain. Such a factor makes it possible to

assess the extent to which the influence of the human factor has already led to an actual narrowing of the safe maneuvering space.

For the numerical approbation and calibration of the integral indicator, a vector of uncertain parameters is introduced:

$$\Theta = (\theta_0, \theta_E, \theta_C, \theta_S, \theta_U, \theta_{EC}, \theta_{CS}, \theta_{SU}, \theta_{EU}, \alpha, \beta, \lambda, \eta, a_0, \dots, a_4), \quad (85)$$

as well as a vector of random or scenario-dependent input variables:

$$X_t = (R_{f,i}^{tot}, D_{f,i}, \omega_{rms,i}, A, T, D_\tau, P, H_s, z_h, M_{ext}, M_{dem}, \rho_\Omega, J, C_H)_t \quad (86)$$

Here, Θ covers the weighting coefficients of the integral indicator, the degradation coefficients, and the parameters of logistic functions, whereas X_t combines random or semi-random variables that, in a specific time window, characterize episodic risks, cognitive-temporal states, dynamic stability parameters, and control conditions. For the weighting coefficients α, β, λ , it is expedient to use Dirichlet distributions, which automatically ensure non-negativity and a sum equal to one. For the interaction parameters θ , truncated normal or lognormal distributions are appropriate. For $z_h(t)$, a Beta distribution or a truncated normal law on $[0,1]$ is appropriate. For episodic risks $R_{f,i}^{tot}$, durations $D_{f,i}$, and RMS values, it is expedient to use an empirical approach based on a real sample of AIS/ECDIS episodes, which preserves the structural specificity of the data. For M_{ext} and M_{dem} , a truncated normal or lognormal distribution is appropriate, depending on the nature of the scenario.

Calibration of the parameters of the integral model is proposed to be performed as the task of minimizing the mismatch functional:

$$\hat{\Theta} = \arg \min_{\Theta} L(\Theta), \quad (87)$$

where

$$L(\Theta) = \kappa_1 L_{elips} + \kappa_2 L_{dyn} + \kappa_3 L_{ctrl} + \kappa_4 Reg(\Theta), \quad \kappa_1, \dots, \kappa_4 \geq 0, \sum \kappa_i = 1 \quad (88)$$

Here, L_{elips} is the episodic component of the functional, L_{dyn} is the dynamic-stability component, L_{ctrl} is the control-risk component, and $Reg(\Theta)$ is the regularization of parameters.

The episodic component may be specified as:

$$L_{elips} = \sum_t (I_{HF \rightarrow R}(t) - y'_t)^2, \quad (89)$$

where y'_t is a weakly labeled target estimate formed on the basis of the share of High–Medium episodes, the average episodic risk, and the spatial concentration of risk peaks in the window $\Omega(t)$. This is consistent with the constructed apparatus of local coding and categorization of episodes. The dynamic calibration component is specified as:

$$L_{dyn} = \sum_{s \in \{stab, tense, crit\}} \|\bar{q}_s^{MC}(\Theta) - q_s^{ref}\|_2^2, \quad (90)$$

where q_s^{ref} are reference vectors for the stable, strained, and critical modes, and $\bar{q}_s^{MC}(\Theta)$ are the corresponding mean values obtained by the Monte Carlo method. As q_s^{ref} , it is expedient to use scenario values for the low, medium, and high position of the center of gravity of the human factor. The control-risk component is specified as:

$$L_{ctrl} = \sum_t \left[\omega_1 (\rho_\Omega^{MC}(t) - \rho_\Omega^{obs}(t))^2 + \omega_2 (\bar{J}^{MC}(t) - \bar{J}^{obs}(t))^2 + \omega_3 (\bar{C}_H^{MC}(t) - \bar{C}_H^{obs}(t))^2 \right] \quad (91)$$

where $\omega_1, \omega_2, \omega_3 \geq 0, \omega_1 + \omega_2 + \omega_3 = 1$. For regularization, the following is used:

$$Reg(\Theta) = \|\Theta\|_2^2. \quad (92)$$

Taken together, this ensures calibration of the integral indicator not according to an arbitrary criterion, but simultaneously according to behavioral, dynamic, and applied characteristics of risk.

After calibration of the parameters, a series of Monte Carlo runs is performed. At each run $m = 1, \dots, N$, $\Theta^{(m)}$ and $X_t^{(m)}$ are generated, $E^{(m)}(t)$, $C^{(m)}(t)$, $S^{(m)}(t)$, $U^{(m)}(t)$ are computed, and then the integral indicator $I_{HF \rightarrow R}^{(m)}(t)$. Based on the results of these runs, the following statistics are estimated:

$$E[I_{HF \rightarrow R}(t)], \text{Var}[I_{HF \rightarrow R}(t)], Q_{0.05}(t), Q_{0.5}(t), Q_{0.95}(t), \quad (93)$$

where $E[\cdot]$ is the mathematical expectation, $\text{Var}[\cdot]$ is the variance, and $Q_{0.05}$, $Q_{0.50}$, $Q_{0.95}$ are the quantiles of the distribution. These characteristics make it possible not to be limited to a point estimate of the integral indicator, but to analyze its variability and confidence bounds under given scenario and parametric uncertainties.

For the analysis of transitions between functioning modes, it is expedient to introduce two thresholds τ_1 and τ_2 , which separate the stable, strained, and critical modes:

$$P_{stab}(t) = P(I_{HF \rightarrow R}(t) < \tau_1), P_{tense}(t) = P(\tau_1 \leq I_{HF \rightarrow R}(t) < \tau_2), P_{crit}(t) = P(I_{HF \rightarrow R}(t) \geq \tau_2). \quad (94)$$

Then the Monte Carlo method provides not only the mean estimate of the index, but also the probability that the system is in or will transition into each of the modes. This is especially important for the early detection of pre-critical states and the selection of the corresponding response mode.

To determine the dominant factors, it is expedient to apply global sensitivity analysis. For each input parameter X_j , the first sensitivity index is defined as:

$$S_j = \frac{\text{Var}_{X_j}(E[I_{HF \rightarrow R} | X_j])}{\text{Var}(I_{HF \rightarrow R})}. \quad (95)$$

Such an assessment makes it possible to quantitatively rank the contribution of individual factors – the episodic risk of micromotions, attention deficit, subjective time distortion, p -adic complexity of the situation, the coordinate $z_h(t)$, the stability margin μ_{st} , or the deficit of admissible actions $\rho\Omega$ – to the formation of the integral indicator.

Thus, the proposed model forms a holistic deterministic-probabilistic contour for assessing the influence of the human factor on the increase in the risk of the ergatic navigational support system. Unlike local estimates, it combines fractal-episodic features of micromotions, cognitive-temporal and psychophysiological states of the navigator, dynamic stability parameters of the gravitational-inertial model, and control-risk characteristics of the domain of admissible actions. In this case, the use of the Monte Carlo method performs not the role of a source of the model structure, but the role of an instrument for its numerical approbation, parameter calibration, robustness analysis, sensitivity analysis, and estimation of the probability of the system's transition from a stable mode to strained and critical modes of functioning. It is precisely this that makes the proposed approach suitable both for the theoretical generalization of the research results and for further implementation in decision-support systems and automated control of human-factor risks in ergatic navigational support systems.

The constructed generalized model differs fundamentally from approaches in which the human factor is taken into account only as a source of post factum error or as an external constraint of the technical system. Within the proposed structure, the human factor enters the model in two interrelated forms: as a source of observable behavioral-trajectory manifestations recorded in AIS/ECDIS data and transformed into fractal-episodic signatures, and as an internal dynamic parameter that directly changes the stability, unsteadiness, and risk of the system's functioning through the gravitational-inertial model.

The second strong point of the model is that it does not end at the diagnostic stage. Owing to the p -adic description of the situation, risk functionals, domains of admissible control actions, and the storm subcontour, the model passes directly into procedures for the automated selection of safe

actions. Therefore, the article may be positioned not as a description of individual mathematical tools, but as a holistic ergatic concept of navigational support management with a risk-oriented automated output.

Simulation Modeling.

For the numerical approbation of the proposed integral model of the influence of the human factor on the increase in the risk of the ergatic navigational support system, six scenarios were formed, reflecting typical and practically probable vessel operating modes: daytime passage in the open sea, coastal approach, crossing of a traffic separation scheme, night pilotage in confined waters, movement under restricted visibility conditions, and a storm emergency-strained mode in a narrow channel. Such a set of scenarios ensures a stepwise increase in information load, maneuvering complexity, the level of external disturbances, and the navigator's responsibility, thereby creating the necessary conditions for verifying the adequacy of the integral indicator over a wide range of functional states of the system.

Within each scenario, time series of parameters characterizing the internal state of the navigator, external disturbances, and control conditions were specified, in particular the coordinate of the center of gravity of the human factor $z_h(t)$, the external disturbing influence $M_{ext}(t)$, the moment of required corrections $M_{dem}(t)$, the angular characteristic $\theta^*(t)$, as well as the partial factors $E(t)$, $C(t)$, and $U(t)$. In addition, raw arrays of episodic, cognitive-temporal, and control-risk data were formed for each scenario, which made it possible to implement the calculation of the integral indicator in accordance with the structure of the model rather than on the basis of external simplified approximations.

Table 1 records the initial configuration of the simulation and defines the physical and operational context of the subsequent analysis. Its content shows that the scenarios were constructed according to the logic of sequentially increasing complexity: from the open sea with a low load to storm motion in a narrow channel with a critical level of uncertainty and a high frequency of forced corrections. It is precisely such a construction that makes it possible to interpret the results not as abstract mathematical values, but as estimates for real navigational situations.

The numerical approbation of the integral indicator was carried out by the Monte Carlo method, which made it possible to take into account parametric and scenario uncertainty.

Table 1 – Initial scenario parameters of the simulation modeling of the influence of the human factor on the increase in the risk of the ergatic navigational support system

<i>scenario</i>	<i>risk_level</i>	<i>navigation_situation</i>	<i>captain_interpretation</i>
S1_open_sea_day	low	Open sea day passage, good visibility, low traffic, normal watch conditions	Stable operating mode with minimal cognitive load
S2_coastal_approach	moderate	Coastal approach, more navigation objects, moderate traffic load	Growing information load and need for tighter monitoring
S3_tss_crossing	moderate_high	Traffic separation scheme crossing, dense crossing traffic	Tense watch condition with high decision responsibility
S4_pilotage_night	high	Night pilotage in narrow fairway / confined waters	Attention deficit risk and high pilotage responsibility
S5_restricted_visibility	very_high	Restricted visibility in traffic area, uncertainty sharply increased	High uncertainty, strong temporal and cognitive strain
S6_storm_channel_emergency	critical	Storm approach in narrow channel, emergency-like regime	Critical regime close to systemic stability loss

At each run, the weighting coefficients of the partial factors, the interaction parameters in the integral model, as well as the key input variables associated with the human factor and the external operating conditions of the system were varied. As a result, for each scenario, the mean

value of the integral indicator $I_{HF \rightarrow R}$, its quantile bounds, and the probabilities of transition of the system to stable, strained, and critical modes were obtained.

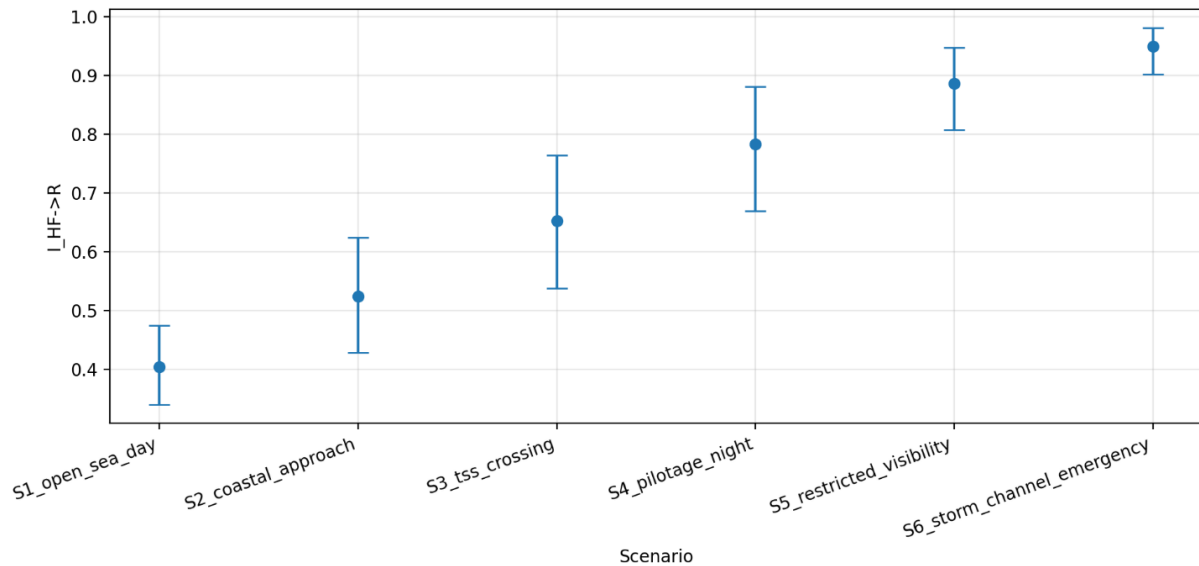


Figure 1 – Mean values of the integral indicator of the influence of the human factor on the increase in the risk of the ergatic navigational support system by scenarios with quantile bounds $Q_{0.05}$ – $Q_{0.95}$

Figure 1 reflects the main integral result of the simulation. It shows a clear monotonic increase in the mean value of $I_{HF \rightarrow R}$ from the first to the sixth scenario. For the scenario S1_open_sea_day, the mean value of the integral indicator is about 0.404; for S2_coastal_approach, 0.524; for S3_tss_crossing, 0.652; for S4_pilotage_night, 0.783; for S5_restricted_visibility, 0.887; and for S6_storm_channel_emergency, 0.950. Such a pattern indicates the high sensitivity of the indicator to the complication of the navigational situation and confirms that the integral model adequately reflects the growth of the risk-generating influence of the human factor. At the same time, the quantile bounds demonstrate that, even taking Monte Carlo variability into account, the correct ordering of scenarios by risk level is preserved.

Table 2 – Generalized results of Monte Carlo modeling of the integral indicator $I_{HF \rightarrow R}$ by navigational situation scenarios

scenario	I_{mean}	I_{std}	I_{q05}	I_{q50}	I_{q95}
S1_open_sea_day	0.40426	0.041426	0.340121	0.402722	0.474752
S2_coastal_approach	0.523952	0.061069	0.428373	0.522832	0.62475
S3_tss_crossing	0.652503	0.070849	0.537867	0.653576	0.763895
S4_pilotage_night	0.783486	0.067119	0.669478	0.788845	0.881601
S5_restricted_visibility	0.886972	0.044208	0.807186	0.89319	0.947613
S6_storm_channel_emergency	0.949974	0.025061	0.902474	0.955075	0.981304

Table 2 numerically confirms the conclusions drawn from Figure 1 and makes it possible to assess the limits of variability more precisely. In particular, for the first scenario, the quantile interval is approximately 0.339–0.474, whereas for the sixth it is 0.902–0.981. This means that, as the scenario risk increases, not only does the mean value of the integral indicator increase, but the entire domain of its probable realizations is also shifted toward critical values. This property is important for the practical use of the model, since it makes it possible to interpret it not only in terms of mean estimates, but also in terms of confidence bounds of the risk state.

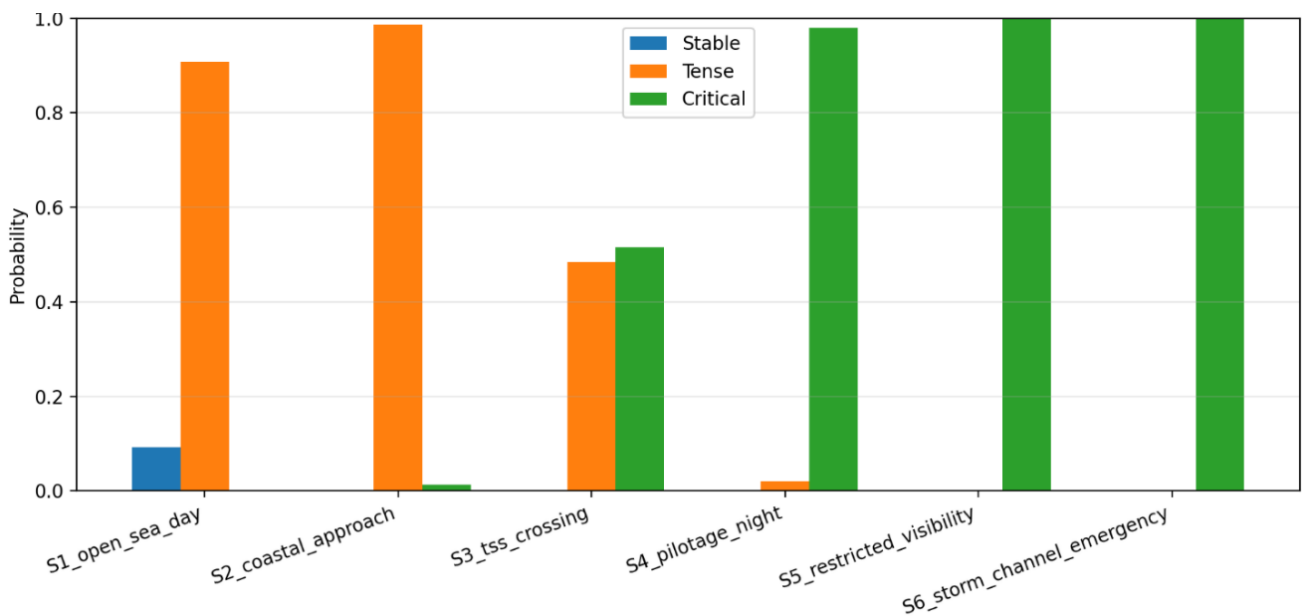


Figure 2 – Probabilities of the ergatic navigational support system being in stable, strained, and critical operating modes according to the results of Monte Carlo modeling

Figure 2 demonstrates the regime interpretation of the integral indicator. For S1_open_sea_day, the strained mode dominates with a small proportion of the stable mode, whereas the critical mode is practically not realized. For S2_coastal_approach, the strained mode remains predominant, but a small proportion of critical realizations appears. In the scenario S3_tss_crossing, the system enters a transitional region in which the strained and critical modes have close probabilities. Beginning with the scenario S4_pilotage_night, the critical mode already becomes almost completely dominant, while for S5_restricted_visibility and S6_storm_channel_emergency it effectively reaches unit probability. Thus, the integral indicator is suitable not only for quantitative assessment, but also for the classification of system operating modes and for identifying the threshold of transition to a dangerous state.

It is substantively important that the transition to the critical mode is observed not abruptly, but through an intermediate strained state, which corresponds to the real logic of navigation. This confirms the correctness of the regime scale of the model and its suitability for scenario forecasting.

Table 3 – Mean values of the partial factors $E(t)$, $C(t)$, $S(t)$, $U(t)$ and the dynamic stability parameters by scenarios

scenario	E_{mean}	C_{mean}	S_{mean}	U_{mean}	μ_{st_mean}	L_{eff_mean}	Ω_{mean}	$R_{dynamic_mean}$
S1_open_sea_day	0.163	0.132	0.134	0.112	0.811	0.780	0.250	0.150
S2_coastal_approach	0.265	0.226	0.249	0.209	0.703	0.741	0.297	0.245
S3_tss_crossing	0.383	0.328	0.369	0.305	0.595	0.704	0.356	0.340
S4_pilotage_night	0.522	0.459	0.500	0.426	0.482	0.665	0.426	0.460
S5_restricted_visibility	0.688	0.598	0.638	0.565	0.370	0.628	0.507	0.600
S6_storm_channel_emergency	0.835	0.748	0.798	0.744	0.253	0.590	0.621	0.770

Table 3 performs the function of the internal decomposition of the integral indicator. It shows that, when moving from the first to the sixth scenario, not only the integral estimates increase, but also all the main partial components. In particular, the mean value of the episodic factor increases from approximately 0.163 to 0.835, the cognitive-temporal factor from 0.132 to 0.748, the dynamic-stability factor from 0.134 to 0.798, and the control-risk factor from 0.112 to 0.744. Thus, the increase in the integral indicator is formed not by a single local mechanism, but as a result of a coordinated deterioration of the behavioral, cognitive, dynamic, and control contours.

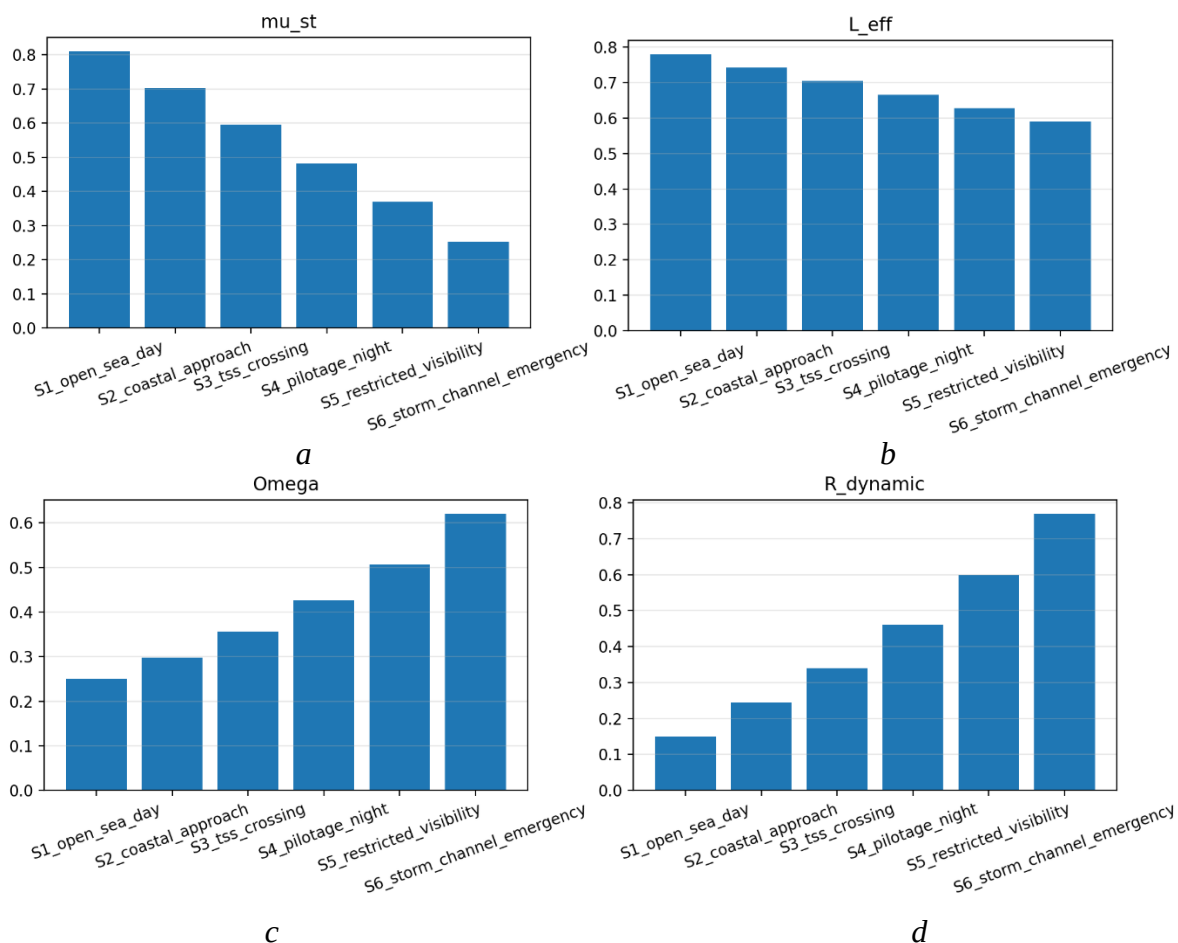


Figure 3 – Change in the mean values of the relative stability margin μ_{st} (a), effective functional reserve L_{eff} (b), forced correction frequency Ω (c), and dynamic risk $R_{dynamic}$ (d) across navigation scenario conditions

Figures 3a–3d confirm the consistency of the integral model with the basic dynamic apparatus. Figure 3a shows a successive decrease in the relative stability margin μ_{st} from 0.811 for S1_open_sea_day to 0.253 for S6_storm_channel_emergency. This means that, with the increasing influence of the human factor, the system loses the ability to maintain a stable mode without intensifying corrective actions.

Figure 3b demonstrates an analogous decrease in the effective functioning reserve L_{eff} from approximately 0.780 to 0.590. This indicates a degradation of the functional resource of the system and confirms that the human factor in the model acts not as an external commentary, but as an internal parameter that changes the real characteristics of the dynamics.

Figure 3c shows an increase in the frequency of forced corrections Ω from 0.250 to 0.620. Thus, as the scenario deteriorates, the system is forced to compensate for the loss of stability increasingly often by active control actions. Finally, Figure 3d shows an increase in the dynamic risk $R_{dynamic}$ from 0.150 to 0.770, that is, from a low-risk to a distinctly critical level. Taken together, these four figures prove that the integral indicator $I_{HF \rightarrow R}$ is consistent with the dynamic nature of the system and reflects the real mechanism of transition from a stable to a risky mode.

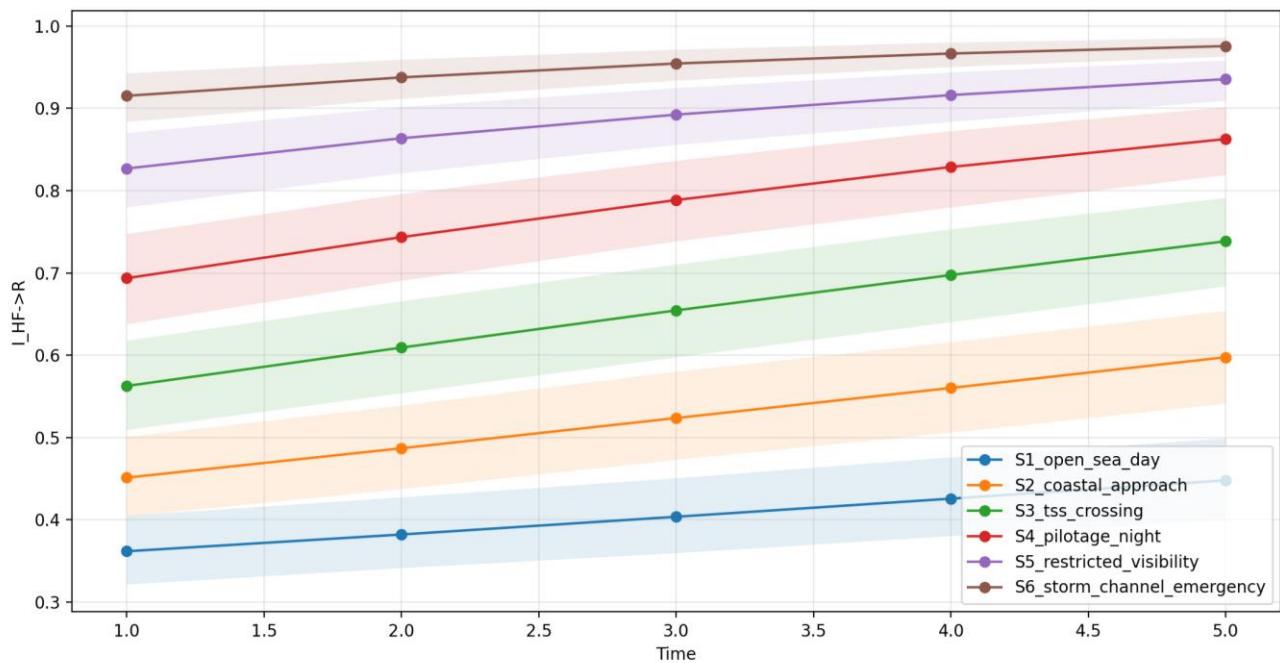


Figure 4 – Temporal evolution of the integral indicator $I_{HF \rightarrow R}$ in six operating scenarios of the ergatic navigational support system

Figure 4 shows that the integral indicator changes regularly not only between scenarios, but also over time within each scenario. For low-risk scenarios, the growth of $I_{HF \rightarrow R}$ is moderate, whereas for high-risk and critical scenarios the curves are steeper. This means that the model is suitable not only for the static comparison of operating conditions, but also for quasi-real-time monitoring of situation development. It is precisely this property that is fundamentally important for decision-support systems, in which it is necessary not merely to record an already formed dangerous state, but to track the trajectory of its approach in advance.

Table 4 – Probabilities of transition of the ergatic system to stable, strained, and critical operating modes

scenario	P_{stable}	P_{tense}	$P_{critical}$
S1_open_sea_day	0.0916	0.9084	0
S2_coastal_approach	0	0.986933	0.013067
S3_tss_crossing	0	0.485	0.515
S4_pilotage_night	0	0.0196	0.9804
S5_restricted_visibility	0	0	1
S6_storm_channel_emergency	0	0	1

Table 4 is a numerical complement to Figure 2 and makes it possible to trace the change in the regime structure of the system in detail. It shows that, for the first scenario, the share of the stable mode is about 0.092, the strained mode 0.908, and the critical mode is practically absent. For the second scenario, the share of the critical mode is already approximately 0.013; for the third, 0.516; for the fourth, 0.979; and for the fifth and sixth, it reaches unity. Thus, the model provides a clear quantitative representation of the transition of the system from predominantly strained to critical functioning.

Table 5 – Results of the sensitivity analysis of the integral indicator $I_{HF \rightarrow R}$ to variations in the main model parameters

<i>variable</i>	<i>spearman_rank_corr</i>
E	0.988951957
$R_{dynamic}$	0.98870102
U	0.988598384
C	0.988598384
S	0.985383299
z_h	0.982032815
μ_{st}	0.982032815
L_{eff}	0.982032815
Ω	0.956732892
θ_E	0.051237313
θ_C	0.046449323
θ_S	0.040946005
θ_U	0.038674436

Table 5 demonstrates the results of the sensitivity analysis and is an important argument in favor of the internal mathematical consistency of the model. The greatest contribution to the formation of the integral indicator is made by the episodic factor E ($\rho \approx 0.989$), the dynamic risk $R_{dynamic}$ ($\rho \approx 0.989$), the cognitive-temporal factor C ($\rho \approx 0.988$), the control-risk factor U ($\rho \approx 0.988$), and the dynamic-stability factor S ($\rho \approx 0.986$). A high influence is also exerted by the coordinate of the center of gravity of the human factor z_h , the stability margin μ_{st} , the effective reserve L_{eff} , and the frequency of forced corrections Ω . At the same time, random variations of the individual weighting coefficients θ_E , θ_C , θ_S , θ_U have a significantly smaller local contribution, which confirms the dominance of the substantive physical-behavioral components of the model over the technical calibration parameters. Its analysis confirms that the integral indicator is most sensitive precisely to those factors that were theoretically laid at the foundation of the model: behavioral, cognitive-temporal, dynamic-stability, and control-risk. This means that the model contains no internal logical contradiction and responds to changes in key parameters in accordance with its mathematical structure.

Thus, the set of results presented in Tables 1–5 and Figures 1–4 confirms the adequacy of the proposed integral model. First, a monotonic increase in the integral indicator is observed with increasing scenario risk. Second, this tendency is consistent with a decrease in the stability margin and functioning reserve, as well as with an increase in the frequency of forced corrections and dynamic risk. Third, the probabilistic interpretation of the results demonstrates a regular transition of the system from stable and strained modes to the critical mode. Finally, the sensitivity analysis shows that the integral indicator is determined precisely by the basic substantive factors of the model. Taken together, this gives grounds to consider the proposed approach suitable for the quantitative assessment of the influence of the human factor on the increase in the risk of the ergatic navigational support system and for further application in decision-support systems and adaptive automated control.

Conclusions

1. A generalized model for controlling ergatic systems and means of navigational support has been developed, in which the navigator, the vessel, the navigational-information environment, and the regulatory-situational constraints are considered as elements of a unified functional space.

2. It has been shown that the transition from raw AIS/ECDIS data to the standardized series constitutes an independent methodological level of the model, at which a unified temporal-spatial analytical space is formed, suitable for the mathematical interpretation of motion microdynamics.

3. A fractal-episodic approach to the identification of local vessel micromotions has been substantiated, within which episodes are encoded by the fractal code $FC-abcdef$, combined with the quantitative assessment of episodic risk, and form a formalized behavioral-risk space of the navigator's actions.

4. Models of attention distribution, temporal states, subjective time distortion, and p-adic complexity of the situation have been integrated into a unified cognitive-temporal block, which makes it possible to formalize the internal states of the navigator as variables of the ergatic system.

5. A gravitational-inertial interpretation of the human factor has been formed through the coordinate of the center of gravity $z_h(t)$, the effective stiffness $k_{eff}(t)$, the stability margin $\mu_{st}(t)$, the frequency of forced corrections $\Omega(t)$, and the integral risk $R(t)$, which provides a formal mechanism for the transition from the navigator's state to the dynamics of stability of the ergatic system.

6. The applied output of the generalized model into risk-oriented and automated control contours has been demonstrated, namely: p-adic structuring of the situation, multicriteria risk functionals, domains of admissible control actions, automated multi-target collision avoidance, and the formation of safe storm navigation modes.

7. An integral indicator of the influence of the human factor on the increase in the risk of the ergatic navigational support system has been developed, which, in logistic-normalized form, combines episodic behavioral, cognitive-temporal, dynamic-stability, and control-risk components. This made it possible to move from the isolated analysis of individual manifestations of the navigator's activity to a unified quantitative assessment of the total risk-generating influence of the human factor on the functioning of the navigational contour.

8. It has been shown that the numerical approbation of the integral indicator by the Monte Carlo method provides the possibility of calibrating model parameters, assessing the variability and robustness of results, determining the probability of the system's transition to stable, strained, and critical modes, as well as ranking dominant risk factors by means of global sensitivity analysis. This creates the basis for using the proposed approach in decision-support systems and the automated control of human-factor risks in navigation.

REFERENCES

1. Chauvin, C., Lardjane, S., Morel, G., Clostermann, J.-P., Langard, B. (2013). Human and organisational factors in maritime accidents: Analysis of collisions at sea using the HFACS. *Accident Analysis & Prevention*. Vol. 59. P. 26–37. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2013.05.006>.
2. Pietrzykowski, Z., Wielgosz, M., Breitsprecher, M. (2020). Navigators' Behavior Analysis Using Data Mining. *Journal of Marine Science and Engineering*. Vol. 8, No. 1. Article 50. <https://doi.org/10.3390/jmse8010050>.
3. Hetherington, C., Flin, R., Mearns, K. (2006). Safety in Shipping: The Human Element. *Journal of Safety Research*. Vol. 37, No. 4. P. 401–411. <https://doi.org/10.1016/j.jsr.2006.04.007>.
4. Du, L., Goerlandt, F., Kujala, P. (2020). Review and Analysis of Methods for Assessing Maritime Waterway Risk Based on Non-Accident Critical Events Detected from AIS Data. *Reliability Engineering & System Safety*. Vol. 200. Article 106933. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2020.106933>.
5. Tu, E., Zhang, G., Rachmawati, L., Rajabally, E., Huang, G. B. (2018). Exploiting AIS Data for Intelligent Maritime Navigation: A Comprehensive Survey From Data to Methodology. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. Vol. 19, No. 5. P. 1559–1582. <https://doi.org/10.1109/TITS.2017.2724551>.
6. Nosov, P. S., Palamarchuk, I. V., Zinchenko, S. M., Popovych, I. S., Nahrybelnyi, Y. A., Nosova, H. V. (2020). Development of Means for Experimental Identification of Navigator Attention in Ergatic Systems of Maritime Transport. *Bulletin of the University of Karaganda. Technical Physics*. No. 1 (97). P. 58–69. <https://doi.org/10.31489/2020Ph1/58-69>.

7. Car, M., Brčić, D., Žuškin, S., Svilicic, B. (2020). The Navigator's Aspect of PNC before and after ECDIS Implementation: Facts and Potential Implications towards Navigation Safety Improvement. *Journal of Marine Science and Engineering*. Vol. 8, No. 11. Article 842. <https://doi.org/10.3390/jmse8110842>.
8. Nosov, P., Cherniavskiy, V., Zinchenko, S., Popovych, I., Prokopchuk, Y., Safonov, M. (2020). Identification of Distortion of the Navigator's Time in Model Experiment. *Bulletin of the University of Karaganda. Instrument and Experimental Techniques*. No. 4 (100). P. 57–70. <https://doi.org/10.31489/2020Ph4/57-70>.
9. Kristić, M., Žuškin, S., Brčić, D., Car, M. (2021). Overreliance on ECDIS Technology: A Challenge for Safe Navigation. *TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*. Vol. 15, No. 2. P. 277–287. <https://doi.org/10.12716/1001.15.02.02>.
10. Nosov, P., Zinchenko, S., Ben, A., Prokopchuk, Y., Mamenko, P., Popovych, I., Moiseienko, V., Kruglyj, D. (2021). Navigation Safety Control System Development through Navigator Action Prediction by Data Mining Means. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. Vol. 2, No. 9 (110). P. 55–68. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.229237>.
11. Ponomaryova, V., Nosov, P. (2024). Development of a Navigator Qualification Model for Automated Ship Handling Control Tasks. *Науковий вісник Херсонської державної морської академії*. No. 2 (29). P. 6–23. <https://doi.org/10.33815/2313-4763.2024.2.29.006-023>.
12. Nosov, P., Koretsky, O., Zinchenko, S., Prokopchuk, Y., Gritsuk, I., Sokol, I., Kyrychenko, K. (2023). Devising an Approach to Safety Management of Vessel Control through the Identification of Navigator's State. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. Vol. 4, No. 3 (124). P. 19–32. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.286156>.
13. Nosov, P., Melnyk, O., Malaksiano, M., Shumylo, O., Onishchenko, O., Yarovenko, V., Zinchenko, S., & Popovych, I. (2026). A Unified Fractal Processing Framework for Normalized AIS and ECDIS Ship Trajectories. *Digital*, 6(1), 11. <https://doi.org/10.3390/digital6010011>.
14. Pazouki, K., Forbes, N., Norman, R. A., Woodward, M. D. (2018). Investigation on the Impact of Human-Automation Interaction in Maritime Operations. *Ocean Engineering*. Vol. 153. P. 297–304. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2018.01.103>.
15. Kari, R., Steinert, M. (2021). Human Factor Issues in Remote Ship Operations: Lesson Learned by Studying Different Domains. *Journal of Marine Science and Engineering*. Vol. 9, No. 4. Article 385. <https://doi.org/10.3390/jmse9040385>.
16. Man, Y., Lundh, M., Porathe, T., MacKinnon, S. (2015). From Desk to Field – Human Factor Issues in Remote Monitoring and Controlling of Autonomous Unmanned Vessels. *Procedia Manufacturing*. Vol. 3. P. 2674–2681. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2015.07.635>.
17. Huang, Y., Chen, L., Negenborn, R. R., van Gelder, P. H. A. J. M. (2020). A Ship Collision Avoidance System for Human-Machine Cooperation during Collision Avoidance. *Ocean Engineering*. Vol. 217. Article 107913. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.107913>.
18. Aylward, K., Weber, R., Lundh, M., MacKinnon, S. N., Dahlman, J. (2022). Navigators' Views of a Collision Avoidance Decision Support System for Maritime Navigation. *The Journal of Navigation*. Vol. 75, No. 5. P. 1035–1048. <https://doi.org/10.1017/S0373463322000510>.
19. Wu, X., Liu, K., Zhang, J., Yuan, Z., Liu, J., Yu, Q. (2021). An Optimized Collision Avoidance Decision-Making System for Autonomous Ships under Human-Machine Cooperation Situations. *Journal of Advanced Transportation*. Vol. 2021. Article 7537825. <https://doi.org/10.1155/2021/7537825>.
20. Veitch, E., Alsos, O. A. (2021). Human-Centered Explainable Artificial Intelligence for Marine Autonomous Surface Vehicles. *Journal of Marine Science and Engineering*. Vol. 9, No. 11. Article 1227. <https://doi.org/10.3390/jmse9111227>.
21. Wróbel, K., Gil, M., Chae, C.-J. (2021). On the Influence of Human Factors on Safety of Remotely-Controlled Merchant Vessels. *Applied Sciences*. Vol. 11, No. 3. Article 1145. <https://doi.org/10.3390/app11031145>.

22. Fan, S., Shi, K., Weng, J., Yang, Z. (2025). Letting Losses Be Lessons: Human-Machine Cooperation in Maritime Transport. Reliability Engineering & System Safety. Vol. 253. Article 110547. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2024.110547>.

23. Song, R., Papadimitriou, E., Negenborn, R. R., van Gelder, P. (2024). Safety and Efficiency of Human-MASS Interactions: Towards an Integrated Framework. Journal of Marine Engineering and Technology. Vol. 24, No. 3. P. 159–178. <https://doi.org/10.1080/20464177.2024.2414959>.

Носов П. С. УЗАГАЛЬНЕНА МОДЕЛЬ УПРАВЛІННЯ ЕРГАТИЧНИМИ СИСТЕМАМИ НАВІГАЦІЙНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ З ІНТЕГРАЛЬНИМ ПОКАЗНИКОМ ВПЛИВУ ЛЮДСЬКОГО ФАКТОРА

У статті розв'язано актуальне наукове завдання розроблення узагальненої моделі управління ергатичними системами навігаційного забезпечення з інтегральним показником впливу людського фактора судноводія на підвищення ризику функціонування системи. Запропонований підхід ґрунтується на визначенні дії судноводія не як зовнішнього джерела випадкових похибок, а як внутрішнього параметра ергатичної системи, що визначає якість сприйняття навігаційної ситуації, своєчасність реакцій, характер керувальних дій і рівень безпеки руху судна. Метою роботи є побудова інтегрованої моделі, яка поєднує системне подання ергатичної системи, формалізацію AIS/ECDIS-даних, фрактально-епізодне представлення мікрорухів судна, моделі когнітивно-часових і психофізіологічних станів судноводія, гравітаційно-інерціальну інтерпретацію стійкості та ризик-орієнтований контур керування. Наукова новизна полягає у введенні інтегрального показника, що в логістично-нормованій формі об'єднує епізодний поведінковий, когнітивно-часовий, динамічно-стійкісний і керувально-ризиковий компоненти в єдиний інформаційно-аналітичний контур. Для чисельної апробації моделі застосовано метод Монте-Карло, який забезпечує калібрування параметрів, оцінювання варіативності, робастності, чутливості та ймовірностей переходу системи до стійкого, напруженого і критичного режимів. Імітаційне моделювання для шести сценаріїв навігаційної ситуації підтвердило монотонне зростання інтегрального показника зі збільшенням сценарної складності, узгоджене зі зменшенням запасу стійкості та резерву функціонування, а також зі зростанням частоти вимушених корекцій і динамічного ризику. Практичне значення роботи полягає у можливості використання запропонованої моделі в системах підтримки прийняття рішень, моніторингу стану судноводія та адаптивного автоматизованого керування безпечними режимами руху судна.

Ключові слова: ергатична система; навігаційне забезпечення; людський фактор; безпека мореплавства; судноводій; AIS/ECDIS-дані; фрактально-епізодний аналіз; інтегральний показник ризику; автоматизоване керування рухом.

© Nosov P.

Статтю прийнято до редакції 13.04.2026

МОДЕЛЬ ОЦІНЮВАННЯ РИЗИКУ ЗІТКНЕННЯ АВТОНОМНИХ НАДВОДНИХ СУДЕН З УРАХУВАННЯМ ВПЛИВУ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА

Бень А. П., д.т.н., професор, проректор з науково-педагогічної роботи Херсонської державної морської академії, м. Херсон, Україна, e-mail: a_ben@i.ua, ORCID: 0000-0002-9029-3489;

Пелихівський Л. О., аспірант Херсонської державної морської академії, м. Херсон, Україна, e-mail: leonid.pelykhivskiy@gmail.com, ORCID: 0009-0004-1226-3091;

Вороненко С. В., к.т.н., доцент кафедри експлуатації судового електрообладнання і засобів автоматики Херсонської державної морської академії, м. Херсон, Україна, e-mail: voronenko447@gmail.com, ORCID: 0000-0001-9606-6538.

Стаття присвячена розробці моделі оцінювання ризику зіткнення автономних надводних суден за умов невизначеності стану навколишнього середовища на основі нечіткої логіки. Розглянуто сучасний стан розвитку систем запобігання зіткненням для автономних суден та визначено ключові проблеми, пов'язані з обробкою неповних і неточних навігаційних даних. Проведено порівняльний аналіз існуючих підходів до оцінювання ризику зіткнення, зокрема методів на основі найкоротшої дистанції/часу зближення (DCPA/TCPA), та нечіткої логіки, визначено їх переваги та обмеження. Запропоновано концептуальну модель оцінювання ризику зіткнення суден на основі нечіткої логіки, яка забезпечує комплексну оцінку рівня ризику з урахуванням геометричних параметрів зони зближення, впливу факторів навколишнього середовища та індексу невизначеності навігаційної інформації. Особливістю моделі, що запропонована, є виокремлення геометричного та контекстного ризику, а також застосування двоступеневої системи нечіткого логічного висновку з урахуванням обмежень МПЗЗС-72. Показано, що інтеграція методів нечіткої логіки, багатокритеріального аналізу та нових підходів до моделювання невизначеності стану навколишнього середовища дозволяє підвищити достовірність оцінювання ризику в умовах реальної експлуатації автономних суден. Наведено структуру розробленої системи оцінювання ризику, продемонстровано її роботу на типових сценаріях зближення суден та визначено ступінь впливу зовнішніх факторів (вітер, течія, хвилювання) на формування рівня ризику. Визначено напрями подальших досліджень, зокрема використання нечітких систем та методів теорії доказів для врахування невизначеності факторів впливу зовнішнього середовища на управління рухом автономних суден.

Ключові слова: нечітка логіка; оцінювання ризику зіткнення; автономні надводні судна; MASS; DCPA; TCPA; МПЗЗС-72; навігаційна безпека; невизначеність; штучний інтелект; системи управління.

DOI: 10.33815/2313-4763.2026.1.32.058-070

Вступ. Інтенсивний розвиток індустрії морських автономних надводних суден (MASS) упродовж останнього десятиліття зумовив необхідність стрімкого переходу від простого автоматизованого ведення судна по маршруту до створення та застосування повноцінних систем ситуаційної обізнаності, оцінювання ризику та прийняття рішень з управління судном в умовах складного морського трафіку. Як зазначається у низці оглядових робіт [1, 2], сучасна автономна навігація вимагає не лише точного визначення траєкторії руху, а й здатності інтерпретувати наявну навігаційну обстановку відповідно до принципів доброї морської практики та вимог Міжнародних правил попередження зіткнень суден (МПЗЗС-72, або COLREGs). Подальші дослідження інших авторів [3, 4] підтверджують, що саме зв'язок між формальними алгоритмами, нормативними правилами і реальною поведінкою суден залишається центральною науковою проблемою в системах запобігання зіткненням MASS.

Необхідно підкреслити, що у структурі автономної навігації оцінювання ризику зіткнення виступає базовою ланкою, від якої залежить подальший вибір стратегії розходження, що відповідає вимогам МПЗЗС-72, та визначення множини допустимих маневрів судна. Так, у роботі [5] ризик розглядається як динамічна величина, що має визначатися в реальному часі з урахуванням кількох джерел даних та різної вагомості факторів впливу у різних сценаріях. У свою чергу, оглядові праці [1, 2], показують, що без

наявності надійного модуля оцінювання ризику навіть складні інтелектуальні системи планування траєкторій руху суден і модулі керування не можуть гарантувати безпечну поведінку автономного судна. Отже, саме якість моделі ризику значною мірою визначає практичну придатність усієї автономної навігаційної системи.

З огляду на вищевказане, у роботі зосереджено увагу на вдосконаленні оцінювання ризику зіткнення MASS-суден як на ключовому елементі безпеки автономної навігації. На відміну від існуючих підходів, які обмежуються лише класичними показниками зближення, або лише частково враховують вплив навколишнього середовища, пропонується напрям дослідження орієнтований на інтегроване подання ризику, у якому ДСПА/ТСРА-оцінка навігаційної ситуації доповнюється оцінкою впливу зовнішніх факторів і розглядається в умовах неповноти та неточності навігаційних даних, характерної для реальної експлуатації MASS. Така постановка задачі логічно випливає з виявлених у літературі обмежень практичного застосування існуючих підходів [1, 2, 5–11].

Аналіз існуючих підходів та їх обмежень. Актуальність дослідження. Основою більшості сучасних підходів з виявлення небезпечного зближення суден залишаються класичні показники дистанції (ДСПА) та часу (ТСРА) найбільшого зближення. Вищевказане наведено, зокрема, у роботах [6–8], де зазначені показники формують базове геометричне ядро ризику, а далі масштабуються або комбінуються з іншими індикаторами, або подаються в нечітку систему висновку. Поширеність та базовість застосування ДСПА/ТСРА у сучасній літературі пояснюється їх фізичною зрозумілістю: вони відповідають на два основних питання навігатора – наскільки близьким буде зближення та через який час воно стане критичним. Водночас слід враховувати, що сама по собі геометрія зближення не описує повною мірою складність реального середовища руху MASS.

Особливо складним для задач оцінювання ризику зіткнень автономних суден є врахування впливу зовнішніх умов, зокрема вітру, течії, хвилювання, а також невизначеності стосовно спостережень щодо наявної навігаційної ситуації і прогнозу стосовно її розвитку. Так, у роботі [9] на основі AIS-даних та гідрометеорологічних даних кількісно показано, що вплив вітру і течії на рух суден є суттєвим і неоднорідним. У роботі [7] вплив навколишнього середовища представлено як окремий фактор (Environmental Factor), який поєднується з базовою оцінкою ризику зіткнень (CRI – collision risk index) у показник ECRI-W (exchanged collision risk index – weather). Більш глибоко напрям формального врахування невизначеності впливу зовнішнього середовища розглянуто у роботі [8], в якій для обробки AIS-даних застосовано інтервальну нечітку систему другого типу та запропоновано застосування теорії доказів згідно з принципами Демпстера–Шейфера (Dempster–Shafer fusion). Таким чином, сучасний стан досліджень переконливо показує, що для вирішення проблем ефективного керування MASS-суднами в умовах впливу зовнішніх факторів необхідно застосування такої моделі оцінки ризику зіткнень, яка одночасно поєднує геометрію зближення, вплив навігаційного середовища та явне подання невизначеності вхідної навігаційної інформації.

Слід окремо зазначити, що у більшості існуючих практичних розробок першим кроком залишається обчислення ДСПА і ТСРА за відносним рухом суден. Така постановка є природною, оскільки зазначені показники безпосередньо відображають геометрію небезпечного зближення. Так, у роботі [6] вказаний підхід розширено для сценаріїв, що регламентують процеси розходження декількох суден: автори використовують безрозмірні ДСПА' і ТСРА', вводять нечіткі правила відповідно до вимог МПЗС-72 і формують рішення на основі не лише ризику зближення, а й кутів зустрічі та відносних положень суден. Перевага вказаного підходу полягає в інтерпретованості та відповідності рішень, які приймаються, до вимог морської практики. Водночас слід підкреслити, що така модель спирається переважно на геометрію зближення та експертно сформовані правила, а отже її чутливість до невизначеності і похибок навігаційних даних, а також зовнішніх збурень, залишається обмеженою.

У статті [12] зроблено наступний крок далі: крім DCPA і TCPA, автори враховують кут перетину курсів і навігаційне середовище, а потім, за допомогою методів нечіткої логіки (fuzzy logic) і методу аналізу ієрархій (АНР) формують локальну оцінку можливості зіткнень для ситуацій розходження декількох суден. Вказаний підхід має істотні переваги, тому що він дозволяє аналізувати складні сценарії розходження множини суден та дозволяє сформувати певну картину руху в заданій акваторії, що дозволяє сформувати упереджувальні (проактивні) дії із залученням систем берегового моніторингу та контролю руху суден. Разом із тим, у доступному описі моделі основну роль усе ж відіграє структура експертно обраних факторів і ваг, тоді як питання достовірності та неповноти вхідних даних не винесено в окремий формалізований блок. Саме тому підхід є ефективним лише при вирішенні питань оцінки навігаційних ризиків у певній акваторії, проте він недостатньо повно враховує похибки спостережень та є чутливим до якості навігаційних даних.

Альтернативний напрям оцінки ризиків представлений методами на основі швидкісних завад (velocity obstacle, VO). У роботі [13] запропоновано застосування індексу MPC (Most Probable Collision – індекс імовірного зіткнення), який поєднує VO-геометрію з AIS-даними про розміри суден, завдяки чому підвищується адекватність оцінки ризиків у системах уникнення зіткнень. У роботі [14] вказаний підхід розширено шляхом застосування методу нелінійних швидкісних завад (UNLVO), де враховано динамічні характеристики руху суден. В цілому, перевага VO-підходів полягає в чіткій просторовій інтерпретації небезпеки та природному зв'язку з маневруванням. Проте, у вказаній групі методів залишаються відкритими принаймні дві проблеми: по-перше, не завжди просто поєднати геометрію з правовою логікою дотримання вимог МПЗЗС-72 у складних змішаних сценаріях; по-друге, навіть коли невизначеність уже враховується, вона часто стосується передусім динаміки руху, а не повного ланцюжка дані–інтерпретація–висновок.

В окремий клас методів оцінювання ризиків зіткнень слід виділити методи, що базуються на застосуванні моделей небезпечної зони, або домену судна (ship domain). Так, у роботі [15] ризик визначається не лише через близькість зближення, а й через ступінь порушення домену судна, відносну швидкість, комбінацію курсів, порушення зони маневрування та складність навігаційної ситуації зближення. Сильна сторона цього підходу полягає в тому, що він краще за класичні DCPA/TCPA-пороги відображає контекст, зокрема запізнілі маневри та вплив навколишнього трафіку. Водночас і тут наявні обмеження: хоча підхід на основі домену судна добре відображає просторово-поведінковий аспект ситуації, однак сам по собі не враховує вплив погодних збурень і не замінює явного моделювання достовірності AIS-даних чи часове накопичення доказів ризику.

Суттєвий крок у напрямі врахування впливу навколишнього середовища зроблено у працях [3] та [7]. У першій роботі кількісно показано, що вітер і течія реально змінюють поведінку суден у портах і водних шляхах, причому вказаний вплив залежить від розміру судна. У другій роботі автори формують інтегральний показник ECRI-W шляхом поєднання базового CRI з погодним фактором, після чого застосовують модель глибокого навчання для прогнозування рівня ризику зіткнення.

У роботі [6] наведено інший підхід до більш «морепрактичного» індексу ризику: автори вводять нечіткий динамічний еліптичний домен судна (Fuzzy Dynamic Elliptical Ship Domain), небезпечну (dangerous domain) та заборонену (forbidden domain) зони, параметр відповідальності (responsibility-aware parameter) та вагове поєднання факторів на основі вдосконаленого методу аналізу ієрархій (improved АНР). Вищевказане важливо, оскільки ризик у такому випадку пов'язується не лише з геометрією зближення, а й із роллю судна відповідно до вимог МПЗЗС-72 (як судна, що повинно поступитися дорогою, або судна, що зберігає курс і швидкість). Подібний підхід також застосовано у роботі [12], де інтегральний індекс ризику зіткнення CRI формується на основі базового та середовищного ризику, після чого використовується для прийняття рішень з маневрування судна. Проте навіть за такої деталізації питання оцінки невизначеності навігаційних даних, а також часової несталості

оцінки залишаються слабо формалізованими порівняно з підходом, представленим у роботі [9].

Найбільш послідовне розв'язання вказаної проблеми запропоновано в роботах [5] та [8]. У роботі [5] ризик оцінюється як багатокритеріальна величина з кількох джерел даних, а підсумкова оцінка формується через теорію доказів. У статті [9] невизначеність уже винесена в центр моделі: інтервальна нечітка система другого типу моделює невизначеність функцій належності, а комбінування доказів за теорією Демпстера–Шафера забезпечує часову інтеграцію факторів ризику. Слід додатково відзначити, що для вирішення задач керування автономними суднами недостатньо просто додати ще один фактор у CRI – потрібно ще й описати, наскільки надійними є дані та як змінюється оцінка ризику в часі. Крім того, у роботах [10] та [15] показано, що навіть за наявності якісної моделі оцінювання ризику залишаються проблеми у вирішенні задач, пов'язаних з урахуванням особливостей правил руху суден в обмежених водах. Окремою проблемою є відсутність єдиної системи тестових сценаріїв для перевірки створених моделей і алгоритмів керування рухом MASS.

Таким чином, попри значну кількість досліджень у сфері оцінювання ризику зіткнення суден та керування рухом MASS, більшість наявних підходів або зосереджуються переважно на геометрії зближення на основі DCPA/TCPA, або враховують окремі контекстні фактори, без явного моделювання невизначеності вхідних даних. У частині робіт детально розглянуто правила прийняття рішень відповідно до вимог МПЗС-72 [6, 10, 16], у частині – багатосуднові сценарії розходження або врахування особливостей поточної навігаційної ситуації [12, 14, 15], а в частині – вплив навігаційного середовища та погодних умов [7, 9]. Водночас лише обмежена кількість досліджень безпосередньо ставить у центр уваги структурну невизначеність AIS-даних і часову акумуляцію факторів ризику [5, 8, 17], внаслідок чого недостатньо опрацьованою залишається проблема інтегрованого оцінювання ризику зіткнення для MASS в умовах одночасного впливу факторів впливу навколишнього середовища, невизначеності (неточності або помилковості) навігаційних даних та навігаційної ситуації (геометрії взаємного розташування та параметрів руху суден).

Отже, проведений аналіз літературних джерел надає можливість визначити ключові питання проблеми керування рухом автономних суден та шляхи їх вирішення. У підсумку слід зазначити наступне. По-перше, врахування параметрів DCPA/TCPA залишається основою майже всіх моделей оцінки ступеня ризику зіткнень MASS. По-друге, сучасні автори вже намагаються доповнювати його моделями домену судна, урахуванням відповідальності відповідно до вимог МПЗС-72, багатосудновими сценаріями та врахуванням впливу погодних факторів. По-третє, формальне моделювання невизначеності комплексного впливу вищезазначених факторів поки що представлено значно вужчим колом робіт. Тому невирішеною раніше частиною проблеми є побудова такої інтегрованої моделі оцінювання ризику для MASS, яка одночасно поєднувала б геометрію зближення, оцінку стану навігаційного середовища, багатосуднові сценарії розходження і неповноту (помилковість або неточність) вхідних навігаційних даних у єдиному контурі оцінки. Вищевказане дозволяє сформулювати мету та основні задачі дослідження.

Мета та задачі дослідження. Метою дослідження є розробка моделі оцінювання ризику зіткнення автономних надводних суден з урахуванням впливу навколишнього середовища. Для досягнення поставленої мети слід вирішити низку наступних задач:

1. Провести порівняльний аналіз існуючих підходів до вирішення проблеми керування автономними суднами та оцінки ризиків їх зіткнення в умовах неповноти та неточності навігаційних даних і впливу зовнішнього середовища, визначити можливі шляхи її розв'язання.

2. Розробити концептуальну модель оцінювання ризику зіткнення суден на основі нечіткої логіки, яка забезпечує комплексну оцінку рівня ризику з урахуванням геометричних параметрів зони зближення, впливу факторів навколишнього середовища та індексу невизначеності навігаційної інформації.

3. Розробити програмні засоби та провести тестове імітаційне моделювання типових навігаційних ситуацій з метою оцінки ризиків зіткнення суден із застосуванням розробленої моделі.

Основна частина. У статті пропонується підхід до оцінювання ризику зіткнення, у якому оцінка ризику зіткнень суден за величинами DCPA/TCPA розглядається у якості базової основи, яка доповнюється оцінками зовнішніх факторів впливу навігаційного середовища та розглядається за умов наявності часткової невизначеності вхідної інформації (неточності або неповноти навігаційних даних). Вказана постановка задачі дозволяє перейти від спрощеної оцінки ризиків зіткнення суден лише за параметрами зближення та їх взаємного розташування до більш реалістичного та інтегрального оцінювання ризиків, яке краще відповідає специфіці застосування MASS, вимогам МПЗЗС-72, та реальним умовам експлуатації автономних суден в умовах інтенсивного морського трафіку.

Пропонована концептуальна модель оцінювання ризику зіткнення для автономного надводного судна (далі – «власне судно», ВС, або «own ship», OS), орієнтована на роботу з навігаційною AIS-інформацією відносно станів суден-цілей (далі – «судно-ціль», ЦС, або «target ship», TS) та враховує вплив факторів невизначеності.

Запропонована модель узгоджується з перспективними сучасними тенденціями створення методів керування MASS, а також оцінки та зниження ризиків їх зіткнень: розрахунки ризиків за геометричними параметрами взаємного розташування та руху суден та ризиків, що виникають внаслідок зовнішніх впливів [7], врахування вимог МПЗЗС-72 у поєднанні з межами домену судна, що зазнає адаптивних змін [15], використання багатокритеріальних оцінок та нечіткої логіки [8, 12, 16].

Згідно з розробленою концептуальною моделлю, комплексна оцінка рівня ризику зіткнення суден здійснюється шляхом послідовного виконання низки розрахункових процедур, які наведені далі.

1. *Геометрична оцінка навігаційної ситуації.* Здійснюється визначення взаємного розташування суден та розрахунок геометричних параметрів їх зближення – визначаються DCPA/TCPA кожного ЦС. З метою зменшення залежності функцій належності від розмірів судна застосовується безрозмірна нормалізація вхідних даних, згідно з підходом, запропонованим у роботі [5]:

$$D^* = \frac{DCPA}{L_o} \quad T^* = \frac{TCPA}{L_o / \|\nu_0\| + \varepsilon} \quad (1)$$

де L_o – довжина власного судна, ε – малий доданок для уникнення ділення на нуль.

Додатковими даними опису навігаційної ситуації є: $\Delta\psi$ – відносний курс цілі (для розпізнавання типу навігаційної ситуації (зустрічний курс, перетин курсів, обгін), їх швидкості та значення $k_v = \|\nu_T\| / \|\nu_0\|$ – відношення швидкостей, яке використовується як одна з ключових ознак у розширених CRI-методиках [6].

2. *Визначення впливу зовнішнього середовища та індексу невизначеності (достовірності) навігаційної інформації.* Вплив зовнішнього середовища оцінюється з урахуванням двох складових: стану зовнішнього середовища – (E) та невизначеності оцінки стану зовнішнього середовища – (U).

До складової (E) входять: вітер (швидкість (V_g), напрям (w)), видимість (V_{is}), течія (швидкість (V_c), напрям (c)), рівень хвилювання (бали). Складова $U \in [0,1]$ являє собою нечітку оцінку якості наявної навігаційно-метеорологічної інформації (за часом оновлення, узгодженістю між джерелами, дисперсією прогнозу або доступністю даних), оскільки у контексті автономного судноводіння невизначеність середовища проявляється не лише як фізичний вплив, а як помилка прогнозу та звуження маневрового простору.

3. *Нечіткий логічний висновок.* Нечіткий логічний висновок здійснюється з урахуванням двох складових: рівня ризику зіткнення суден, який обумовлений їх взаємним розташуванням відповідно до навігаційної ситуації, що має місце, $-R_{geo}$ (FIS-1 – геометричний ризик, входи: $D^*, T^*, \Delta\psi, k_v$, вихід – R_{geo}), ризику, спричиненого впливом зовнішнього середовища, $-R_{env}$ (FIS-2, ризик зовнішніх впливів, входи: E та U , вихід – R_{env}).

Узагальнена оцінка ризику, може бути представлена у вигляді:

$$R = Defuzz(G(R_{geo}, R_{env}, p)), \quad (2)$$

де p – параметр чутливості моделі, який визначає рівень загального ризику з урахуванням типу навігаційної ситуації (дотримання вимог МПЗС-72).

Відповідно до отриманого рівня ризику формується вибір маневру автономного судна, що спрямований на його зменшення і відповідає вимогам МПЗС-72, та, у випадку перевищення заданого порогу, формується сигнал тривоги.

4. *Визначення маневру судна та дій його рушійно-керуючого комплексу.* Рух автономного судна відбувається відповідно до запланованої траєкторії руху за умов неперевикнення порогових значень рівня ризику, в іншому випадку здійснюється зміна траєкторії руху та/або швидкості, яка відповідає вимогам МПЗС-72 та забезпечує зниження рівня ризику.

Структура запропонованої системи оцінювання ризику зображена на рис. 1. Вона включає в себе: модуль збору даних (AIS + навігаційні датчики + метео/гідро), модуль оцінювання геометрії зближення та прогнозу DCPA (обчислення $D^*, T^*, \Delta\psi, k_v$), модуль оцінювання стану навколишнього середовища та індексу невизначеності навігаційних даних E, U модуль нечіткого логічного висновку (FIS-1/FIS-2 + МПЗС-72), модуль оцінки підсумкового рівня ризику R та оцінки критичності ситуації, модуль планування маневру, та модуль керування рушійно-керуючим комплексом автономного судна.

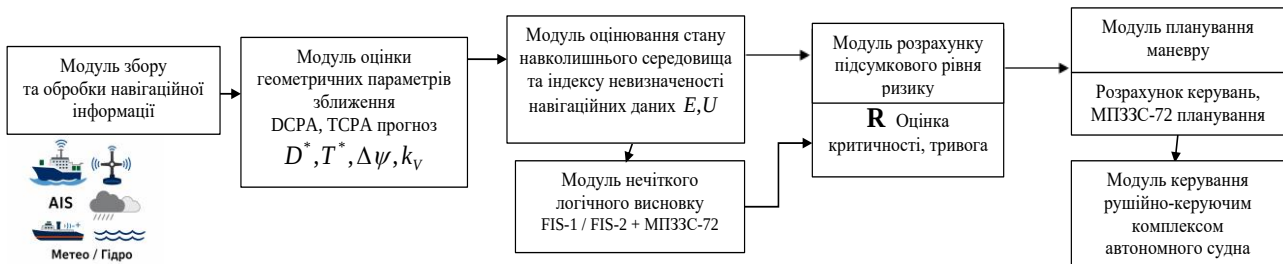


Рисунок 1 – Структурна схема системи оцінювання ризиків зіткнень MASS

Таким чином, відповідно до запропонованого методу оцінки ризиків зіткнення автономних суден, при однаковій геометрії зближення, погіршення стану навколишнього середовища та/або зростання невизначеності навігаційних даних сприяє підвищенню рівня підсумкового ризику, оскільки зростає похибка прогнозу та зменшується запас керованості судном.

З метою перевірки працездатності і валідності запропонованої методики оцінювання ризиків зіткнення автономних суден із застосуванням вищенаведеної моделі на основі нечіткої логіки, було розроблено авторське програмне забезпечення для проведення імітаційного сценарного моделювання.

Програмну реалізацію виконано мовою JavaScript у середовищі Node.js, що дозволяє запускати моделювання локально, формувати табличні результати у форматі CSV та генерувати графічну візуалізацію зміни ризику в часі. Розроблене програмне середовище призначене для попередньої аналітичної апробації моделі в типових ситуаціях зближення

суден і дозволяє дослідити, як змінюється підсумковий ризик залежно від геометрії руху, стану навколишнього середовища, невизначеності вхідних даних та вимог МПЗЗС-72.

Перед початком імітаційного моделювання в програмі задаються опорні параметри сценарію моделювання: кількість суден, початкові координати власного судна та цільових суден, швидкість, курс руху, тип ситуації зближення, ролі суден, а також параметри навколишнього середовища: швидкість вітру, швидкість течії, рівень хвилювання, видимість та умовна оцінка якості AIS-даних. Для кожного судна рух задається у двовимірній площині, координати подаються в морських милях, швидкість у вузлах, а курс у градусах. Також, з метою розрахунку величин D^* та T^* зазначається довжина L власного судна (у наведених нижче сценаріях імітаційного моделювання застосовано значення $L=100$ м). Для оцінки рівня ризику застосовано наступну лінгвістичну шкалу: 0.00–0.30 – низький; 0.31–0.60 – середній; 0.61–0.80 – високий; 0.81–1.00 – критичний.

Таблиця 1 – Сценарії імітаційного моделювання навігаційних ситуацій

№	Кількість суден	Тип ситуації зближення	Стан навколишнього середовища	МПЗЗС-72-роль ВС/ЦС	Поведінка ЦС або групи суден
1	2	3	4	5	6
1	2	Рух на зустрічних курсах за помірних умов	Помірний вітер 10–15 вуз., хвилювання 2 бали, добра видимість	Взаємне розходження, обидва судна діють за логікою зустрічного зближення	Прогнозована, своєчасна реакція обох суден
2	2	Рух на зустрічних курсах за помірних умов без своєчасної зміни курсу ЦС	Помірні умови, добра видимість	Взаємне розходження, затримка маневру ЦС	Інертна або запізнена реакція
3	2	Перетин курсів, ВС повинно поступитися дорогою	Добра видимість, слабка течія	ВС – судно, що має поступитися дорогою, ЦС – судно, що зберігає курс і швидкість	ЦС діє прогнозовано, зберігає курс і швидкість
4	2	Перетин курсів за умов сильного вітру та течії	Вітер 22–28 вуз., течія 1.5–2.0 вуз., хвилювання 3–4 бали	ВС – судно, що має поступитися дорогою, ЦС – судно, що зберігає курс і швидкість	Поведінка загалом прогнозована, але маневр ускладнений зовнішніми збуреннями
5	2	Перетин курсів, у якому ВС зберігає курс і швидкість, але ЦС не виконує очікуваний маневр	Помірні умови, добра видимість	ВС – судно, яке зберігає курс і швидкість, ЦС – судно, що має поступитися дорогою	Порушення правил МПЗЗС-72, відсутній своєчасний маневр ЦС
6	2	Обгін за спокійних умов	Спокійне море, добра видимість	Судно, яке обганяє / судно, яке обганяють	Прогнозована поведінка, стабільна швидкість, прогнозований маневр
7	2	Обгін із раптовим зменшенням швидкості ЦС	Спокійне море, добра видимість	Судно, яке обганяє / судно, яке обганяють	Несподіване зменшення швидкості ЦС
8	3	Багатосуднова ситуація з трьома суднами в обмеженій акваторії	Обмежена акваторія, помірний вітер, інтенсивний локальний трафік	ВС одночасно взаємодіє з двома ЦС, різні ролі для пар суден	Одне судно діє прогнозовано, інше реагує із запізненням

Продовження Таблиці 1

1	2	3	4	5	6
9	4	Багатосуднова ситуація з чотирма суднами та різними МПЗС-72-ролями	Обмежена акваторія маневру, помірне хвилювання, неоднорідний трафік	Для різних пар одночасно виникають ролі судна, що зберігає курс і швидкість, та судна, що має поступитися дорогою	Частково інертна реакція суден, обмежена акваторія для маневру
10	2–3	Ситуація «торговельне судно + риболовне судно»	Прибережний район, помірне хвилювання, активна риболовна обстановка	Роль залежить від фактичного статусу риболовного судна та геометрії зближення	Нерегулярна траєкторія або змінний режим швидкості риболовного судна
11	2–3	Перетин курсів із неповними або відсутніми AIS-даними	Помірні погодні умови, але низька якість AIS-даних	Роль визначається з нижчою достовірністю через неповноту даних	Поведінка частково спостережувана; прогноз руху нестійкий
12	3+	Багатосуднова ситуація за поганої видимості	Видимість < 1 милі, хвилювання 3 бали, обмежений простір для маневру	Для кількох пар суден виникають різні ролі, окремі взаємодії потребують термінового маневру судна, що має поступитися дорогою	Переважно обережна, але неоднорідна за темпом реакція кожного судна з групи
13	4+	Багатосуднова ситуація із сильним вітром, течією та непередбачуваною поведінкою одного із суден	Вітер 25–30 вуз., течія 1.5–2.0 вуз., хвилювання 4–5 балів, знижена видимість	Для кількох пар суден виникають різні ролі, окремі взаємодії потребують термінової дії	Одне судно діє непередбачувано/ризиково, інші маневрують з обмеженнями
14	2	Перетин курсів зі своєчасним маневром ВС	Ускладнені, але контрольовані умови: вітер близько 22 вуз., течія близько 1.4 вуз., хвилювання 3–4 бали, помірна видимість	ВС – судно, що має поступитися дорогою; ЦС – судно, що зберігає курс і швидкість	ЦС зберігає курс і швидкість; ВС своєчасно виконує МПЗС-72-узгоджений маневр, внаслідок чого дистанція розходження збільшується, а ризик поступово зменшується
15	2	Обгін із корекцією дистанції	Помірно ускладнені умови: вітер близько 23 вуз., течія близько 1.3 вуз., хвилювання 3–4 бали, помірна видимість	Судно, яке обганяє / судно, яке обганяють, взаємна ситуаційна відповідальність	ЦС рухається стало, ВС коригує траєкторію обгону та підтримує безпечну бокову дистанцію, через що ДСПА збільшується, ТСПА віддаляється, а підсумковий ризик знижується

У процесі роботи програма моделює переміщення суден у часі з фіксованим часовим кроком. На кожному кроці для кожної пари «ВС – ЦС» обчислюються параметри найближчої

точки зближення DCPA і TCPA, їх нормовані значення, та визначається геометричний ризик R_{geo} . Далі окремо здійснюється розрахунок ризику R_{env} , що враховує вплив вітру, течії, хвилювання та видимості. Також формується індекс невизначеності U , який відображає надійність вхідних даних і прогнозу руху суден. МПЗЗС-72 використовуються як процедурний модифікатор, що дозволяє врахувати, чи є ВС судном, що повинно поступитися дорогою, судном, що має зберігати курс і швидкість, або учасником багатосуднової ситуації зі змішаними ролями.

За результатами імітаційного моделювання вищенаведених сценаріїв були отримані окремі та узагальнені оцінки рівнів ризику (табл. 2).

Таблиця 2 – Результати fuzzy-based оцінювання ризику зіткнення суден за сценаріями

№	DCPA, nm	TCPA, хв	U	R_{geo}	R_{env}	R_{total}	Рівень ризику
1	0.28	12	0.18	0.64	0.24	0.49	Середній
2	0.19	10	0.22	0.76	0.25	0.67	Високий
3	0.26	13	0.18	0.58	0.20	0.54	Середній
4	0.24	12	0.38	0.61	0.62	0.72	Високий
5	0.25	12	0.22	0.60	0.24	0.80	Високий
6	0.40	22	0.10	0.32	0.10	0.23	Низький
7	0.20	10	0.18	0.71	0.12	0.64	Високий
8	0.19*	8*	0.40	0.74	0.44	0.76	Високий
9	0.16*	7*	0.46	0.80	0.48	0.83	Критичний
10	0.22	10	0.52	0.64	0.36	0.75	Високий
11	0.26	13	0.72	0.58	0.20	0.68	Високий
12	0.18*	8*	0.65	0.75	0.71	0.86	Критичний
13	0.15*	6*	0.68	0.84	0.83	0.92	Критичний
14	0.85	24	0.16	0.18	0.22	0.28	Низький
15	0.70	25	0.12	0.22	0.10	0.24	Низький

* – у зазначених рядках рівень ризику розраховано для найбільш небезпечного судна

Для багатосуднових сценаріїв програма виконує попарне оцінювання взаємодій між власним судном і кожним цільовим судном. У поточній реалізації для підсумкового представлення обирається найбільш небезпечна пара суден за максимальним значенням R_{total} . Такий підхід дозволяє виділити найкритичнішу взаємодію в межах багатосуднової навігаційної ситуації. Результати роботи програми зберігаються у вигляді таблиць CSV, які можуть бути використані для подальшого аналізу та побудови графіків. Додатково програмне забезпечення формує графічну візуалізацію зміни R_{total} , R_{geo} та R_{env} у часі для кожного окремого сценарію. Така візуалізація дозволяє простежити, як підсумковий ризик змінюється впродовж розвитку конкретної ситуації зближення. На рис. 2 наведено приклад роботи програми для сценарію 4.

Окрім графіків для окремих сценаріїв, програмне середовище формує порівняльну візуалізацію динаміки підсумкового ризику для кількох репрезентативних сценаріїв. Для прикладу такого порівняння обрано сценарії 1, 4, 8, 13 та 14, які охоплюють різні типи ситуацій: зустріч на зустрічних курсах, перетин курсів за складних умов, безпечний обгін, багатосуднову ситуацію та критичну багатосуднову ситуацію за умов сильного впливу середовища. Зазначена можливість дозволяє зробити наочне порівняння відмінності отриманих рівнів ризику залежно від типу зближення, зовнішніх умов та складності навігаційної ситуації, рис. 3.

З метою підвищення відтворюваності дослідження вихідний код авторського програмного середовища розміщено у відкритому GitHub-репозиторії: <https://github.com/lpelykhivskyi/mass-collision-risk-simulation> [18].

Сценарій 4 – перетин курсів за умов сильного вітру та течії
Вітер 22-28 kn, течія 1.5-2.0 kn, хвилювання 3-4 бали. OS – give-way; TS – stand-on. Поведінка загалом прогнозована, але маневр ускладнений зовнішніми збуреннями.

(index)	time_min	target_ship	dcpa_nm	tcpa_min	d_star	t_star	r_geom	r_env	u	c_colregs	r_total	risk_level
0	0	'TS-1'	2.055	13.53	38.059	49.93	0.317	0.619	0.386	0.65	0.459	'Середній'
1	1	'TS-1'	1.964	12.5	36.373	46.129	0.345	0.619	0.386	0.65	0.483	'Середній'
2	2	'TS-1'	1.874	11.58	34.706	42.734	0.37	0.619	0.385	0.65	0.507	'Середній'
3	3	'TS-1'	1.783	10.75	33.021	39.671	0.392	0.619	0.385	0.65	0.526	'Середній'
4	4	'TS-1'	1.692	10.02	31.336	36.977	0.413	0.619	0.385	0.65	0.546	'Середній'
5	5	'TS-1'	1.601	9.4	29.651	34.689	0.431	0.619	0.385	0.65	0.563	'Середній'
6	6	'TS-1'	1.511	8.87	27.984	32.733	0.448	0.619	0.384	0.65	0.578	'Середній'
7	7	'TS-1'	1.42	8.44	26.298	31.146	0.464	0.619	0.384	0.65	0.593	'Середній'
8	8	'TS-1'	1.329	8.12	24.613	29.965	0.477	0.619	0.384	0.65	0.606	'Високий'
9	9	'TS-1'	1.238	7.89	22.928	29.117	0.49	0.619	0.383	0.65	0.619	'Високий'
10	10	'TS-1'	1.147	7.77	21.242	28.674	0.502	0.619	0.383	0.65	0.631	'Високий'
11	11	'TS-1'	1.057	7.74	19.576	28.563	0.513	0.62	0.383	0.65	0.642	'Високий'
12	12	'TS-1'	0.966	7.81	17.89	28.021	0.523	0.62	0.382	0.65	0.652	'Високий'
13	13	'TS-1'	0.875	7.99	16.205	29.486	0.533	0.62	0.382	0.65	0.663	'Високий'
14	14	'TS-1'	0.787	8.26	14.575	30.482	0.543	0.62	0.382	0.65	0.672	'Високий'
15	15	'TS-1'	0.71	8.63	13.149	31.848	0.553	0.62	0.382	0.65	0.694	'Високий'
16	16	'TS-1'	0.64	9.11	11.853	33.619	0.563	0.62	0.381	0.65	0.7	'Високий'
17	17	'TS-1'	0.565	9.68	10.464	35.722	0.578	0.62	0.381	0.65	0.706	'Високий'
18	18	'TS-1'	0.477	10.35	8.834	38.195	0.594	0.62	0.381	0.65	0.711	'Високий'
19	19	'TS-1'	0.371	11.13	6.871	41.073	0.606	0.62	0.38	0.65	0.72	'Високий'
20	20	'TS-1'	0.24	12	4.445	44.284	0.61	0.62	0.38	0.65	0.72	'Високий'

CSV saved to: /Users/leonidpelyhivskyi/PhD/projects/mass-collision-risk-simulation/simulation_results/scenario_4_results.csv
SVG plot saved to: /Users/leonidpelyhivskyi/PhD/projects/mass-collision-risk-simulation/simulation_results/scenario_4_risk_plot.svg

Рисунок 2 – Зміни геометричного, середовищного та підсумкового ризику зіткнення для сценарію 4

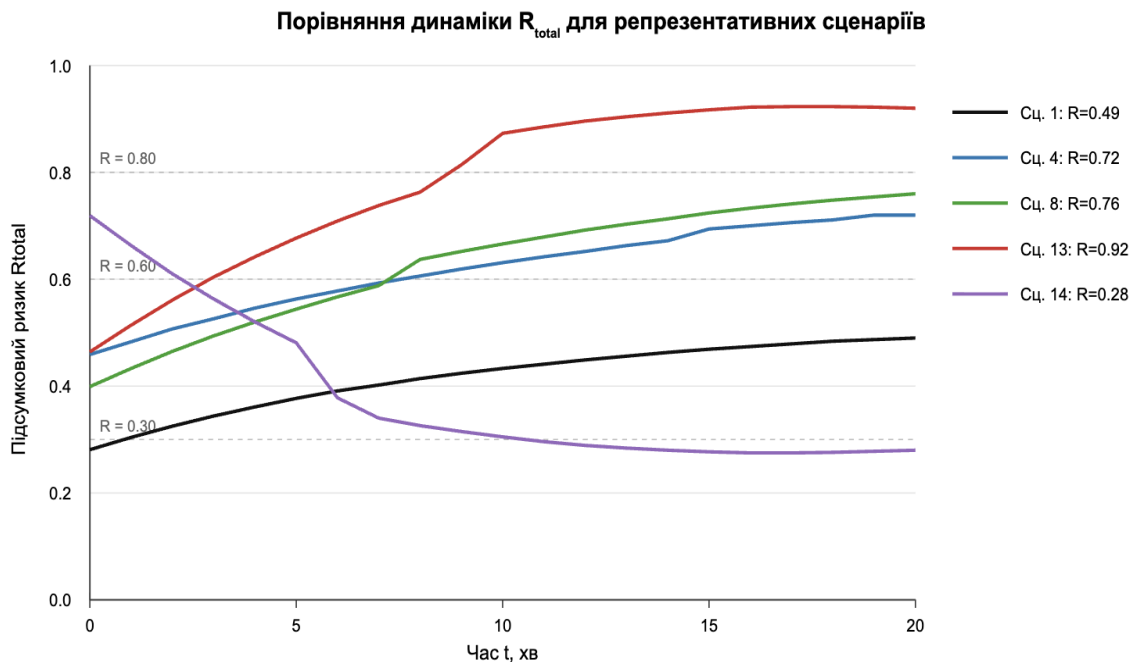


Рисунок 3 – Порівняння динаміки підсумкового ризику R_{total} для різних сценаріїв

Репозиторій містить реалізацію сценарного моделювання, приклади вхідних сценаріїв, розрахунок DCPA/TCPA, нормалізацію параметрів зближення, оцінювання геометричного та середовищного ризику, індексу невизначеності, дотримання вимог МПЗС-72 та формування підсумкового ризику.

Слід зазначити, що розроблене програмне забезпечення носить дослідницький і демонстраційний характер, і його основне призначення полягає в апробаційній перевірці логічної узгодженості запропонованої моделі та демонстрації можливості її подальшої програмної реалізації в системах підтримки прийняття рішень MASS. Подальша валідація моделі має передбачати використання реальних AIS-даних, AIS+weather вибірок або професійного навігаційного симулятора.

Висновки. Розроблено концептуальну модель оцінювання ризику зіткнення для автономних надводних суден, яка поєднує класичні параметри $DCPA/TCPA$ з додатковими

кінематичними індикаторами ($\Delta\psi, k_v$) та факторами впливу навколишнього середовища (вітер/течія/хвилювання/видимість), що дозволяє врахувати особливості оцінки ризиків зіткнень та процесів керування, які притаманні автономним надводним суднам (MASS). Відмінними рисами, що визначають наукову новизну запропонованого підходу у порівнянні з вже існуючими, є те, що у розробленій моделі поєднано, але структурно розподілено врахування навігаційних ризиків, обумовлених як геометричними параметрами розташування та руху суден, так і факторами впливу зовнішнього середовища, неповноти або помилковості наявних навігаційних даних, а також дотриманням вимог МПЗС-72.

Практичне значення розробки полягає в тому, що запропонована модель може бути використана як для оцінки ризику у автоматизованих системах планування маневру автономних суден, а також у берегових центрах моніторингу руху MASS.

Обмеження моделі є типовими для нечітких систем заснованих на правилах – функції належності та правила потребують калібрування під район плавання та клас судна. Також слід враховувати, що для створення практично придатних та сертифікованих систем автоматизованого керування рухом MASS потрібна належна валідація на широкому наборі сценаріїв та зовнішніх факторів впливу.

Перспективи подальших досліджень. Подальші дослідження доцільно проводити у напрямку вивчення впливу на рівень ризиків зіткнень MASS окремих районів плавання, типів суден та погодних умов. Окремим важливим напрямком подальших досліджень постає визначення та вивчення емпіричних закономірностей поведінки суден у типових навігаційних ситуаціях та під впливом характерних погодних умов.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Zhang X., et al. Collision-avoidance navigation systems for Maritime Autonomous Surface Ships: A state of the art survey. *Ocean Engineering*. 2021;235:109380. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2021.109380>.
2. Burmeister H.-C., Constapel M. Autonomous Collision Avoidance at Sea: A Survey. *Frontiers in Robotics and AI*. 2021;8:739013. <https://doi.org/10.3389/frobt.2021.739013>.
3. Sarhadi P., Naeem W., Athanasopoulos N. A Survey of Recent Machine Learning Solutions for Ship Collision Avoidance and Mission Planning. *IFAC-PapersOnLine*. 2022;55(31):257–268. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2022.10.440>.
4. Zhu Q., Xi Y., Weng J., Han B., Hu S., Ge Y.-E. Intelligent ship collision avoidance in maritime field: A bibliometric and systematic review. *Expert Systems with Applications*. 2024;252(Part A):124148. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2024.124148>.
5. Yu Q., Teixeira A. P., Liu K., Guedes Soares, C. Framework and application of multi-criteria ship collision risk assessment. *Ocean Engineering*. 2022;250:111006. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.111006>.
6. Ahmed Y. A., et al. COLREGs Compliant Fuzzy-Based Collision Avoidance System for Multiple Ship Encounters. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2021;9(8):790. <https://doi.org/10.3390/jmse9080790>.
7. Korupoju A. K., Kapadia V., Vilwathilakam A. S., Samanta A. Ship Collision Risk Evaluation using AIS and weather data through fuzzy logic and deep learning. *Ocean Engineering*. 2025;318:120116. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.120116>.
8. Park J. Estimation of Vessel Collision Risk Under Uncertainty Using Interval Type-2 Fuzzy Inference Systems and Dempster–Shafer Evidence Theory. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2026;14(1):34. <https://doi.org/10.3390/jmse14010034>.
9. Zhou Y., Daamen W., Vellinga T., Hoogendoorn S. P. Impacts of wind and current on ship behavior in ports and waterways: A quantitative analysis based on AIS data. *Ocean Engineering*. 2020;213:107774. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.107774>.

10. Hansen P. N., Enevoldsen T. T., Papageorgiou D., Blanke M. Autonomous Navigation in Confined Waters – A COLREGs Rule 9 Compliant Framework. IFAC-PapersOnLine. 2022;55(31):222–228. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2022.10.435>.
11. Sawada R., Sato K., Minami M. Framework of safety evaluation and scenarios for automatic collision avoidance algorithm. Ocean Engineering. 2024;300:117506. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.117506>.
12. Shi Z., Zhen R., Liu J. Fuzzy logic-based modeling method for regional multi-ship collision risk assessment considering impacts of ship crossing angle and navigational environment. Ocean Engineering. 2022;111847. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.111847>.
13. Zhao L., Fu X. A novel index for real-time ship collision risk assessment based on velocity obstacle considering dimension data from AIS. Ocean Engineering. 2021;240:109913. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2021.109913>.
14. Gai X., Zhang Q., Hu Y., Wang G. A Fuzzy Fusion Method for Multi-Ship Collision Avoidance Decision-Making with Merchant and Fishing Vessels. Journal of Marine Science and Engineering. 2024;12(10):1822. <https://doi.org/10.3390/jmse12101822>.
15. Szlapczynski R., Szlapczynska J. A ship domain-based model of collision risk for near-miss detection and Collision Alert Systems. Reliability Engineering & System Safety. 2021;214:107766. <https://doi.org/10.1016/j.res.2021.107766>.
16. Cheng K., et al. A novel fuzzy comprehensive evaluation method for ship collision risk. Ocean Engineering. 2025;332:121462. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2025.121462>.
17. Yuan X., Zhang D., Zhang J., Zhang M., Guedes Soares C. A novel real-time collision risk awareness method based on velocity obstacle considering uncertainties in ship dynamics. Ocean Engineering. 2021;220:108436. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.108436>.
18. <https://github.com/lpelykhivskiy/mass-collision-risk-simulation>.

REFERENCES

1. Zhang, X., et al. (2021). Collision-avoidance navigation systems for Maritime Autonomous Surface Ships: A state of the art survey. Ocean Engineering. 2021;235:109380. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2021.109380>.
2. Burmeister, H.-C., Constapel, M. (2021). Autonomous Collision Avoidance at Sea: A Survey. Frontiers in Robotics and AI. 2021;8:739013. <https://doi.org/10.3389/frobt.2021.739013>.
3. Sarhadi, P., Naem, W., Athanasopoulos, N. (2022). A Survey of Recent Machine Learning Solutions for Ship Collision Avoidance and Mission Planning. IFAC-PapersOnLine. 2022;55(31):257–268. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2022.10.440>.
4. Zhu, Q., Xi, Y., Weng, J., Han, B., Hu, S., Ge, Y.-E. (2024). Intelligent ship collision avoidance in maritime field: A bibliometric and systematic review. Expert Systems with Applications. 2024;252(Part A):124148. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2024.124148>.
5. Yu, Q., Teixeira, A. P., Liu, K., Guedes Soares, C. (2022). Framework and application of multi-criteria ship collision risk assessment. Ocean Engineering. 2022;250:111006. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.111006>.
6. Ahmed, Y. A., et al. (2021). COLREGs Compliant Fuzzy-Based Collision Avoidance System for Multiple Ship Encounters. Journal of Marine Science and Engineering. 2021;9(8):790. <https://doi.org/10.3390/jmse9080790>.
7. Korupoju, A. K., Kapadia, V., Vilwathilakam, A. S., Samanta, A. (2025). Ship Collision Risk Evaluation using AIS and weather data through fuzzy logic and deep learning. Ocean Engineering. 2025;318:120116. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.120116>.
8. Park, J. (2026). Estimation of Vessel Collision Risk Under Uncertainty Using Interval Type-2 Fuzzy Inference Systems and Dempster–Shafer Evidence Theory. Journal of Marine Science and Engineering. 2026;14(1):34. <https://doi.org/10.3390/jmse14010034>.

9. Zhou, Y., Daamen, W., Vellinga, T., Hoogendoorn, S. P. (2020). Impacts of wind and current on ship behavior in ports and waterways: A quantitative analysis based on AIS data. *Ocean Engineering*. 2020;213:107774. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.107774>.
10. Hansen, P. N., Enevoldsen, T. T., Papageorgiou, D., Blanke, M. (2022). Autonomous Navigation in Confined Waters – A COLREGs Rule 9 Compliant Framework. *IFAC-PapersOnLine*. 2022;55(31):222–228. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2022.10.435>.
11. Sawada, R., Sato, K., Minami, M. (2024). Framework of safety evaluation and scenarios for automatic collision avoidance algorithm. *Ocean Engineering*. 2024;300:117506. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.117506>.
12. Shi, Z., Zhen, R., Liu, J. (2022). Fuzzy logic-based modeling method for regional multi-ship collision risk assessment considering impacts of ship crossing angle and navigational environment. *Ocean Engineering*. 2022;111847. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.111847>.
13. Zhao, L., Fu, X. (2021). A novel index for real-time ship collision risk assessment based on velocity obstacle considering dimension data from AIS. *Ocean Engineering*. 2021;240:109913. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2021.109913>.
14. Gai, X., Zhang, Q., Hu, Y., Wang, G. (2024). A Fuzzy Fusion Method for Multi-Ship Collision Avoidance Decision-Making with Merchant and Fishing Vessels. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2024;12(10):1822. <https://doi.org/10.3390/jmse12101822>.
15. Szlapczynski, R., Szlapczynska, J. (2021). A ship domain-based model of collision risk for near-miss detection and Collision Alert Systems. *Reliability Engineering & System Safety*. 2021;214:107766. <https://doi.org/10.1016/j.res.2021.107766>.
16. Cheng, K., et al. (2025). A novel fuzzy comprehensive evaluation method for ship collision risk. *Ocean Engineering*. 2025;332:121462. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2025.121462>.
17. Yuan, X., Zhang, D., Zhang, J., Zhang, M., Guedes Soares, C. (2021). A novel real-time collision risk awareness method based on velocity obstacle considering uncertainties in ship dynamics. *Ocean Engineering*. 2021;220:108436. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.108436>.
18. <https://github.com/lpelykhivskyi/mass-collision-risk-simulation>.

Ben A. P., Pelykhivskyi L. O., Voronenko S. V. A COLLISION RISK ASSESSMENT MODEL FOR AUTONOMOUS SURFACE VESSELS CONSIDERING ENVIRONMENTAL INFLUENCES

The article is devoted to the development of a fuzzy logic-based model for assessing the collision risk of autonomous surface vessels under conditions of environmental uncertainty. The current state of development of collision avoidance systems for autonomous vessels is considered, and the key challenges associated with the processing of incomplete and imprecise navigational data are identified. A comparative analysis of existing approaches to collision risk assessment is carried out, in particular methods based on the distance and time to the closest point of approach (DCPA/TCPA) and fuzzy logic, with their advantages and limitations determined. A conceptual fuzzy logic-based model for ship collision risk assessment is proposed, providing a comprehensive evaluation of the risk level by taking into account the geometric parameters of the encounter area, the influence of environmental factors, and the uncertainty index of navigational information. A distinctive feature of the proposed model is the separation of geometric and contextual risk components, as well as the use of a two-layer fuzzy inference system that takes into account the constraints of COLREGs-72. It is shown that the integration of fuzzy logic methods, multi-criteria analysis, and new approaches to modeling environmental uncertainty can improve the reliability of risk assessment under real operating conditions of autonomous vessels. The structure of the developed risk assessment system is presented, its operation is demonstrated using typical ship encounter scenarios, and the degree of influence of external factors, including wind, current, and sea state, on the formation of the risk level is determined. Directions for further research are identified, in particular the use of fuzzy systems and evidence theory methods to account for the uncertainty of environmental factors affecting the motion control of autonomous vessels.

Key words: fuzzy logic; collision risk assessment; autonomous surface vessels; MASS; DCPA; TCPA; COLREGs; navigational safety; uncertainty; artificial intelligence; control systems.

© Бень А. П., Пелихівський Л. О., Вороненко С. В.

Статтю прийнято до редакції 18.05.2026

ЗНИЖЕННЯ ШУМОВОГО ЗАБРУДНЕННЯ СУДЕН ШЛЯХОМ СПЕКТРАЛЬНОЇ ІДЕНТИФІКАЦІЇ ВІБРОАКУСТИЧНИХ ПРОЦЕСІВ ДИЗЕЛЬ-ГЕНЕРАТОРА

Кучеренко В. Ю., аспірант, старший викладач кафедри судноводіння і морської безпеки Одеського національного морського університету, м. Одеса, Україна, e-mail: kucherinho@gmail.com, ORCID: 0009-0008-4906-9726;

Мельник О. М., д.т.н., професор, завідувач кафедри судноводіння і морської безпеки Одеського національного морського університету, м. Одеса, Україна, e-mail: m.onmu@ukr.net, ORCID: 0000-0001-9228-8459.

У даній роботі подано результати експериментального дослідження та спектральної діагностики віброакустичних процесів суднової енергетичної установки в умовах трьох характерних режимів експлуатації: холостого ходу, часткового навантаження 18 кВт та робочого навантаження 36 кВт. Актуальність дослідження обумовлена сучасними вимогами до зниження підводного шумового випромінювання суден, підвищення рівня екологічної безпеки морського транспорту та необхідністю вдосконалення методів бортової діагностики джерел структурного шуму і вібрації. Особливу увагу приділено аналізу низькочастотних складових, які є найбільш інформативними при оцінюванні технічного стану судових дизельних енергетичних установок і формуванні підводного акустичного поля судна. Оброблення експериментальних сигналів виконано методом дискретного перетворення Фур'є з подальшим виділенням домінуючих гармонічних компонентів у діапазоні 0–200 Гц. Для дослідження використано результати одночасного запису акустичних і вібраційних сигналів, отриманих із застосуванням сенсорних каналів контролю структурних коливань та низькочастотної акустики. У процесі спектрального аналізу встановлено, що найбільш інформативними є гармоніки 25,1; 50,2; 100,2; 150,4 та 175,5 Гц, які пов'язані з порядками обертання валу, цикловою нерівномірністю крутного моменту, інерційними силами поршневої групи, резонансними коливаннями конструктивних елементів та структурним передаванням вібраційної енергії корпусом суднової установки. Запропоновано використання інтегрованого аналізу акустичних і вібраційних каналів як ефективного інструменту для контролю критичних режимів роботи судових енергетичних установок, визначення коефіцієнта нерівномірності обертання колінчастого валу, раннього виявлення дефектів та обґрунтування експлуатаційних заходів зі зниження шумового випромінювання суден і підвищення екологічної ефективності морського транспорту.

Ключові слова: суднова енергетична установка; віброакустика; підводне шумове випромінювання; дискретне перетворення Фур'є; спектральний аналіз; коефіцієнт нерівномірності обертання колінчастого валу; вібрація; гармоніки.

DOI: 10.33815/2313-4763.2026.1.32.071-086

Вступ. Суднові дизель-генераторні установки є одними з основних джерел низькочастотної вібрації та структурного шуму на морських судах. Динамічні навантаження, що виникають унаслідок нерівномірності крутного моменту дизеля, періодичної дії газових та інерційних сил кривошипно-шатунного механізму, передаються через опорні елементи, фундамент і корпусні конструкції судна. У результаті формується складне віброакустичне поле, яке визначає рівень шуму в машинному відділенні та може впливати на підводне шумове випромінювання судна. У сучасних умовах експлуатації суден актуальним є не лише зниження інтегрального рівня шуму, а й визначення конкретних частотних складових, пов'язаних із роботою валопроводу, поршневої групи, газорозподільного механізму та конструктивних елементів СЕУ. Тому використання спектрального аналізу акустичних і вібраційних сигналів є доцільним інструментом для діагностики джерел віброакустичного збудження та обґрунтування експлуатаційних заходів зменшення шуму.

Постановка проблеми. Комерційне судноплавство розглядається міжнародними організаціями як один із суттєвих чинників антропогенного підводного шуму, а переглянуті рекомендації ІМО МЕРС.1/Circ.906 визначають необхідність підвищення уваги до джерел шуму, експлуатаційних режимів та практичних заходів його зниження [1]. Для судна шум не

є ізольованим акустичним явищем. Він формується через послідовний енергетичний ланцюг: робочий процес дизеля, коливання крутного моменту, валопровід, опори та фундамент, корпусні вібрації, випромінювання у водне середовище. У сучасних роботах з вимірювання випроміненого суднового шуму підкреслюється необхідність вузькосмугового спектрального аналізу, оскільки третиноктавні смуги часто недостатні для відокремлення окремих механічних тональних складових [2]. Дослідження «Vibration and Radiated Noise of a Small Ship» показало, що поєднання вимірювань підводного шуму і вібрацій на борту дає змогу пов'язати окремі компоненти спектра з конкретними джерелами у двигуні та корпусній структурі [3]. Актуальність роботи також визначається тим, що вібраційні показники судна мають подвійне значення. З одного боку, вони є ознакою технічного стану механізмів, а з іншого – передумовою формування структурного шуму, який у подальшому переходить у підводне шумове випромінювання. Стандарти ISO 6954 і ISO 20283-5 визначають підходи до оцінювання вібрацій на судах і вимірювання вібрацій обертових механізмів, а практичні керівництва класифікаційних товариств рекомендують враховувати як джерела збудження, так і шляхи передавання вібрацій через конструкцію [4–9]. Основна науково-прикладна проблема полягає у тому, що збільшення навантаження суднової енергетичної установки не завжди призводить до лінійного зростання шуму. Частина гармонік може посилюватися, частина – зменшуватися, а окремі позапорядкові складові можуть свідчити про резонанс, нерівномірність частоти обертання або нестационарність робочого процесу. Тому простого контролю інтегрального рівня вібрації недостатньо для визначення джерела шуму. У практиці експлуатації необхідно мати можливість за спектральним складом сигналів визначити джерело походження складових спектра, критичні частоти, критичні режими навантаження і можливі експлуатаційні заходи зниження впливу. Для цього потрібно поєднати методи DFT-досліджень спектральних складових віброакустичних процесів двигуна, аналіз нерівномірності частоти обертання, стандартизовані підходи до вимірювання та практичні рекомендації ІМО щодо зменшення підводного шумового випромінювання [1, 5–6].

Об'єкт і предмет дослідження. Об'єктом дослідження є віброакустичні процеси у суднової енергетичній установці дизельного типу при різних режимах навантаження. Предметом дослідження є спектральні характеристики низькочастотних акустичних та вібраційних сигналів, а також їх зв'язок із гармонічними порядками обертання валу, частотою нерівномірності обертання та структурним шумом.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Фундаментальний напрям вимірювання випроміненого суднового шуму розвивається через методи визначення рівня джерела з урахуванням втрат поширення, гідроакустичних умов і режиму роботи судна. Wang та співавтори запропонували методику вимірювання шуму судна у мілководді з одночасним використанням кількох вимірювальних станцій та оцінюванням спектра джерела [2]. Такий підхід є важливим для зовнішніх гідроакустичних вимірювань, однак для цієї роботи головною є попередня діагностика джерел шуму на борту за віброакустичними сигналами. У роботі Gloza розглянуто вимірювання шуму та вібрації малого судна з дизельним двигуном потужністю 20 кВт, де використано два взаємодоповнювальні методи: статичне вимірювання підводного шуму і бортове вимірювання вібрації. Важливим результатом є використання функції когерентності для зв'язування окремих компонентів підводного шуму з вібруючими частинами двигуна [3]. У цій роботі даний підхід адаптовано у вигляді зіставлення акустичних та вібраційних каналів і визначення узгоджених тональних компонентів. Для судових дизелів важливими є не лише спектр шуму, а й параметрична діагностика циклів. Роботи Варбанця Р. А., Мінчева Д. С. та Заложа В. І. показують, що поєднання сигналів тиску у циліндрі та віброакустичного датчика дає змогу оцінювати стабільність процесів упорскування, згоряння і роботи клапанного механізму в режимі реального часу [10–14]. Цей підхід методично близький до нашого дослідження, оскільки амплітуди спектральних складових акустичних та вібраційних сигналів пов'язані з робочим процесом і частотою нерівномірності обертання. Діагностичне значення вібраційних параметрів форсунок,

паливних насосів і крутильних коливань також підтверджено у сучасних дослідженнях суднових дизелів [12–14]. У роботах щодо методів зниження гідроакустичного шуму судна обґрунтовано необхідність інтелектуального моніторингу вібрацій, акустичного шуму і розрахунку коефіцієнта нерівномірності обертання колінчастого валу [15]. У подальшому дослідженні впливу управління судном показано, що корекція курсу відносно хвильового фронту, диференту і швидкості може зменшувати гідродинамічну асиметрію, крутильні навантаження та структурний шум [16].

Мета та задачі дослідження. Метою роботи є експериментальне оцінювання зміни спектральних характеристик низькочастотного акустичного та вібраційного сигналів суднової енергетичної установки на трьох режимах роботи з подальшим визначенням спектральних складових, пов'язаних з обертанням валу, нерівномірністю частоти обертання та можливим переходом структурних вібрацій у підводне шумове випромінювання. Для досягнення мети виконано такі завдання: описано експериментальну установку та канали вимірювання; визначено частотні компоненти акустичного і вібраційного сигналів; сформовано математичну модель гармонічного сигналу, DFT, RMS, когерентності та розрахунку коефіцієнта нерівномірності обертання колінчастого валу; встановлено зв'язок між спектральними складовими акустичного та вібраційного сигналів і коефіцієнтом нерівномірності обертання на різних режимах навантаження; обґрунтовано практичні методи зменшення вібрації та шуму. Наукова новизна роботи полягає у комплексному встановленні кількісного взаємозв'язку між режимом навантаження суднової енергетичної установки, коефіцієнтом нерівномірності обертання валу та спектральною структурою низькочастотних віброакустичних сигналів у діапазоні 10–200 Гц. Удосконалено метод віброакустичної діагностики СЕУ шляхом інтегрованого аналізу акустичних та вібраційних каналів із використанням вузькосмугового спектрального розкладу та функції когерентності, що дозволяє ідентифікувати джерела структурного шуму за гармонічними порядками.

Матеріали та методи дослідження. Дослідження проводилися на лабораторному судновому дизель-генераторному агрегаті на базі чотиритактного дизельного двигуна Weichai WP4CD66E200, з номінальною потужністю 66 кВт при частоті обертання 1500 об/хв. Загальний вигляд лабораторного дизель-генераторного агрегату, на якому проводилися експериментальні вимірювання, наведено на рис. 1. Двигун укомплектований генераторною установкою CCFJ-50J-W номінальною потужністю 50 кВт, напругою 400 В і частотою генерованого струму 50 Гц. Основні геометричні параметри кривошипно-шатунного механізму становлять: діаметр циліндра – 105 мм, хід поршня – 130 мм, радіус кривошипа – 65 мм, довжина шатуна – 203 мм, ступінь стиску – 18. У ході експерименту дослідження проводилися у режимах активного електричного навантаження 18 кВт та 36 кВт.



Рисунок 1 – Дизель-генераторний агрегат Weichai WP4CD66E200

Дослідження віброакустичних характеристик суднової енергетичної установки проводилися із застосуванням багатоканальної системи збору даних, що включала акустичний сенсор (електретний мікрофон ЕМ-6022Р) з фільтром НЧ зі смугою пропускання від 10 до 200 Гц, вібраційний акселерометр типу ІЕРЕ АС150-1А, з номінальною чутливістю

100 мВ/г, датчик тиску газів у циліндрі (встановлений на першому циліндрі) CPS-03 IMES (0...300 bar, 4...20 mA) та датчик обертів KB (122 імп/об). Встановлення вібраційного акселерометра типу IEPЕ AC150-1A на кришці циліндра дизель-генератора наведено на рис. 2. Вимірювання виконувалися у трьох характерних режимах роботи установки: холостий хід, часткове навантаження 18 кВт і навантаження 36 кВт. У кожному режимі аналізувалися два основні канали: канал низькочастотної акустики та канал вібраційного сигналу, а також дані з датчика обертів і датчика тиску газів у циліндрі, які використовувалися для виділення робочого циклу двигуна та розрахунку частоти нерівномірності обертання. Для контролю спектральної структури додатково використовувалися WAV-файли, сформовані з експериментальних часових реалізацій сигналів. Сигнали з датчиків оброблялися методом дискретного перетворення Фур'є, що дозволило виділити гармонічну структуру коливань у діапазоні до 500 Гц. Основний амплітудний аналіз виконано у діапазоні 0–200 Гц, оскільки саме він охоплює основну частоту обертання валу та кратні гармоніки, які мають найбільше значення для структурного і підводного шуму. Для спектральної обробки віброакустичних сигналів використовувалося програмне забезпечення RightMark Audio Analyzer, яке застосовувалося для вузькосмугового FFT/DFT-аналізу WAV-сигналів, побудови амплітудно-частотних спектрів та ідентифікації гармонічних складових у діапазоні 0–500 Гц. Програмний комплекс забезпечував візуалізацію тональних компонентів, контроль спектральної структури та порівняльний аналіз акустичних і вібраційних каналів у різних режимах навантаження СЕУ. Цифрова обробка сигналів виконувалася у середовищі Python із використанням бібліотек NumPy, SciPy та Matplotlib. Реалізовано алгоритми дискретного перетворення Фур'є, цифрової фільтрації, спектрального оцінювання, автоматичного визначення пікових гармонік та побудови DFT-спектрів відповідно до класичного підходу FFT-оцінювання спектральної щільності [17]. Це дозволило виконати точну спектральну ідентифікацію віброакустичних процесів, аналіз гармонічних порядків і підготовку науково коректних графічних матеріалів.



Рисунок 2 – Вібраційний акселерометр типу IEPЕ AC150-1A

Вимірювальні точки, напрями контролю та діагностичне призначення кожного сигналу систематизовані в табл. 1.

Таблиця 1 – Вимірювальні точки та діагностичне призначення сигналів

<i>Точка вимірювання</i>	<i>Напрями контролю</i>	<i>Контрольований ефект</i>	<i>Діапазон вимірювань</i>
Вібраційний акселерометр Кришка циліндра	X, Y, Z	ударні події циклу, імпульси упорскування, сили інерції обертових мас	10–500 Гц
Вібраційний акселерометр Фундамент двигуна	вертикальний, поперечний, поздовжній	передавання вібрації у корпус, локальні резонанси	10–1000 Гц
Акустичний сенсор біля ДГ, Кришка циліндра	вертикальний	низькочастотний акустичний відгук, структурний шум	10–200 Гц

Нормативна база та методи вимірювання. Оцінювання вібрацій та шуму виконувалося з урахуванням міжнародної нормативної бази, яка регламентує як вимірювання на судні, так і підходи до зменшення підводного шумового випромінювання. ISO 6954 встановлює підхід до оцінювання вібрації на борту суден з позиції впливу на екіпаж і житлові приміщення. ISO 20283-5 визначає підходи до вимірювання вібрацій обертових механізмів на суднах. ISO 17208-1 використовується у сфері вимірювання підводного шуму суден у глибокій воді, а IMO MEPC.1/Circ.906 формує загальні практичні рекомендації щодо зменшення URN [1, 4–6]. Для загального оцінювання механічної вібрації машин також враховано положення ISO 20816-1 [18]. Важливо зазначити, що ISO 6954 використовується для оцінювання вібрацій з позиції придатності судна до проживання та роботи екіпажу, тоді як ISO 17208-1 застосовується для зовнішніх гідроакустичних вимірювань підводного шуму. У цій роботі ці стандарти використано як методологічну основу для бортової віброакустичної діагностики джерел URN, а не як повну процедуру зовнішнього гідроакустичного випробування. Практична методика вимірювання передбачає контроль вібрацій у декількох напрямках, оскільки вертикальні, поперечні і поздовжні складові можуть мати різні джерела збудження. Для головного двигуна найбільш інформативними є точки на кришках циліндрів, фундаменті, підшипникових опорах та вільному кінці валу. Для акустичного каналу важливо забезпечити стабільне положення датчика, однакову відстань до установки та незмінні умови запису для всіх режимів. Нормативні документи, використані як методологічна основа для оцінювання вібрації, шуму та підводного шумового випромінювання, подано в табл. 2.

Таблиця 2 – Стандарти вимірювання вібрації та шуму

Документ	Об'єкт оцінювання	Ключовий параметр	Застосування у роботі
IMO MEPC.1/Circ.906	підводне шумове випромінювання суден	джерела URN, експлуатаційні та конструктивні заходи	обґрунтування практичного зниження шуму
ISO 6954:2000	вібрація на борту суден	коректована віброшвидкість RMS у діапазоні 2–80 Гц	оцінка впливу вібрацій на екіпаж
ISO 20283-5:2016	обертові механізми на суднах	RMS, FFT, напрямки вимірювання	оцінка СЕУ, дизеля, насосів та валопроводу
ISO 17208-1:2016	підводний шум судна	рівень джерела та умови вимірювання	методологічна база для майбутнього зіставлення з URN
ABS Guidance Notes on Ship Vibration	контроль судових вібрацій	резонанс, конструктивна та механічна вібрація	практична інтерпретація критичних частот
ISO 2923	вимірювання шуму на суднах	Вимірювання інтенсивності акустичного шуму	110 dB(A) max для машинного відділення

Математична модель дослідження. Математична модель роботи побудована так, щоб безпосередньо описувати експериментальні сигнали, отримані з акустичних та вібраційних каналів. Модель не є абстрактною, а застосовується для пояснення конкретних спектральних піків, виявлених у режимах холостого ходу, 18 кВт і 36 кВт. Вона поєднує гармонічний опис сигналу, дискретне перетворення Фур'є, енергетичне RMS-оцінювання, коефіцієнт нерівномірності обертання та когерентність між каналами. Віброакустичний сигнал розглядається як сума гармонічних складових, що формуються внаслідок періодичних процесів у дизелі. Основними фізичними джерелами є обертання валу, імпульси згоряння, робота клапанного механізму, нерівномірність крутного моменту та некомпенсовані сили інерції обертових мас.

$$S(t) = \sum_{n=1}^N A_n \sin(2\pi f_n t + \varphi_n) \quad (1)$$

де $S(t)$ – миттєве значення акустичного або вібраційного сигналу; A_n – амплітуда n -ї гармоніки; f_n – частота гармоніки, Гц; φ_n – фазовий зсув, рад; N – кількість урахованих гармонік. Для нашого експерименту формула (1) означає, що піки біля 12,6; 25,1; 50,2; 100,2; 150,4 та 175,5 Гц можуть бути інтерпретовані як гармонічні або субгармонічні складові, пов'язані з процесами обертання, робочими тактами та структурними резонансами, кожна з яких має власну амплітуду та фізичне джерело. Наприклад, зростання A_n при переході від 18 кВт до 36 кВт інтерпретується як зростання енергії відповідного механічного збудження.

$$X_k = \sum_{n=0}^{N-1} x_n e^{-j\frac{2\pi}{N}kn} \quad (2)$$

де X_k – комплексна спектральна складова; x_n – n -й дискретний відлік сигналу; N – кількість відліків; k – номер спектрального відліку; j – уявна одиниця.

Формула (2) використовується для переходу від часових реалізацій сигналів до частотної області. Саме вона дає змогу визначити спектральні компоненти з частотним розділенням, з точністю, що визначається параметрами дискретизації та довжиною реалізації сигналу, та порівняти режими роботи за однаковою частотною сіткою.

$$f_m = m \cdot f_0 = m \cdot \frac{RPM}{60} \quad (3)$$

де f_m – частота m -го порядку, Гц; m – порядок гармоніки; f_0 – опорна частота обертання, Гц; RPM – частота обертання валу, об/хв.

Формула (3) використовується для ідентифікації гармонічних порядків у спектрах акустичних та вібраційних сигналів. На її основі виконано співставлення експериментально отриманих частотних піків із розрахунковими порядками обертання колінчастого валу. Це дозволило встановити відповідність між домінуючими спектральними складовими 25,1; 50,2; 100,2; 150,4 та 175,5 Гц і характерними процесами роботи суднової енергетичної установки. У роботі опорна частота обертання двигуна (25,1 Гц) для інтерпретації режимів прийнята як основна гармоніка робочого спектра. Тому частоти 25,1; 50,2; 75,3; 100,2 Гц відповідають порядкам 1X, 2X, 3X і 4X, що є зручним для інженерної діагностики. Слід зазначити, що спектральна складова 50,2 Гц має окрему свою природу походження, пов'язану з некомпенсованими силами інерції обертючих мас та роботою циліндрів. Тому в роботі її основний спектральний порядок позначається як 1Y.

$$x_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N} \cdot \sum_{n=1}^N x_n^2} \quad (4)$$

де x_{RMS} – середньоквадратичне значення сигналу; x_n – відлік сигналу після усунення постійної складової; N – кількість відліків. RMS-показник у формулі (4) характеризує енергетичний рівень сигналу. Для вібраційного каналу він пов'язаний з інтенсивністю механічного збудження, а для акустичного каналу – з інтегральним рівнем акустичної активності у вибраному діапазоні частот.

$$\delta = \frac{\omega_{max} - \omega_{min}}{\omega_{avg}} \quad (5)$$

де δ – коефіцієнт нерівномірності обертання; ω_{max} – максимальна миттєва кутова швидкість, рад/с; ω_{min} – мінімальна миттєва кутова швидкість, рад/с; ω_{avg} – середня кутова швидкість за цикл, рад/с. Формула (5) використовується як спрощений варіант оцінки коефіцієнта нерівномірності обертання, у якому аналізується відхилення миттєвої кутової швидкості від середнього значення за цикл. Для нашої дизель-генераторної установки було проведено теоретичний розрахунок δ для вибраних трьох режимів навантаження та розрахунок δ за

даними 20 циклів з використанням датчика обертів КВ (122 імпульси/об) та за даними акустичного сенсора. Для виділення циклу (синхронізації) було використано сигнал з датчика тиску газів у циліндрі. Для розрахунку ω_{max} , ω_{min} та ω_{avg} було застосовано дискретне перетворення Фур'є. Розрахунок δ_{avg} по сигналу з акустичного сенсора був проведений за даними 20 циклів на частотах 25 та 50 Гц. Результати розрахунку представлені у таблиці 3. Зростання δ проявляється у посиленні складових спектру на частотах 25,1, 50,2, 100,2 та 150,4, 175,5 Гц у вібраційному спектрі, а також у розширенні шумового фону, що вказує на підвищену передачу механічних коливань у корпусні конструкції.

Для зіставлення акустичних та вібраційних каналів у частотній області використовується функція когерентності. У межах цієї роботи $x(t)$ прийнято як часовий сигнал вібраційного каналу ІЕРЕ-акселерометра, а $y(t)$ – як часовий сигнал акустичного сенсора.

$$\gamma_{xy}^2(f) = \frac{|G_{xy}(f)|^2}{G_{xx}(f) \cdot G_{yy}(f)} \quad (6)$$

де $\gamma_{xy}^2(f)$ – квадрат когерентності між вібраційним сигналом $x(t)$ та акустичним сигналом $y(t)$; $G_{xy}(f)$ – взаємна спектральна густина; $G_{xx}(f)$ і $G_{yy}(f)$ – автоспектральні густини відповідних каналів; f – частота, Гц. Значення $\gamma_{xy}^2(f)$, близьке до 1, свідчить про спільне джерело частотної складової у двох каналах, а значення, близьке до 0, вказує на слабкий або випадковий зв'язок. Формула (6) застосовується для оцінювання ступеня взаємозв'язку між акустичними та вібраційними процесами. За результатами розрахунків встановлено високі значення квадрата когерентності $\gamma_{xy}^2(f)$ у діапазоні основних гармонік 25,1; 50,2; 100,2 та 150,4 Гц, що підтверджує спільне механічне походження відповідних спектральних складових та структурний характер передачі коливальної енергії від двигуна до акустичного середовища.

Таблиця 3 – Дані розрахунку коефіцієнта нерівномірності обертання колінчастого валу

Режим	Теор. оцінка $\delta(\%)$	Розрах. по обертам КВ $\delta(\%)$	Розрах. по акуст. спектру $\delta_{avg}(\%)$	
			1X(25Гц)	2X, 1Y (50Гц)
Холостий хід	0,33	0,901	5,59	5,30
18 кВт	0,48	1,05	3,11	5,31
36 кВт	0,64	1,41	3,97	0,9
Критична межа з лит. джерел	1,45	Зростає вібрація, ризик структурних резонансів		

Теоретично зі збільшенням навантаження коефіцієнт нерівномірності частоти обертання зростає, оскільки збільшується амплітуда циклових коливань крутного моменту. Однак в експерименті залежність може відрізнятись: на холостому ході нестабільність згоряння та робота регулятора можуть збільшувати коефіцієнт нерівномірності обертання, тоді як на середніх навантаженнях процес згоряння стабілізується. Тому практичний коефіцієнт нерівномірності обертання визначається не лише газовими силами, а й динамікою регулятора, генератора та крутильними коливаннями валопроводу. Нижче на рис. 3, 4 – представлені порівняльні енергетичні PSD-спектри вібрації і акустики для режиму холостого ходу; на рис. 5, 6, 7, 8 – представлені порівняльні енергетичні PSD-спектри вібрації і акустики для режимів активного навантаження 18 кВт і 36 кВт, а на рис. 9, 10, 11, 12 – амплітудні спектри для цих режимів. Амплітудні спектри побудовані в одиницях віброприскорення (g) та в одиницях акустичного тиску (Па), які перераховані згідно з коефіцієнтами тарування датчиків.

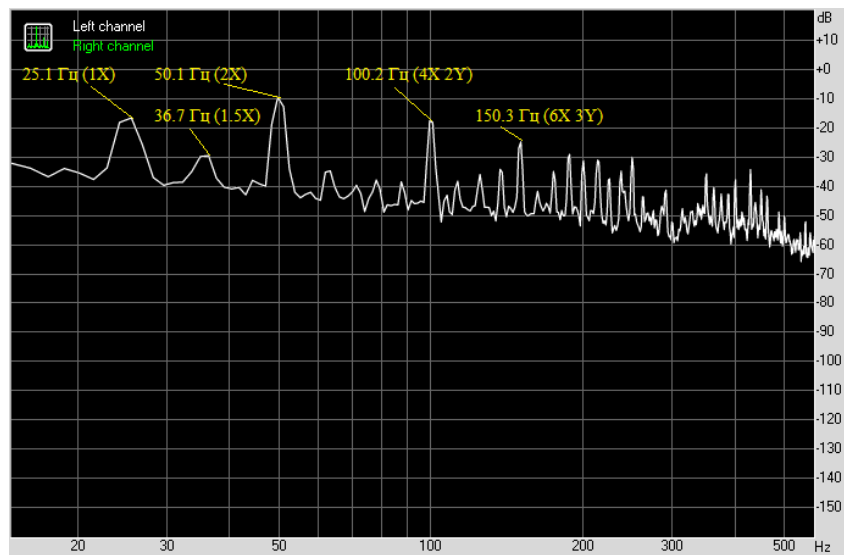


Рисунок 3 – Спектр акустичного сигналу при холостому ході

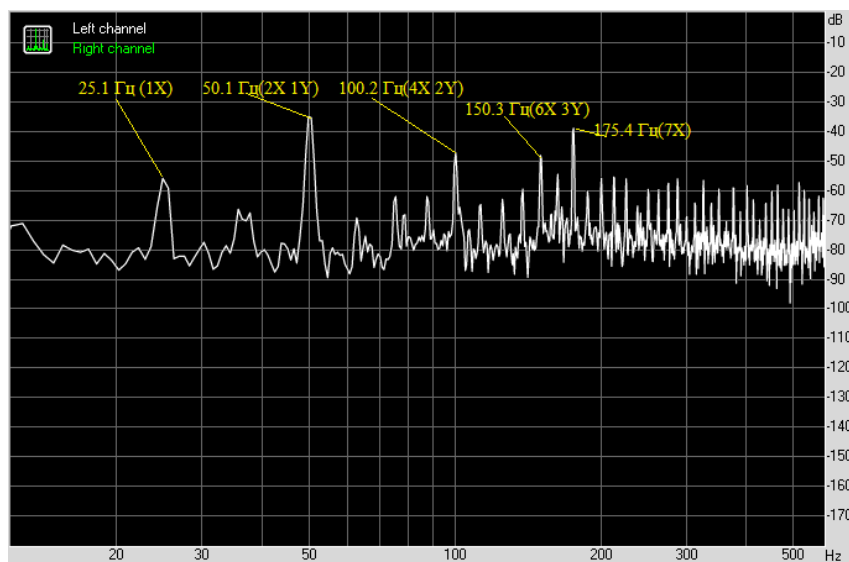


Рисунок 4 – Спектр вібраційного каналу при холостому ході

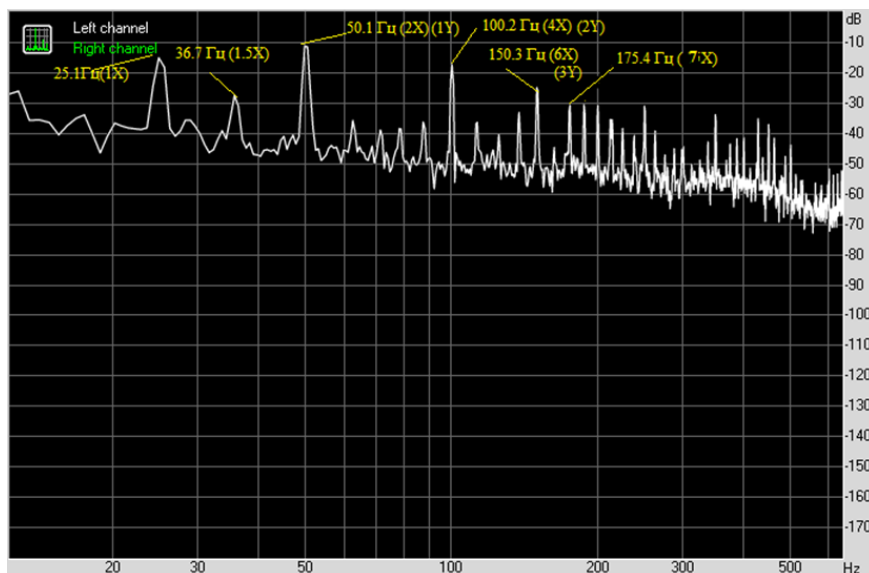


Рисунок 5 – Спектр акустичного сигналу при навантаженні 18 кВт

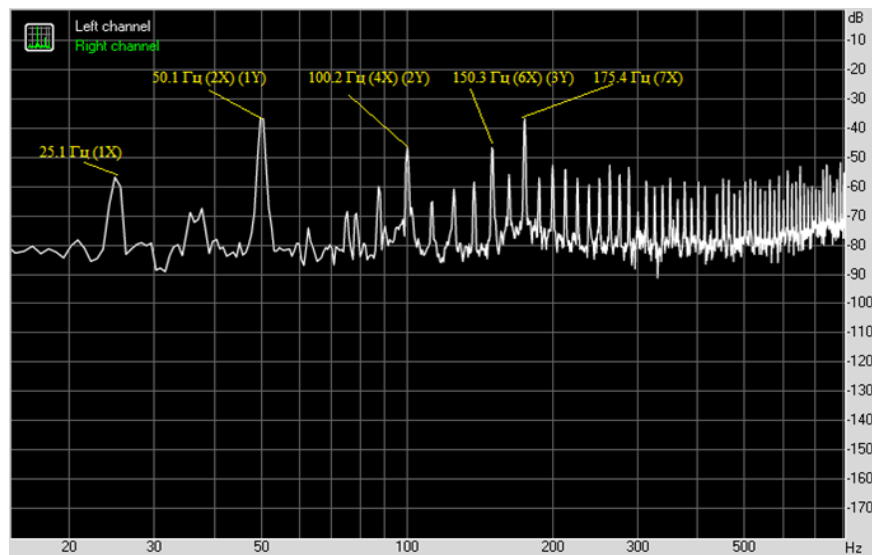


Рисунок 6 – Спектр вібраційного каналу при навантаженні 18 кВт

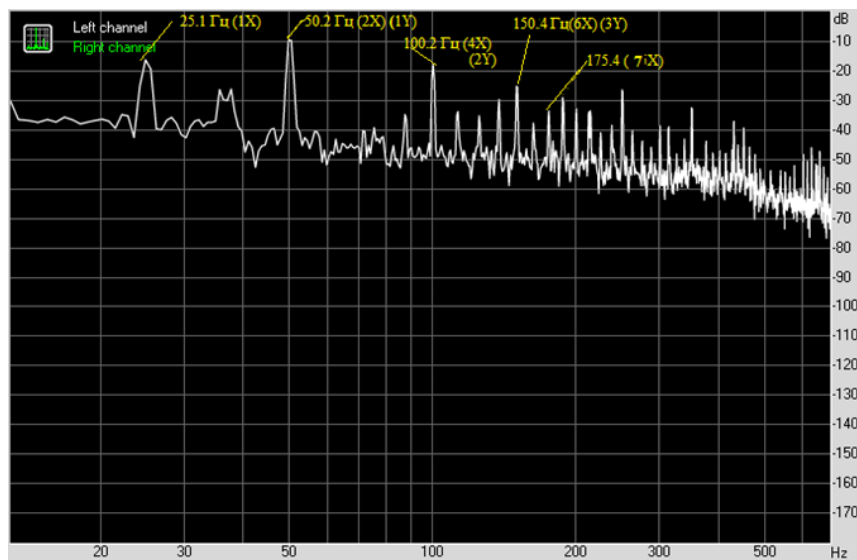


Рисунок 7 – Спектр акустичного сигналу при навантаженні 36 кВт

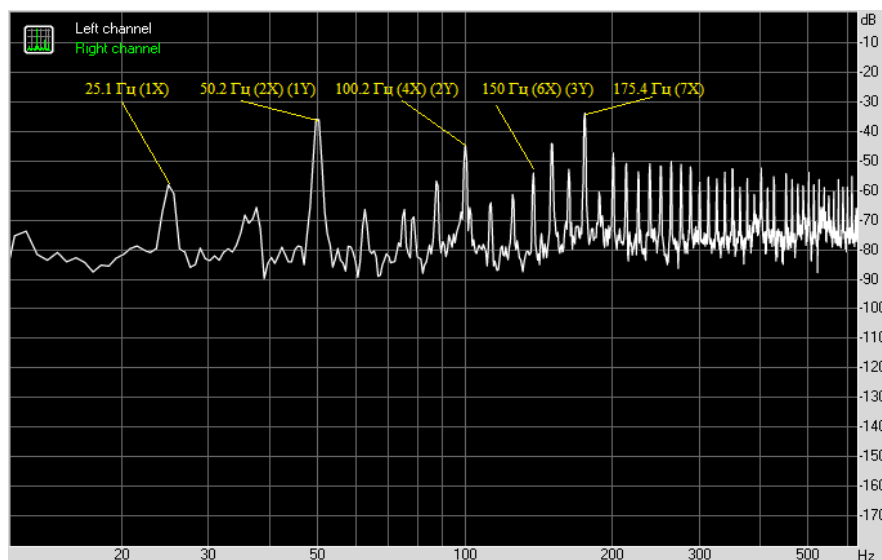


Рисунок 8 – Спектр вібраційного каналу при навантаженні 36 кВт

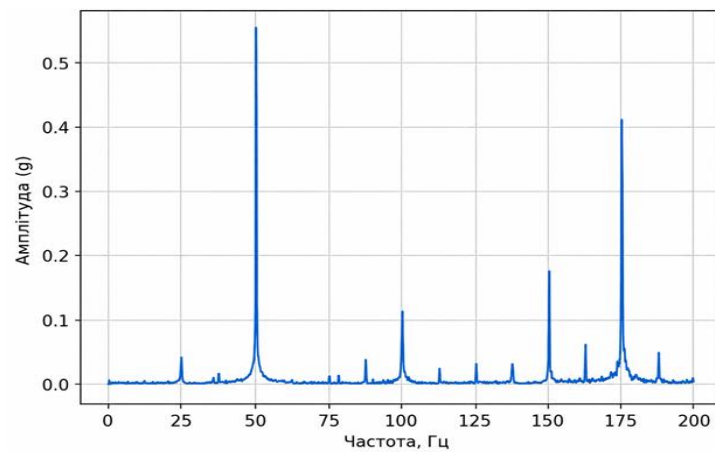


Рисунок 9 – Амплітудний DFT-спектр вібраційного каналу при навантаженні 18 кВт

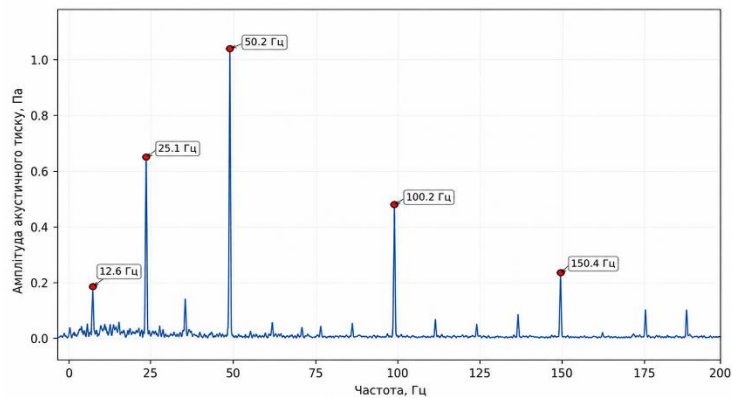


Рисунок 10 – Амплітудний DFT-спектр акустичного каналу при навантаженні 18 кВт

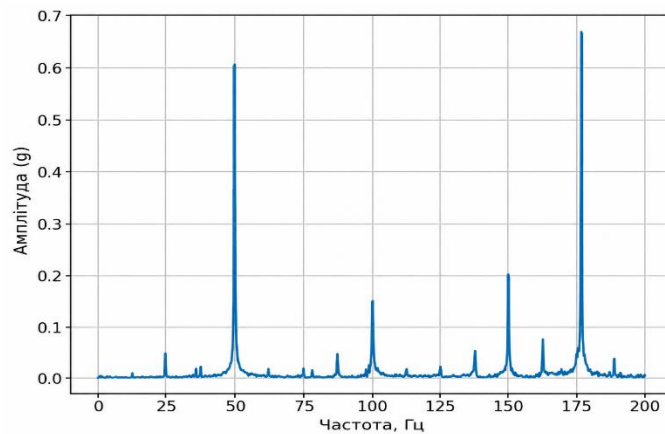


Рисунок 11 – Амплітудний DFT-спектр вібраційного каналу при навантаженні 36 кВт

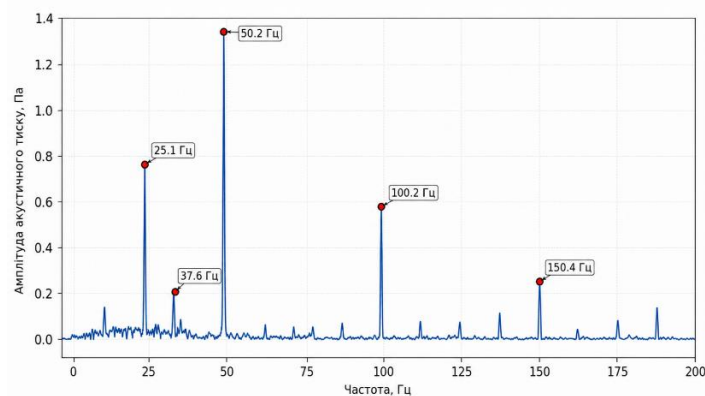


Рисунок 12 – Амплітудний DFT-спектр акустичного каналу при навантаженні 36 кВт

Основні результати та їх обговорення. Одним із основних результатів дослідження є встановлена висока когерентність між спектральними складовими сигналів вібрації і акустики у вимірювальному діапазоні частот від 10 до 200 Гц. Високі значення квадрата когерентності $\gamma^2_{xy}(f)$ на частотах 25, 50, 100 і 150 Гц, від 0,909 до 0,996, свідчать, що акустичні гармоніки не є випадковими шумовими компонентами, а формуються внаслідок структурної вібрації дизель-генераторної установки. Особливо високий зв'язок на 50 Гц підтверджує передачу механічних коливань у акустичне поле.

Теоретичний та експериментальний розрахунок коефіцієнта нерівномірності обертання КВ. Теоретично розрахований коефіцієнт нерівномірності обертання для двигуна Weichai WP4 при прийнятих параметрах моменту інерції знаходиться в межах: $\delta=0.33\text{--}0.64\%$. Що відповідає нормальному режиму роботи та не перевищує умовну критичну межу 1,45%. Однак експериментальні значення, отримані за розрахунком по датчику обертів КВ, а також із акустичного сигналу методом гармонічного аналізу, виявилися помітно вищими. Це свідчить про те, що реальна система «двигун–генератор» має додаткові джерела нерівномірності, які не враховуються спрощеною теоретичною моделлю.

Особливості режиму холостого ходу. Для холостого ходу характерні:

- найбільша акустична неоднорідність циклу;
- високі значення гармонік 25 та 50 Гц;
- підвищені RMS та пікові значення акустичного сигналу.

Це пояснюється низьким середнім ефективним тиском, нестабільністю процесу згоряння, нерівномірністю подачі палива, погіршенням повторюваності робочих циклів. При цьому навіть за відносно невеликого коефіцієнта нерівномірності обертання δ за тахометричним методом спостерігається значна циклічна неоднорідність акустичного сигналу. Можна зробити висновок, що акустичний аналіз виявився значно чутливішим до нестабільності процесу згоряння, ніж класичний аналіз частоти обертів КВ.

Особливості режиму 18 кВт. На навантаженні 18 кВт загальна нерівномірність частоти обертання δ_{avg} зменшується за даними акустичного сенсора відносно режиму холостого ходу, однак гармоніка 50 Гц у спектрі акустики і вібрації залишається максимально вираженою. Це означає, що домінуючим фактором стає нерівномірність окремих робочих тактів циліндрів. Фізично це відповідає більш стабільному обертанню колінчастого валу, але ще недостатньо рівномірній роботі окремих циліндрів.

Особливості режиму 36 кВт. У режимі навантаження 36 кВт відбувається зростання газових сил та тангенціальної сили на кривошипі. Встановлено різке зменшення δ_{avg} при розрахунку за даними складової 50 Гц, що свідчить про вирівнювання роботи циліндрів при збільшенні навантаження. Також можна відзначити збільшення нерівномірності частоти обертів КВ і підвищення δ_{avg} за розрахунками на складовій 25 Гц, що корелює з теоретичним розрахунком та розрахунком за датчиком обертів КВ. Це свідчить про те, що підвищується глобальна модуляція крутного моменту, вплив інерції системи і вплив генератора та електромагнітного моменту. Такий режим є найбільш інформативним для визначення зв'язку між коефіцієнтом нерівномірності обертання δ та акустичним відгуком. Спектральні характеристики демонструють наявність чітко виражених гармонічних складових, пов'язаних із кінематикою обертання валу, роботою поршневої групи та газорозподільного механізму. Найбільш значущими у всіх режимах є частоти 25,1; 50,2; 100,2; 150,4 та 175,5 Гц. Частота 25,1 Гц розглядається як основна гармоніка обертання КВ 1X, 50,2 Гц – як основна робоча гармоніка 1Y та 2X, 100,2 Гц – як друга гармоніка 2Y та 4X, 150,4 Гц – як третя гармоніка 3Y та 6X, а 175,5 Гц – як 7X і її суттєве збільшення у спектрі може бути пов'язана з локальним структурним резонансом або з електромагнітними пульсаціями генератора, складовими мережевої частоти, пульсаціями електромагнітного моменту ротора. Поява позапорядкових компонентів може вказувати на резонансні явища, дефекти кріплень або нерівномірність навантаження валопроводу. Інженерну інтерпретацію основних частотних складових, їх гармонічних порядків, імовірних джерел та діагностичного значення наведено в табл. 4.

Таблиця 4 – Ідентифікація частотних складових СЕУ

Частота, Гц	Порядок	Ймовірне джерело	Діагностичне значення
25,1	1X	циклова нерівномірність, допоміжні механізми, нерівномірність крутного моменту КВ	ознака низькочастотної модуляції та загальної нерівномірності частоти обертання
50,2	2X, 1Y	другий механічний порядок обертання валу, основна гармоніка пов'язана з роботою циліндрів та згорянням, з некомпенсованими силами інерції 2-го порядку	базова діагностична частота, характеризує рівномірність роботи циліндрів
100,2	4X, 2Y	поршнева група, згоряння, інерційні сили	посилення циклової динаміки, ознака росту навантаження та передачі сил у фундамент, показує рівномірність роботи циліндрів
150,4	6X, 3Y	структурні резонанси фундаменту чи опор, гармоніки газових сил	характеризує передачу структурної вібрації та можливе підсилення коливань корпусу
175,5	7X	локальний структурний резонанс або електромагнітні пульсації генератора, пульсації електромагнітного моменту ротора	зона додаткового контролю

Експлуатаційні методи зменшення вібрації та шуму. Результати спектрального аналізу дозволяють не лише фіксувати підвищення рівня шуму, а й визначати причини віброакустичного збудження та відповідні експлуатаційні заходи. Підсилення гармоніки 50,2 Гц свідчить про необхідність контролю обертів, балансування та стабільності паливоподачі. Зростання складових 100,2 та 150,4 Гц може бути пов'язане з посиленням циклової динаміки, станом поршневої групи, клапанного механізму та опор двигуна. Поява позапорядкових компонентів може вказувати на резонансні явища, дефекти кріплень або нерівномірність навантаження валопроводу. З урахуванням результатів попередніх досліджень і рекомендацій ІМО, експлуатаційне зменшення віброакустичного навантаження може також передбачати оптимізацію швидкості, курсу, крену та диференту судна [16]. У межах цієї роботи ці фактори розглядаються як перспективний напрям подальшого зіставлення лабораторних віброакустичних ознак із реальними судовими режимами [1, 16]. Результати дослідження можуть бути основою для розробки методу безконтактного вимірювання частоти обертання КВ двигуна та коефіцієнта нерівномірності обертання δ , визначення частотних смуг з підвищеним рівнем параметрів вібрації. Ці показники можуть доповнити інформативну базу адаптивної системи керування судном. Отримані результати підтверджують ефективність спектрального аналізу для визначення джерел віброакустичного збудження за співвідношенням спектральних складових.

Висновки. У роботі проведений порівняльний спектральний аналіз даних у смузі частот від 10 до 200 Гц, отриманих з датчиків акустики і вібрації при випробуваннях у лабораторних умовах судового дизель-генератора на базі чотиритактного дизельного двигуна Weichai WP4CD66E200 з номінальною потужністю 66 кВт при частоті обертання 1500 об/хв на режимі холостого ходу і режимах активного електричного навантаження 18 кВт та 36 кВт. Результати дослідження свідчать про високу когерентність між спектральними складовими сигналів вібрації і акустики. Це підтверджує, що складові акустичного спектра породжуються структурною вібрацією двигуна. Визначено основні діагностичні складові спектру гармоніки 25,1; 50,2; 100,2; 150,4 та 175,5 Гц, які характеризують процеси обертання валу, циклову нерівномірність роботи дизеля та структурні коливання елементів СЕУ. Порівняння амплітудних спектрів вібрації у смузі частот від 10 до 200 Гц показує підвищення рівня віброприскорення при збільшенні

активного електричного навантаження. Також зі збільшенням активного електричного навантаження відбувається збільшення коефіцієнта нерівномірності обертання δ . Це підтверджено теоретичним розрахунком, розрахунком за даними з датчика обертів КВ, а також розрахунком за даними спектрального аналізу акустичного сигналу робочого циклу на основній частоті обертання 1X (25,1 Гц). Необхідно відзначити, що δ_{avg} , розрахований за акустичним сигналом, виявився більшим у порівнянні з розрахунком за датчиком обертів, що обумовлено спотворенням акустичного сигналу на низьких частотах такими явищами, як інтерференція; також накладаються сигнали від вихлопного колектора і роботи клапанів. Хоча ці сигнали більш високочастотні, вони моделюються основною частотою роботи двигуна. Попри це, у роботі показано, що акустичний сигнал може використовуватись як непрямий індикатор нерівномірності частоти обертання. Гармоніка 25 Гц відповідає глобальній частоті нерівномірності обертання КВ, а розрахунок δ_{avg} на частоті 50 Гц характеризує нерівномірність окремих робочих тактів. Збільшення амплітуди 1Y (50,1 Гц) корелює зі збільшенням рівня віброприскорення у смузі частот від 10 до 200 Гц. Можна зробити висновок, що аналіз сигналу акустичного сенсора у низькочастотній смузі дозволяє оцінювати стан роботи двигуна за вищеперерахованими параметрами безконтактним методом, що є важливим у судових умовах.

Перспективи подальших досліджень. Подальші дослідження доцільно спрямувати на синхронізацію спектрального аналізу з фазою обертання валу, побудову когерентних залежностей між акустичними та вібраційними каналами для різних типів судових двигунів, а також на експериментальну перевірку діагностичних ознак у реальних умовах експлуатації судна з урахуванням швидкості, хвилювання, курсу, крену та диференту.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. International Maritime Organization. Revised Guidelines for the Reduction of Underwater Radiated Noise from Shipping to Address Adverse Impacts on Marine Life : MEPC.1/Circ.906. London : IMO, 2023. URL: <https://glonoise.imo.org/documents/2436>.
2. Wang L. S., Robinson S. P., Theobald P. D., Lepper P. A., Hayman G., Humphrey V. F. Measurement of radiated ship noise. Proceedings of Meetings on Acoustics. 2013. Vol. 17. Article 070091. <https://doi.org/10.1121/1.4792663>.
3. Gloza I. Vibration and radiated noise of a small ship. Hydroacoustics. 2008. Vol. 11. URL: <https://bibliotekanauki.pl/articles/331545>.
4. International Organization for Standardization. ISO 6954:2000. Mechanical vibration – Guidelines for the measurement, reporting and evaluation of vibration with regard to habitability on passenger and merchant ships. Geneva : ISO, 2000. URL: <https://www.iso.org/standard/28883.html>.
5. International Organization for Standardization. ISO 20283-5:2016. Mechanical vibration – Measurement of vibration on ships – Part 5: Guidelines for measurement, evaluation and reporting of vibration with regard to habitability on passenger and merchant ships. Geneva : ISO, 2016. URL: <https://www.iso.org/standard/68125.html>.
6. International Organization for Standardization. ISO 17208-1:2016. Underwater acoustics – Quantities and procedures for description and measurement of underwater sound from ships, Part 1: Requirements for precision measurements in deep water used for comparison purposes. Geneva : ISO, 2016. URL: <https://www.iso.org/standard/62408.html>.
7. American Bureau of Shipping. Guidance Notes on Noise and Vibration Control for Inhabited Spaces. Houston : ABS, 2017. URL: https://ww2.eagle.org/content/dam/eagle/rules-and-guides/current/other/209_noisevibrationcontrolinhabitedspaces/Noise_and_Vibration_GN_e-Sept17.pdf.

8. American Bureau of Shipping. Guidance Notes on Ship Vibration. Houston : ABS, 2006. URL: https://www.vibrationdata.com/tutorials/abs_ship_vibration.pdf.
9. Kluczyk M., Grządziela A. Marine diesel engine common rail injectors monitoring with vibration parameters. *Diagnostyka*. 2019. Vol. 20, No. 3. P. 37–44. <https://doi.org/10.29354/diag/109793>.
10. Varbanets R., Minchev D., Kucherenko Yu., Zalozh V., Kyrylash O., Tarasenko T. Methods of Real-Time Parametric Diagnostics for Marine Diesel Engines. *Polish Maritime Research*. 2024. Vol. 31, No. 3. P. 71–84. <https://doi.org/10.2478/pomr-2024-0037>.
11. Варбанець Р. А., Мінчев Д. С., Кучеренко Ю. М., Залож В. І. Параметрична діагностика суднових дизельних двигунів у режимі реального часу. Двигуни внутрішнього згоряння. 2024. № 1. С. 69–76. <https://doi.org/10.20998/0419-8719.2024.1.09>.
12. Kluczyk M., Grządziela A. Vibration Diagnostics of Marine Diesel Engines Malfunctions Connected with Injection Pumps Supported by Modelling. *Naše More*. 2020. Vol. 67, No. 3. P. 209–216. <https://doi.org/10.17818/NM/2020/3.4>.
13. Drewing S., Witkowski K. Spectral Analysis of Torsional Vibrations Measured by Optical Sensors, as a Method for Diagnosing Injector Nozzle Coking in Marine Diesel Engines. *Sensors*. 2021. Vol. 21, No. 3. Article 775. <https://doi.org/10.3390/s21030775>.
14. Minchev D., Varbanets R., Kucherenko Yu. Vibroacoustic Diagnostic Features of Marine Diesel Engines under Transient Operating Conditions. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2024. Vol. 12, No. 4. Article 652. <https://doi.org/10.3390/jmse12040652>.
15. Кучеренко В. Ю., Булгаков М. П. Сучасні методи та напрямки досліджень щодо зниження рівня гідроакустичних шумів судна. *Розвиток транспорту*. 2025. № 1(24). С. 31–43. <https://doi.org/10.33082/td.2025.1-24.03>.
16. Kucherenko V. The impact of proactive ship handling on reducing the ship's vibration and hydroacoustic noise. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*. 2025. Вип. 51. С. 263–274. <https://doi.org/10.31498/2225-6733.51.2025.344963>.
17. Welch P. The use of fast Fourier transform for the estimation of power spectra: a method based on time averaging over short, modified periodograms. *IEEE Transactions on Audio and Electroacoustics*. 1967. Vol. 15, No. 2. P. 70–73. <https://doi.org/10.1109/TAU.1967.1161901>.
18. International Organization for Standardization. ISO 20816-1:2016. Mechanical vibration – Measurement and evaluation of machine vibration – Part 1: General guidelines. Geneva : ISO, 2016. URL: <https://www.iso.org/standard/63180.html>.

REFERENCES

1. International Maritime Organization (2023). Revised guidelines for the reduction of underwater radiated noise from shipping to address adverse impacts on marine life: MEPC.1/Circ.906. IMO. <https://glonoise.imo.org/documents/2436>.
2. Wang, L. S., Robinson, S. P., Theobald, P. D., Lepper, P. A., Hayman, G., & Humphrey, V. F. (2013). Measurement of radiated ship noise. *Proceedings of Meetings on Acoustics*, 17, 070091. <https://doi.org/10.1121/1.4792663>.
3. Gloza, I. (2008). Vibration and radiated noise of a small ship. *Hydroacoustics*, 11. <https://bibliotekanauki.pl/articles/331545>.
4. International Organization for Standardization (2000). ISO 6954:2000. Mechanical vibration – Guidelines for the measurement, reporting and evaluation of vibration with regard to habitability on passenger and merchant ships. ISO. <https://www.iso.org/standard/28883.html>.
5. International Organization for Standardization (2016). ISO 20283-5:2016. Mechanical vibration – Measurement of vibration on ships – Part 5: Guidelines for measurement, evaluation and reporting of vibration with regard to habitability on passenger and merchant ships. ISO. <https://www.iso.org/standard/68125.html>.

6. International Organization for Standardization (2016). ISO 17208-1:2016. Underwater acoustics – Quantities and procedures for description and measurement of underwater sound from ships – Part 1: Requirements for precision measurements in deep water used for comparison purposes. ISO. <https://www.iso.org/standard/62408.html>.
7. American Bureau of Shipping (2017). *Guidance notes on noise and vibration control for inhabited spaces*. ABS. https://ww2.eagle.org/content/dam/eagle/rules-and-guides/current/other/209_noisevibrationcontrolinhabitedspaces/Noise_and_Vibration_GN_e-Sept17.pdf.
8. American Bureau of Shipping (2006). *Guidance notes on ship vibration*. ABS. https://www.vibrationdata.com/tutorials/abs_ship_vibration.pdf.
9. Kluczyk, M., & Grządziela, A. (2019). Marine diesel engine common rail injectors monitoring with vibration parameters. *Diagnostyka*, 20(3), 37–44. <https://doi.org/10.29354/diag/109793>.
10. Varbanets, R., Minchev, D., Kucherenko, Yu., Zalozh, V., Kyrylash, O., & Tarasenko, T. (2024). Methods of real-time parametric diagnostics for marine diesel engines. *Polish Maritime Research*, 31(3), 71–84. <https://doi.org/10.2478/pomr-2024-0037>.
11. Varbanets, R. A., Minchev, D. S., Kucherenko, Yu. M., & Zalozh, V. I. (2024). Real-time parametric diagnostics of marine diesel engines [Parametrychna diahnostyka sudnovykh dyzelnykh dvyhuniv u rezhymi realnoho chasu]. *Dvyhuny vnutrishnoho zghoriannia*, 1, 69–76. <https://doi.org/10.20998/0419-8719.2024.1.09> [in Ukrainian].
12. Kluczyk, M., & Grządziela, A. (2020). Vibration diagnostics of marine diesel engines malfunctions connected with injection pumps supported by modelling. *Naše More*, 67(3), 209–216. <https://doi.org/10.17818/NM/2020/3.4>.
13. Drewing, S., & Witkowski, K. (2021). Spectral analysis of torsional vibrations measured by optical sensors, as a method for diagnosing injector nozzle coking in marine diesel engines. *Sensors*, 21(3), 775. <https://doi.org/10.3390/s21030775>.
14. Minchev, D., Varbanets, R., & Kucherenko, Yu. (2024). Vibroacoustic diagnostic features of marine diesel engines under transient operating conditions. *Journal of Marine Science and Engineering*, 12(4), 652. <https://doi.org/10.3390/jmse12040652>.
15. Kucherenko, V. Yu., & Bulgakov, M. P. (2025). Modern methods and research directions for reducing ship hydroacoustic noise [Suchasni metody ta napriamky doslidzhen shchodo znyzhennia rivnia hidroakustychnykh shumiv sudna]. *Rozvytok transportu*, 1(24), 31–43. <https://doi.org/10.33082/td.2025.1-24.03> [in Ukrainian].
16. Kucherenko, V. (2025). The impact of proactive ship handling on reducing the ship's vibration and hydroacoustic noise. *Visnyk Pryazovskoho derzhavnoho tekhnichnoho universytetu. Serii: Tekhnichni nauky*, 51, 263–274. <https://doi.org/10.31498/2225-6733.51.2025.344963>.
17. Welch, P. (1967). The use of fast Fourier transform for the estimation of power spectra: A method based on time averaging over short, modified periodograms. *IEEE Transactions on Audio and Electroacoustics*, 15(2), 70–73. <https://doi.org/10.1109/TAU.1967.1161901>.
18. International Organization for Standardization (2016). ISO 20816-1:2016. Mechanical vibration – Measurement and evaluation of machine vibration – Part 1: General guidelines. ISO. <https://www.iso.org/standard/63180.html>.

Kucherenko V. Yu., Melnyk O. M. REDUCING SHIP NOISE POLLUTION THROUGH SPECTRAL IDENTIFICATION OF DIESEL GENERATOR VIBROACOUSTIC PROCESSES

The paper presents the results of an experimental vibroacoustic investigation of a marine diesel generator operating under three characteristic conditions: idle running mode, partial load of 18 kW, and working load of 36 kW. The relevance of the study is associated with current international requirements aimed at reducing underwater radiated noise generated by ships, improving the environmental safety of maritime transport, and enhancing onboard diagnostic methods for marine power plants. Particular attention is devoted to low-frequency spectral components related to shaft rotational dynamics, cyclic irregularity, structural vibration transmission, and tonal acoustic excitation. Experimental measurements included simultaneous acquisition of acoustic and vibration signals obtained from low-frequency acoustic channels and structural vibration sensors

installed on the diesel-generator system. Digital signal processing was performed using the Discrete Fourier Transform and Fast Fourier Transform algorithms with subsequent narrowband spectral analysis in the frequency range of 0-200 Hz. Additional processing included RMS evaluation, harmonic order identification, and comparative analysis of acoustic and vibration spectra. The results demonstrated that the most informative spectral components correspond to frequencies of 25.1, 50.2, 100.2, 150.4, and 175.5 Hz. These frequencies are associated with shaft rotational orders, piston-group inertial forces, cyclic combustion irregularity, torsional oscillations, and structural resonance processes. It was established that the 18 kW operating condition provides the most balanced spectral structure, while the 36 kW mode is characterized by increased harmonic saturation and higher rotational non-uniformity. The proposed integrated vibroacoustic approach can be applied for onboard condition monitoring of marine power plants, early detection of developing mechanical defects, evaluation of structural vibration processes, and operational reduction of ship-generated underwater radiated noise.

Key words: *marine diesel generator; vibroacoustic diagnostics; underwater radiated noise; spectral analysis; vibration; harmonics; rotational irregularity; marine power plant.*

© Кучеренко В. Ю., Мельник О. М.

Статтю прийнято до редакції 14.05.2026

СИСТЕМА МОНІТОРИНГУ ПАРАМЕТРІВ МІКРОКЛІМАТУ ЖИТЛОВИХ ПРИМІЩЕНЬ СУДНА

Нікольський В. В., д.т.н., професор, професор кафедри експлуатації суднових енергетичних установок Херсонської державної морської академії, м. Херсон, Україна, професор кафедри комп'ютерної інженерії Чорноморського національного університету імені Петра Могили, м. Миколаїв, Україна, e-mail: vit_nik@ukr.net, ORCID: 0000-0002-8123-4233;

Малахов О. В., д.фіз.-мат.н., професор, професор кафедри суднових допоміжних установок та холодильної техніки Національного університету «Одеська морська академія», м. Одеса, Україна, e-mail: a_malahov@yahoo.com, ORCID: 0000-0002-5003-8715;

Нікольський М. В., к.т.н., старший механік, LSCgroup, м. Рига, Латвія, e-mail: markdezert@ukr.net, ORCID: 0000-0002-3387-7402;

Палагін О. М., к.т.н., доцент, доцент кафедри суднових енергетичних установок і систем Дунайського інституту національного університету «Одеська морська академія», м. Ізмаїл, Україна, e-mail: apalagin113@gmail.com, ORCID: 0000-0002-6533-5894;

Найдюнов А. І., к.т.н., доцент, доцент кафедри суднових енергетичних установок і систем Дунайського інституту національного університету «Одеська морська академія», м. Ізмаїл, Україна, e-mail: NaydyonovAndrii@gmail.com, ORCID: 0000-0002-3979-4923.

В існуючих сучасних суднових системах моніторингу навколишнього середовища традиційні бездротові протоколи такі як Wi-Fi, Bluetooth та стільникові мережі, не відповідають вимогам щодо забезпечення необхідного балансу в ланцюзі енергоспоживання – радіус покриття – вартість розгортання мережі. В якості альтернативного рішення, яке описано в статті, необхідно використовувати такі новітні наукові технології, як модуляція великого радіуса дії та її локального мережевого рівня. Вони можуть розглядатися як ключові рішення, що дозволяють розгорнути на судні мережі з автономною роботою кінцевих пристроїв терміном до кількох років. Для процесу передачі даних у розподілених системах моніторингу параметрів навколишнього середовища в машинному відділенні судна було виконано моделювання пропускну здатності і проведена оцінка частоти роботи системи. Для активації всіх пристроїв суднової мережі запропоновано використання методу персоналізації. Експериментальним шляхом отримана оцінка параметрів, що описують якість старту мікроконтролера під час контрольних запусків, стабільність роботи АЦП, показників сенсорів температури, вологості і освітлення.

Ключові слова: суднова локальна мережа; моніторинг параметрів мікроклімату; архітектура системи; метод персоналізації.

DOI: 10.33815/2313-4763.2026.1.32.087-099

Вступ. Велика кількість промислових технологій напряму залежить від глобальних кліматичних змін. До таких технологій належать суднові системи забору повітря, яке йде на згоряння палива, на вентиляцію приміщень, на довільні суднові технологічні процеси і т. ін. [1]. Необхідність раціонального використання повітряних ресурсів потребують впровадження енергоефективних систем моніторингу параметрів навколишнього середовища, здатних працювати автономним чином протягом тривалого часу з урахуванням змін освітлення, температури, тиску або вологості. На теперішній час в існуючих суднових системах моніторингу традиційні бездротові протоколи такі як Wi-Fi, Bluetooth та стільникові мережі, не відповідають вимогам щодо забезпечення необхідного балансу в такому ланцюзі енергоспоживання, як: радіус покриття – вартість розгортання мережі [2].

В якості альтернативного рішення необхідно використовувати новітні наукові рішення, що базуються на технології фізичного рівня LoRa (Long Range – технологія модуляції великого радіуса дії) та її мережевого рівня LoRaWAN (Long Range Wide Area

Network – мережевий протокол для LoRa) [3]. Саме вони можуть розглядатися як ключові рішення, які дозволяють розгортати суднові мережі з автономною роботою кінцевих пристроїв терміном до кількох років. Така автономність є критичним фактором для зниження експлуатаційних витрат та забезпечення безперервності моніторингу під час роботи судна [4].

У випадку, що розглядається, найбільш суттєва проблема полягає у низькій швидкості передачі даних з фізичного рівня архітектури стеку задіяних протоколів. Втрата пакетів даних через інтерференцію, колізії або затінення сигналу можуть порушувати цілісність часових рядків даних у таких сховищах даних як PostgreSQL або MS Excel. Низька швидкість також створює критичну проблему перевищення очікування на повідомлення таймером. В архітектурі LoRaWAN відсутні вбудовані механізми автоматичної компенсації таких втрат на рівні сервера [4].

На підставі вищезначеного, для дослідження, що описано в статті, було обрано процес передачі даних у розподілених судових системах моніторингу параметрів навколишнього середовища. Головна мета виконаних досліджень була призначена дослідженню методів та засобів забезпечення цілісності даних у мережах LoRaWAN.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Концепція «Інтернету речей» визначається як глобальна мережа фізичних об'єктів, оснащених сенсорами та комунікаціями, для їхньої взаємодії та обміну даними без безпосередньої участі людини. За оцінками аналітичних агенцій, до початку 2020 року глобально кількість підключених пристроїв вже перевищила кількість у 25 мільярдів одиниць [5, 6].

Базова технологія бездротової модуляції LoRa була розроблена французьким стартапом «Cycleo», а у 2012 році корпорація Semtech придбала його та запатентувала цю технологію, що обумовлює закритий технологічний стек рівня фізичного каналу.

Протокол LoRaWAN визначений та активно просувається неприбутковою організацією «LoRa Alliance», до складу якої входять понад 500 компаній-учасників, які мають безпосередній вплив на стандартизацію та масове розгортання LPWAN-технологій у світі [7, 8, 9].

Якщо брати масштабні IoT-системи, то класична клієнт-серверна модель (коли кожен клієнт напряму звертається на сервер) має помітні обмеження. Вона працює, але не завжди зручно і не завжди ефективно, особливо коли компонентів багато. У роботах [10, 11] показано, що логічніше дивитися в бік патерну «видавець-підписник» (Publish-Subscribe, або Pub/Sub). Це більш гнучкий підхід для асинхронної комунікації між великою кількістю розподілених елементів [12, 13, 14].

Під час розробки енергоефективної судової системи моніторингу параметрів навколишнього середовища на підставі технології фізичного рівня LoRa та її мережевого рівня LoRaWAN був обраний напрямок, важливість якого, детально розглянуто в роботах [3, 9, 15, 16]. Він пов'язаний з розробкою механізму компенсації втрат пакетів даних. Цей напрямок забезпечує цілісність часових рядів даних при постійному занесенні їх у сховище даних.

Мета та задачі дослідження. Метою роботи є розробка розподіленої системи моніторингу на базі технології LoRaWAN з реалізацією механізму компенсації втрат повідомлень та валідації даних для забезпечення записуваних до таблиці MS Excel часових рядів даних.

Для його подальшої практичної реалізації були сформульовані дослідницькі задачі щодо: обґрунтування вибору стеку LoRaWAN для побудови системи моніторингу та дослідження процесу поширення радіосигналу в діапазоні 868 МГц.

До головних задач досліджень відносяться:

- розробка математичної моделі бюджету лінії зв'язку (Link Budget);
- розрахунки таких характеристик радіоканалу як: чутливість приймача, SNR (Signal-to-Noise Ratio – співвідношення сигналу до наявного шуму) та ToA (Time on Air – час передачі сигналу в ефірі) для забезпечення відповідності регуляторним нормам;

– розробка архітектури розподіленої системи на базі мікро сервісів у Docker (платформа контейнеризації програмного забезпечення), яка включає шлюз, мережевий сервер ChirpStack (програмний комплекс із відкритим вихідним кодом, який використовується для розгортання приватних мереж LoRaWAN) та сервер додатків.

Результати та методи дослідження. Для вирішення сформульованих наукових задач були використані наступні методи дослідження:

- аналітичний метод персоналізації та аналіз нормативної бази протоколів;
- математичне моделювання радіоканалу та розрахунок бюджету ліній зв'язку;
- метод алгоритмічної обробки даних засобами візуального програмування з використанням скриптів;
- експериментальний метод налаштування обладнання з розгортанням серверного програмного забезпечення;
- аналітичний метод оцінювання отриманих даних через статистичне формування висновків та оцінку перспектив системи.

Сутність структури мережі LoRaWAN. Під час розробки мережу LoRaWAN необхідно розглядати як складну систему. Вона є сукупністю набору об'єктів (кінцеві пристрої, шлюзи, рівні серверів), які мають визначені властивості та фіксовані протоколи взаємодії. Центральною задачею під час розробки є визначення умов розповсюдження радіосигналу в складних умовах експлуатації судна та розробка механізмів компенсації втрат корисного навантаження повідомлень на рівні програмного стеку. Доцільність використання мережі LoRaWAN у порівнянні з іншими мережами дуже наочно демонструється порівняльним аналізом бездротових протоколів комунікації, що показаний у таблиці 1.

Таблиця 1 – Порівняльний аналіз бездротових протоколів комунікації

<i>Технологія</i>	<i>Спосіб комунікації</i>	<i>Дальність (м)</i>	<i>Потужність передачі (мВт)</i>
Bluetooth	Мала дальність	приблизно 10	приблизно 2,5
WiFi	Мала дальність	приблизно 50	приблизно 80
4G / 5G	Стільниковий зв'язок	приблизно 5 тисяч	приблизно 500
LoRa	LPWAN	2–5 тисяч (місто), 5–15 тисяч (сільська місцевість), більше 15 тисяч (пряма лінія видимості)	приблизно 20

Базова технологія бездротової модуляції LoRa обумовлює закритий технологічний стек рівня фізичного каналу в якому дальність зв'язку між передавачем та приймачем є величиною, що змінюється. Вона залежить від фактора розширення спектра (Spreading Factor) та характеристик середовища поширення сигналу – від 0,3 кбіт/с до 5,5 кбіт/с відповідно.

Архітектура суднової мережі LoRaWAN базується на зірковій топології в якій кінцевий пристрій є автономним модулем. Він складається з радіочастотного приймача-передавача з антеною та мікроконтролера, що відповідає за обробку даних з сенсорів. При інтеграції додаткових сенсорних елементів кінцевий пристрій набуває функціональності віддаленого датчика.

Шлюз є концентратором і виконує роль моста, який складається з радіо модуля та мікропроцесора для обробки пакетів даних IP. Він здатний одночасно прослуховувати кілька

частотних каналів та всі коефіцієнти розширення спектра на кожній частоті. У цьому випадку значно підвищується ймовірність прийому сигналів.

Мережевий судновий сервер приймає пакети даних від усіх шлюзів та виконує їх дедуплікацію/фільтрацію. Після обробки та дешифрування пакетів він маршрутизує їх індивідуально на коректний сервер додатків. На сервері відбувається кінцева обробка даних для користувача. При необхідності надсилання відповіді або команди на пристрій, судновий сервер додатків надсилає запит по низхідному з'єднанню. Мережевий судновий сервер визначає оптимальний шлюз для трансляції цього низхідного з'єднання.

Завдяки всім своїм властивостям базова технологія бездротової модуляції LoRa набуває широкого застосування на судах водного транспорту. Наявним прикладом є дистанційний моніторинг довільних параметрів навколишнього середовища: контроль рівня рідини у резервуарах та судових танках; моніторинг показників/стану засобів вимірювання; моніторинг параметрів тиску, вологості та температури у машинному відділенні судна та критичних середовищах всередині вантажних танків; запобігання процесам зневоднювання або висихання вантажу в трюмах; контроль умов транспортування на судах водного транспорту біологічно активних вантажів.

Моделювання пропускної здатності і частоти роботи системи. Моделювання пропускної здатності можливо виконувати за допомогою набору параметрів. Головним з них є FSL (Free Space Path Loss – втрати сигналу у вільному просторі) – зменшення інтенсивності сигналу внаслідок розширення фронту хвилі по мірі віддалення від джерела [7]. У просторі з лінією прямої видимості сила сигналу обернено пропорційна квадрату відстані. Кількісне значення втрат у вільному просторі є базовою складовою бюджету лінії і обчислюється за формулою Фрііса, модифікованою для зручності розрахунків у LoRaWAN-мережі:

$$L_{fs} = 20 \log_{10} \frac{4\pi df}{c}, \quad (1)$$

де L_{fs} – втрати у вільному просторі, Дб; d – дистанція між кінцевим пристроєм та шлюзом, км; f – робоча частота, МГц; c – швидкість розповсюдження електромагнітних хвиль, м/с.

Наступним параметром є Зона Френеля. Вона визначає якість та інтенсивність радіосигналу в умовах прямої видимості. Ця зона є еліпсоїдом, в об'ємі якого існує пряма лінія поширення сигналу між кінцевим пристроєм та шлюзом [8]. Не залежно від наявності прямої видимості, будь-яка перешкода, що потрапляє в зону Френеля (наприклад, рельєфні судові вантажні елементи, надстройка судна тощо), може спричинити ослаблення сигналу через інтерференцію прямого та відбитого сигналів. У цьому випадку максимальний радіус першої зони Френеля (r_{max}), що знаходиться посередині дистанції, розраховується за формулою [8]:

$$r = 8,657 \sqrt{\frac{D}{f}}, \quad (2)$$

де r – радіус зони, м; D – дистанція між передавачем та приймачем, км; f – робоча частота, ГГц.

У Європі, включаючи Україну, використовується частотний план EU863-870 МГц. Дотримання встановлених ETSI регуляторних норм є обов'язковим [1]. ETSI розподіляє смугу 863 МГц – 870 МГц на п'ять субліцензованих піддіапазонів, як зазначено в таблиці 2 [4]. Кожен піддіапазон має конкретні обмеження, яких кінцеві пристрої повинні дотримуватися.

Таблиця 2 – Піддіапазони ETSI [4]

Найменування	Діапазон, МГц	Обмеження
G	863–870	EIRP менше 25 мВт – робочий цикл менше 0,1 відсотка
G1	868–868,6	EIRP менше 25 мВт – робочий цикл менше 1 відсотка
G2	868,7–869,2	EIRP менше 25 мВт – робочий цикл менше 0,1 відсоток
G3	869,4–869,65	EIRP менше 500 мВт – робочий цикл менше 10 відсотків
G4	869,7–870	EIRP менше 25 мВт – робочий цикл менше 1 відсотка

Специфікація LoRaWAN використовує лише три діапазони смуг пропускання: 125 КГц, 250 КГц та 500 КГц. У європейському регіоні використовуються смуги пропускання 125 та 250 КГц відповідно.

Канал зв'язку визначається як узгоджений набір конкретних параметрів: несучої частоти CF (Carrier Frequency – несуча частота), смуги пропускання (BW) та фактору розширення спектра.

Зв'язок між несучою частотою та діапазоном каналу (нижча $f_{\text{ниж}}$ та вища $f_{\text{вищ}}$ частоти) визначається наступними формулами [9]:

$$f_{\text{ниж}} = f_{\text{несуча}} - \frac{BW}{2}, \quad (3)$$

$$f_{\text{вищ}} = f_{\text{несуча}} + \frac{BW}{2}. \quad (4)$$

При обробці низхідного зв'язку, для слотів очікування діють наступні правила:

- для RX1 (перше вікно прийому сигналу) використовуються ті ж частоти висхідного каналу, що й для передачі;
- для RX2 (друге вікно прийому сигналу) використовується фіксована додаткова частота.

Кінцевий пристрій змінює канал псевдовипадковим чином для кожної передачі, що значно підвищує стійкість системи до локальних інтерференцій.

Технологія LoRa ґрунтується на схемі модуляції з розширеним спектром, відомій як CSS (Chirp Spread Spectrum). Цей метод спектрального розширення використовує широкосмугові, лінійно-частотно-модульовані імпульси для кодування даних [3, 9]. CSS кодує інформацію за допомогою циклічного зсуву частоти несучої хвилі. CSS є сигналом, частота якого лінійно зростає або спадає. На рисунку 1 можна побачити, що у LoRa повідомлення кодується не зміною частоти, а зміною початкової фази (або точки початку) циклічно повторюваного CSS, що також називають LoRa-модуляцією.

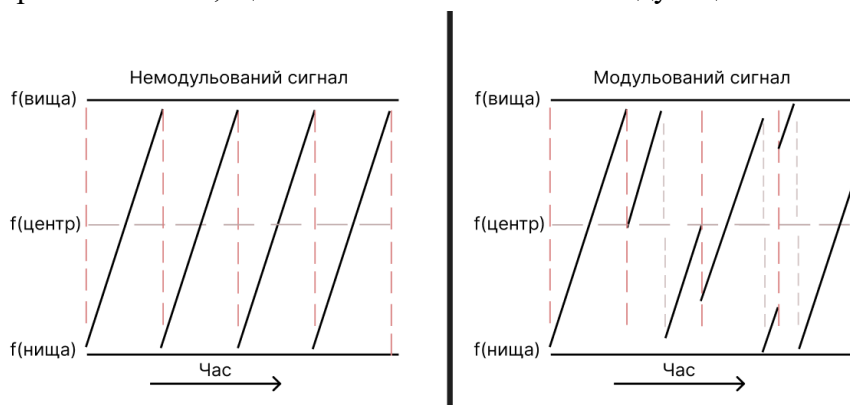


Рисунок 1 – Робота LoRa-модуляції

Метод активації пристроїв мережі. Для активації на судні всіх пристроїв мережі найбільш адекватним є використання методу персоналізації. Він передбачає попереднє конфігурування кінцевого пристрою та суднових серверів усіма необхідними сесійними ключами та адресами. У цьому механізмі відсутній обмін повідомленнями запиту на приєднання, а також відповіді на цей запит. Кінцевий пристрій та судновий мережевий сервер не зберігають DevEUI (унікальний ідентифікатор пристрою), AppEUI (унікальний ідентифікатор додатка) та AppKey. Замість них пристрою попередньо присвоюються DevAddr, NwkSKey та AppSKey (ключ шифрування додатка). Пристрій ініціює обмін даними одразу, надсилаючи зашифровані та підписані пакети. Але цей метод вважається менш безпечним порівняно з OTAA (Over-The-Air Activation – відкрита бездротова активація), оскільки ключі NwkSKey (мережевий сесійний ключ) та AppSKey (сесійний ключ додатка) є статичними і не оновлюються. Діаграма цього процесу представлена на рисунку 2.

Ключ NwkSKey використовується кінцевим пристроєм та судновим мережевим сервером для розрахунку та верифікації коду цілісності усіх пакетів даних. При цьому корисне навантаження шифрується від кінцевого пристрою до суднового мережевого сервера.

Ключ AppSKey використовується кінцевим пристроєм та судновим сервером додатків для наскрізного шифрування та дешифрування корисного навантаження. Попри це, цілісність на рівні додатків не гарантується, бо мережа може змінювати вміст повідомлення, але всі суднові мережеві сервери вважаються умовно довіреними вузлами.

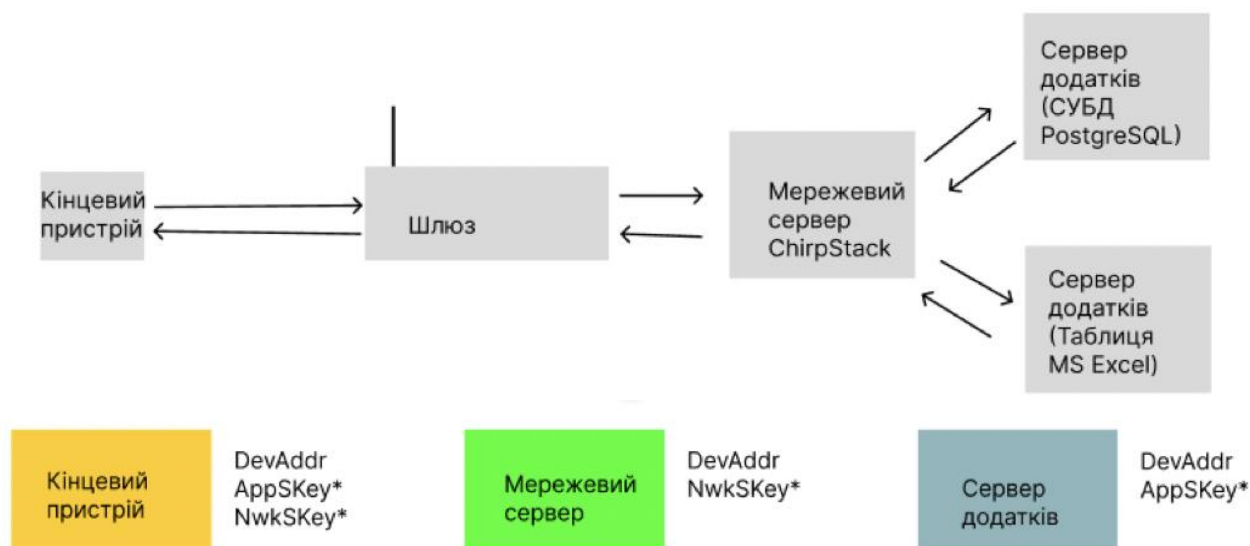


Рисунок 2 – Активація шляхом персоналізації

Візуалізація даних. Під час досліджень для виведення головних показників вимірювання показників мікроклімату в машинному відділенні судна був розроблений інтерфейс. Його ключовою частиною є графіки, які реалізовані через Chart.js. Бібліотека працює на HTML5 Canvas. Під час роботи рендеринг є високошвидкісним навіть у випадку, коли точок даних стає багато.

Оновлення даних зроблено без перезавантаження сторінки, тобто через AJAX. JavaScript на клієнті кожні кілька секунд відправляє асинхронні запити fetch() до REST API сервера (/api/data, /api/stats і подібні). Далі приходить JSON, і цей JSON використовується для оновлення значень у DOM та для перемальовування графіків.

Стилізація інтерфейсу була виконана на базі Bootstrap 5. Завдяки цьому був отриманий сучасний вигляд і нормальна адаптивність під різні екрани без зайвого ручного CSS. Для візуальної деталізованої підтримки та переходу від табличного інтерфейсу були додані іконки Lucide. Приклад інтерфейсу для вимірювання головних параметрів мікроклімату у навіколишньому середовищі показаний на рисунку 3.

Для відображення частотного розподілу значень було використано гістограми, що допомагають оцінювати стабільність параметрів. Приклад такої візуалізації потокових даних всередині машинного відділення судна показаний на рисунку 4.

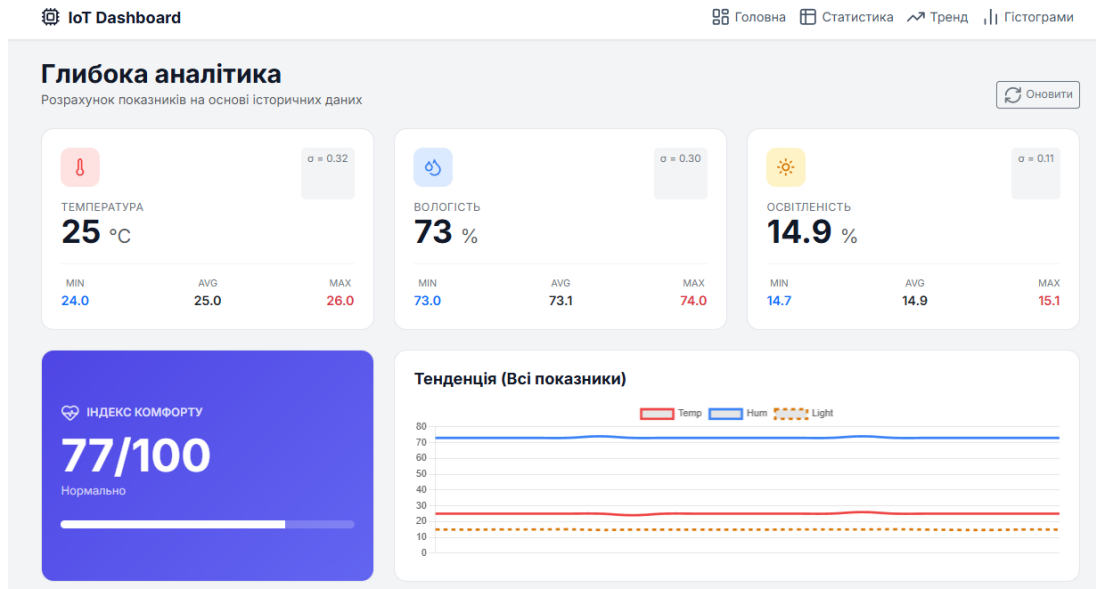


Рисунок 3 – Інтерфейс сторінки розширеної статистики

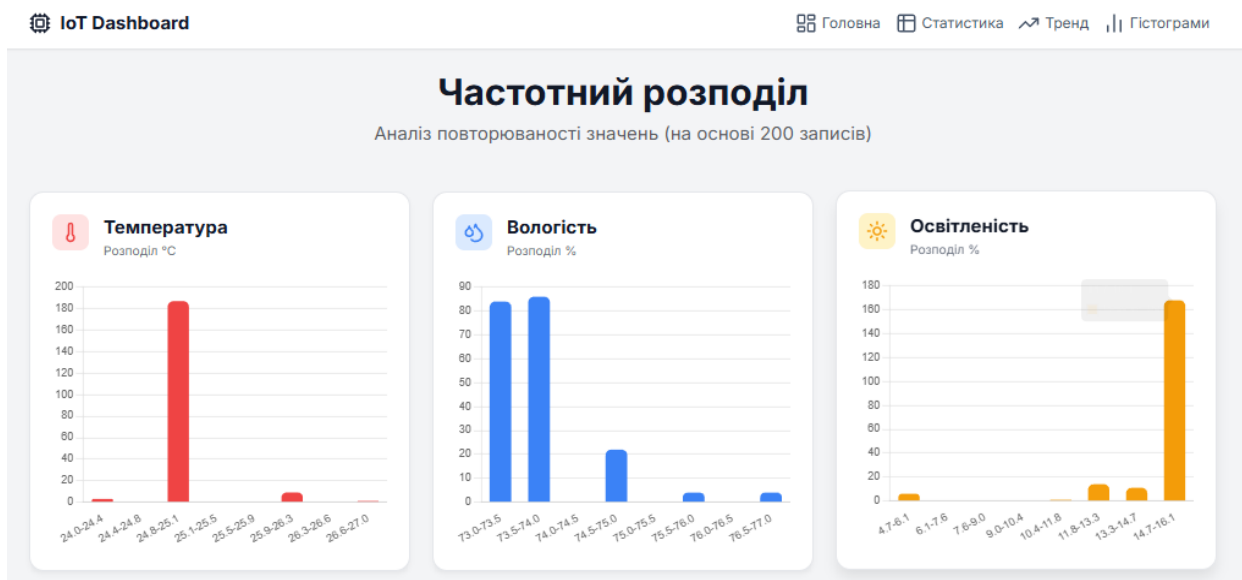


Рисунок 4 – Сторінка з гістограмами

Моніторинг змін мікроклімату. В якості наявного прикладу моніторингу змін мікроклімату всередині машинного відділення судна була проведена серія експериментів щодо вимірювання поточних значень температури і вологості повітря у навколишньому середовищі та рівня освітлення приміщення. У цих експериментах був задіяний серверний застосунок, логіка якого базувалася на асинхронній моделі бібліотеки `Raho-MQTT`.

Алгоритм обробки даних серверним застосунком показаний на рисунку 5. Під час його використання основний потік виглядав наступним чином: виконувалася ініціалізація клієнтів (для MQTT та SQLite), встановлювалось підключення до брокера, реалізовувалася підписка на агреговану тему `iot/devices/+/data`. Головна перевага алгоритму полягає в однорівневому wildcard-символі MQTT, який дозволяв приймати дані від усіх пристроїв.



Рисунок 5 – Алгоритм обробки даних судновим серверним застосунком

Судновий серверний застосунок, після прийому даних, заходив у нескінченний цикл очікування (`loop_forever()`), а саме: під час входу повідомлення, воно формувалося як байтовий масив (`msg.payload`), а потім реалізовувались наступні кроки: байти декодувалися в рядок (UTF-8) і парсинг цього рядка як JSON-об'єкта; паралельно аналізувалася тема повідомлення (`msg.topic`) і з неї витягувався ідентифікатор пристрою (`device_id`); формувався об'єкт Point (точка даних) на основі даних з JSON (поля) та теми (теги); сформована точка даних записувалась у базу SQLite.

Такий алгоритм обробки даних у вигляді callback спрацьовував кожного разу, коли доставлялися нові повідомлення.

Для роботи суднової системи моніторингу змін мікроклімату всередині машинного

відділення судна були підібрані цифрові і аналогові сенсори. Вибір робився з огляду на доступність, простоту підключення і адекватну вірогідність для побутових задач.

Температура і відносна вологість вимірювалися за допомогою датчика DHT11, що містить резистивний елемент для вологості та NTC-термістор для температури. Його підключення до мікроконтролера відбувалося через власний однопровідний протокол Single Wire з використання лише одного цифрового піну. Діапазон обмежень DHT11 складає: вологість 20–90 %, температура 0–50°C. Сенсор DHT11 є стабільним і має заводське калібрування.

Контроль освітленості був реалізований з використанням модуля на базі фоторезистора (LDR) у якого принцип роботи базувався на зменшенні опору із зростанням світлового потоку. Був використаний модуль з вхідним діапазоном АЦП, що дорівнює 0–1,0 В і він мав дільник напруги, щоб сигнал був у допустимих межах.

Під час моніторингу даних використовувались статистична обробка та аналіз трендів.

Приклад статистичної обробки показаний на рисунках 3–4 де відображені більш розширені метрики для кожного параметру навколишнього середовища: мінімальні, максимальні, середні значення і стандартне відхилення.

Аналіз трендів, що показаний на рисунку 6, візуально відображав лінійну регресію та згладжені графіки ковзного середнього. Саме на підставі таких результатів можливо приблизно оцінювати і прогнозувати зміни мікроклімату всередині машинного відділення судна.

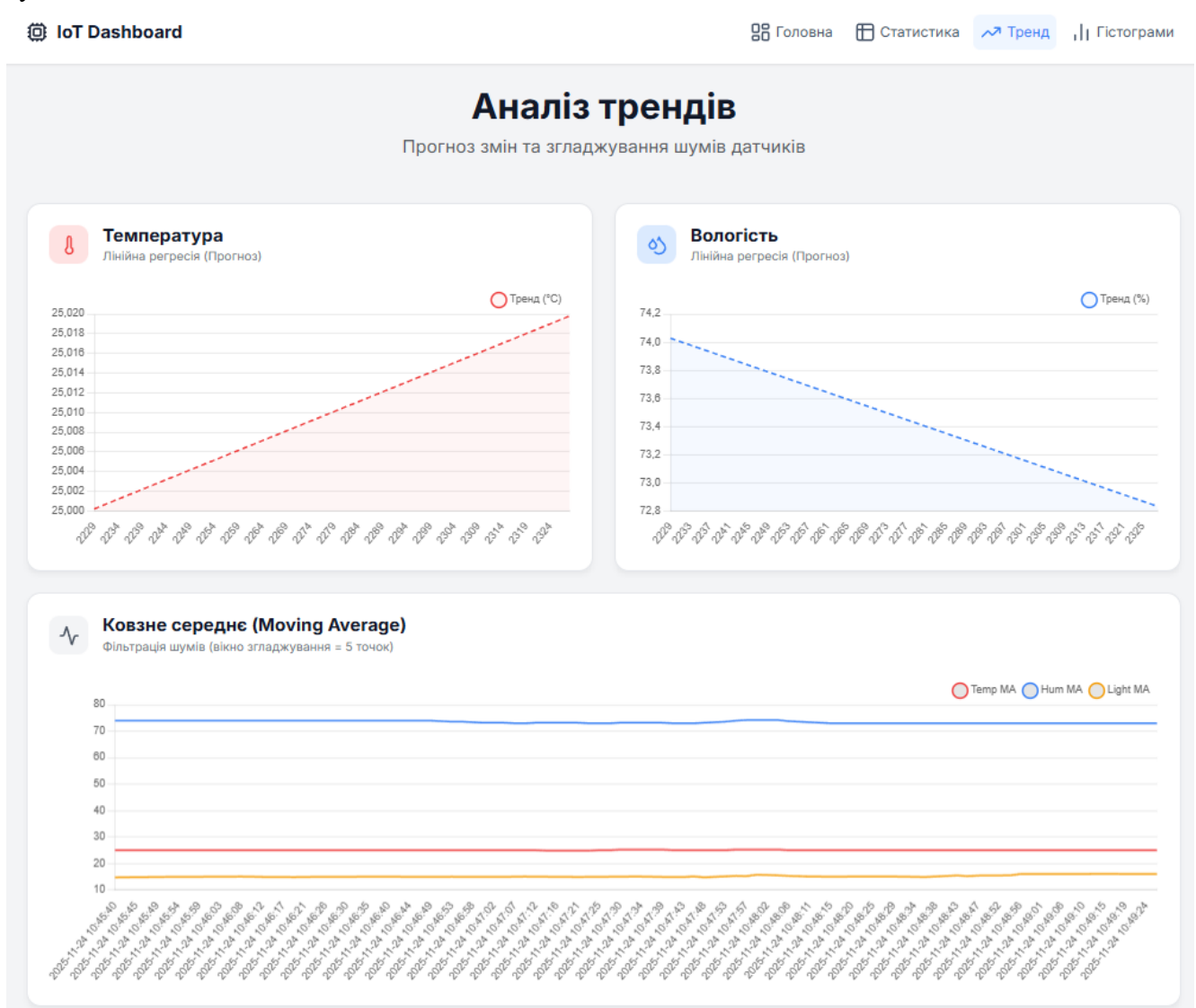


Рисунок 6 – Відображення трендів зміни мікроклімату в машинному відділенні судна

Для збереження історії вимірювань використовувалася реляційна система керування базами даних SQLite. Вона не вимагає встановлення окремого серверного ПЗ оскільки є одним файлом `iot_data.db`. Спроектowana схема бази даних складалася з таблиці з полями: `id`: унікальний ідентифікатор запису (первинний ключ); `timestamp`: мітка часу (проставляється автоматично сервером у момент отримання даних); `temperature`: значення температури (дійсне число); `humidity`: значення вологості (дійсне число); `light_level`: рівень освітленості (дійсне число).

Важливим питанням у розробленій системі моніторингу параметрів змін мікроклімату є перевірка старту мікроконтролера після подачі живлення. Коли живлення підключене, ESP8266 завантажує прошивку MicroPython і запускає файл `boot.py`. Під час тестування в умовах роботи судна, результати якого показані на рисунку 7, було виконано десять контрольних запусків пристрою. Середній час від моменту подачі напруги до повідомлення про готовність у консолі складав 1.5 секунди. У цей часовий проміжок входить і ініціалізація внутрішньої периферії, і налаштування портів вводу-виводу.

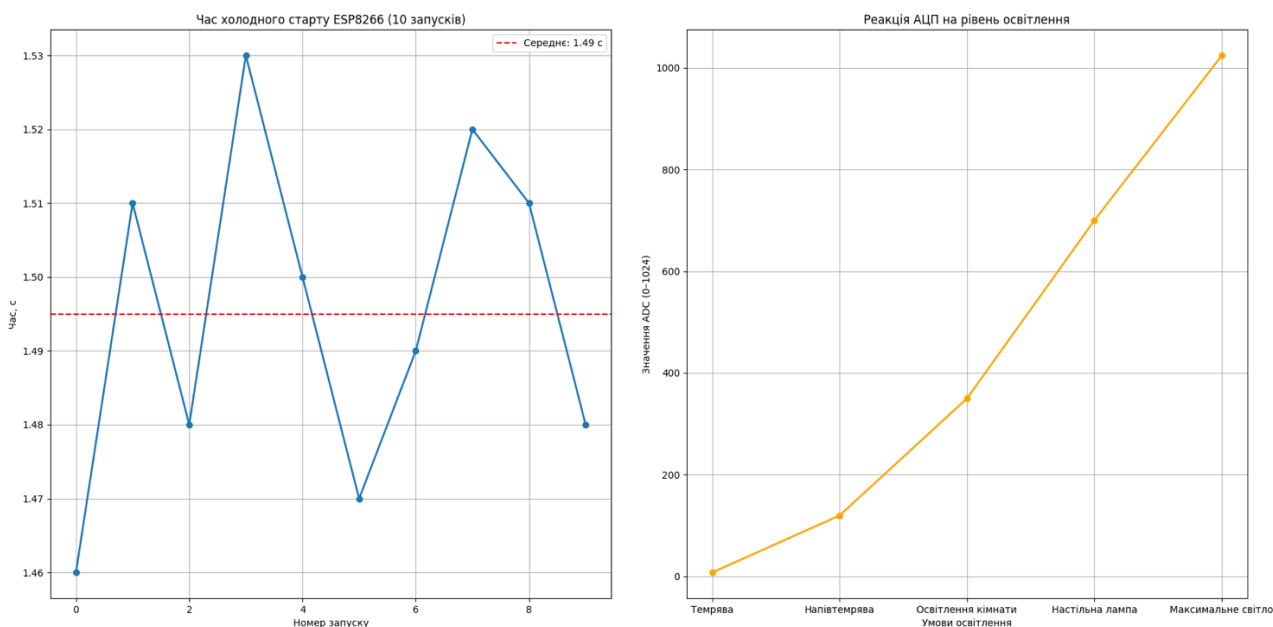


Рисунок 7 – Тестування живлення та стабільність роботи АЦП

Під час проведення суднових експериментів окремо перевірялася стабільність роботи АЦП при зчитуванні даних з фоторезистора оскільки вхід А0 на ESP8266 має вузький діапазон напруги 0–1.0 В, а сам модуль фоторезистора живиться від 3,3 В. Під час експериментальної перевірки коректності роботи дільника напруги на платі NodeMCU було зафіксовано, що при максимальному освітленні суднового машинного відділення значення АЦП доходило до 1024. При відсутності світлового потоку воно падало до 5–10 одиниць. Тобто узгодження рівнів напруги відпрацьовувало зміни якісно та адекватно.

Тестування адекватності показників сенсора DHT11 було проведено у порівнянні з побутовим термометром-гігрометром. Експеримент проводився під час експлуатації судна при температурі повітря 24°C. Різниця в показах температури між DHT11 та еталонним пристроєм становила 0,5–1,0 °C. Це вкладається у паспортну похибку датчика ($\pm 2^\circ\text{C}$) і вказує на якісну роботу сенсора. По вологості розбіжність була близько 4–5 %, що для бюджетного сенсора є також припустимим.

Сенсор DHT11 має певну інерційність. Його реакція на різку зміну температури (наприклад, при обдуві струменем теплого повітря) займає приблизно 10–15 секунд. Тому інтервал опитування у програмному коді (раз на 2 секунди) виглядає достатнім: зміни фіксуються, але процесор не буде навантажуватися зайвими запитами.

Висновки. У роботі була вирішена задача проєктування суднової IoT-системи для моніторингу головних фізичних параметрів навколишнього середовища. В умовах роботи

судна система реалізує збір, передавання, збереження та візуалізацію даних датчиків на базі мікроконтролерів сімейства ESP і протоколу MQTT. Головними перевагами розробленої суднової системи є: енергоефективність, надійність, простота масштабування.

Розроблена програмно-апаратна архітектура включає сенсорний вузол (на ESP), брокер, серверний застосунок і веб-інтерфейс. Вибір апаратної частини дозволив зробити суднову систему дешевою з можливістю розширювання. Реалізовано повний цикл роботи – від моменту зчитування датчика до появи цифр у браузері.

Експериментальне оцінювання розробленої суднової системи моніторингу параметрів змін мікроклімату всередині машинного відділення показало високі якісні показники під час перевірки старту мікроконтролера після подачі живлення. Отримані чисельні параметри щодо вимірюваних значень температури, вологості та освітленості відповідають малим похибкам та вказують на високу якість розробленої суднової мережі за умови мінімальної кількості запитів.

Перспективи подальших досліджень. В якості головного напрямку подальших досліджень необхідно виділити додавання алгоритмів статистичного аналізу трендів і гістограм. Внаслідок їх впровадження можливо прогнозувати роботу усього обладнання машинного відділення судна з використанням регуляторів витрати головних робочих агентів, що йдуть на технологічні суднові процеси нагрівання або охолодження.

Розширення можливостей системи також можливо досягнути у разі проведення досліджень щодо часових характеристик передачі даних під час збільшення стабільності роботи каналу зв'язку MQTT. Головними результатами в цьому випадку мають бути дані про те як швидко сервер обробляє запити, і як система реагує на динамічні зміни параметрів навколишнього середовища.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Choudhury S., Mandal B. IOT Based Weather Analysis System Using ESP8266. *International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology*. 2023. Vol. 11, no. 6. P. 3899–3903. <https://doi.org/10.22214/ijraset.2023.54365> (Last accessed: 25.11.2025).
2. Das M. Home Automation Using ESP8266. *Transactions on Machine Design (TMD)*. 2018. Vol. 6, no. 2. P. 47. <https://doi.org/10.6025/tmd/2018/6/2/43-46> (Last accessed: 25.11.2025).
3. LoRaWAN® L2 1.0.4 Specification. TS001-1.0.4 [Електронний ресурс] // LoRa Alliance. – Режим доступу: <https://resources.lora-alliance.org/getting-started-with-lorawan/ts001-1-0-4-lorawan-l2-1-0-4-specification> (дата звернення: 20.10.2025).
4. Rappaport T. Wireless Communications: Principles and Practice / T. Rappaport. 2nd ed. – New Jersey : Prentice Hall, 2002. 640 p.
5. Sai Prasad D. S., Taluja A., Sharma V. Feedback System using ESP8266. *MR International Journal of Engineering and Technology*. 2023. Vol. 10, no. 1. P. 8–11. <https://doi.org/10.58864/mrijet.2023.10.1.2> (Last accessed: 25.11.2025).
6. Windesi P. K. A., Sampebua M. R., Kmurawak R. M. Iot-Based Home Automation Using Nodemcu Esp8266. *Jurnal Riset Informatika*. 2022. Vol. 4, no 4. P. 391–396. <https://doi.org/10.34288/jri.v4i4.431> (Last accessed: 25.11.2025).
7. Fresnel Zone: The Ultimate RF Engineering Guide [Електронний ресурс] // Number Analytics. – Режим доступу: <https://www.numberanalytics.com> (дата звернення: 26.10.2025).
8. Master the Bandwidth Formula: Essential Guide for Engineers [Електронний ресурс] // Keysight Tech Guides. – Режим доступу: <https://www.keysight.com/used/us/en/knowledge/formulas/bandwith-formula>.
9. LoRa Modulation Basics: application note AN1200.22. 2nd ed. [Електронний ресурс]. – Semtech Corporation, 2015. 25 p. Режим доступу: <https://www.semtech.com> (дата звернення: 28.10.2025).

10. Analisis Traffic Data ESP8266 pada Perangkat Middleware / Unang Achlison та ін. Elkom : *Jurnal Elektronika dan Komputer*. 2022. Vol. 15, no. 1. P. 223–227. <https://doi.org/51903/elkom.v15i1.818> (Last accessed: 25.11.2025).
11. Gupta S., Lekhi S. Home Automation Using Packet Tracer and ESP8266. *International Journal Of Computers & Technology*. 2021. Vol. 21. P. 84–96. <https://doi.org/.24297/ijct.v21i.9061> (Last accessed: 25.11.2025).
12. Julianti M. R., Sofia D., Kusuma A. R. Application of IoT for Filling and Monitoring Water Tanks Using NodeMCU ESP8266 and MQTT Protocol. *Jurnal Sisfotek Global*. 2022. Vol. 12, no. 2. P. 108. <https://doi.org/10.38101/sisfotek.v12i2.554> (Last accessed: 25.11.2025).
13. Julianti M. R., Sofia D., Kusuma A. R. Application of IoT for Filling and Monitoring Water Tanks Using NodeMCU ESP8266 and MQTT Protocol. *Jurnal Sisfotek Global*. 2022. Vol. 12, no. 2. P. 108. <https://doi.org/10.38101/sisfotek.v12i2.554> (Last accessed: 25.11.2025).
14. K M. D. N. Smoke Detection Security Using ESP8266. *International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology*. 2025. Vol. 13, no. 9. P. 741–743. <https://doi.org/10.22214/ijraset.2025.74112> (Last accessed: 25.11.2025).
15. Magtibay O. B. M. Applying MQTT Protocol and Node-Red Programming in Designing IoT based Home Automation. *IJASC*. 2019. Vol. 1, no. 3. P. 7–12. <https://doi.org/.22662/ijasc.2019.1.3.007> (Last accessed: 25.11.2025).
16. Salama M., Raslen B. MQTT in Action: Building Reliable and Scalable Home Automation Systems. *Sakarya University Journal of Computer and Information Sciences*. 2024. <https://doi.org/10.35377/saucis...1504759> (Last accessed: 25.11.2025).

REFERENCES

1. Choudhury S. (2023). Mandal B. IOT Based Weather Analysis System Using ESP8266. *International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology*. Vol. 11, no. 6. P. 3899–3903. <https://doi.org/10.22214/ijraset.2023.54365> (Last accessed: 25.11.2025).
2. Das M. (2018). Home Automation Using ESP8266. *Transactions on Machine Design (TMD)*. Vol. 6, no. 2. P. 47. <https://doi.org/10.6025/tmd/2018/6/2/43-46> (Last accessed: 25.11.2025).
3. LoRaWAN® L2 1.0.4 Specification. TS001-1.0.4 [Електронний ресурс] // LoRa Alliance. – Режим доступу: <https://resources.lora-alliance.org/getting-started-with-lorawan/ts001-1-0-4-lorawan-l2-1-0-4-specification> (дата звернення: 20.10.2025).
4. Rappaport T. (2002). *Wireless Communications: Principles and Practice* / T. Rappaport. – 2nd ed. – New Jersey : Prentice Hall, 640 p.
5. Sai Prasad D. S., Taluja A., Sharma V. (2023). Feedback System using ESP8266. *MR International Journal of Engineering and Technology*. Vol. 10, no. 1. P. 8–11. <https://doi.org/10.58864/mrijet.2023.10.1.2> (Last accessed: 25.11.2025).
6. Windesi P. K. A., Sampebua M. R., Kmurawak R. M. (2022). Iot-Based Home Automation Using Nodemcu Esp8266. *Jurnal Riset Informatika*. Vol. 4, no 4. P. 391–396. <https://doi.org/10.34288/jri.v4i4.431> (Last accessed: 25.11.2025).
7. Fresnel Zone: The Ultimate RF Engineering Guide [Електронний ресурс] // Number Analytics. Режим доступу: <https://www.numberanalytics.com> (дата звернення: 26.10.2025).
8. Master the Bandwidth Formula: Essential Guide for Engineers [Електронний ресурс] // Keysight Tech Guides. Режим доступу: <https://www.keysight.com/used/us/en/knowledge/formulas/bandwidth-formula>.
9. LoRa Modulation Basics: application note AN1200.22. (2015). 2nd ed. [Електронний ресурс]. Semtech Corporation, 25 p. Режим доступу: <https://www.semtech.com> (дата звернення: 28.10.2025).
10. Analisis Traffic Data ESP8266 pada Perangkat Middleware / Unang Achlison та ін. Elkom : *Jurnal Elektronika dan Komputer*. 2022. Vol. 15, no. 1. P. 223–227. <https://doi.org/10.51903/elkom.v15i1.818> (Last accessed: 25.11.2025).

11. Gupta S., Lekhi S. (2021). Home Automation Using Packet Tracer and ESP8266. *International Journal Of Computers & Technology*. Vol. 21. P. 84–96. <https://doi.org/24297/ijct.v21i.9061> (Last accessed: 25.11.2025).
12. Julianti M. R., Sofia D., Kusuma A. R. (2022). Application of IoT for Filling and Monitoring Water Tanks Using NodeMCU ESP8266 and MQTT Protocol. *Jurnal Sisfotek Global*. Vol. 12, no. 2. P. 108. <https://doi.org/10.38101/sisfotek.v12i2.554> (Last accessed: 25.11.2025).
13. Julianti M. R., Sofia D., Kusuma A. R. (2022). Application of IoT for Filling and Monitoring Water Tanks Using NodeMCU ESP8266 and MQTT Protocol. *Jurnal Sisfotek Global*. Vol. 12, no. 2. P. 108. <https://doi.org/10.38101/sisfotek.v12i2.554> (Last accessed: 25.11.2025).
14. K M. D. N. (2025). Smoke Detection Security Using ESP8266. *International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology*. Vol. 13, no. 9. P. 741–743. <https://doi.org/10.22214/ijraset.2025.74112> (Last accessed: 25.11.2025).
15. Magtibay O. B. M. (20219). Applying MQTT Protocol and Node-Red Programming in Designing IoT based Home Automation. *IJASC*. Vol. 1, no. 3. P. 7–12. <https://doi.org/10.22662/ijasc.2019.1.3.007> (Last accessed: 25.11.2025).
16. Salama M., Raslen B. (2024). MQTT in Action: Building Reliable and Scalable Home Automation Systems. *Sakarya University Journal of Computer and Information Sciences*. <https://doi.org/35377/saucis...1504759> (Last accessed: 25.11.2025).

Nikolskiy V. V., Malakhov O. V., Nikolskyi M. V., Palagin O. N., Naydyonov A. I. SYSTEM FOR MICROCLIMATE PARAMETERS MONITORING OF THE VESSEL'S HOUSING AREAS

In existing modern vessel environmental monitoring systems, traditional wireless protocols such as Wi-Fi, Bluetooth and cellular networks do not meet the requirements for ensuring the necessary balance in the chain of energy consumption - coverage radius - cost of network deployment. As an alternative solution, which is described in the article, it is necessary to use such new scientific technologies as long-range modulation and its local network layer. They can be considered as key solutions that allow deploying networks on vessels with autonomous operation of final devices for up to several years. For the data transmission process in distributed systems for monitoring environmental parameters in the vessel's engine room, bandwidth modeling was performed and the system operating frequency was estimated. To activate all devices of the vessel's network, the use of the personalization method was proposed. An experimental assessment of the parameters describing the quality of the microcontroller start during test runs, the stability of the ADC operation, and the indicators of temperature, humidity and lighting sensors was obtained.

Key words: vessel's local area network; monitoring of microclimate parameters; system architecture; personalization method.

© Нікольський В. В., Малахов О. В., Нікольський М. В., Палагін О. М., Найдъонов А. І.

Статтю прийнято до редакції 26.03.2026

КОНЦЕПТУАЛЬНА ДИНАМІЧНА МОДЕЛЬ ФУНКЦІОНАЛЬНОГО СТАНУ ОПЕРАТОРА З УРАХУВАННЯМ ВЗАЄМОДІЇ ФІЗІОЛОГІЧНИХ, КОГНІТИВНИХ ТА ОПЕРАЦІЙНИХ ФАКТОРІВ ІЗ ML-КОРЕКЦІЄЮ

Петровський А. В., к.т.н., доцент кафедри навігації та управління судном Херсонської державної морської академії, м. Херсон, Україна, e-mail: andreanybody@gmail.com, ORCID: 0000-0002-3337-9577.

У статті запропоновано гібридну динамічну модель функціонального стану оператора в морських транспортних системах, яка враховує взаємодію фізіологічних, когнітивних та операційних факторів. Актуальність дослідження обумовлена значним впливом людського фактора на безпеку судноплавства, зокрема роллю втоми та когнітивного навантаження у виникненні аварійних ситуацій. Існуючі підходи до оцінки стану оператора, як правило, розглядають окремі аспекти цієї проблеми та не забезпечують інтегрованого опису процесів. У роботі розроблено динамічну модель, що описує зміну фізіологічної втоми, когнітивного навантаження та характеристик операційного середовища у часі з урахуванням їх нелінійної взаємодії. Особливістю запропонованого підходу є використання методів машинного навчання для корекції залишкової похибки базової моделі, що дозволяє підвищити точність прогнозування без втрати інтерпретованості результатів. У якості методу машинного навчання застосовано градієнтний бустинг. Надано структурно-логічні схеми реалізації моделі та представлено детальний алгоритм, які загалом надають повне уявлення всієї концепції моделі. Запропонована модель може бути використана як основа для побудови систем підтримки прийняття рішень у морських транспортних системах та підвищення рівня безпеки судноплавства.

Ключові слова: втома оператора; індекс PFI; безпека судноплавства; ML; градієнтний бустинг.

DOI: 10.33815/2313-4763.2026.1.32.100-113

Вступ. Забезпечення безпеки судноплавства є однією з ключових задач сучасної морської індустрії, у якій людський фактор відіграє визначальну роль. Незважаючи на розвиток автоматизованих систем управління, оператор залишається центральною ланкою прийняття рішень у складних навігаційних умовах. Численні дослідження показують, що значна частина морських інцидентів пов'язана з помилками людини, серед яких особливе місце займає втома. Втома оператора впливає на увагу, швидкість реакції та якість прийняття рішень, що безпосередньо підвищує ризик аварійних ситуацій.

Складність аналізу цього явища полягає в його багатофакторній природі, оскільки втома формується під впливом фізіологічних, когнітивних та зовнішніх факторів. До фізіологічних факторів належать порушення сну, тривалість роботи та циркадні ритми, тоді як когнітивне навантаження визначається складністю задач і рівнем інформаційного перевантаження. Операційні умови, зокрема інтенсивність суднопотоку та навігаційна обстановка, також суттєво впливають на стан оператора. Взаємодія цих факторів має нелінійний характер і може призводити до різкого погіршення функціонального стану навіть при незначних змінах умов.

Постановка проблеми. Існуючі підходи до оцінки втоми та ризику, як правило, розглядають окремі аспекти цієї проблеми. Біоматематичні моделі ефективно описують фізіологічні процеси, але не враховують когнітивне навантаження. У свою чергу, когнітивні моделі базуються на суб'єктивних оцінках і не відображають фізіологічну динаміку. Методи машинного навчання дозволяють досягати високої точності прогнозування, проте часто використовуються як "чорний ящик" без фізичної інтерпретації. Це обмежує їх застосування у критичних системах, де важлива пояснюваність результатів.

Таким чином, актуальною є задача розробки інтегрованого підходу, який поєднує фізіологічні, когнітивні та операційні фактори в єдиній моделі. Особливого значення набуває врахування динамічного характеру процесів та нелінійної взаємодії між складовими. Крім того, необхідним є використання методів машинного навчання у спосіб, що зберігає інтерпретованість моделі та підвищує її точність.

Аналіз досліджень і публікацій. Сучасні дослідження демонструють, що людський фактор є причиною більшості інцидентів, при цьому втома часто виступає латентною причиною, яка не відображається у звітах про аварії [1, 2]. Аналіз аварійних даних із використанням статистичних та машинних методів показує, що ігнорування втоми призводить до недооцінки ризиків і спотворення моделей безпеки [1, 3].

Втома формується під впливом комплексу факторів, включаючи тривалість роботи, порушення сну, організаційні умови та індивідуальні характеристики оператора [4, 5]. Дослідження психофізіологічного стану моряків показують, що ці фактори взаємодіють між собою та створюють нелінійну систему, у якій навіть невеликі зміни умов можуть призводити до значного погіршення стану [6, 7]. У зв'язку з цим застосовуються різні методи оцінки втоми, включаючи фізіологічні, поведінкові та суб'єктивні підходи. Фізіологічні методи базуються на аналізі біосигналів, поведінкові – на характеристиках виконання задач, тоді як суб'єктивні методи використовують опитувальники [4, 6].

Окремий напрям досліджень пов'язаний із оцінкою когнітивного навантаження, яке є критичним фактором ефективності оператора. Широко використовується індекс NASA-TLX, який дозволяє оцінити багатовимірну структуру навантаження [8, 9]. Дослідження показують, що підвищене когнітивне навантаження призводить до зниження уваги, збільшення часу реакції та зростання ймовірності помилок [10, 11]. При цьому встановлено, що рівень навантаження залежить від складності задачі, досвіду оператора та умов середовища [11, 12]. Попри широке застосування, ці підходи мають обмеження, зокрема суб'єктивність оцінки та відсутність динамічного опису процесів.

Важливу роль у сучасних дослідженнях відіграють операційні дані, зокрема AIS, які дозволяють оцінювати навігаційне середовище. AIS-дані використовуються для аналізу щільності трафіку, прогнозування траєкторій та виявлення аномалій [13, 14]. Застосування методів машинного навчання до AIS-даних дозволяє автоматично визначати складні сценарії руху суден та оцінювати рівень ризику [15, 16]. Це створює основу для інтеграції зовнішніх умов у моделі людського стану.

Методи машинного навчання набули значного поширення у задачах аналізу ризику та втоми. Вони дозволяють виявляти складні нелінійні залежності та взаємодії між факторами [1], [17]. Зокрема, застосування ансамблевих методів та нейромереж дозволяє підвищити точність прогнозування стану оператора та ймовірності інцидентів [9, 18]. Додатково, сучасні дослідження пропонують мультимодальні підходи, які поєднують фізіологічні сигнали, поведінкові характеристики та контекстні дані [19], [20].

Разом із тим, ML-підходи мають суттєві обмеження. Основною проблемою є їх низька інтерпретованість, що ускладнює використання у критичних системах безпеки [17]. Крім того, такі моделі є чутливими до якості даних і можуть демонструвати нестабільність при зміні умов [3]. Це обмежує їх практичне застосування без додаткових обмежень та контролю. У відповідь на ці обмеження сучасні дослідження переходять до гібридних підходів, які поєднують фізично обґрунтовані моделі та машинне навчання. Такі підходи дозволяють зберегти інтерпретованість базових моделей і водночас врахувати складні нелінійні ефекти [9, 17]. Вони передбачають використання фізичних або експертних моделей як базового рівня з подальшою корекцією за допомогою ML (machine learning).

Таким чином, аналіз літератури показує, що існуючі підходи до моделювання втоми та ризику в морських системах розвиваються у трьох основних напрямках: фізіологічні моделі, когнітивні моделі та ML-підходи. Однак їх інтеграція залишається обмеженою, що обґрунтовує необхідність розробки гібридних моделей, які поєднують фізіологічні, когнітивні та операційні фактори з використанням машинного навчання.

Основний науковий розрив полягає у відсутності інтегрованої моделі, яка одночасно:

- враховує фізіологічний стан оператора;
- описує когнітивне навантаження;
- інтегрує операційні умови (зокрема AIS-дані);

- враховує динаміку процесів;
- моделює нелінійні взаємодії факторів;
- і при цьому зберігає інтерпретованість.

Метою даної роботи є розробка гібридної моделі оцінки стану оператора, яка інтегрує фізіологічні, когнітивні та операційні фактори з використанням машинного навчання для корекції залишкової похибки. Запропонований підхід дозволяє врахувати складну структуру взаємодій між факторами та підвищити достовірність прогнозування ризику в умовах реальної експлуатації.

Об'єктом дослідження є функціональний стан оператора в морських транспортних системах, який формується під впливом фізіологічної втоми, когнітивного навантаження та операційних умов навігаційного середовища.

Задачі дослідження: розробити динамічну модель функціонального стану оператора, що включає фізіологічну втому, когнітивне навантаження та операційні фактори; формалізувати взаємодію складових моделі з урахуванням нелінійних ефектів і контекстних змінних (ніч, трафік, перевтома); реалізувати ML-корекцію моделі на основі градієнтного бустингу для зменшення похибки прогнозу.

Методи дослідження: математичне моделювання динамічних процесів; нелінійний аналіз взаємодії факторів; методи машинного навчання (градієнтний бустинг для residual-корекції).

Основна частина. У роботі [21] побудовано базову модель визначення рівня втоми штурмана Predictive Fatigue Index (PFI): $PFI = f(F, C, O)$, де кожна складова вже має свою формалізацію:

де F – через сон і час активності;

C – через задачі, повідомлення, складність;

O – через погоду, трафік, ніч.

Між складовими немає динамічного зв'язку.

З метою підвищення точності прогнозування рівня втоми судноводія запропоновано розширення базової моделі PFI шляхом введення динамічної еволюції складових та врахування їх взаємного впливу. На відміну від статичних представлень, складові фізіологічного стану, когнітивного навантаження та операційного ризику є сенс розглянути як часові процеси, що змінюються у дискретному часі.

Для динамічного розширення моделі кожену складову моделі можна описати рівнянням стану:

- фізіологічна втома:

$$F(t + \Delta t) = F(t) + \alpha_1 D_{sleep}(t) + \alpha_2 T_{work}(t) + \alpha_3 R(t) \quad (1)$$

де D_{sleep} – дефіцит сну;

T_{work} – тривалість безперервної активності;

$R(t)$ – відновлення;

α_1 – вплив дефіциту сну;

α_2 – накопичення втоми;

α_3 – швидкість відновлення.

$$\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 = 1$$

- когнітивне навантаження:

$$C(t + \Delta t) = C(t) + \beta_1 W(t) + \beta_2 M(t) + \beta_3 A(t) \quad (2)$$

де $W(t)$ – кількість задач;

$M(t)$ – інтенсивність повідомлень;

$A(t)$ – адаптація оператора;

β_1 – вплив задач;

β_2 – вплив повідомлень;

β_3 – ефект адаптації.

$\beta_1 + \beta_2 + \beta_3 = 1$

– операційний ризик:

$$O(t + \Delta t) = \gamma_1 Weather(t) + \gamma_2 Traffic(t) + \gamma_3 Night(t) \quad (3)$$

де $Weather(t)$ – складність погодних умов;

$Traffic(t)$ – інтенсивність трафіку (за кількістю суден з AIS-помітками);

$Night(t)$ – зміна частин доби, $Night(t) \in [0; 1]$;

γ_1 – вплив погодних умов на втомленість штурмана;

γ_2 – вплив насиченості трафіку;

γ_3 – потенційний вплив частини доби на втомленість.

$\gamma_1 + \gamma_2 + \gamma_3 = 1$

Інтегральний показник визначається як:

$$PFI_{base}(t) = w_F(t) F(t) + w_C C^*(t) + w_O O(t) \quad (4)$$

де w_F , w_C , w_O – вагові коефіцієнти, $w_F + w_C + w_O = 1$.

На відміну від незалежного розгляду складових, у запропонованій моделі вводиться їх взаємний вплив. Наприклад, фізіологічна втома підсилює когнітивне навантаження:

$$C^*(t) = C(t)(1 + \lambda_F F(t)) \quad (5)$$

де λ_F – коефіцієнт впливу втоми на когнітивні процеси, а, наприклад, когнітивне навантаження прискорює накопичення втоми:

$$F(t + \Delta t) = F(t) + \lambda_C C^*(t) \quad (6)$$

де λ_C – коефіцієнт впливу когнітивних процесів на втому.

При цьому операційні фактори можуть моделювати обидві складові (вплив операційних факторів на фізіологічний стан λ_{OF}):

$$C^*(t) = C(t)(1 + \lambda_O O(t)), \quad F(t) = F(t)(1 + \lambda_{OF} O(t)) \quad (7)$$

Таким чином, система набуває нелінійного характеру, що дозволяє врахувати ефект «каскадного» зростання навантаження:

втома $\rightarrow$ зниження уваги $\rightarrow$ зростання когнітивного навантаження $\rightarrow$ ще більша втома $\rightarrow$ зниження уваги $\rightarrow$ зростання когнітивного навантаження $\rightarrow$ ще більша втома.

Тоді з урахуванням динаміки та взаємодії компонентів прогноз рівня втоми визначається як:

$$PFI_{base}(t + \Delta t) = f(F(t + \Delta t), C^*(t + \Delta t), O(t + \Delta t)) + \varepsilon_{ML} \quad (8)$$

де ε_{ML} – корекція на основі машинного навчання.

У реальних умовах така формальна модель свідчить, що однакова кількість задач при різному рівні втоми дає різний ризик, також нічні умови не лише додають ризик, а й підсилюють дію інших факторів. Така модель здатна виявляти приховані критичні стани, коли оператор ще формально у нормальному стані, але система вже прогнозує різке погіршення.

Для практичного застосування запропонованої динамічної моделі необхідно визначити параметри, діапазони змін змінних та методи їх ідентифікації. У даній роботі використовується комбінований підхід, що поєднує експертну ініціалізацію, нормалізацію вхідних даних та подальше уточнення параметрів за допомогою даних (data-driven).

Запропонована модель складається з двох функціонально відокремлених рівнів. Перший рівень – аналітична (базова) модель, що формує первинну оцінку індексу функціонального стану на основі фізіологічних, когнітивних та операційних змінних. Другий рівень – модуль машинного навчання, який не замінює базову модель, а виконує корекцію її залишкової похибки, враховуючи нелінійні залежності та індивідуальні особливості, не охоплені аналітичним описом.

Другий рівень моделі – ML-підхід.

Математична модель ML-корекції PFI:

$$PFI(t) = PFI_{base}(t) + \varepsilon_{ML}(t) \quad (9)$$

Формуємо вхідний вектор:

$$x(t) = [F(t), C(t), O(t), D_{sleep}(t), T_{work}(t), R(t), W(t), M(t), A(t), Weather(t), Traffic(t), Night(t)]$$

Корекція:

$$\varepsilon_{ML}(t) = f_{\theta}(x(t), h(t)) \quad (10)$$

де f_{θ} – ML-модель;

$h(t)$ – історичний стан (пам'ять).

При виборі градієнтного бустингу:

$$\varepsilon_{ML}(t) = \sum_{k=1}^K \alpha_k h_k(x(t))$$

де: h_k – слабкі моделі (дерева рішень);

K – кількість ітерацій.

Перевагою використання градієнтного бустингу є визначення нелінійності параметрів. Таким чином, модуль машинного навчання виконує виключно функцію корекції залишкової похибки базової аналітичної моделі. Це забезпечує збереження фізичної інтерпретованості основних компонентів, тоді як ML-модуль компенсує невраховані нелінійні ефекти, міжфакторні взаємодії та індивідуальні особливості оператора.

Навчання моделі через цільову функцію:

$$y(t) = PFI_{real}(t) - PFI_{base}(t) \quad (11)$$

Тобто модель вчиться саме помилці.

Мінімізується функція помилки (функція втрат):

$$\min_{\{\alpha, \beta, \gamma, \lambda\}} \sum_t (y(t) - f_0(x(t)))^2 \quad (12)$$

$$\min_{\{\alpha, \beta, \gamma, \lambda\}} \sum_t (f_0(x(t)) - (PFI_{real} - PFI_{base}))^2$$

Адаптація моделі (через Exponential Moving Average, EMA):

$$\varepsilon_{ML}(t) = \rho f_0(x(t)) + (1 - \rho) \varepsilon_{ML}(t - 1) \quad (13)$$

$\rho \in [0.1; 0.5]$

Обмеження моделі: $F(t), C(t), O(t), PFI(t) \in [0; 1]$

Значення насиченості (сатурація): $PFI(t) = \min(1, \max(0, PFI(t)))$. Наприклад, фізичні обмеження (сатурація для $F(t)$):

– сон < 0 – неможливо;

– часове навантаження $> \max$ – обрізка до максимального значення;

– логічні обмеження: при $F(t) \rightarrow 1$ ефективність знижується, а при $C(t) \rightarrow 1$ зростає ризик помилки $C(t) = \min(1, \max(0, C(t)))$.

Обмеження корекції: $\varepsilon_{ML}(t) \in [-\delta; +\delta]$, $\delta \in [0.1; 0.3]$.

ML-корекція ($\varepsilon_{ML}(t)$) фактично є індивідуальною поправкою штурмана, яка враховує: швидкість втомлення конкретного ООВ (вахтовий офіцер навігаційного містка), реакцію на нічні зміни та на поведінку в умовах перевантаження.

Остаточна модель:

$$PFI(t) = w_F F(t) + w_C C^*(t) + w_O O(t) + f_\theta(x(t)) \quad (14)$$

Запропонована система рівнянь (1)–(7) є нелінійною динамічною системою з обмеженими змінними стану $F(t), C(t), O(t) \in [0; 1]$.

Стійкість моделі забезпечується такими факторами:

– обмеженістю фазового простору: всі змінні нормалізовані, що виключає необмежене зростання; наявністю демпфуючих компонентів (у фізіологічній моделі – член відновлення $R(t)$, а у когнітивній – адаптація $A(t)$);

– балансом параметрів: система є стійкою за умов: $\alpha_3 \geq \alpha_2, \beta_3 \geq \beta_1 + \beta_2$ (в середньому), що відповідає фізичному сенсу відновлення;

– дисипативністю системи: при відсутності зовнішніх впливів ($W \rightarrow 0, Traffic \rightarrow 0$) система прямує до стаціонарного стану.

Таким чином, модель не демонструє нестійкості, а її поведінка обмежена фізично інтерпретованими межами.

Модель має динамічний характер та може бути формалізована у вигляді системи диференціальних рівнянь, однак у межах даної роботи розглядається на концептуальному рівні із акцентом на структурні та функціональні взаємозв'язки.

На рис. 1 представлено формальну схему взаємодії впливів та визначення поточного інтегрального показника PFI та його прогнозного значення.

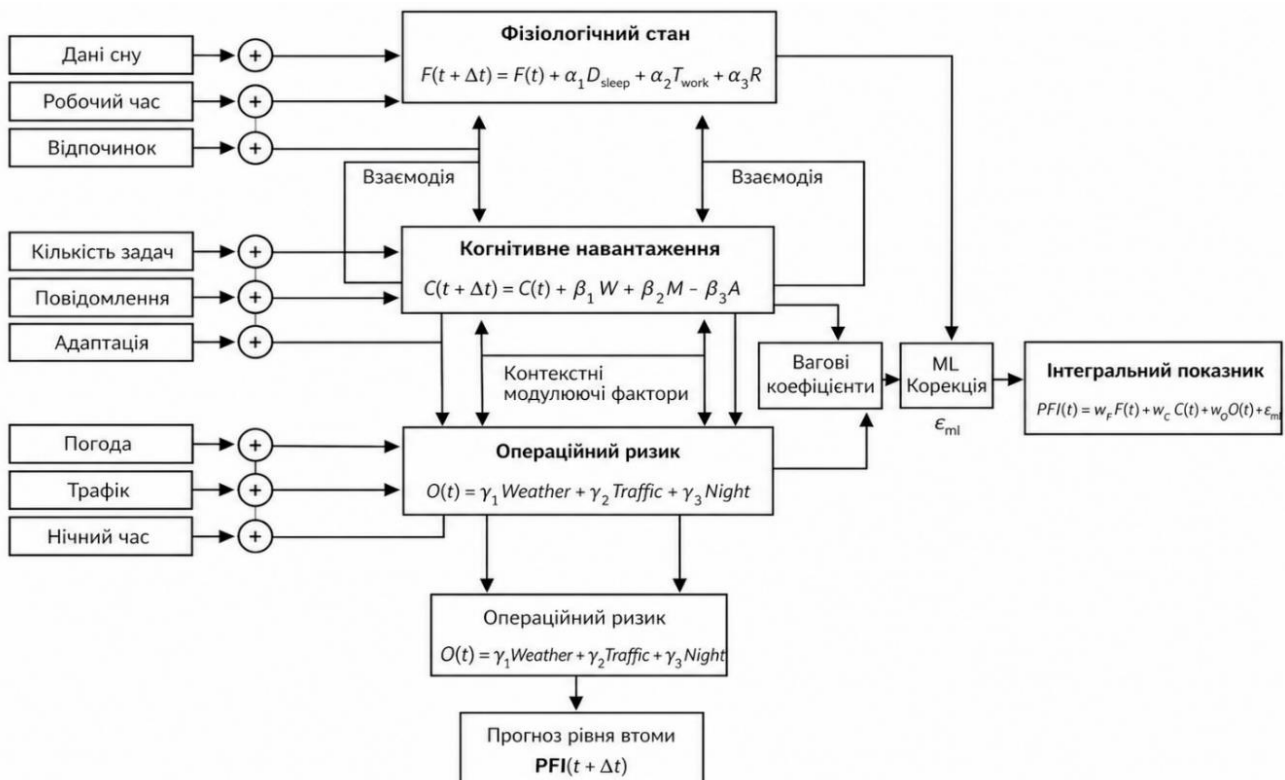


Рисунок 1 – Формальна схема взаємодії впливів та визначення інтегрального показника PFI

Структурно-логічна схема формальної моделі показує концептуальні моменти її реалізації (рис. 2).

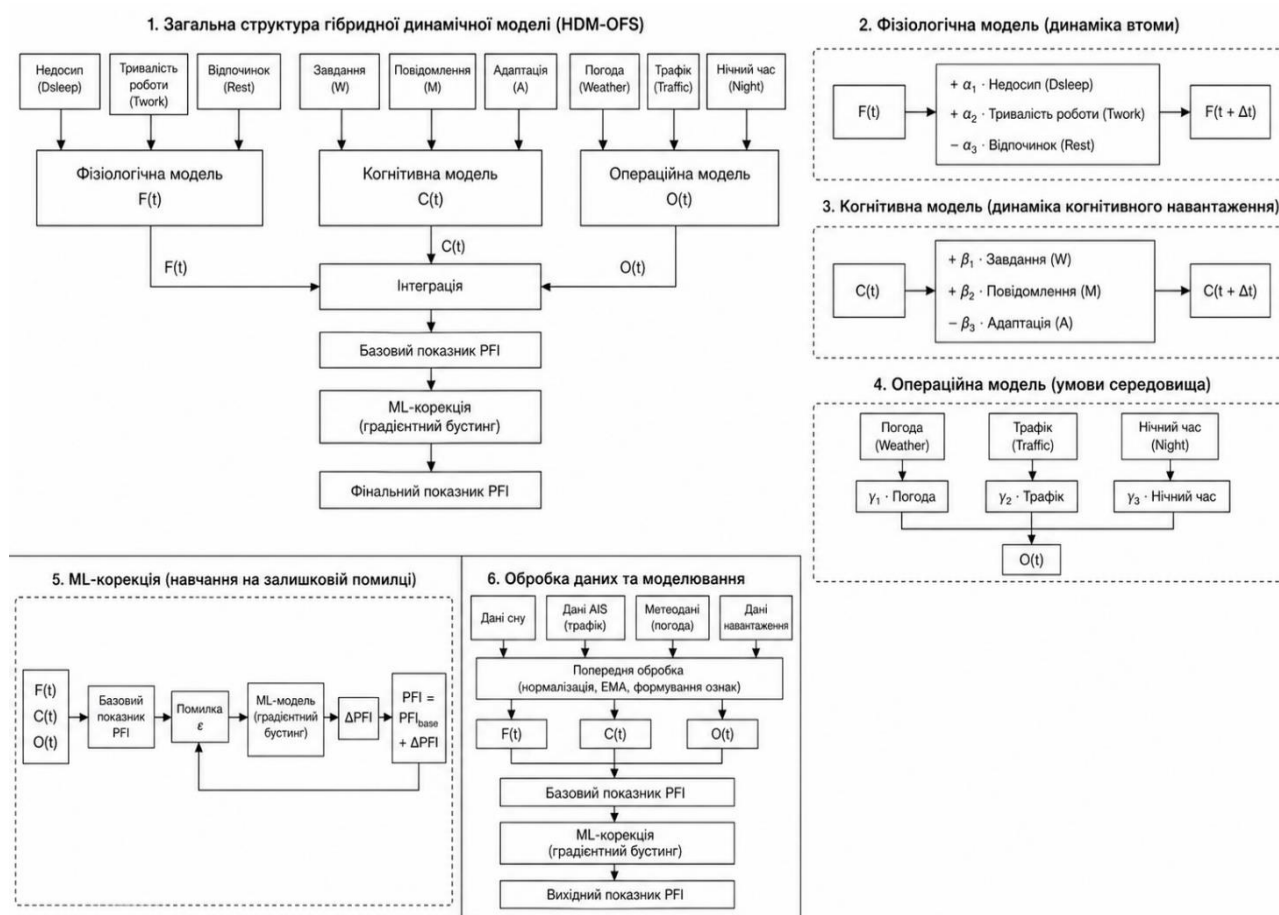


Рисунок 2 – Структурно-логічна схема визначення інтегрального PFI

Модель чутлива до нормалізації і тому її параметри потрібно калібрувати під тип судна, район плавання і екіпаж.

Усі складові призводяться до безрозмірного вигляду: $F(t), C(t), O(t), PFI(t) \in [0,1]$. Нормалізація надає можливість порівняння компонентів, стійкість моделі і коректну роботу вагових коефіцієнтів.

Приклад нормалізації. Фізіологія:

$$D_{sleep} = \max\left(0, \frac{T_{opt} - T_{sleep}}{T_{opt}}\right)$$

$$T_{work}^{norm} = \max\left(1, \frac{T_{work}}{T_{max}}\right) \quad (15)$$

Когнітивне навантаження:

$$W^{norm} = \frac{W}{W_{max}}, \quad M^{norm} = \frac{M}{M_{max}} \quad (16)$$

Розроблений алгоритм реалізації моделі (рис. 3) надає уявлення послідовності розрахунків, а по окремих компонентах – подальших досліджень.

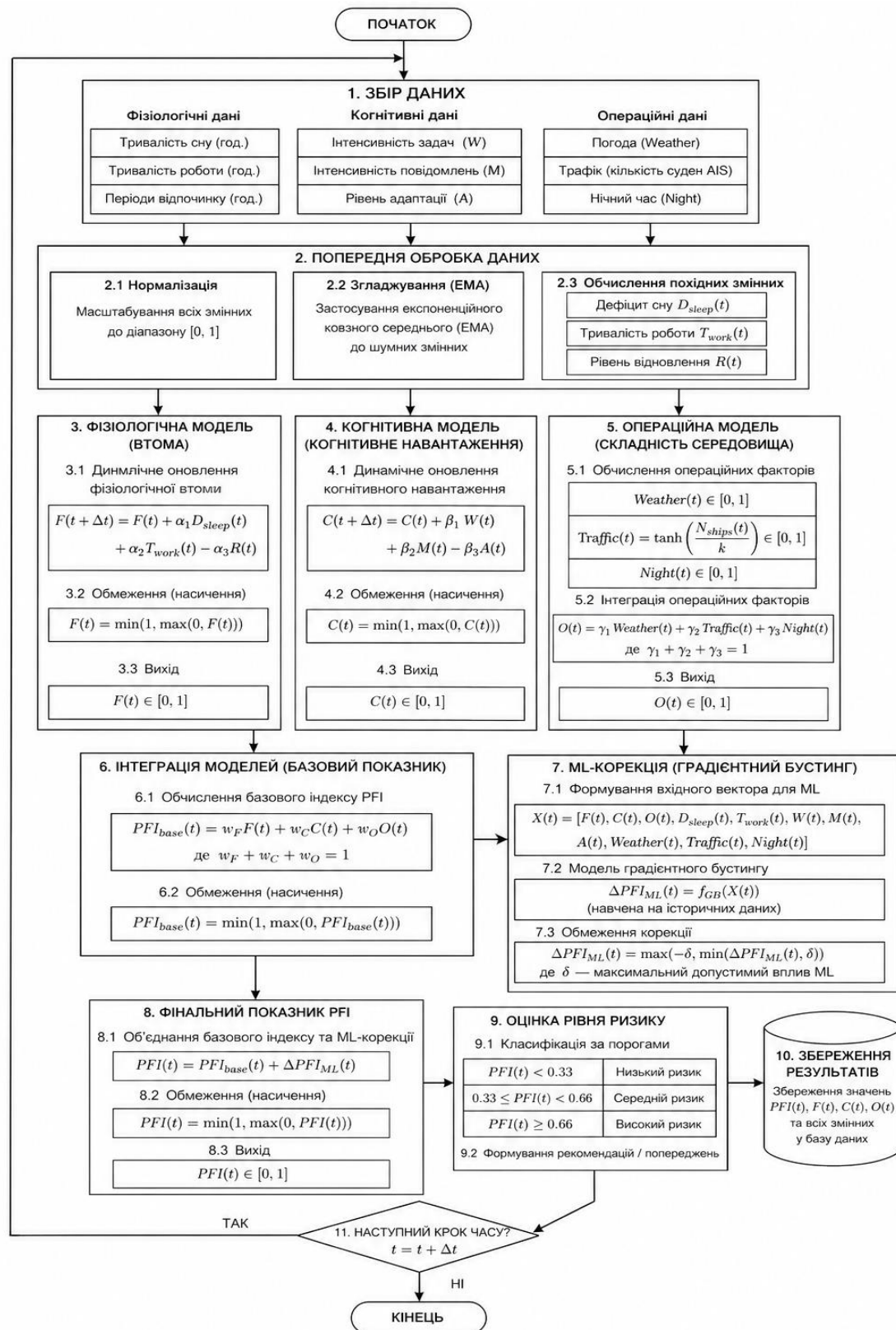


Рисунок 3 – Блок-схема визначення інтегрального PFI

Обговорення і результати досліджень.

Операційні фактори:

- $Weather \in [0; 1]$ (за шкалою Бофорта або індексом хмарності/ясності);
- $Traffic \in [0; 1]$ (щільність AIS);
- $Night \in \{0; 1\}$ або $[0, 1]$ (як перехідна функція).

Припустимо, що коефіцієнти ($\alpha_i, \beta_i, \gamma_i$) визначають «швидкість накопичення» ефектів. Тоді у фізіологічній моделі рекомендовані діапазони для коефіцієнтів:

$\alpha_1 \in [0.05; 0.2]$ – вплив недосипу;

$\alpha_2 \in [0.01; 0.1]$ – накопичення втоми;

$\alpha_3 \in [0.05; 0.3]$ – швидкість відновлення.

Наприклад, якщо $\alpha_3 > \alpha_2$, то людина добре відновлюється, а навпаки – йде швидке накопичення втоми.

Для когнітивної моделі рекомендовані діапазони для коефіцієнтів:

$\beta_1 \in [0.05; 0.3]$ – вплив задач;

$\beta_2 \in [0.05; 0.25]$ – вплив повідомлень;

$\beta_3 \in [0.05; 0.2]$ – адаптація.

Для операційної моделі рекомендовані діапазони для коефіцієнтів: $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3 \in [0.2; 0.5]$.

Конкретні значення будь-яких коефіцієнтів можна розрахувати, наприклад, методом аналізу ієрархій (MAI), в якості вхідних даних обирати реальні показники втоми окремого штурмана. Будується матриця парних порівнянь (наприклад, *Traffic* важливіший за *Weather*, а *Night* -менш важливий):

	Weather	Traffic	Night
Weather	1	1/2	2
Traffic	2	1	3
Night	1/2	1/3	1

Після нормалізації отримані ваги складуть: $\gamma_1 = 0.30, \gamma_2 = 0.50, \gamma_3 = 0.20$. Головним залишається питання: як задавати значення для подальшого розрахування MAI ваг компонентів. По компоненті *Weather*, як приклад, бали по шкалі Бофорта / 12:

Умови	Бофорт	Значення Weather
штиль	0–1	0.0–0.1
слабкий вітер	2–3	0.2–0.3
помірний	4–5	0.4–0.6
сильний	6–7	0.7–0.8
шторм	8+	0.9–1.0

По компоненті *Traffic* (дані обирати по AIS з сайту marinetraffic.com):

$$Traffic = \frac{N_{ships}}{N_{max}} \quad (17)$$

N_{max} – максимальна кількість (за статистикою) судів у даній частині акваторії;

N_{ships} – поточна кількість судів.

По компоненті *Night* для врахування сутінок:

$$Night = (1 + e^{-k(t-t_{night})})^{-1} \quad (18)$$

Рівень втоми по факторах (дефіцит сну, за відновлення стану відповідає $R(t)$):

$$D_{sleep} = \max(0; 0.8 - Sleep) \quad (19)$$

$$D_{sleep} = \max(0; 8 - SleepHours)/8: \quad (20)$$

<i>Sleep</i>	D_{sleep}
8 год	0
6 год	0.25
4 год	0.5
0 год	1

Нормалізація D_{sleep} наведено у (19) $Sleep \in [0; 1]$, а фізичний сенс – (19) $SleepHours \in [0; 8]$.

Нормування по кількості відпрацьованих годин: $T_{work} = HoursWorked/12$.

МАІ добре працює для операційної компоненти та впливу факторів навантаження, але гірше для фізіології (тут краще калібрувати по даних).

Таким чином МАІ дає стартові ваги, а потім ML (бустинг) – корекція:

$$\alpha_i^{final} = \alpha_i^{MAI} + \Delta \alpha_i^{ML}$$

Додатково можна ввести контроль за стабільністю значень: $\lambda_F + \lambda_C < 1$ (саме ці компоненти можуть приймати найбільші значення).

Типовими значення ваг можуть бути: $w_F = 0.4$; $w_C = 0.35$; $w_O = 0.25$, але вночі збільшується w_F , а у складній навігації – w_C .

Методами оцінки параметрів можуть бути: ІМО рекомендації (International Maritime Organization), правила несення вахти, досвід штурманів.

Подалі, порівнюючи різні моделі, можна скласти таблицю порівняння по можливостях використання у моделях параметрів:

Таблиця 1 – Порівняльна таблиця підходів до моделювання рівня втоми

Підхід	Фізіологія	Когнітивність	AIS / середовище	Динаміка	ML	Інтерпретованість
Фізіологічні моделі	+	–	–	+	–	+
Когнітивні моделі	–	+	–	–	–	+
AIS / операційні моделі	–	–	+	+	+	–
ML (data-driven)	–	+	+	+	+	–
Гібридні моделі	+	+	+	+	+	+

Висновки. У роботі запропоновано гібридний підхід до моделювання стану оператора та оцінки ризику, який поєднує фізично інтерпретовану структуру моделі з методами машинного навчання. Запропоновано єдину модель, що об'єднує три ключові компоненти: фізіологічний стан (втома), когнітивне навантаження, операційне середовище (на основі AIS-даних). На відміну від існуючих підходів, ці компоненти розглядаються не ізольовано, а як взаємопов'язана система. Також на відміну від статичних моделей, запропонований підхід враховує часову еволюцію стану оператора, що дозволяє описати процес накопичення втоми та зміну навантаження у часі. У моделі явно враховано взаємодію між компонентами, зокрема: вплив фізіологічної втоми на когнітивну ефективність, посилення навантаження в умовах високого трафіку, порогові ефекти перевтоми, що дозволяє адекватно описати складні сценарії, які не відображаються у лінійних моделях. Було застосовано концепцію residual learning, у якій машинне навчання не замінює базову модель, а використовується для корекції її похибки, що забезпечує збереження фізичної інтерпретації, підвищення точності і стабільність моделі при обмеженому обсязі даних. Введені контекстні змінні (наприклад, нічний режим, інтенсивність трафіку, перевтома), які формуються на основі реальних даних, враховуються у ML-компоненті. Для моделювання залишкової похибки базової моделі використано метод градієнтного бустингу, у якому функція корекції представляється у вигляді суми слабких моделей (дерев рішень). На кожній ітерації здійснюється апроксимація

залишкової похибки попереднього кроку, що дозволяє послідовно зменшувати загальну помилку моделі. Такий підхід забезпечує врахування нелінійних залежностей, взаємодії факторів та контекстних умов при збереженні інтерпретованості моделі. Модель зберігає можливість інтерпретації результатів, оскільки базова частина має фізичний зміст, а ML використовується лише для корекції, також внесок кожного фактору може бути проаналізований окремо. Такий підхід дозволяє врахувати нелінійні взаємодії факторів, забезпечити інтерпретованість та підвищити точність прогнозування стану оператора. Надані концептуальні схеми реалізації моделі та алгоритм дій, запропонованою блок-схемою.

Перспективи подальших досліджень. Перспективи подальших досліджень полягають у проведенні експериментальної валідації запропонованої моделі на основі реальних даних суднової експлуатації, зокрема фізіологічних показників операторів, даних AIS та параметрів навігаційного середовища. Важливим напрямом також є адаптація моделі до індивідуальних особливостей операторів шляхом персоналізації параметрів та використання методів онлайн-навчання.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Fan S., Yang Z. Accident data-driven human fatigue analysis in maritime transport using machine learning, *Reliability Engineering & System Safety*, Volume 241, 2024, 109675, ISSN 0951-8320, <https://doi.org/10.1016/j.ress.2023.109675>.
2. Crestelo Moreno F., Soto-López V., García Maza J. A., Sernaglia M. Fatigue as a latent risk factor in maritime safety systems: A systematic review and implications for reliability analysis, *Reliability Engineering & System Safety*, Volume 267, Part B, 2026, 111930, ISSN 0951-8320, <https://doi.org/10.1016/j.ress.2025.111930>.
3. Matsangas P., & Shattuck N. L. Discriminating Between Fatigue and Sleepiness in the Naval Operational Environment. *Behavioral Sleep Medicine*, 16(5), 427–436. 2018. <https://doi.org/10.1080/15402002.2016.1228645>.
4. Kerkamm F., Dengler D., et al. Measurement Methods of Fatigue, Sleepiness and Sleep Behaviour Aboard Ships: A Systematic Review. *Int J Environ Res Public Health*. 2021, Vol.19(1):120. <https://doi.org/10.3390/ijerph19010120>.
5. Ma M., Liao R. Factors affecting seafarers' fatigue: a scoping review. *Front Public Health*. 2025 Vol.13:1647685. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2025.1647685>.
6. Yisi Liu, Zirui Lan, Jian Cui, Gopala Krishnan, Olga Sourina, Dimitrios Konovessis, Hock Eng Ang, Wolfgang Mueller-Wittig, Psychophysiological evaluation of seafarers to improve training in maritime virtual simulator, *Advanced Engineering Informatics*, Vol.44, 2020, 101048, ISSN 1474-0346, <https://doi.org/10.1016/j.aei.2020.101048>. Mao S. et al. (2016).
7. Mao S., Tu E, Zhang G., et al. An Automatic Identification System (AIS) Database for Maritime Trajectory Prediction and Data Mining, *Computer Science > Databases*, 2016, 1607.03306, <https://doi.org/10.48550/arXiv.1607.03306>.
8. Moreno F., Soto-López V., et al. Fatigue as a key human factor in complex sociotechnical systems: Vessel Traffic Services. *Front. Public Health*, 2024, Vol.11:1160971. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2023.1160971>.
9. Cao-Feijóo G., Pérez-Canosa J. M., et al. Deep Learning Methods to Mitigate Human-Factor-Related Accidents in Maritime Transport. *J. Mar. Sci. Eng.* 2024, 12, 1819. <https://doi.org/10.3390/jmse12101819>.
10. Miklody D., Uitterhoeve W. M., van Heel D., Klinkenberg K., Blankertz B. Maritime Cognitive Workload Assessment. *Symbiotic Interaction*. Symbiotic 2016. Lecture Notes in Computer Science, vol 9961. Springer, 2027. Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-57753-1_9.

11. Main L. C., Wolkow A., Chambers T. P. Quantifying the Physiological Stress Response to Simulated Maritime Pilotage Tasks: The Influence of Task Complexity and Pilot Experience. *J Occup Environ Med.* 2017. Nov; 59(11):1078-1083. <https://doi.org/10.1097/JOM.0000000000001161>.
12. NASA/TM—2018–219934. San Francisco Bar Pilot Fatigue Study, NASA Langley Research Center, Hampton, VA 23681-2199, 2018, p. 137. <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20190002704/downloads/20190002704.pdf>.
13. Tu E, Zhang G., et al. Exploiting AIS Data for Intelligent Maritime Navigation: A Comprehensive Survey, *Computer Science. Other Computer Science*, Vol.1606.00981, 2016. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1606.00981>.
14. Singh S. K., Heymann F. Machine Learning-Assisted Anomaly Detection in Maritime Navigation Using AIS Data. *Electrical Engineering and Systems Science. Signal Processing*, Vol. 2002. 05013, 2020. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2002.05013>.
15. Nguyen D. et al. A Multi-task Deep Learning Architecture for Maritime Surveillance using AIS Data Streams. *Computer Science. Machine Learning*, Vol. 1806.03972, 2018. <https://doi.org/10.1109/DSAA.2018.00044>.
16. Xue J., Yang P., et al. Machine Learning in Maritime Safety for Autonomous Shipping: A Bibliometric Review and Future Trends. *J. Mar. Sci. Eng.* 2025, 13, 746. <https://doi.org/10.3390/jmse13040746>.
17. Jiang Y, Tang Z, Liu H, et al. Work-Life Conditions as the Primary Determinant of Seafarer Mental Health: An Explainable Machine Learning Analysis. *INQUIRY: The Journal of Health Care Organization, Provision, and Financing.* 2026;63. <https://doi.org/10.1177/00469580261438708>.
18. Ma X., Liu Q., et al. Machine learning-based multimodal fusion recognition of passenger ship seafarers' workload: A case study of a real navigation experiment, *Ocean Engineering*, Vol. 300, 2024, 117346, ISSN 0029-8018, <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.117346>.
19. Zhang X. et al. Towards operational safety in maritime transportation: a neurophysiological workload measurement using deep learning, *Ocean Engineering*, 2026.
20. Volume 351, Part 2, 2026, 124399, ISSN 0029-8018, <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2026.124399>.
21. Петровський А. В. Динамічна модель розрахунку рівня втоми штурмана – Predictive fatigue index, *Науковий вісник Херсонської державної морської академії*, Т(31), 2025, С. 199–208 <https://doi.org/10.33815/2313-4763.2025.2.31.199-208>.

REFERENCES

1. Fan, S., Yang, Z. (2024). Accident data-driven human fatigue analysis in maritime transport using machine learning, *Reliability Engineering & System Safety*, Volume 241, 109675, ISSN 0951-8320, <https://doi.org/10.1016/j.ress.2023.109675>.
2. F. Crestelo Moreno, V. Soto-López, J. A. García Maza, M. (2026). Sernaglia, Fatigue as a latent risk factor in maritime safety systems: A systematic review and implications for reliability analysis, *Reliability Engineering & System Safety*, Volume 267, Part B, 111930, ISSN 0951-8320, <https://doi.org/10.1016/j.ress.2025.111930>.
3. Matsangas, P., & Shattuck, N. L. (2018). Discriminating Between Fatigue and Sleepiness in the Naval Operational Environment. *Behavioral Sleep Medicine*, 16(5), 427–436. <https://doi.org/10.1080/15402002.2016.1228645>.

4. Kerkamm, F., Dengler, D. et al. (2021). Measurement Methods of Fatigue, Sleepiness and Sleep Behaviour Aboard Ships: A Systematic Review. *Int J Environ Res Public Health*. Vol.19(1):120. <https://doi.org/10.3390/ijerph19010120>.
5. Ma, M., Liao, R. (2025). Factors affecting seafarers' fatigue: a scoping review. *Front Public Health*. Vol.13:1647685. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2025.1647685>.
6. Yisi Liu, Zirui Lan, Jian Cui, Gopala Krishnan, Olga Sourina, Dimitrios Konovessis, Hock Eng Ang, Wolfgang Mueller-Wittig (2020). Psychophysiological evaluation of seafarers to improve training in maritime virtual simulator, *Advanced Engineering Informatics*, Vol.44, 101048, ISSN 1474-0346, <https://doi.org/10.1016/j.aei.2020.101048>.15 Mao S. et al. (2016).
7. Mao, S., Tu, E, Zhang, G. et al. (2016). An Automatic Identification System (AIS) Database for Maritime Trajectory Prediction and Data Mining, *Computer Science > Databases*, 1607.03306, <https://doi.org/10.48550/arXiv.1607.03306>.
8. Moreno, F., Soto-López, V. et al. (2024). Fatigue as a key human factor in complex sociotechnical systems: Vessel Traffic Services. *Front. Public Health*, Vol.11:1160971. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2023.1160971>.
9. Cao-Feijóo, G., Pérez-Canosa, J. M. et al. (2024). Deep Learning Methods to Mitigate Human-Factor-Related Accidents in Maritime Transport. *J. Mar. Sci. Eng.*, 12, 1819. <https://doi.org/10.3390/jmse12101819>.
10. Miklody, D., Uitterhoeve, W. M., van Heel, D., Klinkenberg, K., Blankertz, B. (2017). Maritime Cognitive Workload Assessment. *Symbiotic Interaction. Symbiotic 2016. Lecture Notes in Computer Science*, vol 9961. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-57753-1_9.
11. Main, L. C., Wolkow, A., Chambers, T. P. (2017). Quantifying the Physiological Stress Response to Simulated Maritime Pilotage Tasks: The Influence of Task Complexity and Pilot Experience. *J Occup Environ Med*. Nov;59(11):1078-1083. <https://doi.org/10.1097/JOM.0000000000001161>.
12. NASA/TM—2018–219934. (2018). San Francisco Bar Pilot Fatigue Study, NASA Langley Research Center, Hampton, VA 23681-2199, p. 137 <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20190002704/downloads/20190002704.pdf>.
13. Tu, E, Zhang, G. et al. (2016). Exploiting AIS Data for Intelligent Maritime Navigation: A Comprehensive Survey, *Computer Science. Other Computer Science*, Vol. 1606.00981, <https://doi.org/10.48550/arXiv.1606.00981>.
14. Singh, S. K., Heymann, F. (2020). Machine Learning-Assisted Anomaly Detection in Maritime Navigation Using AIS Data. *Electrical Engineering and Systems Science. Signal Processing*, Vol. 2002.05013, <https://doi.org/10.48550/arXiv.2002.05013>.
15. Nguyen, D. et al. (2018). A Multi-task Deep Learning Architecture for Maritime Surveillance using AIS Data Streams. *Computer Science. Machine Learning*, Vol. 1806.03972, <https://doi.org/10.1109/DSAA.2018.00044>.
16. Xue, J., Yang, P. et al. (2025). Machine Learning in Maritime Safety for Autonomous Shipping: A Bibliometric Review and Future Trends. *J. Mar. Sci. Eng.*, 13, 746. <https://doi.org/10.3390/jmse13040746>.
17. Jiang, Y., Tang, Z., Liu, H. et al. (2026). Work-Life Conditions as the Primary Determinant of Seafarer Mental Health: An Explainable Machine Learning Analysis. *INQUIRY: The Journal of Health Care Organization, Provision, and Financing*. 2026;63. <https://doi.org/10.1177/00469580261438708>.
18. Ma, X., Liu, Q. et al. (2024). Machine learning-based multimodal fusion recognition of passenger ship seafarers' workload: A case study of a real navigation experiment, *Ocean Engineering*, Vol. 300, 117346, ISSN 0029-8018, <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.117346>.

19. Zhang, X. et al. (2026). Towards operational safety in maritime transportation: a neurophysiological workload measurement using deep learning, *Ocean Engineering*.
20. Volume 351, Part 2, (2026). 124399, ISSN 0029-8018, <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2026.124399>.
21. Petrovskiy, A. (2025). Dynamic model for calculating navigator fatigue level – Predictive Fatigue Index. *Scientific Bulletin of the Kherson State Maritime Academy Vol 31*, pp. 199–208, <https://doi.org/10.33815/2313-4763.2025.2.31.199-208>.

Petrovskiy A. V. CONCEPTUAL DYNAMIC MODEL OF OPERATOR FUNCTIONAL STATE CONSIDERING THE INTERACTION OF PHYSIOLOGICAL, COGNITIVE, AND OPERATIONAL FACTORS WITH ML-BASED CORRECTION

This article proposes a conceptual hybrid dynamic model of the operator functional state in maritime transport systems, taking into account the interaction of physiological, cognitive, and operational factors. The relevance of the study is driven by the significant impact of the human factor on maritime safety, particularly the influence of fatigue accumulation and cognitive workload fluctuations on decision-making processes and the occurrence of accidents in complex and time-constrained navigation conditions. Despite extensive research in this domain, most existing approaches to operator state assessment consider these factors separately, and do not provide an integrated and dynamically evolving representation of their interaction, which significantly limits their applicability in real-world operational environments. The proposed model introduces a unified framework for describing the temporal evolution of the operator's functional state as a multidimensional construct that combines physiological fatigue, cognitive workload, and operational context variables. The model reflects the cumulative and nonlinear nature of fatigue development, the variability and sensitivity of cognitive load to task demands, and the influence of external factors such as traffic density, environmental conditions, and operational complexity. Particular attention is given to the dynamic coupling between these components, which enables capturing feedback effects and interdependencies that are critical for realistic modeling of human performance in maritime systems. A key feature of the approach is the integration of a machine learning-based correction mechanism into the analytical core of the model. Specifically, gradient boosting is employed to approximate residual errors of the base conceptual model, allowing the identification of complex nonlinear relationships and latent dependencies that cannot be explicitly formalized. This hybrid structure ensures a balance between interpretability and predictive capability, preserving the transparency of the model while enhancing its adaptability to empirical data. Although the model is formulated at a conceptual level, it provides a basis for further formalization and numerical implementation in simulation and decision-support environments. The proposed approach can be used as a foundation for intelligent decision support systems in maritime transport, contributing to improved situational awareness, adaptive workload management, and enhanced navigation safety through a more comprehensive and flexible evaluation of operator performance.

Key words: operator fatigue; PFI index; maritime safety; ML; gradient boosting.

© Петровський А. В.

Статтю прийнято до редакції 29.04.2026

ТЕОРІЯ РУХУ СУДНА НА ПОВОРОТІ ПРИ БУКСИРУВАННІ ІЗ ВРАХУВАННЯМ ОСТАННІХ ДОСЯГНЕНЬ ТЕОРІЇ ТА ПРАКТИКИ

Товстокорий О. М., к.т.н., доцент, капітан далекого плавання, завідувач кафедри управління судном, Херсонська державна морська академія, м. Херсон, Україна, e-mail: otovstokory@gmail.com, ORCID: 0000-0003-3048-0028;

Нагрибельний Я. А., доктор педагогічних наук, професор, декан факультету судноводіння, Херсонська державна морська академія, Херсон, Україна, e-mail: yar1507@ukr.net, ORCID: 0000-0003-3266-5798;

Матейчук В. М., доктор філософії, доцент кафедри управління судном, Херсонська державна морська академія, м. Херсон, Україна, e-mail: mateichykv@gmail.com, ORCID: 0000-0001-9328-0651.

Об'єктом дослідження є процес повороту суден при буксируванні. Стаття присвячена з'ясуванню положення базових точок повороту судна при буксируванні. У буксируванні беруть участь мінімум дві одиниці: буксир і об'єкт буксирування. Положення базових точок є різними для кожного з учасників процесу буксирування. Від положення базових точок залежить траєкторія буксирного каравану. Спочатку визначаються базові точки для буксира та для об'єкта буксирування. З'ясовується, що при буксируванні під час повороту буксир можуть очікувати серйозні небезпеки: гірдінг і положення «в лежцатах», які можуть призвести до перекидання буксира.

Порівнюючи попередні джерела щодо цього питання з'ясовується, що процес повороту при буксируванні розглядався не так, як пропонує сучасна змістовна модель повороту судна.

Крім визначення базових точок повороту усіх учасників буксирування виникає потреба з'ясувати, як будуть рухатись буксир, об'єкт буксирування і буксирна лінія. Це також впливає на акваторію, яку займає буксирний караван при поворотах. Що впливає на безпеку плавання. Для пояснення цього питання розглядається приклад руху системи судно-буксир + сейсмічне обладнання, розкладається на компоненти і аналізується.

Також розглядається аварія, яка сталась з буксиром-якорезавізником завдяки гірдінгу.

У висновках показується положення базових точок повороту при буксируванні і зміна їхніх позицій при різних маневрах, у тому числі і при небезпечних ситуаціях «гірдінг» і «у лежцатах». Надаються рекомендації ММО щодо запобігання цих ситуацій і пропозиції, що потрібно робити, коли потрапили у положення «у лежцатах».

Ключові слова: буксир; об'єкт буксирування; гірдінг; положення «у лежцатах»; траєкторія руху; центр обертання; полюс повороту; буксирна точка.

DOI: 10.33815/2313-4763.2026.1.32.114-129

Вступ. Буксирування – операція, яка досить часто трапляється в морській практиці. Знання закономірностей руху суден буксирного каравану підвищує точність вирахування і нанесення на карту маршруту буксирного каравану, що в свою чергу, підвищує безпеку буксирного каравану. Крім того, при виконанні операції буксирування можуть трапитись небезпечні явища, які загрожуватимуть судну. Їх також потрібно знати, розглянути, проаналізувати і зробити висновки, як їх можна уникнути.

Буксирування – це операція, коли одне судно (буксир) тягне або штовхає інше судно або інший предмет.

Буксирування може бути аварійним або плановим.

У разі планового буксирування зазвичай використовують спеціальне судно (буксир), яке має буксирне спорядження і призначене для таких робіт. В офшорних компаніях багато буксирів, і буксирування – одна з основних операцій для них. Завдяки цьому слід говорити про заплановане буксирування.

Використовуючи новий погляд на поворот судна, змістовну модель повороту судна, потрібно використати їх для розгляду процесу буксирування. Це зможе оцінити процес буксирування з погляду врахування новітніх досягнень і, можливо, виявити якісь сторони цього процесу, які не враховувалися раніше і можуть бути небезпечними, якщо їх не взяти до уваги зараз, наприклад, явище гірдінгу.

Постановка проблеми. При розгляді процесу буксирування потрібно врахувати, як визначати базові точки процесу повороту при буксируванні, визначити, які небезпечні явища можуть виникнути і як їм запобігти.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Питання буксирування обговорюється давно і думки авторів на те, де знаходяться базові точки повороту як буксира, так і об'єкта буксирування розрізняються.

В [1] автори роз'яснюють основні положення буксирування без згадки про базові точки процесу буксирування.

У роботі [2] викладені загальні принципи морських буксировок, дані теоретичні і практичні основи і принципи розрахунку буксирних ліній і підбір буксирувальника, розглянуті різні схеми заведення і установки буксирної браги і буксирних пінів для буксування судів та інших плаваючих об'єктів, включаючи установки, обладнання та платформи.

В операції буксирування беруть участь як мінімум два об'єкти: буксир і об'єкт буксирування. Для того щоб ця операція вдалась, потрібно, щоб буксир за допомогою свого упору гвинта міг подолати опір як об'єкта буксирування, так і свій власний.

Автори в [3] вважають, що важливо розуміти вплив полюса повороту на будь-яке судно, але особливо на буксири під час буксирування. Знання полюса повороту допомагає капітану буксира зрозуміти, як буксирована одиниця буде керуватися в різних ситуаціях. Плавуча одиниця обертається навколо точки, розташованої вздовж її довжини, яка називається полюсом повороту, і коли прикладається сила, вона повертається навколо цієї точки. Ці сили можуть бути рухами керма, буксиром, який тягне в одному напрямку, вітром або течією. Положення полюса повороту змінюватиметься залежно від швидкості, осадки, підкілевого просвіту, розміру/типу керма, конструкції буксира та форми корпусу.

Також важливо розуміти, як змінюється полюс повороту буксированої одиниці. Судно або баржа, зупинені у воді без застосування зовнішніх сил, матимуть полюс повороту, що збігається з центром плавучості, який знаходиться приблизно посередині судна. Коли судно рухається вперед, полюс повороту рухатиметься вперед. Зазвичай, він рухатиметься приблизно на 25% довжини буксированого судна до носа під час руху вперед і навпаки, якщо рухатиметься назад.

Так автори [4] вважають, що полюс повороту (ПП) буксира знаходиться в 1/3 довжини судна від форштевня під час ходу вперед і переміщується в буксирну точку (БТ – точка, в якій сила буксирного троса прикладається до буксира) тоді, коли буксир потрапляє у “irons” (рис. 1).



Рисунок 1 – Положення ПП при ходові вперед і при ситуації “in irons”[4]

Капітан Cauvier Н. у [5] вважає, що, якщо при ходові судна назад буксир, який діє на укол у кормовій частині судна пересуває ПП судна в $1/3$ довжини судна від форштевня.

Капітан Butusina Р. у [6] пояснює, що, якщо судно не має ходу відносно води і буксир штовхає його в районі міделя судна, судно буде рухатись лагом. Якщо ж буксир переміститься в корму від міделя, ПП переміститься вперед і буде далеко попереду за межами судна. При подальшому русі буксиру в корму ПП буде наблизитися до судна, перейде в межі корпусу і буде рухатися далі поки буксир не досягне корми. Якщо ж буксири з різних боків з однією силою і на однакових відстанях від міделя будуть штовхати судно. Воно буде обертатися навколо центра бокового опору.

Автори в [7] та [8] розглядають варіант руху судна лагом під дією двох буксирів. Вони вважають, що полюс повороту переміщується всередині корпусу судна.

Автори в [9, 10, 11] висловлюють сумнів у правильному розгляді положення полюса повороту, а в [10] висловлює точку зору, що положення полюса повороту при дії буксира враховується неправильно.

Автори в [12], [13] пропонують нову схему повороту судна. Згідно з цією схемою при виконанні повороту потрібно знати положення таких точок:

– Центр обертання (ЦО), точка, в якій момент інерції судна є найменшим і від якої відраховуються всі бокові сили і моменти цих сил, а також плече ПП. При прикладанні бокової сили в ЦО обертального руху не відбувається. Відбувається лише поступальний рух у бік дії бокової сили. ЦО зміщується назустріч потокові води і на відстань пропорційну поздовжній швидкості;

– Полюс повороту (ПП) – точка, навколо якої повертається судно, дрейф дорівнює 0 і бокова швидкість дорівнює 0.

Для керування кутовим рухом на більшості суден використовується одне стерно. Відхилення стерна, крім створення керуючого моменту, призводить також і до появи бокової сили. Бокова сила і керуючий момент викликають появу бокового і кутового руху одночасно. [1].

На рисунку 2 наведено графічне уявлення полюса повороту судна.

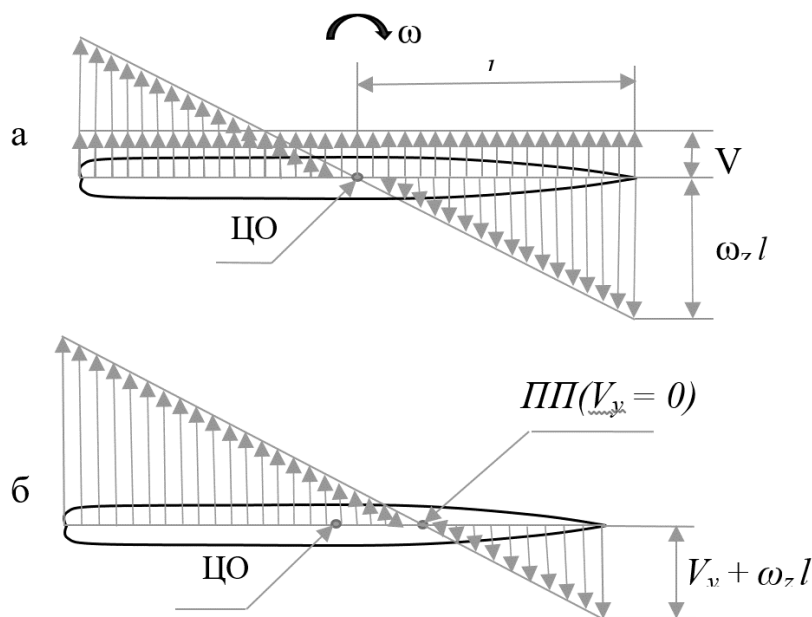


Рисунок 2 – Графічне уявлення про полюс повороту:

- а) епюри швидкостей бокового і кутового руху навколо ЦО
- б) сума епюр швидкостей бокового і кутового руху навколо ЦО

Як видно із рис. 2.б), нульове значення сумарної бокової швидкості виявилось зміщеним на відстань R від центру обертання. Це положення називається полюсом повороту. Два рухи, наведені на рис. 2.а) та сумарний рух, наведений на рис. 2.б), являються

еквівалентними, а значить, боковий і кутовий рух навколо ЦО можуть бути замінені одним кутовим рухом навколо ПП. Положення полюса повороту R можна знайти у аналітичному вигляді, виходячи із умови $V_y + \omega_z R = 0$ звідки,

$$R = -\frac{V_y}{\omega_z} \quad (1)$$

де R – відстань від ЦО до ПП, м;

V_y – бокова швидкість судна, м/сек;

ω_z – кутова швидкість судна у каналі рискання, град/сек [14].

У випадку, коли обертального руху немає, кутова швидкість $\omega_z = 0$. Згідно з формулою (1) у такому випадку отримуємо невизначеність при діленні на 0. Тобто, ПП знаходиться в нескінченності, що відповідає прямолінійному поступальному руху і відсутності обертального. Ця формула використовується в усіх випадках визначення положення ПП.

У роботі [15] автор показує, як можна розрахувати положення ЦО та ПП на практиці.

Багато уваги приділяється подоланню небезпечних явищ, таких, як «гірдінг». Під впливом зовнішніх факторів, коли судно, зазвичай буксир, буксирується лагом до буксирної лінії і не може вийти з цього положення, створюється ситуація, яка називається «гірдінг» (girding).

Так, у роботах [16] (рис. 3), [17] (Рис 4.) та [3] Рис. 5) показані приклади утворення «гірдингу».



Рисунок 3 – Приклад гірдингу, що трапився при буксируванні баржі [16]

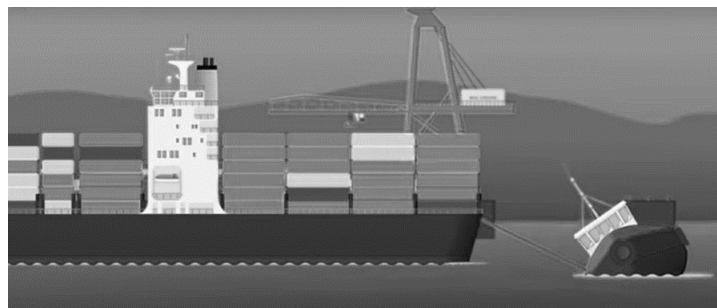


Рисунок 4 – Приклад гірдингу, що трапився при роботі буксиру в кормі судна як утримувача [17]

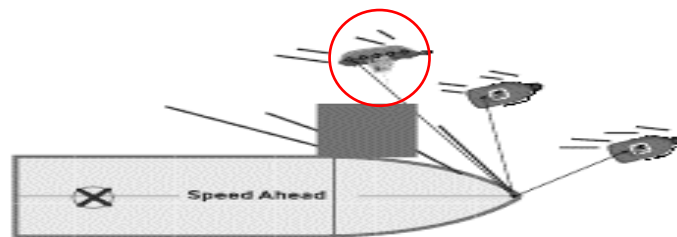


Рисунок 5 – Приклад гірдингу, коли в таку ситуацію потрапляє буксир закріплений на носу судна [3]

Фактори, які можуть призвести до ситуації «гірдингу»:

- Придатність буксира – потужність, розмір, маневреність та видимість.
- Довжина буксирного троса – короткі троси зменшують час реакції.
- Точка буксирування – створює негативну силу стійкості.
- Характеристики буксирувального троса – розмір, вага, імпульс.
- Кут буксирного троса.
- Умови навколишнього середовища – вітер, приплив, течія, глибина води.
- Водонепроникність буксира [16].

Прикладів, коли при гірдингу сталися аварії буксирів, було декілька [16, 17, 21, 22].

Найбільш резонансним була катастрофа буксиру-якорезавізника “Bourbon Dolphin” [22].

12.04.2007 буксир-якорезавізник “Bourbon Dolphin” працював на завезенні якорів для напівзануреної бурової “Transocean Rather” у Норвезькому морі. Глибина моря була 1100 м і завозились якорі з якірними лініями довжиною близько 3500 м, які складались з ланцюгів і тросів. На той час погодні умови були наступними: південно-західний вітер до 35 вузлів і хвилювання з висотою значних хвиль близько 3,5 м, а максимальних – до 7 м.



Рисунок 6 – Судно Bourbon Dolphin
в 16.31 12.04.2007 р., [22]

На час 16.31 “Bourbon Dolphin” витравив вже 1817 м ланцюга і приблизно 220 м троса. (рис. 6). Хвилювання і вітер зносили його з курсу. На цей час він був на дистанції 2119 м від місця покладання якоря і на 948 м був знесений від лінії прокладки якоря. “Bourbon Dolphin” маневрував, щоб продовжити якорезавезення. Якірна лінія лежала на палубі між двома буксирними штифтами правого борту. Ліві штифти були в наступному стані: внутрішній був опущений, а зовнішній – піднятий. “Bourbon Dolphin” намагався наблизитись до лінії прокладання якоря, машини працювали з максимальним навантаженням. Якірна лінія перемістилась ліворуч, буксир почав хилитися на лівий борт. Внутрішній штифт правого борту опустили. Якірна лінія перемістилась до зовнішнього штифта лівого борту. Трохи пізніше “Bourbon Dolphin” збільшив крен на лівий борт. Правий двигун зупинився, трапилось знеструмлення. О 17.08 “Bourbon Dolphin” перевернувся [22].

Після декількох подібних аварій, завершальною з яких була аварія “Bourbon Dolphin”, міжнародні морські організації, такі як ММО, класифікаційні товариства і інші організації, пов’язані з цією тематикою, встановили нові вимоги до суден, які зайняті в буксируванні, якорезавезенні і подібних операціях, стосовно нормування безпеки при проведенні таких операцій [18, 23]. Це стосується в першу чергу норм остійності. Вказується, що судна, зайняті в буксирувальних операціях, повинні мати достатній запас остійності, щоб протидіяти моменту, що нахилає, який виникає від дії буксирної лінії без загрози безпеки судну-буксиру [24].

Мета та задачі дослідження. Метою дослідження є визначення положення базових точок повороту при буксируванні і використання їх під час керування буксирним караваном при виконанні поворотів і при запобіганні виникненню небезпечних ситуацій.

Задачі дослідження. Задачами дослідження є: аналіз літературних джерел та пошук аналогів і прототипів; розробка схеми повороту буксирного каравану, з урахуванням переміщення базових точок під час маневру, послідовності дій при повороті буксирного каравану з використанням концепції полюса повороту.

Викладення основного матеріалу. Положення базових точок змістовної моделі повороту об'єкта буксирування. При буксируванні караван може рухатись зі швидкістю, яка не перевищуватиме максимальної, тобто, коли опір всього каравану не перевищуватиме максимального упору гвинта. Оскільки стернування буде відбуватися шляхом пера чи пер керма, що розташовані в кормі, полюс повороту (ПП) буксиру буде розташований у носовій частині судна [13].

Під час повороту судна картина змінюється.

Потрібно буде враховувати також положення буксирної точки (БТ) – точки, в якій сила натягу буксирного троса прикладається до буксира [4].

В ідеалі БТ має бути розташована в ЦО [13], щоб надати буксиру максимальну свободу обертання при стернуванні. Ось чому буксирну лебідку встановлюють якомога далі вперед від корми та якомога ближче до ЦО, наскільки це можливо. Буксирна лебідка розташована щонайближче від ЦО, а полюс повороту (ПП) без об'єкта буксирування при керуванні судна звичайним кермом, яке розташоване в кормі судна, зазвичай розташований на центральній лінії приблизно на одній третині довжини буксира від носа. Точки ЦО та ПП – базові точки змістовної моделі повороту судна [13]. З практичного погляду, БТ позначається як буксирна лебідка або буксирні кнехти, якщо вони встановлені або додаткові елементи, на які може опиратися буксирний трос при маневруванні.

Однак при розташуванні буксирної БТ близько до ЦО при напрямку буксирної лінії перпендикулярно до ДП виникає дуже висока ймовірність гирдингу. «Гирдинг» – це ситуація, коли судно, зазвичай буксир, буксирується лагом до буксирної лінії і не може вийти з цього положення.

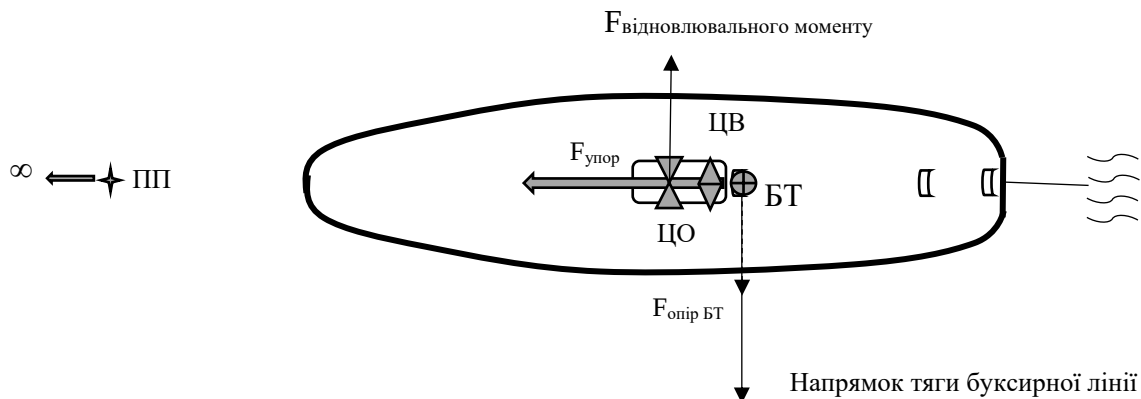


Рисунок 7 – Ситуація гирдингу, коли напрямок тяги буксирної лінії стає перпендикулярним до діаметральної площини буксира. Сили, що діють під час буксирування у горизонтальній площині

Що стосується горизонтальної площини, то на рис. 7 видно, що боковими силами, які діють в протилежних напрямках і намагаються перебороти одна одну є сила тяги буксирної лінії і сила відновлювального моменту. З погляду безпеки нам потрібно, щоб відновлювальний момент завжди був не менший ніж момент сил, що накренають.

Тепер розглянемо дію бокових сил у вертикальній площині (рис. 8).

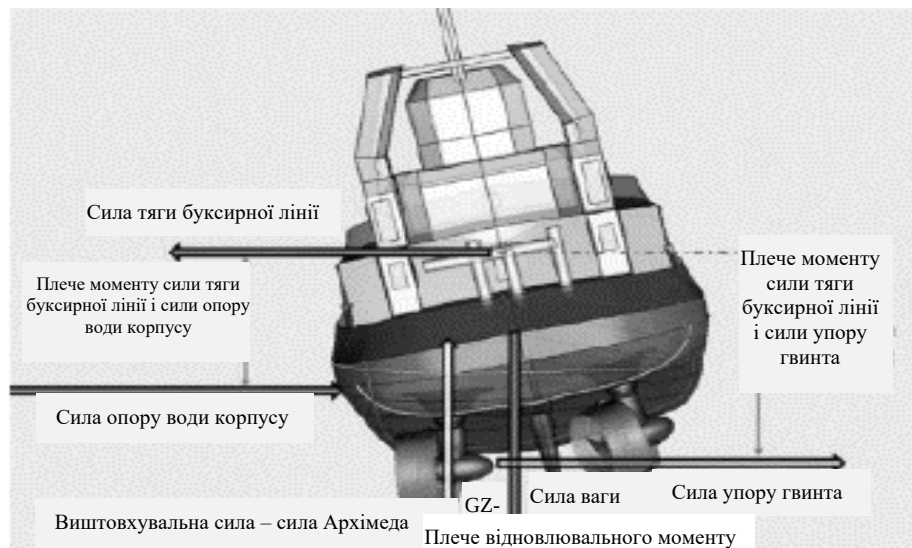


Рисунок 8 – Сили, що діють під час буксирування у вертикальній площині [3]

Якщо напрямок буксирної лінії опиниться перпендикулярним до діаметральної площини буксира (рис. 7), то в вертикальній площині на нього буде діяти момент, що нахилиє, створений силою тяги буксира, яка прикладена до БТ, та силою опору води, яка прикладена до центру бокового опору, точки, яка при відсутності поздовжньої швидкості співпадає з центром величини ($\text{Ц}_{\text{вел}}$) – центром підводної частини буксира. Протистояти цьому моменту буде відновлювальний момент, утворений силою ваги, яка прикладена до ЦВ, і силою Архімеда (виштовхувальною), яка прикладена до $\text{Ц}_{\text{вел}}$. До сил, які утворюють ці моменти, може додаватись поперечна складова сили упору гвинта в той чи інший бік залежно від перекладки керма (рис. 8). Якщо момент, що нахилиє, перебільшить відновлювальний момент, судно може перекинутись. Горизонтальний момент, який утворюється силою тяги буксирної лінії, що прикладена до БТ і силою відновлювального моменту, яка прикладена до ЦО, буде досить малим і не впливатиме на переміщення базових точок і напрямку руху буксира через те, що БТ розташована щонайближче до ЦО.

Цій проблемі приділяється увага і в світовому морському співтоваристві. Так, у [18] судам-постачальникам в офшорі присвячувалася глава 4.5 "Offshore supply vessels", де перераховані критерії остійності для таких суден. Після катастрофи з «Bourbon Dolphin» ММО прийняло Resolution IMO A.749(18) [23], де були прийняті обмеження для максимально допустимих вертикальних та горизонтальних (поперечних) сил/натягів, які може випробувати судно в найбільш несприятливих умовах для поперечних сил/натягів до досягнення максимального кута крену, обмеженого одним з наступних кутів, залежно від того, який з них менший:

1. Кут крену еквівалентний значенню GZ , що відповідає 50% від GZ_{max} ;
2. Кут заливання робочої палуби, причому палуба вважається плоскою;
3. 15° .

Між буксиром і об'єктом буксирування можуть бути великі відносні рухи. Між буксирним тросом і кормою буксира також можуть бути значні відносні рухи, особливо поворот або зміщення в поперечному напрямку. Обладнання для контролю цих рухів еволюціонувало протягом історії буксирування. Зараз для цього використовують вертикальні обертальні вали на кормі (Stern Rollers), норманські штифти (Norman pins) (рис. 9), стаціонарний гоб(гог) (рис. 10а), гоб-ланцюг (Gob Chain) (рис. 10б), тросові відтяжки (рис. 11) [3].

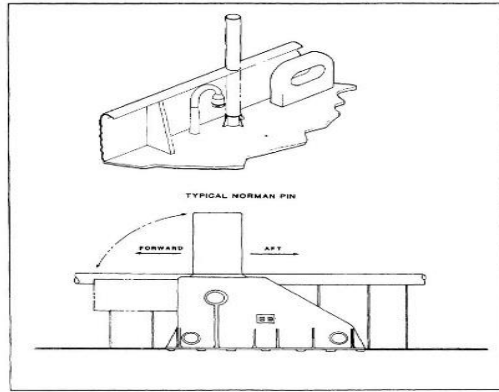


Рисунок 9 – Норманські штифти (Norman Pins [4])



а)



б)

Рисунок 10 – Стационарний гоб (гоб) – пристрій для запобігання ризику буксирного троса (а), та Гоб (гоб) ланцюг – пристрій для запобігання ризику буксирного троса (б). Фото автора

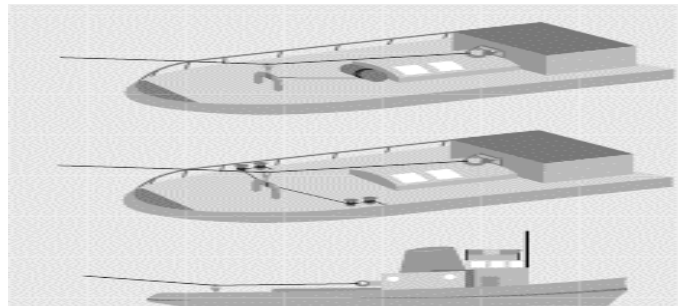


Рисунок 11 – Встановлення тросової відтяжки [3]

Як видно з рис. 5 при гирдінгу судно розташовується лагом до буксирної лінії і не може виконувати обертальний рух. А якщо обертального руху немає, то немає кутової швидкості і, згідно з формулою (1) ПП розташовується по лінії ДП у нескінченності. А БТ співпадає з ЦО, який за відсутності поздовжнього руху буксира співпадає з ЦВ.

Шляхом зміщення точки буксирування в корму або за допомогою відтяжки з ланцюга або тросу схильність до гирдінгу буксира можна покращити на конвенційних буксирах (рис. 11). Гоб-трос або ланцюг, який іноді називають вуздечкою, – це короткий трос або ланцюг, який швидко приєднуються до буксирної лінії в кормовій частині буксира. Таким чином, використання відтяжки ефективно переміщує точку буксирування назад, ближче до корми буксира. Це надає капітану буксира більший контроль і забезпечує більшу маневреність, щоб запобігти гирдінгу, коли буксир виконує роль кормового буксира. Деякі портові адміністрації вимагають, щоб усі конвенційні буксири використовували відтяжку.

Тросова відтяжка (також її називають вуздечкою) може бути встановлена різними способами, включаючи спосіб, зазначений на рисунку 11б, які використовують довжину троса, закріплену на буксирі, який проходить через клюз або відповідний кронштейн на центральній лінії робочої палуби. На кінці троса утримується велика скоба, яка кріпиться навколо буксирної лінії. Велика скоба вільно ковзає вздовж буксирної лінії. Коли буксирна лінія рухається до борту буксира, трос вуздечки натягується і утримує точку буксирування в кормі і близько до середини судна. Іншим методом встановлення тросової відтяжки є наявність окремої лебідки з тросом, який виконує роль відтяжки, що веде через вертлюг, розташований на центральній лінії в кормі буксира. Скоба використовується для ковзання вздовж буксирної лінії, а лебідка використовується для варіювання довжини гоб-тросу. Очевидно, що довжину не можна змінюватись, коли гоб-трос знаходиться під натягом [3].

Завдяки цим пристроям ймовірність гірдинга значно зменшується і капітану буксира потрібно тільки моніторити натяг буксирного троса, щоб він не перевищував дозволені межі [18, 23, 24].

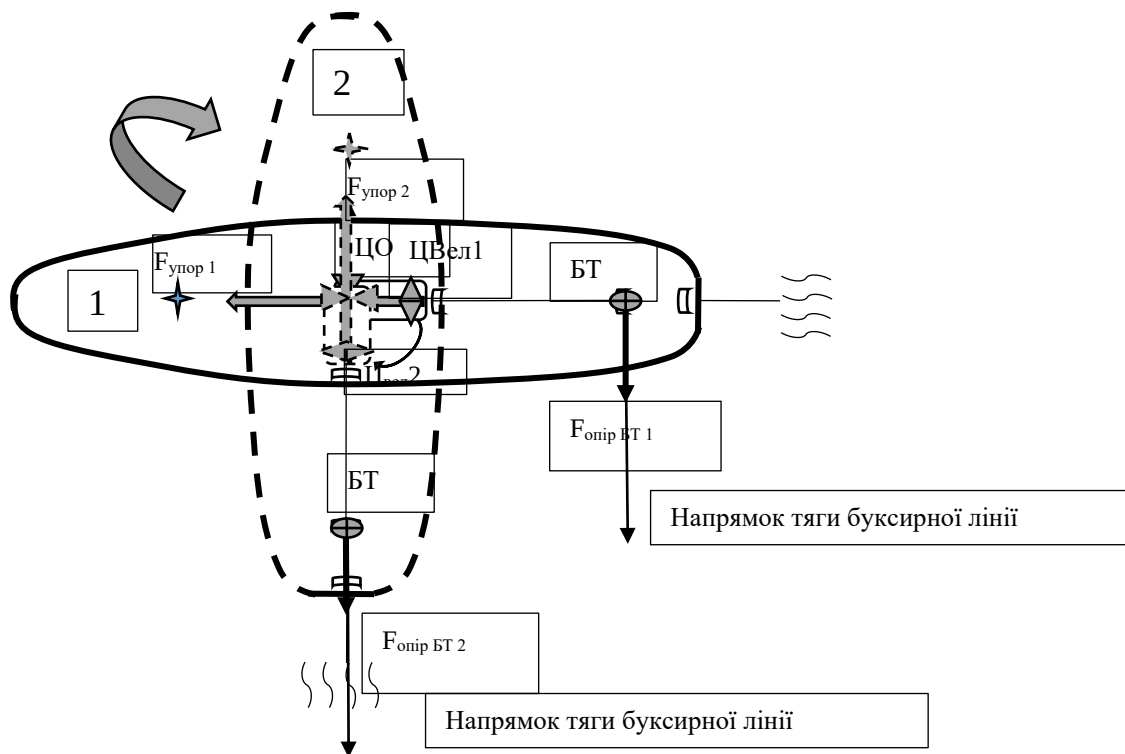


Рисунок 12 – Розворот у горизонтальній площині буксира, що має хід вперед, під дією пари сил: сили натягу буксирного каната, прикладеного до БТ, що перенесена більше в корму, і сили опору води, що прикладена в Ц_{вел}

У разі, коли буксир йде вперед і БТ перенесена в корму від ЦВ, при напрямку буксирної лінії перпендикулярно діаметральній площині, сила натягу буксирної лінії, що прикладена до БТ і сила опору води, що прикладена до Ц_{вел}, який розташовується на одній вертикалі є ЦВ, утворюють пару сил, що прагне розвернути буксир з положення 1 до положення 2 (рис. 12). Якщо протидії цій парі сил немає, то буксир так і розвертається і запобігає гірдингу. Це відбувається тому, що у положенні 1 відновлювальний момент залежить від поперечної метацентричної висоти, а в положенні 2 – від поздовжньої метацентричної висоти, яка в багато разів більша і тому остійність судна в багато разів більша в поздовжньому напрямку, ніж у поперечному.

Але завданням буксира є відбуксирувати якийсь об'єкт у задану точку, тому він має використовувати тягу гвинта для утворення поздовжньої швидкості і перо керма для відхилення потоку від гвинта і утворення сили в потрібному напрямку (рис. 13), де

$F_{\text{упор}}$ – упор гвинта буксира;

$F_{\text{опір}}$ – сила опору води буксира;

$F_{\text{упор}} - F_{\text{опір}} = F_{\text{тяги}}$ – сила тяги буксира;

$F_{\text{опір БТ}}$ – сила тяги буксирної лінії (опір об'єкта буксирування);

$F_{\text{опір БТ Х}}$ – сила тяги буксирної лінії – поздовжня складова;

$F_{\text{опір БТ У}}$ – сила тяги буксирної лінії – поперечна складова;

$F_{\text{опір К}}$ – сила опору води перекладеному керму;

$F_{\text{опір К Х}}$ – сила опору води перекладеному керму – поздовжня складова;

$F_{\text{опір К У}}$ – сила опору води перекладеному керму – поперечна складова.

Для запобігання гирдінгу БТ пересувають якомога далі в корму. Уявімо, що БТ розташована максимально в кормі, у районі розташування вертикальних обертальних валів. Перо керма розташоване також у кормі і залежно від конструкції центр пера керма може бути також на одній вертикалі з БТ.

Розкладемо силу тяги буксирної лінії $F_{\text{опір БТ}}$ на поздовжню $F_{\text{опір БТ Х}}$ та поперечну $F_{\text{опір БТ У}}$ складові. Силу опору води перекладеному керму $F_{\text{опір К}}$ також розкладемо на поздовжню $F_{\text{опір К Х}}$ та поперечну $F_{\text{опір К У}}$ складові.

Для руху вперед, як вже було згадано вище, тяга гвинта $F_{\text{тяги}}$ має перевершувати сумарний опір буксира $F_{\text{опір}} + F_{\text{опір К Х}}$ і об'єкта буксирування $F_{\text{опір БТ Х}}$.

Поперечні ж складові сили тяги буксирної лінії $F_{\text{опір БТ У}}$ та сили опору води перекладеному керму $F_{\text{опір К У}}$ будуть протидіяти одна одній і ускладнювати керування судном. Положення БТ і натяг буксирного троса створюють момент, який протидіє моменту керма і обмежує поворотний рух буксира. Здатність буксира до утримування курсу стає все більш ускладненим, оскільки точка буксирування переміщується далі назад. Цей вплив посилюється на низькій або нульовій швидкості [4]. При цьому буксир стає нездатним змінювати курс. Це є положення, коли буксир потрапляє в положення “в кайданах” (“in irons”). Термін “в кайданах” (“in irons”) [4] вважаю краще замінити терміном “в лещатах”, який показує, що судно двома боковими силами затиснуте в такому положенні, що не може змінити курс, використовується для опису умов, коли протидіючий момент буксирного троса такий самий або більший за поворотний момент, створюваний кермом та іншими гідродинамічними силами. Тоді буксир стає нездатним керувати. Це може статися, коли сили $F_{\text{опір К У}}$ та $F_{\text{опір БТ У}}$ будуть дорівнювати одна одній. У цей момент БТ перетворюється в точку з необмеженим опором [12, 13]. Тому ЦО переміщуються в БТ. Буксир не може змінювати курс. Ситуація стає схожою з гирдінгом. Раз буксир не може змінювати курс, обертального руху немає і ПП знов по лінії ДП у нескінченності.

Як тільки буксир пересилує тягу буксирної лінії, знов з'являється поздовжня швидкість, ЦО переміщується в положення попереду ЦВ і буксир стає керованим. А положення «в лещатах» є дуже небезпечним. При перенесенні БТ у корму все одно зберігається небезпека гирдінгу і перекидання судна. Це дуже схоже на катастрофу буксир-якорезавізника “Bourbon Dolphin” [22].

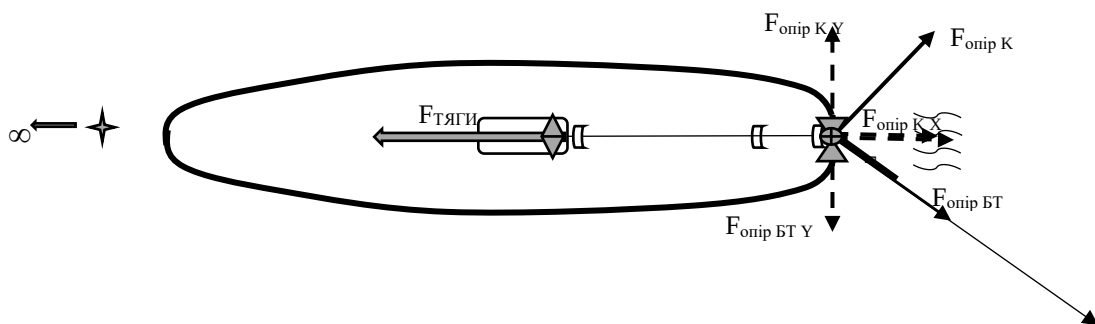


Рисунок 13 – Ситуація, коли буксир опиняється «в лещатах»

Положення базових точок змістовної моделі повороту об'єкта буксирування. Тепер розглянемо положення базових точок змістовної моделі повороту судна на об'єкті

буксирування. Положення ЦВ вираховується по вантажному плану об'єкта буксирування. Положення ЦО при відсутності ходу співпадає з положенням ЦВ. При початку руху положення ПП залежить від положення точки прикладання бокової сили. Сила тяги буксира прикладена до БТ об'єкту буксирування, яка знаходиться в його передній частині. При прямолінійному русі ПП об'єкта буксирування знаходиться в нескінченності.

При рисканні об'єкта буксирування ситуація стає схожою з рисканням судна навколо якірного ключа при стоянці судна на якорі. (При стоянці на якорі судно виконує складний рух: рух відносно якірного ключа, який виступає в якості точки з необмеженим опором, і рух самого якірного ключа відносно якоря або частини якірного ланцюга, який занурений у ґрунт – залежно від навантаження). Тобто, рискання відбувається відносно БТ об'єкта буксирування, який розташований у носовій частині судна.

На тренажері "Navi-Trainer Professional 5000" (Wärtsilä) був проведений експеримент повороту буксира з об'єктом буксирування. На рис. 14 показані результати експерименту. З цього рисунку можна зробити висновок, що при повороті буксира з об'єктом буксирування останній повторює траєкторію буксира з більшим виносом на зовнішній бік повороту за рахунок інерції прямолінійного руху об'єкта буксирування, який намагається змінити буксир шляхом прикладання бокової сили, прикладеної в носовій частині об'єкта буксирування.

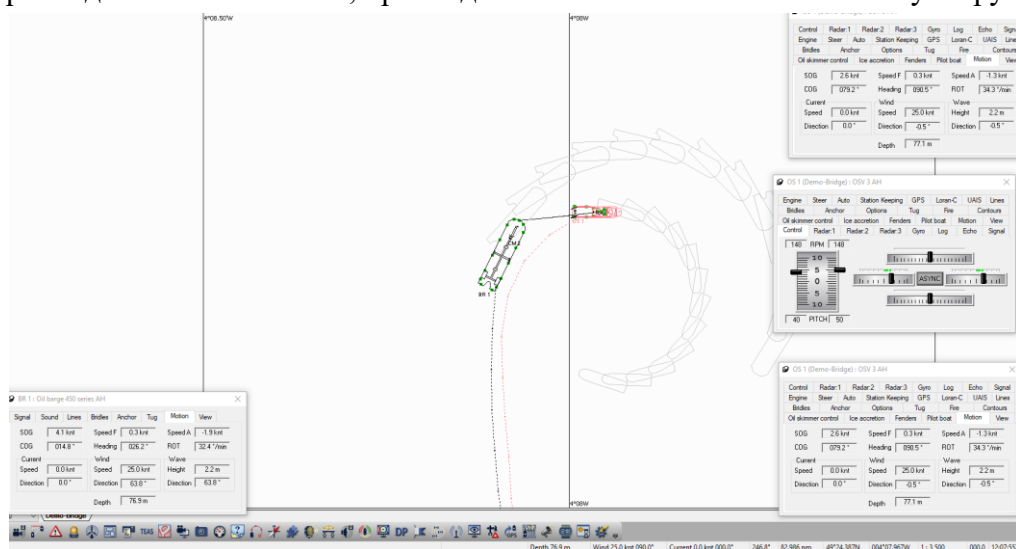


Рисунок 14 – Поворот буксира з об'єктом буксирування.

Скан 1 з тренажера "Navi-Trainer Professional 5000" (Wärtsilä). Фото автора

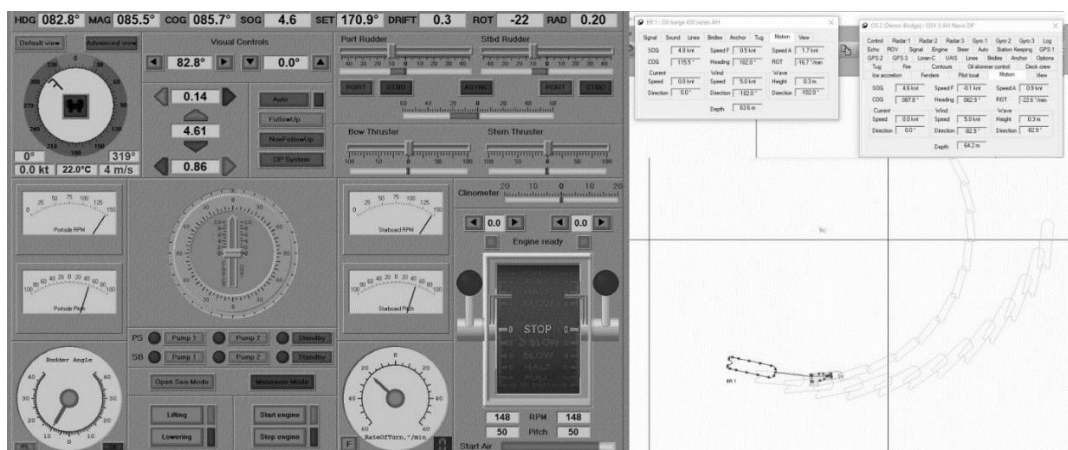


Рисунок 15 – Поворот буксира з об'єктом буксирування.

Скан 2 з тренажера "Navi-Trainer Professional 5000" (Wärtsilä). Фото автора

На лівій частині рис. 15 показана панель керування буксиром, а на правій – траєкторія руху буксира і об'єкта буксирування і числові дані повороту буксира і об'єкта буксирування. Для об'єкта буксирування БТ буде в місці кріплення буксирного троса до

об'єкта буксирування, тобто в носовій частині. ЦО знаходиться також у БТ. Розташування ПП залежить від бокових швидкостей носа та корми. Якщо в даному випадку вони спрямовані в один бік (у бік лівого борту), то ПП буде попереду носу судна. Якщо ж швидкості будуть різноспрямованими (у бік різних бортів), то ПП буде в межах корпусу судна ближче до кінця судна, де бокова швидкість менша.

При зміні напрямку руху буксира, наприклад, з напрямку за годинниковою стрілкою на напрямок проти годинникової стрілки, об'єкт буксирування також змінює сторону руху відносно шляху буксира, залишаючись завжди на зовнішньому боці від руху буксира (рис. 16).

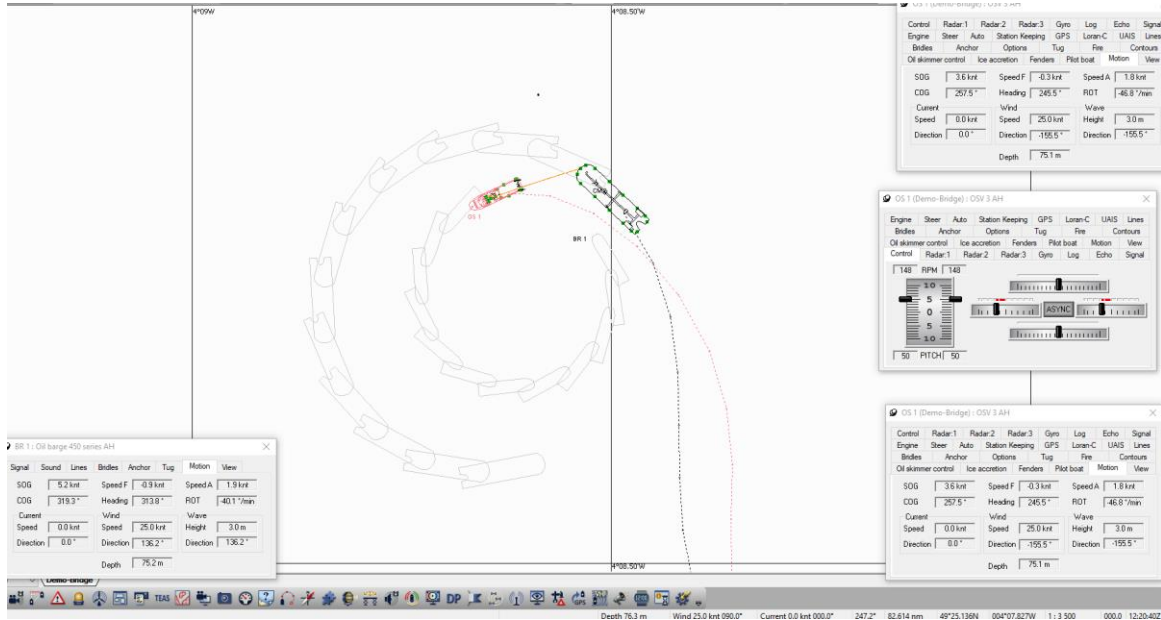


Рисунок 16 – Траєкторія повороту буксира з об'єктом буксирування при зміні напрямку руху.
Скан 3 з тренажера "Navi-Trainer Professional 5000" (Wärtsilä). Фото автора

При русі судна лагом під дією двох буксирів [7, 8] автори вважають, що ПП рухається вперед – назад залежно від напрямку руху судна і не виходить за межі корпусу судна. Цей випадок розглянутий у [15]. При однаковій швидкості обох буксирів – відсутність поздовжньої швидкості. ЦО співпадає з ЦВ. ПП – у нескінченності.

При наявності різниці в швидкості руху буксирів, коли вони обидва рухаються в одному напрямку – ЦО зміщується в бік буксира з меншою швидкістю. ПП буде розташовуватись за межами судна в напрямку буксира з меншою швидкістю.

Це тлумачення базується на новому баченні змістовної моделі повороту судна, викладеному в статтях [12, 13].

Основні результати та їх обговорення.

1. У статті показано, що положення базових точок повороту, показане в джерелах [3, 4, 7, 8], не відповідає дійсності.
2. Завдяки цьому пояснення ситуацій “girding” («гірдінг») та “in irons” («в лещатах») також не відповідає дійсності.
3. Надані пояснення ситуацій “girding” («гірдінг») та “in irons” («в лещатах») з урахуванням останніх досягнень теорії та практики.
4. Додане поняття буксирної точки (БТ) – точки, в якій сила натягу буксирного троса прикладається до буксира, яка входить до переліку базових точок повороту буксира.
5. Також до переліку базових точок повороту буксира входить центр величини – центр підводної частини буксира.
6. Використовуючи тренажер "Navi-Trainer Professional 5000" (Wärtsilä) автори дослідили траєкторію руху буксира з об'єктом буксирування.

Висновки.

– При розрахунку повороту буксира беруться до уваги наступні базові точки: центр ваги (ЦВ), центр величини (Ц_{всл}), центр обертання (ЦО), буксирна точка (БТ), полюс повороту (ПП).

– При буксируванні за кормою на тросі ЦО буксира – попереду ЦВ, ПП – попереду ЦО в межах корпусу судна.

– При положенні «гирдінг» ЦО буксира – в БТ, ПП – у нескінченності.

– При положенні «в лещатах» – ЦО буксира – у БТ, ПП – у нескінченності. Це положення схоже на положення «гирдінг».

– При положенні буксира близькому до положення «в лещатах» – ЦО буксира переміщується в бік БТ, ПП – переміщується вперед за межі судна.

– При русі вперед БТ об'єкта буксирування попереду ЦВ, ЦО співпадає з БТ, ПП – попереду ЦО за межами корпусу об'єкта буксирування.

– При буксируванні буксир рухається по наміченій планом переходу траєкторії переднім ходом.

– Об'єкт буксирування рухається по траєкторії, яка асимптотично прагне до траєкторії буксира. При поворотах траєкторія руху об'єкта буксирування буде розташовуватись із зовнішнього боку повороту.

– Для виходу з положення «в лещатах» потрібно збільшення потужності, якщо є така можливість, і продовження руху вперед. Як можливості збільшення потужності вже немає, можна зменшити потужність, надати можливість буксирній лінії розвернути буксир вздовж буксирної лінії і потім знов збільшувати потужність. Це збільшить остійність буксира і завадить небезпеці. Розігнавши буксирний караван до можливої швидкості на новому курсі, можна починати поступовий перехід на попередній курс.

Перспективи продовження дослідження. Додаткового дослідження вимагає поведінка буксирної лінії і всієї системи буксир – об'єкт буксирування при повороті. Також, оскільки ця стаття описує положення базових точок повороту системи буксир та об'єкт буксирування, що є окремим прикладом змістовної моделі процесу повороту судна, то буде доцільним продовжувати дослідження на інших типах суден, наприклад, на двогвинтових суднах, на суднах з азіподами тощо. Також можна розглянути деякі судові операції, наприклад, швартування двох суден одне до одного в морі на ходу, судна на ходу до судна на якорі тощо.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Дьомін С. І. Керування судном / Дьомін С. І., Жуков Є. І. Та ін. М. : Транспорт, 1991. 359 с.

2. Репетей В. Д. Морські буксировки. (Рекомендації по організації морських буксировок суден та інших плавучих об'єктів, включаючи установки, спорудження та платформи) : навчально-практичний посібник, Одеса; серія ОБМ. Видавництво «Укромедінформ», 2006 стор. 176.

3. Maritime Safety: Tugs and Tows – Shipping industry Practical Safety and Operational Guide By maritimecyprus – 18/03/2024. <https://maritimecyprus.com/wp-content/uploads/2024/03/Tug-and-Tow-Safety-and-Operational-Guide.pdf>.

4. TB-55-1900-232-10. U.S. ARMY TOWING MANUAL. Доступ до джерела: <https://boatmanuals.tpub.com/TB-55-1900-232-10/index.htm>.

5. Cauvier H. The Pivot Point. The PILOT. The official organ of the United Kingdom Maritime Pilots' Association. 2008. p. 295.

6. Butusina P. The Pivot Point Revisited, United Kingdom Maritime Pilots' Association "The Pilot", Autumn 2011, № 306. <https://ukmpa.org/wp-content/uploads/2016/06/Pilot-306-web.pdf>.

7. Behavior and Handling of Ships. Henry H. Hooyer (Author). Cornell Maritime Press; 1st edition (November 1, 1983), 152 p.

8. A Paradigm Shift in Shiphandling (The Pivot Point) Dr. Seong-Gi SEO Captain Kevin EARL. 15th April 2015. Warsash Maritime Academy, Southampton Solent Univity.
9. Cummins T. Scientific Fact: The ‘traditional’ understanding of the ship’s pivot point is wrong!, A review of the ship’s pivot point: Science, Maths and Observation, Harbour Pilot, Portsmouth International Port. 2020. <https://www.marine-pilots.com/articles/81904-scientific-fact-traditional-understanding-of-ships-pivot-point-is-wrong>.
10. Cummins T. Where is the centre of a ship’s rotation?, A review of the ship’s pivot point: Science, Maths and Observation, Harbour Pilot, Portsmouth International Port. 2020. <https://www.marine-pilots.com/articles/84506-review-of-ships-pivot-point-science-maths-and-observation-where-is-centre-of-ships-rotation>.
11. A Corrected Version on Positioning of Pivot Point. by Capt. Santosha K. Nayak - published on 18 November 2020. <https://www.marine-pilots.com/articles/129891-corrected-version-on-positioning-of-pivot-point>.
12. Pivot point position determination and its use for manoeuvring a vessel. Zinchenko Serhii, Tovstokoryi Oleh, Nosov Pavlo, Popovych Ihor & Kyrychenko Kostiantyn/*Ships and offshore structures, volume 17, issue 11 (2022)*. Received 06 Feb 2020, Accepted 07 Mar 2022, Published online: 28 Mar 2022., Volume 18 Issue 3(2023). P. 358–364. <https://doi.org/10.1080/17445302.2022.2052480>. <https://www.tandfonline.com/eprint/JTNNAFIUT7WTMRNB> U3EK/full?target=10.1080/17445302.2022.2052480. ISSN Print ISSN: 1744-5302 Online ISSN: 1754-212X. SCOPUS.
13. Tovstokory O. M. Substantive model of ship turn with account of the latest achievements in theory and practice. <https://doi.org/10.33815/2313-4763.2024.2.29.152-163> Науковий вісник Херсонської державної морської академії: науковий журнал № 2(29) (2024). С. 152–163.
14. Tzeng Ch. Analysys of the pivot point for a turning ship. Journal of marine science and technology. Vol. 6, Issue 1, pp. 39–44. 1998. <http://jmst.ntou.edu.tw/marine/6/39-44.pdf> <https://doi.org/10.51400/2709-6998.2518>.
15. Товстокорий О. М. Практичні методи розрахунку положення базових точок змістовної моделі повороту судна. Науковий вісник Херсонської державної морської академії: науковий журнал № 1(30) (2025). С. 152–163. Категорія Б. <https://doi.org/10.33815/2313-4763.2025.1.30.247-257>.
16. Girding danger under the spotlight. 07 Oct 2019by Martyn Wingrove. Riviera maritime media. <https://www.rivieramm.com/news-content-hub/news-content-hub/girding-danger-under-the-spotlight-56417>.
17. Why You Shouldn't Tug A Tug.Video. Доступ до джерела: <https://www.youtube.com/watch?v=TRb46C4NXzU>.
18. Resolution MSC.415(97) (adopted on 25 November 2016) amendments to part b of the international code on intact stability, 2008 (2008 is code).
19. Guidelines for Offshore Marine Operations. Revision: 0611-1401 on 06/11/2013 / The North West European Area. Режим доступу до джерела: <https://omtc.ua/images/courses/dp/GOMO.pdf>.
20. Towing Resistance and Design of a Towing Scheme for a Floating Wind Turbine. Pengfei Gao 1 , Xiaobin Yuan 1 , Shihua Liu 1 , Wen Lin 1 , Mingsheng Chen 2, Zhiqiang Wang 2, Yichang Tang 2 and Xingyu Jiang. 16 April 2025. <https://www.mdpi.com/2077-1312/13/4/789#Introduction>.
21. Tug Girding. Transportation Safety Board of Canada. TSB Canada releaser wsdeo about tug girding. October 10, 2019 <https://www.iims.org.uk/tsb-canada-release-video-about-tug-girding/>.
22. The Loss of the “Bourbon Dolphin” on 12 April 2007. Official Norwegian Reports. Report from a Commission appointed by Royal Decree of 27 April 2007. Submitted to the Royal Norwegian Ministry of Justice and the Police on 28 March 2008. Government Administration Services. Information Management. Oslo 2008.

23. Resolution IMO A.749(18) dd 04.11.1993 «Code of intact stability for all types of ships covered by IMO instruments» [Електронний ресурс] / International marine organization. Режим доступу до сайту: <http://www.imo.org/>. Назва з екрану.

24. Товстокорий О. Н., Нестеренко В. Б., Завальнюк О. П. Особливості контролю остійності буксирних суден при маневруванні на шельфі. Науковий вісник Херсонської державної морської академії : науковий журнал. Випуск №1(20). Херсон: Видавництво ХДМА, 2019. №1(20). С. 75–81. <https://doi.org/10.33815/2313-4763.2019.1.20.040-046>.

REFERENCES

1. Domin, S. I. et al. (1991). *Keruvannia sudnom*, M.: Transport, 359 с.
2. Repetej, V. D. (2006). *Morsri buksyrovky. (Rekomendawii po organizatsii morskyyh buksyrovok suden ta inshih plavuchih ob'ektiv, vkljuchajuchi sporudzhennjz nf platform) Navchalno-praktychnyj posibnyk*, – Odesa; serija OBM. Vydavnytstvo “Ukromedinform” 176.
3. Maritime Safety: Tugs and Tows – Shipping industry Practical Safety and Operational Guide By maritimecyprus – 18/03/2024. <https://maritimecyprus.com/wp-content/uploads/2024/03/Tug-and-Tow-Safety-and-Operational-Guide.pdf>.
4. TB-55-1900-232-10. U.S. ARMY TOWING MANUAL. Address: <https://boatmanuals.tpub.com/TB-55-1900-232-10/index.htm>.
5. Cauvier, H. (2008). The Pivot Point. The PILOT. The official organ of the United Kingdom Maritime Pilots' Association. p. 295.
6. Butusina, P. (2011). The Pivot Point Revisited, United Kingdom Maritime Pilots' Association “The Pilot”, Autumn 2011, № 306. <https://ukmpa.org/wp-content/uploads/2016/06/Pilot-306-web.pdf>.
7. Behavior and Handling of Ships. Henry H. Hooyer (Author). Cornell Maritime Press; 1st edition (November 1, 1983), 152 p.
8. A Paradigm Shift in Shiphandling (The Pivot Point) Dr. Seong-Gi SEO Captain Kevin EARL. 15th April 2015. Warsash Maritime Academy, Southampton Solent Univity.
9. Cummins, T. (2020). Scientific Fact: The ‘traditional’ understanding of the ship’s pivot point is wrong!, A review of the ship’s pivot point: Science, Maths and Observation, Harbour Pilot, Portsmouth International Port. <https://www.marine-pilots.com/articles/81904-scientific-fact-traditional-understanding-of-ships-pivot-point-is-wrong>.
10. Cummins, T. (2020). Where is the centre of a ship’s rotation?, A review of the ship’s pivot point: Science, Maths and Observation, Harbour Pilot, Portsmouth International Port. <https://www.marine-pilots.com/articles/84506-review-of-ships-pivot-point-science-maths-and-observation-where-is-centre-of-ships-rotation>.
11. A Corrected Version on Positioning of Pivot Point. by Capt. Santosha K. Nayak - published on 18 November 2020. <https://www.marine-pilots.com/articles/129891-corrected-version-on-positioning-of-pivot-point>.
12. Pivot point position determination and its use for manoeuvring a vessel. (2022). Zinchenko Serhii, Tovstokoryi Oleh, Nosov Pavlo, Popovych Ihor & Kyrychenko Kostiantyn / *Ships and offshore structures, volume 17, issue 11 (2022)*. Received 06 Feb 2020, Accepted 07 Mar 2022, Published online: 28 Mar 2022., Volume 18 Issue 3(2023). P. 358–364 <https://doi.org/10.1080/17445302.2022.2052480>. <https://www.tandfonline.com/eprint/JTNNAFIUT7WTMRNBU3EK/full?target=10.1080/17445302.2022.2052480>. ISSN Print ISSN: 1744-5302 Online ISSN: 1754-212X.
13. Tovstokory, O. M. (2024). Substantive model of ship turn with account of the latest achievements in theory and practice. DOI: 10.33815/2313-4763.2024.2.29.152-163 Naukovyj visnyk Kherson state maritime academi: naukovyj zhurnal № 2(29). h 152–163.
14. Tzeng Ch. Analysys of the pivot point for a turning ship. Journal of marine science and technology. Vol. 6, Issue 1, pp. 39–44. 1998. <http://jmst.ntou.edu.tw/marine/6/39-44.pdf>.
15. Tovstokoryj, O. M. (2025). Praktychni metody pozrakhynku polozhennz bazovyh tochok zmistovnoi modeli povorotu sudna. Naukovyj visnyk Kherson stste maritime academy.

Naukovyj zhurnal № 1(30) (2025). p. 152–163. <https://doi.org/10.33815/2313-4763.2025.1.30.247-257>.

16. Girding danger under the spotlight. 07 Oct 2019by Martyn Wingrove. Riviera maritime media. <https://www.rivieramm.com/news-content-hub/news-content-hub/girding-danger-under-the-spotlight-56417>.

17. Why You Shouldn't Tug A Tug.Video. Доступ до джерела: <https://www.youtube.com/watch?v=TRb46C4NXzU>.

18. Resolution MSC.415(97) (adopted on 25 November 2016) amendments to part b of the international code on intact stability, 2008 (2008 is code).

19. Guidelines for Offshore Marine Operations. Revision: 0611-1401 on 06/11/2013 / The North West European Area. Режим доступу до джерела: <https://omtc.ua/images/courses/dp/GOMO.pdf>.

20. Towing Resistance and Design of a Towing Scheme for a Floating Wind Turbine. Pengfei Gao 1, Xiaobin Yuan 1, Shihua Liu 1, Wen Lin 1, Mingsheng Chen 2, Zhiqiang Wang 2, Yichang Tang 2 and Xingyu Jiang. 16 April 2025. <https://www.mdpi.com/2077-1312/13/4/789#Introduction>.

21. Tug Girding. Transportation Safety Board of Canada. TSB Canada releaser wsdeo about tug girding. October 10, 2019 <https://www.iims.org.uk/tsb-canada-release-video-about-tug-girding/>.

22. The Loss of the “Bourbon Dolphin” on 12 April 2007. Official Norwegian Reports. Report from a Commission appointed by Royal Decree of 27 April 2007. Submitted to the Royal Norwegian Ministry of Justice and the Police on 28 March 2008. Government Administration Services. Information Management. Oslo 2008.

23. Resolution IMO A.749(18) dd 04.11.1993 «Code of intact stability for all types of ships covered by IMO instruments» International marine organization. <http://www.imo.org/>.

24. Tovstokoryj, O. M., Nesterenko, V. B., Zavalnjuk, O. P. (2019). Osoblyvosti kontrolju ostijnosti buksyrnyh suden pry buksyruvanni na shelfi. Naukovyj visnyk Kherson stste maritime academy. Vypusk №1(20). Kherson: Vydavnysttvo KSMA. №1(20). p. 75–81. <https://doi.org/10.33815/2313-4763.2019.1.20.040-046>.

Tovstokoryj O. M., Nahrybelnyi Y. A., Matejchuk V. M. TOWING TURN THEORY TAKING INTO ACCOUNT THE LATEST ADVANCEMENTS IN THEORY AND PRACTICE

The object of the study is the process of turning vessels during towing. The article is devoted to finding out the position of the base points of the vessel's turn during towing. At least two units take part in towing: the tug and the towed object. The positions of the base points are different for each of the participants in the towing process. The trajectory of the towing caravan depends on the position of the base points. First, the base points for the tug and for the towed object are determined. It turns out that when towing, during the turn, the tug can expect serious dangers: girding and the position "in irons", which can lead to the tug tipping over.

When comparing previous sources on this issue, it turns out that the process of turning during towing was not considered in the way that the modern substantive model of vessel turning suggests.

In addition to determining the basic turning points of all towing participants, there is a need to find out how the tugboat, the towed object and the towing line will move. This also affects the water area occupied by the towing caravan when turning. Which affects the safety of navigation.

An accident that occurred with an anchor handling tugboat due to girding is also considered.

The conclusions show the position of the base turning points during towing and the change of their positions during various maneuvers, including in dangerous situations of "girding" and "in irons". IMO recommendations are provided for the prevention of these situations along with guidance on actions to be taken if you get into a "in irons" position.

Key words: tugboat; towed object; girding; position "in the iron"; trajectory of movement; center of rotation; pivot point; towing point.

© Товстокорий О. М., Нагрибельний Я. А., Матейчук В. М.

Статтю прийнято до редакції 21.01.2026

ТРАНСПОРТНІ ТЕХНОЛОГІЇ
TRANSPORT TECHNOLOGIES

TRANSPORTATION PROBLEM MODEL WITH PRIORITIES FOR CARGO SUPPLIERS

Afonin M. O., Ph.D., Associate Professor, Associate Professor of Transport Technologies Department in Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine, e-mail: maksym.o.afonin@lpnu.ua, ORCID: 0000-0001-5850-7478;

Slavych V. P., Ph.D., Associate Professor, Associate Professor of the Department of Transport Systems and Technical Service of Kherson National Technical University, Kherson, Ukraine, e-mail: vslavich@ukr.net, ORCID: 0000-0001-7882-4198;

Babiichuk K. O., Student of the Department of Transport Systems and Technical Service of Kherson National Technical University, Kherson, Ukraine, e-mail: s9122119@kntu.edu.ua.

The article proposes a mathematical model of the transport problem taking into account the priorities of cargo suppliers, which is focused on increasing the efficiency of transport flow management in conditions of heterogeneity of transportation participants and different levels of their importance. In modern transport and logistics systems, situations are increasingly arising when cost minimization is not the only and sufficient criterion for transportation efficiency. In practice of operating transport systems, there is a need for priority service for individual suppliers, which is due to the strategic importance of cargo, limited delivery time, social significance or terms of contractual obligations. Such cases include the transportation of humanitarian aid, energy resources, perishable products, medical products, as well as ensuring the continuity of critical production chains. The model is based on a lexicographic approach, which provides priority consideration of supplier priorities with subsequent minimization of transportation costs without the use of weight coefficients. Such a formulation of the problem increases the objectivity of decision-making, eliminates subjectivity in choosing model parameters and allows for the formalization of hierarchical requirements in transport planning. An algorithm for constructing a reference plan that takes into account the hierarchy of suppliers and combines it with local minimization of transportation costs has been developed. The potential method for finding the optimal plan has been improved by introducing restrictions on permissible recalculation cycles, which allows preserving the priority structure of the problem at the stage of iterative optimization. The proposed model can be applied in the practice of freight transportation with a hierarchical structure of participants.

Key words: transport problem; potential method; freight transportation; optimal delivery plan; supplier priorities; lexicographic optimization; transport logistics.

DOI: 10.33815/2313-4763.2026.1.32.131-140

Introduction. Effective management of transport processes is one of the key components of the functioning of modern logistics systems. The tasks of distributing cargo flows between suppliers and consumers arise in various sectors of the economy - from industry and the agricultural sector to energy, trade and humanitarian logistics. In most cases, such tasks are formalized in the form of a classical transport problem, which allows determining the optimal transportation plan based on the criterion of minimizing total transport costs, provided that consumer demand is met and suppliers' resources are fully used.

However, the practical conditions of operation of transport systems often go beyond the classical assumptions. In real logistics processes, suppliers can have different levels of importance, due to strategic, economic or social factors. In particular, this may apply to the transportation of humanitarian cargo, medical products, fuel and energy resources, products with a limited shelf life or servicing critical production facilities. In such cases, not only cost minimization is of paramount importance, but also ensuring priority service for individual suppliers.

Ignoring this aspect in the classical transport model can lead to situations where the economically optimal transport plan does not meet the real needs of the system, as it does not guarantee the priority delivery of goods from the most important suppliers. This necessitates the expansion of traditional approaches to solving transport problems by taking into account additional criteria, in particular priority.

One effective approach to taking into account the hierarchy of importance is the use of discrete priority indicators that allow formalizing the order of service of suppliers. This approach

allows combining economic feasibility with practical requirements for the functioning of transport systems, ensuring a balance between minimizing costs and fulfilling priority tasks.

In this context, it is relevant to develop mathematical models of transport problems that take into account the priorities of suppliers, as well as appropriate algorithms for solving them. Of particular importance is the construction of such methods that allow integrating priority into the process of forming both the reference and optimal transportation plans without significantly complicating the computational procedures.

Thus, the study of transport problems taking into account priorities is a relevant scientific and applied direction, which is of great importance for increasing the efficiency of management of transport and logistics systems in the conditions of increasing complexity and dynamism of modern economic processes.

Analysis of recent achievements and publications. Modern linear programming transport problems are evolving towards a more complex model structure, transition to multi-criteria formulations, and consideration of additional conditions of priority, uncertainty, and dynamics of logistics systems.

A generalized mathematical and information model of the transport problem, focused on increasing the efficiency of freight transportation, is presented in [1], which lays down basic approaches to the formalization of transport flows in complex economic systems. However, the work does not consider the problem of taking into account discrete priorities of suppliers and their hierarchical influence on the formation of the transportation plan.

Further development of the classical transport problem taking into account the structural features of suppliers and their grouping is considered in [2], which creates the prerequisites for introducing additional characteristics of suppliers, in particular their priority when forming transportation plans. However, this model does not provide for lexicographic optimization and a mechanism for preserving priorities when searching for the optimal plan.

In [3], optimization of freight delivery processes at the enterprise level is considered, which allows taking into account organizational constraints and forming more adaptive transport solutions. However, the problem of formally introducing a hierarchy of suppliers into a classical transport problem is not raised in this study.

An extension of the transport model for the case of using different types of vehicles is presented in [4], where the heterogeneity of transport resources is taken into account, which indirectly affects the priority of using individual transportation directions. At the same time, the paper does not investigate the issue of priority service of suppliers as a separate optimization criterion.

Multi-criteria transportation models with fuzzy parameters were investigated in [5], where decision priorities can be specified through weights and fuzzy estimates of the importance of suppliers or consumers. However, the use of weights does not provide a rigid hierarchy of priorities, which is implemented in the lexicographic approach of the proposed work.

In [6], a model of a sustainable supply chain is proposed, in which the priority of orders and goods is taken into account through a multi-level decision-making system, which allows managing the order of satisfaction of needs. However, the paper does not consider the modification of the classical transportation problem and methods for its solution taking into account the priorities of suppliers.

Environmental and stochastic aspects of transport planning are considered in [7], where priorities can be formed as additional criteria along with cost and delay minimization. However, the issue of constructing a mathematical mechanism for preserving the priority structure during transport plan optimization is not investigated.

Dynamic transport systems with real-time adaptive routing are presented in [8], which allows changing transportation priorities during the execution of the transport plan. However, the main focus of the work is on routing, and not on the problems of distributing cargo flows between suppliers and consumers.

Integrated transport systems for combined transportation are considered in [9], where different types of flows can have different levels of priority in a single transport network. At the same time, the issue of formalizing the priorities of suppliers within the classical transport problem remains beyond the authors' attention.

Modern artificial intelligence methods for optimizing logistics processes are summarized in [10], in particular for problems where order priorities are determined dynamically based on environmental data. However, the work does not propose a mathematical model of the transportation problem with a clear lexicographic structure of criteria.

Environmentally oriented freight routing models are investigated in [11], where priorities can be related to minimizing the carbon footprint of individual shipments. However, the problem of prioritizing suppliers depending on their importance is not considered in the work.

Multi-criteria models for perishable goods delivery in [12] consider priority according to time constraints and the level of criticality of delivery. However, these approaches focus mainly on routing and time parameters, rather than on the hierarchy of suppliers in the transportation problem.

Applied optimization algorithms in specialized logistics systems are considered in [13], where the priority can be determined by the specifics of the industry, in particular pharmaceuticals. However, the work lacks a formalization of the transportation problem with discrete supplier priorities and corresponding constraints on the optimization process.

Hybrid intelligent traffic routing systems in [14] allow combining different optimization criteria, including the priority of individual routes. However, the issue of modifying the classical potential method to preserve the hierarchy of supplier priorities is not considered.

A systematization of vehicle routing problems is presented in [15], where it is shown that modern models increasingly include elements of priority transportation planning. However, the problem of constructing a transportation problem with lexicographic optimization and supplier priorities remains insufficiently studied.

Thus, the analysis of modern research shows that although multi-criteria, fuzziness and dynamism are widely used in transport problems, the issue of formal introduction and algorithmic consideration of supplier priorities in the classical transport problem remains insufficiently developed. This necessitates the development of a mathematical model of the transport problem with lexicographic consideration of supplier priorities and modified methods for constructing reference and optimal transportation plans.

Goal and problem statement. In modern transport and logistics systems, situations are increasingly arising when cost minimization is not the only and sufficient criterion for transportation efficiency. In the practice of operating transport systems, there is a need for priority service for individual suppliers, which is due to the strategic importance of the cargo, time constraints, social significance or terms of contractual obligations. Such cases include, in particular, the transportation of humanitarian aid, energy resources, perishable products, medical products, as well as the maintenance of critical production chains.

The classical transportation problem, which consists in finding a transportation plan with minimal costs, provided that the demand of all consumers is satisfied and the suppliers' inventories are completely removed, does not take into account such aspects. In it, all suppliers are considered equivalent, which can lead to economically optimal, but from a practical point of view unacceptable solutions, when less important suppliers are served before more priority ones.

In this regard, a scientific and applied problem arises of developing such a model of the transport problem that would allow taking into account the hierarchy of importance of suppliers and ensure priority execution of transportation for objects with a higher priority level, without violating the general balance constraints of the system.

The aim of the work is to develop a mathematical model of the transport problem with the priorities of cargo suppliers, in which each supplier is assigned a discrete priority indicator, as well as to form an effective algorithmic approach to its solution. In particular, it is planned to build a model with a lexicographic formulation of the objective function, where the dominant criterion is

the maximization of the volume of transportation from suppliers with higher priority levels, and the secondary criterion is the minimization of total transport costs.

An additional task of the research is to develop modified methods for constructing reference and optimal transportation plans that would ensure that priorities are taken into account at all stages of solving the problem. This involves adapting classical approaches, in particular the least cost method and the potential method, by introducing rules that limit permissible redistributions of cargo flows according to the hierarchy of priorities.

Thus, the problem statement consists in determining a transportation plan that satisfies all balance constraints, ensures maximum consideration of supplier priority in the lexicographic sense, and at the same time minimizes total transportation costs.

This paper proposes a conceptual mathematical model of the transportation problem, focused on formalizing the mechanism for taking into account supplier priorities and building an appropriate algorithmic approach to the solution.

Presentation of the main research material. Let there be given m cargo suppliers $A_1, A_2, \dots, A_i, \dots, A_m$, which have cargo concentrated in quantities $a_1, a_2, \dots, a_m$ units, respectively. This cargo needs to be transported to n cargo consumers $B_1, B_2, \dots, B_j, \dots, B_n$, who need it in quantities $b_1, b_2, \dots, b_n$ units, respectively.

Unlike the classical transportation problem, each supplier A_i a discrete priority indicator is matched a discrete priority indicator is matched $p_i \in P$, where P is the set of possible priority values:

$$P = \{p_1; p_2; \dots; p_m\}. \quad (1)$$

The higher the value p_i , the higher the priority of the corresponding supplier, reflecting the need for priority shipment from him. The priority values may coincide for any number of suppliers.

It should be noted that in the case where all p_i are the same, the proposed model reduces to a classical transportation problem.

It is also assumed that suppliers' priorities may coincide.

In the form of the cost of transporting a unit of cargo from any supplier to any consumer, given in the form of a matrix:

$$\begin{pmatrix} C_{11} & C_{12} & \dots & C_{1n} \\ C_{21} & C_{22} & \dots & C_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ C_{m1} & C_{m2} & \dots & C_{mn} \end{pmatrix} \quad (2)$$

or abbreviated:

$$C_{ij},$$

where i is the number of the cargo supplier, $i = \overline{1, m}$;

j – cargo consumer number, $j = \overline{1, n}$.

It is necessary to draw up a transportation plan that:

- 1) ensures priority shipment of cargo from suppliers with the highest priority;
- 2) satisfies the needs of all consumers;
- 3) has the lowest total cost.

Let us denote the transportation plan by:

$$X = \{x_{11}; x_{12}; \dots; x_{1n}; x_{21}; x_{22}; \dots; x_{2n}; \dots; x_{m1}; x_{m2}; \dots; x_{mn}\}, \quad (3)$$

where x_{ij} – the amount of cargo transported from supplier A_i to consumer B_j .

Let's build an objective function taking into account the priority of cargo suppliers.

Since the problem contains two criteria, it is advisable to use a lexicographic formulation.

The first (main) criterion is priority maximization.

For further formalization, let us introduce a set of different priority values that are actually implemented for given suppliers, and order them in descending order:

$$P^* = \{p^{(1)}, p^{(2)}, \dots, p^{(k)}\}, \quad (4)$$

where $p^{(1)} > p^{(2)} > \dots > p^{(k)}$.

Here $P^* \subseteq P$ – is the set of unique priority levels without repetitions and is the $p^{(r)}$ – r -th level in descending order.

For each priority level, $p^{(r)}$ we enter the value:

$$S_r = \sum_{i:p_i=p^{(r)}} \sum_{j=1}^n x_{ij}, \quad (5)$$

which determines the total volume of cargo S_r exported from suppliers with the corresponding priority level $p^{(r)}$.

Taking into account the introduced notations, the optimality criterion is formulated as a problem of lexicographic maximization of the following vector:

$$(S_1, S_2, \dots, S_k) \rightarrow \max_{lex}. \quad (6)$$

This approach means that optimization is performed sequentially by priority level: first, the volume of transportation for suppliers with the highest priority level is maximized, then, among the solutions obtained, the volume of transportation for the next level is maximized, and so on. Thus, the possibility of improving the performance of lower priority suppliers by reducing the volume of transportation for higher priority suppliers is excluded.

The second criterion is cost minimization.

Among the set of transportation plans that are optimal in the lexicographic sense, the plan with the minimum total transportation cost is selected:

$$\begin{aligned} F &= C_{11} \cdot x_{11} + C_{12} \cdot x_{12} + \dots + C_{1n} \cdot x_{1n} + C_{21} \cdot x_{21} + C_{22} \cdot x_{22} + \dots + C_{2n} \cdot x_{2n} + \dots \\ &+ \\ &+ C_{m1} \cdot x_{m1} + C_{m2} \cdot x_{m2} + \dots + C_{mn} \cdot x_{mn} = \\ &= \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n C_{ij} \cdot x_{ij} \rightarrow \min \end{aligned} \quad (7)$$

under the conditions of fulfilling the balance constraints of the transport problem:

$$\begin{cases} \sum_{j=1}^n x_{ij} = a_i, \quad i = \overline{1, m}, \\ \sum_{i=1}^m x_{ij} = b_j, \quad j = \overline{1, n}, \\ x_{ij} \geq 0. \end{cases} \quad (8)$$

Thus, the objective function of the specified transport problem, taking into account the priorities of suppliers and the economic criterion of cost minimization, can be formulated in a single generalized statement. Since the problem simultaneously considers two different criteria - maximizing priority- weighted transportation volumes and minimizing the total cost of transportation - it is advisable to use a lexicographic approach to optimization.

To coordinate the optimization directions, the second criterion, which corresponds to the minimization of total transportation costs, is reduced to a maximization problem by changing the sign of, i.e., the quantity is considered $-F$.

Such a transformation allows us to consider both criteria in a single vector form without changing the substantive interpretation of the problem.

As a result, the generalized optimization criterion can be written as lexicographic maximization of the vector:

$$(S_1; S_2; \dots; S_k; -F) \rightarrow \max_{lex}. \quad (9)$$

In this entry, the first components of the vector S_r , $r = \overline{1, k}$, determine the levels of transportation performance for suppliers in descending order of their priorities, ensuring a strict hierarchy of service. This means that the optimization process first achieves the maximum possible transportation performance for suppliers with the highest priority level, and only then does the following levels take into account.

The last component of the vector, equal to $-F$, reflects the economic criterion and ensures the selection of the least costly transportation plan among all solutions that are optimal in terms of the priority component. Thus, the proposed form of notation provides a clear separation of criteria according to their importance and implements the principle of sequential (lexicographical) optimization without mutual compensation between priority and cost.

The solution of the proposed transport problem taking into account the priorities of suppliers is carried out in two interconnected stages using modified classical approaches to constructing the reference and optimal plans. At the first stage, a reference plan is formed, which takes into account both the structure of transport costs and the priority of suppliers, after which the resulting plan is subject to further improvement using the modified potential method taking into account the priority constraints.

Let's consider the algorithm for constructing a reference plan.

The construction of a reference plan for a transportation problem with supplier priorities is carried out by gradually examining the rows of the transportation table in accordance with the decreasing level of supplier priority.

Let us consider a set of suppliers $A = \{A_i\}_{i=1}^m$ with priorities p_i , a set of consumers $B = \{B_j\}_{j=1}^n$, and a set of valid cells of the transport table.

Let's introduce the set of active suppliers:

$$I = \{1, 2, \dots, m\}. \quad (10)$$

The algorithm is executed until the set is completely empty I .

First, the maximum priority level among active providers is determined:

$$p^* = \max_{i \in I} p_i, \quad (11)$$

and a set of suppliers of this level is formed:

$$I^* = \{i \in I: p_i = p^*\}. \quad (12)$$

Next, any element is selected $i^* \in I^*$ and the corresponding row is examined i^* .

This line defines the set of minimum values:

$$\Omega_{i^*} = \{j \in \{1, \dots, n\}: c_{i^*j} = \min_k c_{i^*k}\}. \quad (13)$$

An index is selected j^* from the set Ω_{i^*} for which the minimum cost rule is satisfied (in case of ambiguity, the choice is arbitrary).

The value of transportation is formed:

$$x_{i^*j^*} = \min(a_{i^*}, b_{j^*}). \quad (14)$$

After that, the residual values are updated:

$$\begin{cases} a'_{i^*} = a_{i^*} - x_{i^*j^*} \\ b'_{j^*} = b_{j^*} - x_{i^*j^*}. \end{cases} \quad (15)$$

If $a'_{i^*} = 0$, then i^* is excluded from the set of active suppliers:

$$I' = I \setminus \{i^*\}. \quad (16)$$

If $b'_{j^*} = 0$, the corresponding consumer is considered satisfied and no longer participates in further iterations.

After that, the procedure is repeated, starting with determining the new maximum priority among the updated set I , until complete completion $I = \emptyset$.

The resulting matrix $X = \{x_{ij}\}$ is a reference plan for the transportation problem, built taking into account the hierarchy of supplier priorities and local minimization of transportation costs within each row.

Now let's consider a method for finding the optimal plan for a transportation problem taking into account supplier priorities. For this, the potential method is used, modified to take into account the priority hierarchy.

Based on the found reference plan, a planning table is built, which is supplemented by the potentials of suppliers u_i and consumers v_j .

The number of occupied cells is first checked. If it is less than $m + n - 1$, the plan is degenerated by introducing zero transports into free cells with the lowest cost values until the required number of basic cells is reached.

Next, one of the potentials (usually for the supplier with the largest number of basic cells) is taken equal to zero. The values of the other potentials are determined from the conditions:

$$u_i + v_j = c_{ij} \quad (17)$$

for all basic cells.

After that, the optimality condition for free cells is checked:

$$u_i + v_j \leq c_{ij}. \quad (18)$$

If this condition is met for all free cells, the resulting plan is optimal.

In the opposite case, for each cell in which the optimality condition is violated, the value is determined:

$$\Delta_{ij} = u_i + v_j - c_{ij}. \quad (19)$$

Among such cells, the cell (i^*, j^*) with the maximum value is selected Δ_{ij} , which is considered as a candidate for inclusion in the basis.

For the selected cell, a closed cycle is constructed, the vertices of which are alternately marked with the signs "+" and "-", starting from cell (i^*, j^*) .

Next, among the cells of the cycle marked with a "-" sign, the minimum transportation value is determined:

$$\theta = \min x_{ij}. \quad (20)$$

Unlike the classic potential method, this stage introduces an additional check related to supplier priorities.

Let the cell for which the minimum is reached θ belong to the row i^- , and the initial cell (i^*, j^*) to the row i^+ . The transition to a new plan is allowed only if one of the conditions is met:

$$\begin{cases} i^- = i^+ \\ p_{i^-} \leq p_{i^+}. \end{cases} \quad (21)$$

That is, transportation exclusion is allowed only for the supplier whose priority is not higher than that of the supplier for whom transportation is increased.

If the specified condition is met, a new plan is formed by adding the value θ to the cells of the cycle marked with a "+" sign and subtracting it from the cells marked with a "-" sign.

If the condition is not met (i.e., the cycle assumes a reduction in transportation for the supplier with a higher priority), the constructed cycle is rejected, and the cell (i^*, j^*) is not considered a candidate for inclusion in the basis.

It should be noted that the proposed restriction on permissible cycles is heuristic in nature, as it is aimed primarily at the practical preservation of the hierarchy of supplier priorities in the optimization process.

In this case, the transition is made to the next cell with violation of the optimality condition (by decreasing value Δ_{ij}), for which the cycle is again constructed, and the specified condition is checked.

If none of the cells for which the optimality condition is violated satisfies the specified constraint, the current plan is considered optimal in the sense of a priority problem.

Conclusions. Thus, the paper presents a conceptual mathematical model of the transport problem taking into account the priorities of cargo suppliers, built on the basis of a lexicographic approach to optimization (1)–(9). A method of combining two criteria is proposed, which ensures the dominance of supplier priority over the minimization of transportation costs without the use of weight coefficients, which increases the objectivity of decision-making.

A modified algorithm for constructing a reference plan has been developed (10)–(16), which provides for a phased filling of the transport table in accordance with the decreasing level of supplier priorities, taking into account the minimization of costs within each row. This allows taking into account the hierarchy of suppliers when forming a transportation plan at the initial stage.

The potential method for finding the optimal plan has also been improved (17)–(21). The proposed modification consists in introducing restrictions on the permissible recalculation cycles, which makes it impossible to reduce transportation from suppliers with a higher priority. This ensures consistency of criteria and preservation of lexicographic optimality in the process of solving the problem.

In general, the proposed approach extends the classical transport problem and allows formalizing problems in which, along with cost minimization, it is necessary to take into account the hierarchy of suppliers. The results obtained can be used in the practice of freight transportation when building models for managing transport flows in logistics systems of varying complexity.

Prospects for further research. A promising direction is to expand the proposed model by taking into account the priorities of not only suppliers but also consumers. This will allow for more flexible transportation plans that take into account the criticality of meeting the demand of individual destinations, for example, depending on the urgency or importance of orders.

Of particular interest is the study of dynamic priorities that change during the transportation process. In particular, it is possible to take into account time factors, delays, changes in demand or external conditions that affect the order of service. This opens up opportunities for building adaptive models of transport tasks that can respond to changes in the environment in real time.

REFERENCES

1. Slavych, V. P. et al. (2025). Mathematical and information model of a special type of transport task as a tool for increasing economic efficiency of freight transportation. *Artificial intelligence as a tool to protect the economy from disinformation: innovative solutions and international practices*. Riga, Latvia: Baltija Publishing. 258 p. <http://doi.org/10.30525/978-9934-26-586-0>.
2. Slavych, V. P., Dobrova, K. D. (2020). Model' ta metod znakhodzhennya opornoho ta optimal'nykh planiv modifikovanoyi transportnoyi zadachi u vypadku hrupuvannya postachal'nykiv vantazhu. *Prykladni pytannya matematychnogo modelyuvannya*. No 1. P. 187–193. <http://doi.org/10.32782/2618-0340/2020.1-3.19>.
3. Ghosh, S., Roy, S. K., Fügenschuh, A. (2022). The multi-objective solid transportation problem with preservation technology using Pythagorean fuzzy sets. *International Journal of Fuzzy Systems*. Vol. 24. P. 2687–2704. <http://doi.org/10.1007/s40815-021-01224-5>.
4. Slavych, V. P., Yel'nyk, V. V. (2023). Optymizatsiya protsesu dostavky vantazhu hazopostachal'noho pidpryemstva. *Visnyk KhNTU*. No 2 (85). P. 84–89. <http://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2023.2.11>.
5. Babaei Tirkolaee, E., Aydin, N. S. (2022). Integrated design of sustainable supply chain and transportation network using a fuzzy bi-level decision support system for perishable products. *Expert Systems with Applications*. Vol. 195. 116628. <http://doi.org/10.1016/j.eswa.2022.116628>.
6. Slavych, V. P., Biloushenko, D. Yu. (2025). Model of the transport problem in the case of cargo delivery by two different types of vehicles. *Naukovyi visnyk KhDMA*. No 31. P. 178–186. <http://doi.org/10.33815/2313-4763.2025.2.31.178-186>.
7. Babaei, A. et al. (2023). Sustainable transportation planning considering traffic congestion and uncertain conditions. *Expert Systems with Applications*. Vol. 227. 119792. <http://doi.org/10.1016/j.eswa.2023.119792>.
8. Danchuk, V. et al. (2023). The optimization of cargo delivery processes with dynamic route updates in smart logistics. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. Vol. 2 (3). P. 64–73. <http://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.277583>.
9. Hatzenbühler, J. et al. (2023). Modular vehicle routing for combined passenger and freight transport. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*. Vol. 173. 103688. <http://doi.org/10.1016/j.tra.2023.103688>.
10. Chen, W. et al. (2024). Artificial intelligence in logistics optimization with sustainable criteria: a review. *Sustainability*. Vol. 16 (21). 9145. <http://doi.org/10.3390/su16219145>.
11. Song, R. et al. (2023). Optimizing freight vehicle routing in dynamic time-varying networks with carbon emission analysis. *Sustainability*. Vol. 15 (21). 15504. <http://doi.org/10.3390/su152115504>.
12. Liang, X. et al. (2023). Bi-objective multi-period vehicle routing for perishable goods delivery considering customer satisfaction. *Expert Systems with Applications*. Vol. 220. 119712. <http://doi.org/10.1016/j.eswa.2023.119712>.
13. Ait Mamoun, K. et al. (2024). Vehicle routing optimization algorithms for pharmaceutical supply chain: a systematic comparison. *Transport and Telecommunication*. Vol. 25 (2). P. 161–173. <http://doi.org/10.2478/ttj-2024-0012>.
14. Daneshvar, H. et al. (2023). Hybrid intelligent transportation system for routing optimization. *Decision Making: Applications in Management and Engineering*. Vol. 6 (2). P. 907–932. <https://doi.org/10.31181/dma622023899>.
15. Konstantakopoulos, G. D. et al. (2022). Vehicle routing problem and related algorithms for logistics distribution: a literature review and classification. *Operations Research International Journal*. Vol. 22. P. 2033–2062. <http://doi.org/10.1007/s12351-020-00600-7>.

Афонін М. О., Славич В. П., Бабійчук К. О. МОДЕЛЬ ТРАНСПОРТНОЇ ЗАДАЧІ З ПРІОРИТЕТАМИ ДЛЯ ПОСТАЧАЛЬНИКІВ ВАНТАЖУ

У статті запропоновано математичну модель транспортної задачі з урахуванням пріоритетів постачальників вантажу, яка орієнтована на підвищення ефективності управління транспортними потоками в умовах неоднорідності учасників перевезень та різного рівня їхньої значущості. У сучасних транспортно-логістичних системах дедалі частіше виникають ситуації, коли мінімізація витрат не є єдиним і достатнім критерієм ефективності перевезень. У практиці функціонування транспортних систем існує необхідність першочергового обслуговування окремих постачальників, що зумовлено стратегічною важливістю вантажів, обмеженістю часу доставки, соціальною значущістю або умовами контрактних зобов'язань. До таких випадків належать перевезення гуманітарної допомоги, енергоресурсів, швидкопсувних продуктів, медичних препаратів, а також забезпечення безперервності критичних виробничих ланцюгів. Модель базується на лексикографічному підході, який забезпечує першочергове врахування пріоритетів постачальників із подальшою мінімізацією транспортних витрат без використання вагових коефіцієнтів. Така постановка задачі підвищує об'єктивність прийняття рішень, усуває суб'єктивність при виборі параметрів моделі та дозволяє формалізувати ієрархічні вимоги в транспортному плануванні. Розроблено алгоритм побудови опорного плану, що враховує ієрархію постачальників і поєднує її з локальною мінімізацією вартості перевезень. Удосконалено метод потенціалів для знаходження оптимального плану шляхом введення обмежень на допустимі цикли перерахунку, що дозволяє зберігати пріоритетну структуру задачі на етапі ітераційної оптимізації. Запропонована модель може бути застосована в практиці вантажних перевезень з ієрархічною структурою учасників.

Ключові слова: транспортна задача, метод потенціалів, вантажні перевезення, оптимальний план доставки, пріоритети постачальників, лексикографічна оптимізація, транспортна логістика.

© Afonin M. O., Slavych V. P., Babiichuk K. O.

Статтю прийнято до редакції 18.05.2026

AN ANALYTICAL ASSESSMENT OF LEGAL RISKS IN MULTIMODAL TRANSPORT INVOLVING MARITIME TRANSPORT DURING EMERGENCIES

Ibrahim A. M., Postgraduate Student, Department of Transport Technologies and Mechanical Engineering, Kherson State Maritime Academy, Kherson, Ukraine, e-mail: arturibrahim97@gmail.com, ORCID: 0009-0007-6007-5708;

Klevtsov K. M., D.Sc., Professor, Department of Transport Technologies and Mechanical Engineering, Kherson State Maritime Academy, Kherson, Ukraine, e-mail: klevtsovka@i.ua, ORCID: 0000-0001-8486-1104.

The effective organisation of multimodal transport involving maritime shipping during emergencies is significantly hindered by systemic legal conflicts. This study addresses the urgent need for quantitative tools to manage these hidden legal vulnerabilities. Objective: To develop a methodological framework for the Barrier Analysis of Legal Risks (BALR) for multimodal transport operators and to quantitatively assess the probability of these risks materialising under extreme conditions. Methods: The study proposes an exploratory integration of engineering safety models into legal risk analysis. It combines Gibson and Haddon's energy-barrier theory with J. Reason's 'Swiss cheese' model to identify legal conflicts as latent system conditions. Furthermore, it adapts the HEART (Human Error Assessment and Reduction Technique) methodology to mathematically calculate the adjusted probability (P_{cor}) of a legal risk occurring, utilising error-provoking condition (EPC) coefficients. Results: Based on the analysis of six key legal conflicts, a comprehensive BALR matrix was developed. Three risks were classified as 'CRITICAL' ($P_{\text{cor}} \approx 1.0$): the 'patchwork' network liability model, the archaic maritime exemption for navigational errors, and the legal vacuum regarding force majeure under martial law. The original concept of 'legal practical drift' is introduced to explain how emergency stressors erode compliance procedures. Practical implications: The study demonstrates that digital technologies, specifically 'Digital Twins' telemetry and electronic records under the 2025 UN Accra Convention, act as the most effective compensatory barriers. The calculated BALR matrix provides multimodal operators with a practical decision-support tool for internal compliance audits and offers supplementary analytical arguments for international transport arbitration.

Key words: multimodal transport; HEART; the 'Swiss cheese' model; legal conflicts; barrier analysis; transport; risk assessment; mathematical model; prognostication; mechanical resilience.

DOI: 10.33815/2313-4763.2026.1.32.141-151

Introduction. The effective organisation of multimodal transport involving maritime transport requires not only the technical coordination of different modes of transport, but also the ability of operators to function within a legal framework that is largely uncoordinated. In a previous study by the authors [1], it was established that Ukraine's regulatory framework in this area contains systemic legal inconsistencies. Specifically, the provisions of the 2021 Law 'On Multimodal Cargo Transport' conflict with the Merchant Shipping Code of Ukraine (MSCU), the Civil Code and key international conventions. That article provided a detailed description of the existing conflicts. The aim of this study, however, is to carry out a quantitative analytical assessment. In other words, to determine the mathematically substantiated probability of each legal risk materialising and which of them should be prioritised for managerial intervention.

The issue becomes particularly acute under martial law, when unprecedented physical threats arise: GPS spoofing in the Black Sea, the danger of mines, air raid alerts during cargo inspections at ports, and the urgent need to change logistics corridors. There is a practical and academic need for quantitative tools to identify, assess and manage legal risks. In other words, tools that could serve as a basis of evidence in arbitration proceedings. From a transport systems engineering perspective, legal conflicts are treated in this study not as abstract legal issues, but as operational constraints that directly influence the reliability and safety of multimodal logistics chains.

Problem statement. A significant proportion of academic research in the field of transport law focuses on issues of *de lege ferenda* – the reform of legislation. This overlooks a fundamentally

important practical consideration: how should an operator manage legal risk right now, given the current imperfect legal framework? Legal conflicts (online liability, an outdated provision of the Civil Code of Ukraine regarding navigational errors, differing limitation periods, and the legal vacuum created by martial law) are latent factors. They exist at all times, but are only ‘activated’ when triggered by an insured event or arbitration proceedings. Quantifying them is essential for setting management priorities.

Analyses of recent studies and publications. The legal aspects of multimodal transport are being actively studied by scholars both in Ukraine and abroad. V. V. Dobrovolska [2] examined the commercial and legal nature of multimodal transport contracts. Kirillova, O. V., and Kirillova, V. Yu. [3] identified terminological inconsistencies between the 2021 Law and international standards. Kunda N. T. [4] examined the evolution of liability regimes in international conventions. A parallel area of research concerns security management theory. The fundamental framework here is Gibson and Haddon’s energy-barrier theory [5, 6]. According to this theory, an incident occurs due to the absence or breach of the barrier between the source of danger and the vulnerable target. This approach was further developed in J. Reason’s ‘Swiss cheese’ model [7]. It describes the occurrence of system failures caused by the simultaneous failure of multiple protective barriers. S. Snook’s theory of ‘practical deviation’ [10] explains the mechanism by which practices gradually diverge from normative guidelines. The HEART [11] method is widely used for the mathematical assessment of the probability of error. The role of the human factor in maritime incidents was investigated by V. G. Torsky and L. A. Pozolotin [12]. Data generated by digital twin systems are accepted as evidence in logistics disputes due to their immutability, reproducibility and comprehensive documentation [13].

However, a critical review of the literature reveals a fundamental gap: none of the aforementioned approaches has integrated the legal aspects of cargo liability with the methodology of engineering barrier analysis. This gap defines the scope of this study.

Aims and objectives of the study. The aim of the study is to conduct an analytical assessment of the organisational and legal risks associated with cargo loss in multimodal transport during emergencies. To achieve this aim, a special toolkit for barrier analysis and risk forecasting (BALR) is being developed. The toolkit is based on the integration of three methodological approaches: energy-barrier theory, the Reason model and the HEART methodology.

Research objectives:

1. To systematise the legal conflicts identified in [1] in terms of safety management theory (active failures / latent conditions);
2. To develop an original concept of the ‘legal practical drift’ as a mechanism for the erosion of legal compliance in emergency situations;
3. Adapt the HEART methodology and calculate the adjusted probability (P_{scor}) of legal risks materialising;
4. Develop a BALR matrix and formulate recommendations on the use of digital technologies as compensatory barriers.

Main part. The main part of the study is structured into six interconnected sections. The first section presents a comparative analysis of international maritime liability regimes and the Ukrainian Merchant Shipping Code. The second section applies Gibson–Haddon energy-barrier theory and Reason’s “Swiss cheese” model to reframe legal conflicts as latent systemic conditions. The third section introduces the original concept of “legal practical drift” to explain how compliance procedures erode under emergency conditions. The fourth section adapts the HEART methodology for the mathematical quantification of legal risk probabilities. The fifth section synthesises the findings into an integrated BALR risk matrix. The sixth section formulates practical recommendations, with particular emphasis on digital technologies as compensatory barriers.

1. A comparative analysis of legal regimes: from the Hague Rules to the Merchant Shipping Code of Ukraine (MSCU). A fundamental factor contributing to legal uncertainty is the absence of a single, unified international regime. Attempts to establish such a regime have failed to

secure the necessary number of ratifications. A comparative analysis of the key regimes is provided in Table 1.

Table 1 – Comparative analysis of international maritime transport regimes and the Merchant Shipping Code of Ukraine (MSCU)

<i>Characteristics</i>	<i>The Hague-Visby Rules (1924/68)</i>	<i>The Hamburg Rules (1978)</i>	<i>The Rotterdam Rules (2008)</i>	<i>The Merchant Shipping Code of Ukraine (1995)</i>
Scope of application	Port-to-port («from hook to hook»)	Port-to-port + overland transport under a single contract	«Door-to-door», including multimodal stages	Port-to-port (similar to the Hague-Visby Rules)*
Basis for liability	Guilt + a wide range of exemptions (navigational error, fire, etc.)	Presumption of guilt, limited list of exemptions	Presumption of guilt, extended list of circumstances	Fault + Retention of dismissal for a navigational error*
Limits (maritime)	666.67 SDR per package or unit, or 2 SDR per kilogram	835 SDR per package or unit, or 2.5 SDR per kilogram	875 SDR per package or unit, or 3 SDR per kilogram	666.67 SDR per package or unit, or 2 SDR per kilogram
Limitation period	1 year	2 years	2 years	1 year (Civil Code / MSCU)*
Navigation error	Grounds for dismissal	not an exemption	not an exemption	Grounds for exemption*
Electronic documents	Not regulated	Mentioned	Dedicated chapter	Not provided for*

Note.* indicates an archaic provision generating legal risk. Source: compiled by the authors based on [1, 14–17].

As demonstrated in Table 1, the MSCU aligns most closely with the archaic liability model, offering the least protection for cargo owners' interests. The network liability model of the 2021 Law generates a 'patchwork' system: the sea leg – 2 SDR/kg, road transport (Convention on the Contract for the International Carriage of Goods by Road, CMR) – 8.33 SDR/kg, rail transport (Agreement on International Goods Transport by Rail, SMGS) – full value. The amount of compensation depends not on the actual damage sustained, but on the ability to localise the place of loss or damage – which, in the context of armed conflict, is frequently impossible.

2. Legal Conflicts as «Latent Conditions» in Gibson–Haddon Energy-Barrier Theory and Reason's Model. The central theoretical proposition of the BALR framework is the integration of energy-barrier theory and the 'Swiss cheese' model into the domain of transport law. According to Gibson and Haddon [5, 6], a hazard materialises when the barrier between the source of danger and the vulnerable target is breached. Reason's model [7] elaborates the anatomy of this failure. According to this model, the defensive system comprises multiple layers («slices of cheese»), each containing 'holes' – that is, vulnerabilities. This multi-level barrier concept effectively illustrates how independent technical or organizational vulnerabilities can align to trigger systemic failures [8]. Reason draws a fundamental distinction between:

1. active failures – unsafe acts committed by frontline operators with a direct and immediate impact (erroneous decisions made by crew members or freight forwarders);
2. latent conditions – concealed regulatory and organisational deficiencies that exist long before an incident occurs.

Losses occur exclusively when the 'holes' across different layers align, forming a «trajectory of accident opportunity». Applying this framework to multimodal transport:

- vulnerable target: the cargo owner's guaranteed right to financial compensation;
- source of danger (kinetic trigger): emergencies – consequences of armed conflict, GPS spoofing, air raid alerts at ports;
- protective barriers: a through-transport contract, an insurance policy, cargo inspection records;
- latent conditions ('holes'): legal conflicts – network liability, the outdated MSCU provision, differing limitation periods.

The protective barriers operate at four levels [9]: 1) the liability limits barrier – the 'hole' of unlocalised loss; 2) the negligence protection barrier – the 'hole' of the MSCU navigational error exemption; 3) the procedural barrier – the 'hole' of conflicting limitation periods; 4) the force majeure barrier – entirely absent due to the legal vacuum surrounding martial law.

3. The Concept of 'Legal Practical Drift' under Emergency Conditions. Snook's theory of «practical drift» [10] describes the phenomenon of gradual divergence of actual practices from normative guidelines. The authors' concept of «legal practical drift» explains the degradation of cargo control procedures during crises. During an air raid alert at a port, personnel accelerate container handling operations, as a result of which seal verification and the drawing up of commercial acts may be overlooked – a 'normalisation' in the interest of physical safety. The activation phase occurs at the moment of arbitration proceedings: the evidentiary basis (a cargo inspection record at the modal interface) is absent, the loss becomes 'unlocalised' and triggers the lowest liability limit under the network model.

4. Adaptation of the HEART Methodology: Analytical Calculation of the Adjusted Probability. The HEART methodology [11, 18] provides a quantitative measurement by classifying the operator's actions according to task types and adjusting the baseline error probability by multiplying it by the environmental probability of failure (EPC). The adapted task types are shown in Table 2.

Table 2 – Types of HEART tasks adapted to the legal decisions of a multimodal transport operator

Code	Task type description	Pbase	90% confidence interval	Legal context for the multimodal transport operator during emergencies
A	Totally unfamiliar task performed under stress without analysis of consequences	0.55	0.35–0.97	Operator actions in an unforeseen emergency (infrastructure shelling, GPS signal loss)
B	Restoring a system without feedback	0.26	0.14–0.42	Restoration of the logistics chain following the destruction of a transshipment hub
C	Complex task requiring deliberation and specialist knowledge	0.16	0.12–0.28	Route planning under new legal conditions (EU overland transit corridors)
D	Simple task under time pressure or with reduced attention	0.09	0.06–0.13	Documentation processing and cargo inspection during transshipment under an air raid alert
E	Routine, highly practised task requiring no special demands	0.02	0.007–0.045	Verification of standard documentation

Source: compiled by the authors based on the adaptation of the HEART methodology [11].

Note: P_{base} and P_{scor} are dimensionless probability values ranging from 0 to 1.0.

The error-producing conditions (EPC) are presented in Table 3. Each condition represents an external factor that elevates the baseline probability of operator error beyond the nominal level established by the HEART methodology. The weighting coefficient of condition presence (wi)

reflects the degree of its actual influence in a given situation: from 0 (condition absent) to 1.0 (condition fully active). For conditions of elevated operational stress, a value of $w_i = 1.0$ is adopted in this study.

Table 3 – Specific error-prone conditions (EPCs) in the adaptation to the legal context

<i>Nº</i>	<i>Error-provoking condition (EPC)</i>	<i>Max</i>	<i>Legal context in multimodal transport</i>
EPC-1	Underestimating the potential significance of the situation	17.0	Failure to comply with legal formalities prior to the occurrence of an insured event or arbitration
EPC-2	Lack of time to identify and correct errors	11.0	Severe time pressure when processing documents due to logistical delays or the threat of shelling
EPC-3	Lack of independent oversight	3.0	Failure to carry out a legal review of the contractual documentation prior to signing
EPC-4	Lack of experience in unusual situations	3.0	First experience of using alternative routes during martial law
EPC-5	Ambiguous objectives and conflicting demands	2.5	Conflict between the provisions of the MSCU, the 2021 Law, and the Civil Code
EPC-6	Lack of feedback on the results of actions	2.5	There is no mechanism for notifying the operator of changes in law enforcement practice
EPC-7	Emotional stress / a state of heightened anxiety	1.3	Martial law conditions, mine hazards, GPS spoofing, threats to the crew
EPC-8	The impact of an unfavourable operating environment	1.15	Use of ports and routes under dual jurisdiction

Source: compiled by the authors based on an adaptation of the HEART methodology [11].

Note: 'Max' column represents the maximum weight of the error-producing condition as per the HEART methodology.

To clarify the analytical mechanism of the BALR framework, it is essential to trace how legal conflicts enter the HEART calculation. Initially, existing legal conflicts create a latent systemic vulnerability. During an emergency, this vulnerability manifests as specific Error-Producing Conditions (EPCs), such as severe time pressure (EPC-2) or emotional stress (EPC-7). These EPCs directly influence the operator's decisions, forcing deviations from standard compliance procedures to prioritise physical safety. Finally, this degraded decision-making environment is mathematically quantified in the HEART model by applying the corresponding EPC multipliers to the base probability. Furthermore, for the calculations in this study, the condition presence multiplier (w_i) is deliberately set to 1.0. This represents a worst-case scenario modelling approach, reflecting the reality that under extreme emergency conditions (e.g., active shelling or sudden infrastructure destruction), negative environmental factors exert their maximum disruptive impact on human cognitive performance.

The HEART mathematical procedure involves calculating the adjusted probability (P_{scor}) using Formula 1:

$$P_{scor} = P_{base} \times \prod [(EPC_i - 1) \times w_i + 1] \quad (1)$$

Where P_{base} is the nominal probability; EPC_i – the maximum coefficient of the i – th condition; w_i – the weighting coefficient for the presence of a condition ($0 \leq w_i \leq 1$). For critical risks during emergencies, w_i is taken as 1.0. The numerical values for EPC coefficients (e.g., 17.0, 11.0) are standardized metrics derived from the original HEART methodology validation studies

[11], representing the maximum potential multiplier of error for specific environmental conditions. Let us present a detailed calculation in Formula 2 for a «patchwork» liability scenario (type C, $P_{base} = 0.16$; EPC-1 $\times$ 17.0; EPC-2 $\times$ 11.0):

$$P_{scor} = 0.16 \times [(17.0 - 1) \times 1.0 + 1] \times [(11.0 - 1) \times 1.0 + 1] = 29.92 \quad (2)$$

Since the probability cannot exceed 1.0, the result is recorded as $P_{scor} = 1.0$ (CRITICAL). For the MSCU standard regarding navigation error, the calculation is performed using Formula 3 (Type A, $P_{base} = 0.55$; EPC-7 $\times$ 1.3; EPC-3 $\times$ 3.0):

$$P_{scor} = 0.55 \times 1.3 \times 3.0 = 2.145 \rightarrow 1.0 \text{ (CRITICAL)} \quad (3)$$

In the event of a conflict of limitation periods, the period is calculated using Formula 4 (type D, $P_{base} = 0.09$; EPC-5 $\times$ 2.5; EPC-6 $\times$ 2.5):

$$P_{scor} = 0.09 \times 2.5 \times 2.5 = 0.563 \text{ (HIGH)} \quad (4)$$

In the absence of electronic document flow, it is calculated using the Formula 5 (type E, $P_{base} = 0.02$; EPC-2 $\times$ 11.0; EPC-8 $\times$ 1.15):

$$P_{scor} = 0.02 \times 11.0 \times 1.15 = 0.253 \text{ (MEDIUM)} \quad (5)$$

This calculation transforms the subjective assertion that «the operator acted negligently» into a supporting analytical argument for arbitration.

5. The BALR risk matrix: a synthesis of qualitative and quantitative analysis. By integrating the results of comparative legal analysis, Reason's model and HEART's mathematical calculations, the author's BALR matrix systematises key conflicts (Table 4). The risk level is colour-coded: red – critical ($P_{scor} \geq 0.90$), yellow – high (0.40–0.89), green – medium (< 0.40).

Table 4 – Matrix for the barrier analysis of legal risks (BALR) during emergencies

<i>Legal conflict / risk factor</i>	<i>HEART type</i>	<i>Pbase</i>	<i>EPCs (coefficients) involved</i>	<i>Pscor</i>	<i>BALR risk level</i>
«Patchwork» liability: non-localised loss of cargo (network model)	C (0.16)	0.16	EPC-1 ($\times$ 17.0) EPC-2 ($\times$ 11.0)	1.0**	CRITICAL
Retention in the UMSC of the provision on exemption from liability for navigational errors	A (0.55)	0.55	EPC-7 ($\times$ 1.3) EPC-3 ($\times$ 3.0)	1.0**	CRITICAL
A legal vacuum regarding force majeure and insurance against military risks	A (0.55)	0.55	EPC-7 ($\times$ 1.3) EPC-4 ($\times$ 3.0)	1.0**	CRITICAL
Conflict of limitation periods (1 year under CMSU vs 2 years under the Hamburg Rules)	D (0.09)	0.09	EPC-5 ($\times$ 2.5) EPC-6 ($\times$ 2.5)	0.563	HIGH
Absence of mandatory electronic document management (vs Regulation (EU) 2020/1056)	E (0.02)	0.02	EPC-2 ($\times$ 11.0) EPC-8 ($\times$ 1.15)	0.253	MEDIUM
Terminological inconsistency: «multimodal» vs «intermodal»	D (0.09)	0.09	EPC-5 ($\times$ 2.5)	0.225	MEDIUM

Note 1. ** – a calculated value of ≥ 1.0 is recorded as the maximum probability. Source: compiled by the authors.

Note 2: P_{base} and P_{scor} are dimensionless probability values ranging from 0 to 1.0.

6. Recommendations: digital technologies as compensatory barriers. At the legislative level (*de lege ferenda*), the priorities are: 1) the removal from the Ukrainian Code of Merchant Shipping of the exemption from liability for navigational errors; 2) a gradual transition from a networked to a unified model of liability; 3) the development of provisions regarding force majeure and insurance against military risks.

At the operational level, given that paper-based document workflows are vulnerable to ‘practical disruption’ during emergencies, digital technologies become the key mitigating factors:

1. Digital Twins technology [13]. The use of IoT sensors (temperature, vibration, geolocation), integrated into the container’s digital twin, allows the exact time and location of an incident to be determined. This approach aligns with the broader trajectory of maritime safety research, which increasingly identifies digital twinning and data-driven simulation as key tools for risk mitigation [19]. This eliminates the legal problem of ‘unlocalised loss’. After all, arbitrators receive indisputable telemetry data to apply the correct liability limit.

2. The 2025 UN Accra Convention [21, 22]. This UNCITRAL instrument legalises electronic cargo management documents (eNCDs) for all modes of transport. The introduction of eNCDs physically prevents a «legal practical drift». As the electronic system will not allow the cargo verification step to be skipped during transit, it creates a reliable evidential basis regardless of infrastructure damage.

Main results and discussion. The developed BALR matrix objectively identified three critical risks ($P_{scor} \approx 1.0$): «patchwork» liability under the network model, the retention of an archaic provision in the Ukrainian Code of Merchant Shipping concerning navigational errors, and a legal vacuum regarding martial law. One risk is classified as «HIGH» ($P_{scor} = 0.563$): conflict of limitation periods. Two risks are «MEDIUM» ($P_{scor} < 0.40$).

An important methodological outcome is the ability to compare heterogeneous risks using a single numerical criterion. In particular, the risk of the absence of e-document flow ($P_{scor} = 0.253$) (is significantly lower in priority than the conflict of limitation periods ($P_{scor} = 0.563$)). However, it should be noted that both conflicts are often mentioned in academic works as being of equal significance. The HEART calculation transforms subjective assessments into a supporting analytical argument. This can serve as a supplementary justification in international transport arbitration: quantitative proof of systemic shortcomings in legislation successfully refutes opponents’ references to the ‘unpredictability’ of events.

The proposed concept of a ‘Legal Practical Drift’ explains the actual mechanism by which even companies with skilled legal departments systematically find themselves unprotected. The problem lies not in a lack of knowledge, but in the absence of a mechanism for continuously monitoring the compliance of operational practices with legal standards – the equivalent of an internal security audit under the ISM Code.

Validation of the BALR Framework: A Simulated Case Study. To demonstrate how the BALR matrix applies in practice, consider a simulated scenario based on current emergency realities. A multimodal operator is transporting high-value energy equipment from a European port to Ukraine. During the modal interface (transshipment from ship to truck), an air-raid alert occurs. Operating under severe time pressure and stress ($EPC-2 = 11.0$, $EPC-1 = 17.0$), the terminal personnel rush the transshipment without proper cargo inspection and documentation—a classic manifestation of ‘*legal practical drift*’. Upon arrival, the cargo is found damaged. Because the exact location of the damage is ‘unlocalised’, the operator faces the ‘patchwork’ liability conflict. Consequently, the carrier successfully invokes the lowest maritime liability limit (2 SDR/kg) instead of the higher road transport limit or full compensation. The BALR matrix accurately anticipates this systemic failure, identifying it as a CRITICAL risk ($P_{scor} = 1.0$). Furthermore, the framework dictates the solution: had the operator deployed the recommended compensatory barrier (IoT sensors integrated into a Digital Twin), the irrefutable telemetry data would have pinpointed the exact time and location of the damage. This would override the human procedural error,

circumvent the 'patchwork' liability loophole, and ensure fair compensation. This example illustrates how BALR effectively transforms abstract legal uncertainties into manageable engineering parameters for decision-making.

The integration of smart contracts and electronic negotiable documents (eNCDs) into the Digital Twins ecosystem as a technological mechanism for managing legal risks. A pragmatic solution for mitigating critical risks ($P_{scor} \approx 1.0$), identified in the BALR matrix, is the creation of a closed technological ecosystem that combines the regulatory framework with engineering functionality. The foundation for such a system was the UN Accra Convention on Negotiable Cargo Documents. It was adopted by the General Assembly on 15 December 2025. This revolutionary convention legalised electronic negotiable documents (eNCDs). As a result, they became fully-fledged documents of title for all modes of transport. eNCDs are based on the principles of the UNCITRAL Model Law on Electronic Negotiable Records (MLETR).

The risk mitigation mechanism is implemented through the integration of electronic transaction documents with Digital Twins technology, based on a blockchain platform and smart contracts. The logic behind this interaction works as follows:

1. *Generation of objective data (digital twins)*: The multimodal container is equipped with a network of IoT sensors that continuously monitor its precise location, temperature, vibration levels and the integrity of the seals. This telemetry data forms a virtual copy (digital twin) of the cargo. It reflects its physical condition in real time during transit.

2. *Data security and immutability (Blockchain)*: As traditional centralised systems are vulnerable to tampering, telemetry data from sensors is transmitted directly to a distributed ledger (blockchain). This ensures the integrity, traceability and cybersecurity of the data.

3. *Compliance automation (Smart contracts)*: A smart contract acts as the legal bridge between the physical cargo and the electronic certificate of ownership (eNCD). The blockchain cannot retrieve external information on its own. This is why special intermediary programmes – 'oracles' – are used. They transfer telemetry from the Digital Twin to the smart contract. If an emergency arises during transport (for example, a seal is damaged at the port or there is a critical change in temperature as a result of an emergency), the smart contract immediately records this breach of conditions.

The smart contract immediately records this breach of terms. The key legal consequence of such integration is that the smart contract automatically, consistently and without human intervention records the exact time and location of the incident. This provides arbitration with a 100% reliable evidence base. Specifically, it completely resolves the problem of 'unlocalised loss' in a fragmented (networked) liability system. The technological architecture simply does not allow the system to pass the cargo on without digital recording. In doing so, it physically blocks the possibility of a 'legal practical drift' arising, as discussed in this study.

Limitations of the Study The proposed BALR methodology is subject to several limitations. First, the model currently lacks a large empirical dataset of arbitration cases to statistically calibrate the outcomes. Second, the adaptation of standard HEART metrics to legal scenarios inherently involves subjective EPC weighting by experts. Third, the fact that several risks reach the probability ceiling ($P_{scor} = 1.0$) indicates the extreme nature of the modelled emergency conditions, rather than serving as an exact statistical prediction. Consequently, this framework is intended primarily as an exploratory decision-support tool for prioritising managerial interventions and legal compliance audits, rather than a tool for exact mathematical prognostication.

Conclusions. Firstly, the BALR concept developed here is a first in Ukrainian transport science. It integrates Gibson-Haddon's energy barrier theory [5, 6], Reason's 'Swiss cheese' model [7] and the HEART methodology [11] into the field of regulatory compliance. This demonstrates that emergencies act as kinetic triggers, exploiting hidden legal 'loopholes' to cause financial harm. Moreover, the three such loopholes identified in this study have a calculated probability of materialisation, $P_{scor} = 1.0$ (CRITICAL).

Secondly, distinguishing between active failures and latent conditions opens up new avenues for arbitration arguments. In particular, analytical justification of systemic legislative shortcomings, expressed through specific ratios such as $EPC-1 \times 17.0$ and $EPC-2 \times 11.0$, provides a strong basis to challenge opponents' claims regarding the «unpredictability» of staff errors.

Thirdly, the concept of 'legal drift' [10] explains the mechanism by which security barriers break down under extreme pressure. In such cases, routine procedural oversights turn into legally irreversible losses.

Fourthly, the HEART calculation [11] (P_{scor}) has mathematically demonstrated how emergency conditions transform legal errors into virtual guarantees. Specifically: «patchwork» liability (type C, $P_{base} = 0.16$) resulted in $P_{scor} = 0.16 \times 17.0 \times 11.0 = 29.92 \rightarrow 1.0$ (*CRITICAL*); exemption from navigational error (type A, $P_{base} = 0.55$) resulted in $P_{scor} = 0.55 \times 1.3 \times 3.0 = 2.145 \rightarrow 1.0$ (*CRITICAL*); the legal vacuum regarding force majeure in a state of martial law (type A, $P_{base} = 0.55$) also reached $P_{scor} = 1.0$ (*CRITICAL*). The conflict of limitation periods (type D, $P_{base} = 0.09$) resulted in $P_{scor} = 0.09 \times 2.5 \times 2.5 = 0.563$ (*HIGH*). Whereas the absence of electronic document management (type E, $P_{base} = 0.02$) resulted in $P_{scor} = 0.02 \times 11.0 \times 1.15 = 0.253$ (*MEDIUM*). This value, whose priority is 2.2 times lower than that of conflicting limitation periods, despite the fact that both are often regarded as equally significant in academic literature.

Fifthly, it has been demonstrated that the most effective compensatory barriers are the implementation of eNCDs in accordance with the 2025 UN Accra Convention [20, 21] and digital twin technology [13]. These provide strong analytical support based on telemetry. In particular, these technologies are capable of legally pinpointing the loss of cargo, thereby directly eliminating the highest-priority risk ($P_{scor} = 1.0$) in the BALR matrix.

Prospects for Further Research. A prospect for future research is the applied verification of the BALR matrix. In other words, this should be based on real-life court and arbitration cases involving Ukrainian logistics operators in emergency situations or during periods of martial law. Future research may also involve the development of standardised contractual clauses for the main configurations of multimodal routes.

REFERENCES

1. Ibrahim, A. M., & Klevtsov, K. M. (2025). Pravovi kolizii v praktytsi orhanizatsii multimodalnykh perevezen za uchastiu morskoho transportu: ryzyky ta upravlinnski naslidky v umovakh nadzvychainykh sytuatsii [Legal conflicts in the practice of organizing multimodal transportations involving maritime transport: risks and managerial consequences in emergency situations]. *Visnyk Pryazovskoho derzhavnoho tekhnichnoho universytetu. Serii: Tekhnichni nauky*, 51, 340–349. <https://doi.org/10.31498/2225-6733.51.2025.344989>.
2. Dobrovolska, V. V. (2023). Hospodarsko-pravovyi aspekt zmishanykh (multimodalnykh) morskyykh perevezen [Economic and legal aspect of mixed (multimodal) maritime transportations]. *Vcheni zapysky TNU imeni V. I. Vernadskoho. Serii: Yurydychni nauky*, 34(73)(3), 33–37. <https://doi.org/10.32782/tnu-2707-0581/2023.3/06>.
3. Kyrylova, O. V., & Kyrylova, V. Yu. (2024). Multimodalni perevezennia u natsionalnomu zakonodavstvi ta mizhnarodnomu konteksti [Multimodal transportations in national legislation and international context]. *Rozvytok transportu*, 3(22), 106–122. <https://doi.org/10.33082/td.2024.3-22.07>.
4. Kunda, N. T. (2022). Mizhnarodni morski perevezennia: aspekty pravovoho rehuliuвання [International maritime transportations: aspects of legal regulation]. *Scientific Collection «InterConf»*, 121, 325–336. <https://doi.org/10.51582/interconf.19-20.08.2022.031>.

5. Haddon, W. (1968). The changing approach to the epidemiology, prevention, and amelioration of trauma: the transition to approaches etiologically rather than descriptively based. *Am J Public Health*, 58(8), 1431–1438.
6. Hu, Y. (2019). A concise and practical barrier model. *Open Journal of Safety Science and Technology*, 9(3), 93–111. <https://doi.org/10.4236/ojsst.2019.93007>.
7. Reason, J. T. (1997). *Managing the risks of organizational accidents*. Routledge. <https://www.taylorfrancis.com/books/mono/10.4324/9781315543543/managing-risks-of-organizational-accidents-james-reason>.
8. Shabani, T., Jerie, S., & Shabani, T. (2023). A comprehensive review of the Swiss cheese model in risk management. *Safety in Extreme Environments*, 6, 43–57. <https://doi.org/10.1007/s42797-023-00091-7>.
9. Maternová, A., Materna, M., Dávid, A., et al. (2023). Exploring the impact of the maritime regulatory framework on the barrier system in ship operations. *Journal of Marine Science and Engineering*, 13(7), 1361. <https://doi.org/10.3390/jmse13071361>.
10. Snook, S. A. (2000). *Friendly fire: The accidental shootdown of U.S. Black Hawks over Northern Iraq*. Princeton University Press. <https://www.bol.com/nl/nl/p/friendly-fire/1001004011689316/>.
11. Williams, J. C. (1986). *HEART – A proposed method for assessing and reducing human error*. Retrieved April 20, 2026, from https://www.epd.gov.hk/eia/files/applications/en/pp_220/eia_1838/progress/action_2120/eia_2242014/EIA/app/app12.10.pdf.
12. Pozolotin, L. A., Torskyi, V. H., & Liubchenko, V. I. (2008). *Okhorona sudna* [Ship security]. Astroprynt. <https://www.nautinst.com.ua/uk/oxorona-sudna/>.
13. Torkay, M. (2025). The use of digital twin technologies as evidence in logistics disputes. *Şengiın Law*. Retrieved April 20, 2026, from <https://sengunlaw.com/the-use-of-digital-twin-technologies-as-evidence-in-logistics-disputes/>.
14. International Convention for the Unification of Certain Rules of Law Relating to Bills of Lading (Hague Rules). (1924, August 25). <https://www.jus.uio.no/english/services/library/treaties/07/7-04/hague-rules.html>.
15. United Nations Convention on the Carriage of Goods by Sea (Hamburg Rules). (1978, March 31). https://uncitral.un.org/en/texts/transportgoods/conventions/hamburg_rules.
16. Kodeks torhovelnoho moreplavstva Ukrainy [Merchant Shipping Code of Ukraine], No. 176/95-VR. (1995, May 23). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/176/95-вр#Text>.
17. United Nations Convention on Contracts for the International Carriage of Goods Wholly or Partly by Sea (Rotterdam Rules). (2008, December 11). https://uncitral.un.org/en/texts/transportgoods/conventions/rotterdam_rules.
18. Ma, X., Shi, G., Li, W., & Shi, J. (2023). Identifying the most probable human errors influencing maritime safety. *Journal of Marine Science and Engineering*, 11(1), 14. <https://doi.org/10.3390/jmse11010014>.
19. Xu, M., Ma, X., Zhao, Y., & Qiao, W. (2023). A systematic literature review of maritime transportation safety management. *Journal of Marine Science and Engineering*, 11(12), 2311. <https://doi.org/10.3390/jmse11122311>.
20. United Nations Convention on Negotiable Cargo Documents (Accra Convention) (2025). <https://uncitral.un.org/en/ncdconvention>.
21. United Nations Information Service (2025). *UN General Assembly adopts breakthrough Convention on cargo documents to facilitate global trade*. Retrieved April 19, 2026, from <https://unis.unvienna.org/unis/en/pressrels/2025/unisl378.html>.

Ібрагім А. М., Клевцов К. М. АНАЛІТИЧНА ОЦІНКА ПРАВОВИХ РИЗИКІВ У МУЛЬТИМОДАЛЬНИХ ПЕРЕВЕЗЕННЯХ ІЗ ЗАЛУЧЕННЯМ МОРСЬКОГО ТРАНСПОРТУ В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

У цій статті представлено дослідження авторів з аналітичної оцінки ризиків у морських мультимодальних перевезеннях під час надзвичайних ситуацій в Україні. Вона базується на попередньому дослідженні, яке систематично виявляло системні правові конфлікти. У статті пропонується оригінальна методологія Бар'єрного аналізу правових ризиків (BALR) для операторів мультимодальних перевезень. Вперше в українській транспортно-правовій науці методологія інтегрує дві концептуальні рамки: теорію енергетичних бар'єрів Гібсона та Хаддона в поєднанні з моделлю організаційних аварій Різона («швейцарський сир») для якісної ідентифікації правових конфліктів як латентних умов, активованих тригерами надзвичайних ситуацій; та кількісну методологію HEART для математичної оцінки ймовірностей з використанням умов, що породжують помилки (EPC). Побудовано матрицю ризиків BALR з розрахованими скоригованими ймовірностями (P_{scor}). Три ризики отримали статус КРИТИЧНИЙ ($P_{scor} \approx 1,0$): «клаптикова» система відповідальності за мережевою моделлю, застаріле звільнення від навігаційних помилок у Кодексі торговельного мореплавства України та правовий вакуум щодо форс-мажору та воєнного стану. Один ризик є ВИСОКИМ ($P_{scor} = 0,563$); два є СЕРЕДНІМИ. Концепція «правового практичного зсуву» вводиться для пояснення механізму поступового руйнування дотримання правових вимог в умовах надзвичайного операційного навантаження. Технологія цифрових двійників та Аккрська конвенція ООН про переговірні вантажні документи 2025 року визначені як основні компенсаційні бар'єри. Результати дослідження демонструють, що кількісна оцінка ризиків перетворює суб'єктивні правові судження на допоміжні аналітичні аргументи, що можуть бути використані в міжнародному транспортному арбітражі. Структура BALR застосовна до законодавчої реформи, розподілу контрактних ризиків та розробки систем моніторингу дотримання вимог, узгоджених з моделлю ISM Code.

Ключові слова: мультимодальні перевезення; HEART; модель «швейцарського сиру»; правові колізії; бар'єрний аналіз; транспорт; оцінка ризиків; математична модель; прогнозування; механічна стійкість.

© Ibrahim A. M., Klevtsov K. M.

Статтю прийнято до редакції 21.04.2026

IMPROVEMENT OF THE OPERATIONAL AND MAINTENANCE PERFORMANCE CHARACTERISTICS OF WATER TRANSPORT EQUIPMENT SURFACES THROUGH THE IMPLEMENTATION OF POLYMER COATINGS

Sapronov O. O., Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Transport Technologies and Mechanical Engineering, Kherson State Maritime Academy, Ukraine, e-mail: oo.sapronov@gmail.com, ORCID: 0000-0003-1115-6556;

Simanenkov A. L., PhD, Associate Professor of the Department of Operation of Ship Electrical Equipment and Automation, Kherson State Maritime Academy, Ukraine, e-mail: simanenkov.andrii@gmail.com, ORCID: 0000-0003-0797-5276;

Banha M. M., Graduate student of the Department of Transport Technologies and Mechanical Engineering, Kherson State Maritime Academy, Ukraine, e-mail: defold.fp@gmail.com, ORCID: 0009-0007-8436-3800;

Danylenko D. O., Graduate student of the Department of Transport Technologies and Mechanical Engineering, Kherson State Maritime Academy, Ukraine, e-mail: kysant777@gmail.com, ORCID: 0009-0007-3311-9365;

Sharanov V. D., PhD, Sea Captain, Danube Institute of the National University "Odesa Maritime Academy", Ukraine, e-mail: vladsharanov609@gmail.com, 0009-0005-4349-2185;

Sapronova A. V., PhD, Senior Researcher of the Department of Transport Technologies and Mechanical Engineering, Kherson State Maritime Academy, Ukraine, e-mail: sapronova.ane4ka@gmail.com, ORCID: 0000-0002-4327-4293.

The paper presents the results of experimental studies aimed at improving the operational and repair characteristics of water transport surfaces by developing and implementing new polymer coatings with improved anti-corrosion characteristics. The main purpose of the study is to establish the patterns of the influence of heterogeneously dispersed fillers on the corrosion resistance of epoxy composite coatings. The epoxy oligomer ED-20, polymerized with polyethylenepolyamine (PEPA), was used as a matrix for protective coatings. To modify the polymer structure, a filler system was used, which includes a nanodispersed fullerene-carbon black mixture (30–40 nm) and microdispersed trimethoprim (5–10 μm). Optimization of the composition was carried out using the method of mathematical planning of experiments in the STATGRAPHICS® Centurion XVI software environment. Corrosion resistance was studied using impedance spectroscopy, which determined the electrical resistivity and capacitance of the coatings in three model aggressive media: a 10% sulfuric acid solution, acetone, and seawater (35‰). It was found that the introduction of trimethoprim contributes to additional chemical crosslinking of the polymer matrix, while the nanodispersed filler forms the effect of a “labyrinth structure”, reducing the diffusion permeability of the coating. It was experimentally confirmed that the developed compositions increase resistivity (0.25–0.29 $\Omega\cdot\text{m}^2$) and decrease capacitance (16–27 pF/m²), indicating the formation of a dense, hydrophobic, and structurally stable polymer network. The maximum values of the studied parameters are characterized by the EC-3 coating, which exceeds the performance of the base matrix by 56% and HEMPEL, HEMPALIN ENAMEL coatings by 24–28%. A generalized model of the mechanism underlying increased corrosion resistance is proposed, based on three key processes: chemical crosslinking, nanomodification, and hydrophobicization of the polymer structure.

Key words: water transport; navigation equipment; anti-corrosion protection; coating composition; model; marine environment.

DOI: 10.33815/2313-4763.2026.1.32.152-163

Problem statement. The problem of protecting water transport surfaces against corrosion stems from the fact that a significant number of components, mechanisms, and equipment are made of steel and iron-based alloys and are installed in open areas (decks), which involve operation in conditions of intense exposure to an external aggressive environment. Even materials with increased corrosion resistance are subject to deterioration under the influence of seawater, atmospheric moisture, salt fog, acid rain, and organic solvents. This, in turn, leads to deterioration in the operational characteristics of structures and a decrease in their reliability and durability. This

problem is quite relevant for deck mechanisms and metal structures, including navigation equipment, which are constantly exposed to variable climatic and mechanical loads. The destruction of protective coatings and the appearance of microcracks and defects contribute to the penetration of corrosive components into the metal base, which initiates electrochemical corrosion processes. The consequence of this is not only the deterioration of the equipment's technical condition, but also significant economic costs associated with the repair and maintenance of these elements [1–3]. Therefore, the task of developing new protective coatings for shipboard equipment is directly related to the problems of technical operation, maintenance, and repair of water transport facilities, which determines the practical relevance of the study to the thematic scope of the journal in the field of transport technologies and transport service systems.

Analysis of recent publications and research. In most scientific works, considerable attention is paid to increasing the corrosion resistance of polymer coatings by introducing nanodispersed fillers. In particular, in [4, 5], it was established that nanoparticles of metal oxides and carbon materials contribute to the formation of a “labyrinthine structure”, which significantly complicates the diffusion of water, oxygen, and ions to the metal surface. Similar results are reported in [6], which demonstrate the effectiveness of using carbon nanostructures to enhance the barrier properties of epoxy systems. At the same time, an important direction is the chemical modification of the polymer matrix. In the works [7, 8], it was shown that the introduction of amine-containing organic compounds increases the crosslinking density of the polymer network, thereby improving the mechanical and anti-corrosion characteristics of coatings. However, such approaches are mostly considered separately from the use of nanofillers. In works [9–11], it is shown that the combination of differently dispersed fillers allows simultaneous increases in the density of the polymer structure, reductions in permeability, and improvements in the mechanical stability of coatings during operation. At the same time, the analysis of literary sources indicates that the use of active organic compounds as structural modifiers of epoxy coatings remains insufficiently studied. In particular, there are no systematic studies devoted to assessing their influence on the crosslinking of the polymer matrix, the formation of the microstructure, and the long-term corrosion resistance in aggressive environments.

The purpose of the work is to investigate the effect of differently dispersed fillers on the corrosion resistance of protective coatings.

Materials and research methods. To create new protective coatings, an epoxy oligomer of the ED-20 brand (ISO 18280:2010) was used, and the polymerization was performed with an amine-type hardener, polyethylenepolyamine PEPA (TU 6-02-594-73).

To improve the corrosion resistance of the developed coatings, the following were used: nanodispersed fullerene-carbon black mixture (NFCM), 30...40 nm; biocidal filler trimethoprim $C_{14}H_{18}N_4O_3$ (TMP), 5...10 μm . Optimization of the content of heterogeneously dispersed fillers in the epoxy binder when creating new protective coatings was performed using the STATGRAPHICS® Centurion XVI software package.

The modified epoxy matrix was prepared according to the procedures described in the works [12–15].

The corrosion resistance of the developed and known protective coatings was determined by measuring changes in specific resistance and specific capacitance using an RLC meter (type E7-22). The thickness of the coatings was measured using a CM8811FN thickness gauge. The study was carried out for 30 days at $T = 293 \pm 2$ K. The obtained values of the specific resistance and specific capacitance of the coatings were converted using the formulas:

$$\rho = \rho \cdot S, \Omega \cdot m^2 \quad (1)$$

$$c = C/S \text{ pF}/m^2 \quad (2)$$

$$S = \pi D^2/4, m^2 \quad (3)$$

The base material was selected as shipbuilding structural steel Q235, measuring 80×40×2.0 mm, used for the manufacture of hull and internal structures of ships where high loads are not expected, in particular, elements of navigation equipment. At the same time, the working area of the coatings was 0.00512 m² (the area on both sides of the plate was taken into account, taking into account the side surface with a thickness of 2.0 mm).

Research results and their discussion. The operation of ship equipment and mechanisms occurs under conditions of intensive exposure to aggressive environments, which increases the requirements for the protective characteristics of coatings. In this regard, increasing the corrosion resistance of polymer coatings used to protect metal structures is particularly important. The effectiveness of such materials is determined not only by their initial properties, but also by the ability to maintain operational characteristics over a long period of operation in difficult marine environment conditions. At the same time, one of the determining indicators of the functional suitability of polymer coatings is their barrier ability, i.e., the ability to limit or significantly slow down the diffusion of corrosive components, such as water, oxygen, and salt ions, to the surface of the metal base. The penetration of these agents initiates electrochemical processes that lead to material degradation and corrosion of metal surfaces, even those made of alloys. An equally important characteristic is the ability of coatings to maintain a high level of adhesion to the substrate, ensuring reliable contact between the polymer layer and the metal, as well as sufficient cohesive strength, which determines the integrity of the coating. Loss of adhesive or cohesive strength leads to the formation of defects, microcracks, and delaminations, which significantly accelerate the penetration of aggressive media and, accordingly, the corrosion destruction of metal surfaces. In addition, the operational durability of polymer systems largely depends on their resistance to external factors, in particular, high humidity, temperature fluctuations, ultraviolet radiation, and the influence of chemically active substances. Prolonged exposure to external factors leads to the physicochemical degradation of the polymer matrix, accompanied by structural transformations and a decrease in the coatings' barrier and protective properties. For water transport, these effects are especially critical for navigation equipment housings, foundation pedestals, deck-mounted support elements, exposed metal casings, and other functional surfaces that require stable performance characteristics during long-term service. In this regard, the developed coatings should be considered not only as new material compositions, but also as a practical means of increasing the operational reliability and maintainability of ship equipment, which corresponds to the thematic area J5. In this regard, optimizing the structure and physical-mechanical and diffusion characteristics of coatings to minimize their permeability to corrosive agents is one of the priority areas of research in the field of knowledge "Transport and Services". The results obtained can be used to improve the corrosion and wear resistance of vehicle surfaces, thereby increasing operational reliability and reducing maintenance and repair costs.

The study used a basic epoxy matrix and developed a series of protective coatings based on ED-20 epoxy resin using a bidisperse filler: dispersed trimethoprim (5...10 µm), nanodispersed fullerene-carbon black mixture (30...40 nm). It should be noted that the optimization of the heterogeneous filler content in the epoxy binder was performed using the STATGRAPHICS® Centurion XVI application package. Based on the obtained mathematical models [14], the following compositions of protective coatings were obtained, which were tested in various aggressive environments:

- EC 1 – control matrix (epoxy resin ED-20 + hardener PEPA);
- EC 2 – epoxy resin ED-20 (100 %) + hardener PEPA (10.0 %) + trimethoprim (5.0 %) + nanodispersed fullerene-carbon black mixture (0.050 %);
- EC 3 – epoxy resin ED-20 (100 %) + hardener PEPA (10.0 %) + trimethoprim (10.0 %) + nanodispersed fullerene-carbon black mixture (0.050 %);
- EC 4 – epoxy resin ED-20 (100 %) + hardener PEPA (10.0 %) + trimethoprim (15.0 %) + nanodispersed fullerene-carbon black mixture (0.050 %).

The values of the specific resistance and specific capacitance of the developed protective epoxy composite coatings were compared with the values of 2 known coatings HEMPEL (white

color) and HEMPALIN ENAMEL (yellow color), which are used to protect elements of navigation equipment (Fig. 1).

HEMPEL coating (white color) is intended for anti-corrosion protection of metal structures, in particular decks, superstructures and elements of navigation equipment of ships.

HEMPALIN ENAMEL (yellow color) is intended for visual identification of dangerous objects, in particular elements of navigation equipment.

Thus, the selected comparison objects and the illustrated application areas confirm the direct practical orientation of the study toward shipboard technical systems and navigation equipment, rather than toward generalized laboratory models only. This strengthens the applied significance of the work for the field of water transport operation and maintenance.



Figure 1 – Navigation equipment of the container ship SPYROS V with applied coatings (arrows show: coating of elements of foundation pedestals for fastening elements of navigation equipment; surfaces for visual identification of dangerous objects that are a source of electromagnetic radiation)

The corrosion resistance was determined using impedance spectroscopy at 1 kHz over 30 days of immersion of samples in model aggressive environments: 10% sulfuric acid solution (H_2SO_4), acetone ($\text{C}_3\text{H}_6\text{O}$), and seawater (35‰, Na^+ , Cl^- , Mg^{2+} , SO_4^{2-}). The choice of these environments is due to the following:

1. Sulfuric acid solution (H_2SO_4) is a typical component of acid rain, which can settle on the hull of a ship or navigation equipment during a prolonged stay in ports with a high level of industrial pollution.

2. Acetone ($\text{C}_3\text{H}_6\text{O}$) is a polar organic solvent that well simulates the process of swelling, dissolution of weakly cross-linked areas of the polymer, and therefore allows you to assess the resistance of the coating to dissolution and leaching.

3. Seawater is a permanent working environment that comes into contact with ship equipment, in particular navigational instruments installed on the deck or on open superstructures. Accordingly, direct contact with seawater spray and atmospheric moisture is formed. Salinity of 35‰, which is equivalent to 35 g/kg NaCl, corresponds to the conditions of the open ocean and provides an adequate simulation of sea voyages.

The experimental testing methodology involved tracking the dynamics of changes in the specific resistance of coatings (ρ , $\Omega \cdot \text{m}^2$) and specific capacitance (c , pF/m^2), which are integral characteristics of the anti-corrosion barrier.

Before applying both developed and commercial protective coatings manufactured by Hempel, a comprehensive preparation of the metal substrate was carried out. The preparatory operations included mechanical surface treatment to remove oxide films, corrosion products, and surface contaminants (Fig. 2). In addition, such treatment contributed to the formation of a developed microrelief structure of the surface, which provides an increase in the contact area and, accordingly, improved adhesive interaction of the coating with the substrate. Additionally, the

surface was degreased with acetone (C_3H_6O), an organic solvent that effectively removes both polar and non-polar organic contaminants, thereby improving wetting of the metal surface by the developed polymer composition. Coatings were applied to samples on both sides, made of shipbuilding structural steel grade Q235 with dimensions of $80 \times 40 \times 2.0$ mm. This approach provided a unified framework for evaluating the effectiveness of both developed and known coatings in experimental research.



Figure 2 – Experimental specimens made of shipbuilding structural steel Q235

After preparatory operations on the metal substrate, protective coatings of various compositions were applied using pneumatic spraying (Fig. 3). The use of this method makes it possible to assess the technological properties of the compositions from the standpoint of their practical suitability for use in the field of maritime transport, in particular during maintenance of equipment for navigation systems of ships. Pneumatic spraying ensures the formation of a uniform, thin-layer, homogeneous coating by dispersing the material over the surface, meeting the conditions for mechanized or automated application in dock and operational (ship) conditions. A similar approach allows us to assess the ability of epoxy compositions to self-level and their tendency to form a continuous, defect-free film. These characteristics are critically important for protecting navigation equipment, which is subject to increased requirements for corrosion resistance and operational reliability. Thus, the applied approach ensures obtaining objective information on the behavior of coatings in conditions as close as possible to the real operation of sea vessels and the performance of routine maintenance work.

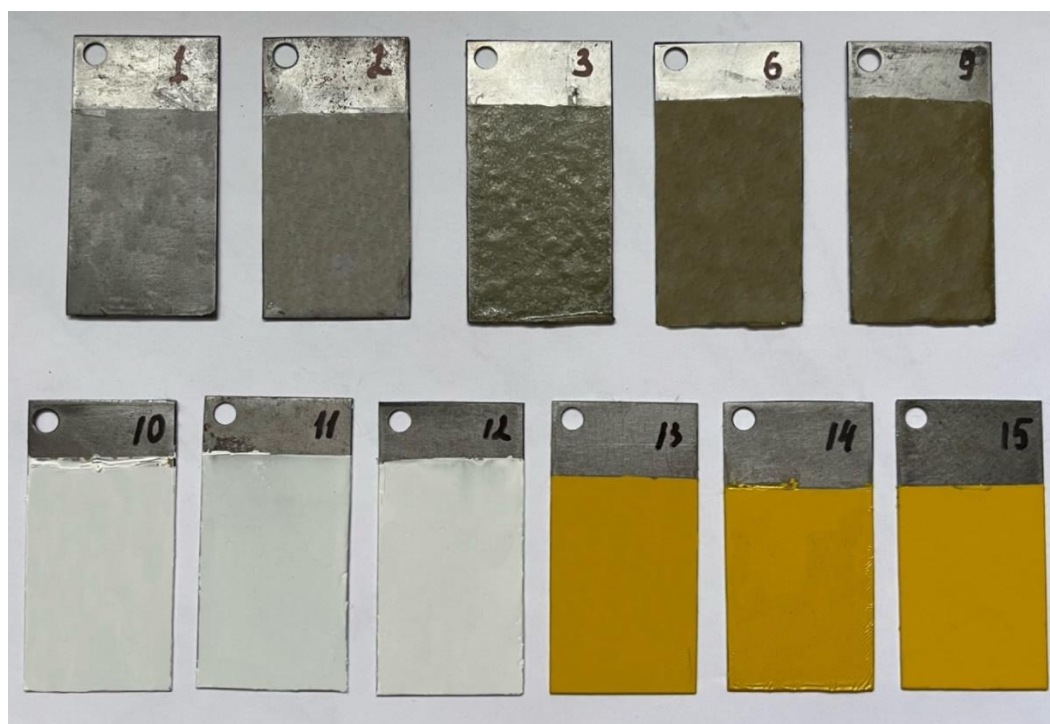


Figure 3 – Appearance of coatings applied by pneumatic method: 1, 2 – EC-1; 3 – EC-2; 6 – EC-3; 9 – EC-4; 10, 11, 12 – HEMPEL; 13, 14, 15 – HEMPALIN ENAMEL

Study of the values of resistivity and specific capacitance in a sulfuric acid environment (Table 1, 2). According to the results of the analysis of experimental studies obtained during 30-day exposure, it was found that the control coating EC-1 is characterized by the lowest values of resistivity, which monotonically decreases from $\rho = 0.19\text{--}0.21\ \Omega\cdot\text{m}^2$ (during the first 10 days) to $\rho = 0.16\ \Omega\cdot\text{m}^2$ (after 20 days of exposure in an aggressive environment). Such dynamics is due to the increased permeability of the epoxy matrix for hydrogen ions (H^+) and sulfate ions (SO_4^{2-}), which intensify the processes of physicochemical destruction of the polymer network. At the same time, an increase in the specific capacitance of the experimental samples from $c = 21\ \text{pF}/\text{m}^2$ to $c = 35\ \text{pF}/\text{m}^2$ was observed, which indicates a gradual saturation of the polymer volume with ionized particles, probably due to the existing structural defects.

Table 1 – Resistivity values obtained during the study of protective coatings

Name of coatings	ρ (Sulfuric acid), $\Omega\cdot m^2$				ρ (Acetone), $\Omega\cdot m^2$				ρ (Seawater), $\Omega\cdot m^2$			
	Trial period, days											
	0	10	20	30	0	10	20	30	0	10	20	30
EC-1	0.21	0.19	0.16	0.16	0.23	0.21	0.18	0.18	0.24	0.22	0.22	0.22
EC-2	0.28	0.27	0.23	0.23	0.30	0.29	0.25	0.25	0.30	0.29	0.28	0.28
EC-3	0.28	0.27	0.27	0.25	0.30	0.29	0.26	0.26	0.30	0.29	0.29	0.29
EC-4	0.27	0.24	0.22	0.22	0.29	0.26	0.25	0.25	0.30	0.28	0.28	0.28
HEMPEL	0.27	0.24	0.19	0.19	0.29	0.25	0.21	0.21	0.29	0.28	0.23	0.23
HEMPALIN ENAMEL	0.27	0.23	0.19	0.18	0.29	0.21	0.17	0.17	0.29	0.28	0.24	0.24

Table 2 – Specific capacitance values obtained during the study of protective coatings

Name of coatings	<i>c</i> (Sulfuric acid), pF/m ²				<i>c</i> (Acetone), pF/m ²				<i>c</i> (Seawater), pF/m ²			
	Trial period, days											
	0	10	20	30	0	10	20	30	0	10	20	30
EC-1	24	30	35	35	24	35	39	40	24	27	28	28
EC-2	16	20	21	21	16	25	30	28	16	17	19	19
EC-3	15	20	22	22	15	29	29	27	15	16	16	16
EC-4	17	23	24	24	17	29	30	29	17	17	18	18
HEMPEL	22	29	33	33	20	27	31	31	23	27	27	27
HEMPALIN ENAMEL	24	29	36	36	25	35	42	42	24	27	30	30

The results obtained indicate insufficient barrier efficiency of the coating, which is associated with the presence of microdefects and the diffusion-open morphology of the polymer matrix. The combination of these defects accelerates the penetration of an aggressive environment to the metal base. At the same time, the developed epoxy composite coatings – EC-2, EC-3, EC-4 demonstrate improved protective characteristics, in particular, reduced permeability of aggressive components. The values of the specific resistance for samples EC-2 and EC-4 exceed the similar indicator of the control coating by 37–43% (Table 1). The highest resistivity value among the developed coating compositions was found for EC-3 ($\rho = 0.27\ \Omega\cdot\text{m}^2$). The increase in resistivity by 56% compared to the control sample indicates the formation of a denser and structurally ordered coating, which complicates the diffusion of aggressive ions in its volume.

The study's results suggest that trimethoprim, owing to its pronounced amine functional groups, can interact with the epoxy matrix by forming chemical bonds with epoxy groups. This

process contributes to additional crosslinking of polymer chains, leading to a denser, structurally stable polymer network. As a result, the cohesive strength of the coating increases, its permeability to aggressive ions and water molecules decreases, and its resistance to physicochemical degradation in corrosive environments increases. In addition, enhanced crosslinking of the polymer can reduce the formation of micropores and microcapillaries within the polymer volume, further improving the material's barrier properties. The introduction of a nanodispersed fullerene-carbon black mixture performs several equally important functions. Firstly, nanoparticles fill the existing nanopores and other defects of the polymer matrix, creating an additional physical barrier for the diffusion of ionized and molecular components of the aggressive environment. Secondly, nanosized particles can distribute mechanical stresses in the coating during operation, thereby reducing the formation of cracks and defects in the polymer layer. Thirdly, the fullerene-carbon black phase can partially interact with the polymer matrix, increasing its structural integrity and stability over a long period of exposure and, therefore, during operation. Thus, the combination of trimethoprim and nanodispersed filler produces a synergistic effect, enhancing the barrier and durability of epoxy coatings.

Experimental data obtained for known HEMPEL and HEMPALIN ENAMEL coatings show that, under sulfuric acid conditions, on the 30th day of testing, the resistivity of the samples exceeds that of the similar indicator for the unfilled epoxy coating by 12–18%. This indicates a slight increase in barrier ability, due to partial compaction of the polymer and limited physicochemical interactions among the components in these coatings' compositions. At the same time, the resistivity indicators remain 24–28% lower than those of the developed EC-3 coating, indicating a significantly higher efficiency of the developed coating compositions in preventing the penetration of aggressive ions and molecules into the metal base.

Such a comparison emphasizes the importance of chemical modification of the polymer matrix and the introduction of nanodispersed compounds to increase the operational reliability of the coatings. In practical terms, the 56% increase in resistivity relative to the control sample (unmodified epoxy matrix) indicates the formation of a denser, structurally ordered polymer network, which significantly hinders the diffusion of corrosive ions within the developed coating. This is critical for protecting metal surfaces from degradation in highly corrosive environments, such as seawater and acidic solutions, which are common during long-term operation of water transport surfaces. From the standpoint of practical application, this result means that the developed EC-3 coating can provide longer preservation of the functional state of ship equipment surfaces, slower development of under-film corrosion, a lower probability of coating failure during service, and reduced frequency of scheduled repair interventions. In addition, improved barrier characteristics create prerequisites for extending maintenance intervals and lowering operating costs for shipboard structures and navigation equipment exposed to aggressive marine factors.

Study of the values of resistivity and specific capacitance in an acetone environment. A comprehensive analysis of experimental data indicates that acetone, as an organic solvent, affects the polymer coating through several interrelated mechanisms. First, the solvent causes swelling of the material due to the penetration of acetone molecules into the free volumes of the polymer's amorphous phase. Second, acetone partially dissolves weakly cross-linked matrix fragments, leading to local disruption of polymer chain cohesion and the formation of microdefects in the coating structure. In the control sample EC-1, these processes are shown as a gradual decrease in resistivity from $\rho = 0.23 \Omega \cdot \text{m}^2$ (at the beginning of exposure) to $\rho = 0.18 \Omega \cdot \text{m}^2$ (after 30 days of exposure in an aggressive environment). At the same time, an increase in the specific capacitance from $c = 24 \text{ pF/m}^2$ to $c = 40 \text{ pF/m}^2$ was observed. The increase in capacitance indicates the accumulation of polar solvent molecules within the polymer volume, leading to increased dielectric polarization and destruction of the matrix's amorphous phase. These changes indicate a high permeability of the control coating for polar molecules and its limited barrier ability during a long exposure period. Significantly more stable studied parameters characterize the developed epoxy compositions EC-2, EC-3, and EC-4. After 30 days of exposure, the resistivity of these samples remained within the range of $\rho = 0.25\text{--}0.26 \Omega \cdot \text{m}^2$, and the specific capacitance did not exceed

$c = 27\text{--}29 \text{ pF/m}^2$. Such stability is explained by the formation of a three-dimensional, densely crosslinked, hydrophobic polymer network that significantly limits acetone penetration. In addition, the presence of trimethoprim in the coating as a structural modifier enhances synergistic effects: trimethoprim promotes additional chemical crosslinking of polymer chains, while nanoparticles fill nanopores and defects, increasing the barrier properties and mechanical stability of the coating.

Comparative analysis showed that the resistivity of commercial HEMPEL coatings after 30 days of exposure in an acetone environment exceeds the indicator of the unmodified epoxy matrix by 16%, but remains 19% lower than that of the developed EC-3 coating. The alkyd coating HEMPALIN ENAMEL demonstrates a decrease in resistivity by 5.5% compared to the epoxy matrix. This difference is explained by the chemical nature of the polymer systems: alkyd coatings are polyesters modified with fatty acids or oils, with a lower crosslinking density and a more polar structure containing hydrophilic groups ($-\text{OH}$, $-\text{COOH}$). These groups actively interact with polar solvents, increasing permeability and leading to a more pronounced decrease in the coating's barrier properties. Thus, the results obtained demonstrate the complex effect of the solvent on the studied characteristics of polymer coatings. Penetration of acetone molecules into the free volume and micropores leads to swelling and partial destruction of the amorphous phase, a decrease in resistivity, and an increase in specific capacitance. At the same time, the introduction of trimethoprim (as a modifying additive) and nanofiller into the polymer matrix enabled the creation of a denser, hydrophobic, and three-dimensionally crosslinked network, which reduces the diffusion of polar molecules, maintains the stability of electrophysical parameters, and increases the operational reliability of coatings in aggressive environments. These data are important for optimizing the composition of epoxy coatings and ensuring their high resistance to organic solvents in marine and industrial practice.

Study of resistivity and capacitance values in seawater (Table 1, 2). In seawater, the epoxy matrix EC-1 was characterized by a resistivity $\rho = 0.22\text{--}0.24 \text{ Ohm}\cdot\text{m}^2$, a decrease in which was observed after the tenth day of exposure. A similar effect indicates partial hydration and diffusion of chloride ions to the metal substrate. At the same time, the specific capacitance was $c = 24\text{--}28 \text{ pF/m}^2$, indicating the partial presence of water molecules in the polymer's pores. Regarding the studied epoxy composite coatings, we can state that they exhibit high barrier characteristics, as the values of the studied resistivity and capacitance did not change significantly over the entire exposure period (30 days). The obtained values of resistivity and capacitance indicate the formation of a dense structural-hydrophobic network that effectively prevents the penetration of moisture and aggressive chloride ions into the metal base.

As in previous model aggressive environments, the obtained values of resistivity and capacitance of known coatings from HEMPEL and HEMPALIN ENAMEL are greater than the value of the resistivity of the epoxy matrix, but are less than the value of the resistivity of the EC-3 coating.

Analysis of the obtained parameters allows us to state the following. The control epoxy coating EC-1 is characterized by a resistivity within $\rho = 0.22\text{--}0.24 \text{ }\Omega\cdot\text{m}^2$ at the initial stage of exposure. After the tenth day of exposure, a gradual decrease in the studied indicator was observed. The decrease in resistivity can be explained by the partial hydration of the amorphous phase of the polymer matrix and by the diffusion of chlorine ions (Cl^-) toward the metal substrate. Water molecules penetrating the matrix pores increase the specific capacitance from $c = 24 \text{ pF/m}^2$ to $c = 28 \text{ pF/m}^2$, indicating the initial integration of the polar environment into the polymer's internal volume and a partial change in the coating's dielectric properties. These processes are a typical manifestation of the electrochemical interaction of the polymer matrix with aggressive components of seawater, which can lead to a local decrease in the material's barrier efficiency and the development of the initial stages of corrosion on the metal base. The developed coatings (EC-2, EC-3, EC-4) exhibit much more stable properties. During 30 days of exposure, the specific resistance remained practically unchanged at $\rho = 0.25\text{--}0.26 \text{ }\Omega\cdot\text{m}^2$, and the specific capacitance did not exceed $c = 27\text{--}29 \text{ pF/m}^2$. Such stability indicates the formation of a dense, three-dimensionally crosslinked, hydrophobic polymer network that effectively limits the penetration of ions and water molecules.

Modification of the polymer structure with trimethoprim enhances crosslinking, increasing the cohesive strength and structural integrity of the matrix. The nanodispersed fullerene-carbon black mixture fills the existing nanopores and defects, thereby reducing capillary permeability and increasing the material's barrier properties.

A comparative analysis of the studied parameters of known coatings manufactured by HEMPEL and HEMPALIN ENAMEL showed that the resistivity of these systems exceeds the corresponding indicators of the unmodified epoxy matrix, but remains lower than that of the EC-3 coating. This emphasizes the advantages of the developed compositions, since their three-dimensional structure provides the maximum barrier for the diffusion of chlorine ions and water molecules. The HEMPALIN ENAMEL alkyd coating, unlike epoxy systems, demonstrates a decrease in resistivity by 5.5% compared to the epoxy matrix, which is explained by the chemical nature of alkyd polymers: they are polyesters modified with fatty acids or oils, with a lower crosslinking density and the presence of polar hydrophilic groups ($-\text{OH}$, $-\text{COOH}$), which actively interact with polar components of seawater. Thus, the results obtained demonstrate the complex influence of the marine environment on the characteristics of the developed and known polymer coatings. Unmodified epoxy systems exhibit a gradual decrease in barrier properties due to hydration and ion diffusion, whereas modified coatings with a three-dimensionally crosslinked, hydrophobic structure maintain stable resistivity and capacitance throughout the entire exposure period. This emphasizes the feasibility of using modified epoxy compositions to protect metal structures in the marine and coastal industries, as they provide high resistance to the penetration of aggressive components of seawater, reduce the risk of corrosion, and extend the service life of structures and functional surfaces in water transport. The obtained effect is of direct practical importance for the maintenance of navigation aids, deck equipment, open-area metal assemblies, and fastening elements of marine technical systems, where corrosion damage usually leads to deterioration in reliability, increased maintenance labour intensity, and additional repair costs.

At the same time, the obtained results allow explaining the mechanism of increased corrosion resistance in seawater, based on the presented model (Fig. 4), which includes: chemical crosslinking, nanomodification, and hydrophobization of the structure.

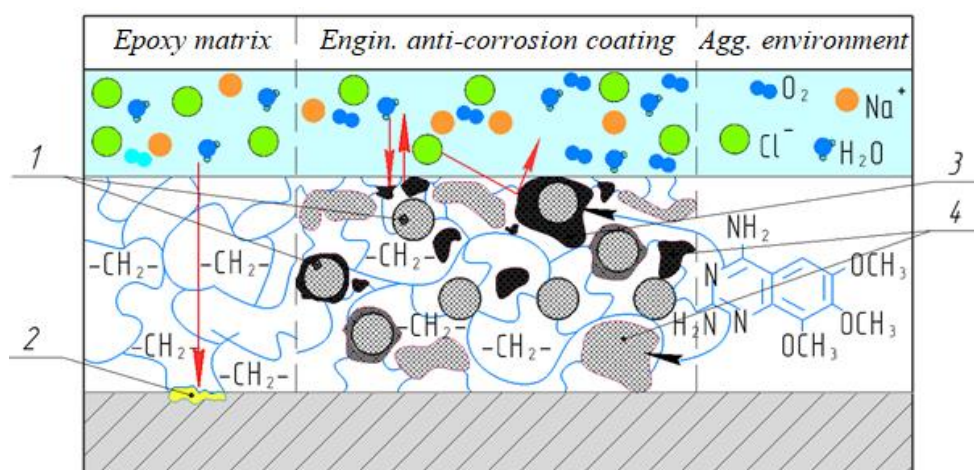


Figure 4 – Model of the mechanism for increasing the corrosion resistance of the developed epoxy composite protective coatings in the seawater environment: 1 – schematic representation of nanoparticles; 2 – nucleation of sub-film corrosion; 3 – adsorption of $\text{C}_{14}\text{H}_{18}\text{N}_4\text{O}_3$ on the surface of particles of the nanodispersed fullerene-carbon black mixture; 4 – formation of new structures $\text{CH}(\text{OH})-\text{CH}_2-\text{NH}-\text{R}_2$ (β -hydroxamine) in the polymer bulk

If we consider the mechanism of chemical crosslinking, then trimethoprim performs the function of additional hardening due to the presence of two primary amino groups interacting with the epoxy rings of the epoxy oligomer ED-20 (proven by the method of wide-angle X-ray diffraction and IR spectral analysis) [13]. This forms additional covalent bonds, increasing the network density and reducing the diffusion permeability of the epoxy composite coating to the base. While the epoxy matrix does not contain, in its structure, characteristic barriers that reduce the

diffusion permeability to the metal base, which accordingly affects the values of the specific resistance and specific capacitance.

If we consider the mechanism of nanomodification, the introduction of nanodispersed fullerene-carbon black mixture 1 forms a diffusion barrier due to the "labyrinth structure", increasing the time required and complicating the path of water molecules and dissolved ions through the polymer matrix to the base.

Hydrophobization of the structure. First of all, it is necessary to take into account that new structures 4 (β -hydroxyamine structures $\text{CH}(\text{OH})\text{--CH}_2\text{--NH--R}_2$) form in the volume of the modified polymer, which, in terms of strength indicators, prevail over the basic ones [14]. It is also necessary to consider the adsorption of $\text{C}_{14}\text{H}_{18}\text{N}_4\text{O}_3$ on the surface of particles of the nanodispersed fullerene-carbon black mixture due to the $\pi\text{--}\pi$ interaction 3. However, it is necessary to consider the complex effect of trimethoprim and the nanodispersed fullerene-carbon black mixture, which provides a decrease in the polarity of the coating due to a decrease in the number of free hydrophilic groups (OH-- , --COOH), which is confirmed by lower capacitance values (relative to the control sample) for the developed epoxy composite coatings in all environments during 30 days of exposure. It is also possible to consider the stabilization of the diffusion process over time, due to the stabilization of the specific resistance and specific capacitance over 30 days, indicating the absence of structural destruction and degradation at the interface between the phases "polymer-filler-substrate".

Based on the conducted experimental studies and the presented mechanism of increasing the corrosion resistance of the developed coatings, it was established that the most effective anti-corrosion coating is EC-3, which contains epoxy oligomer ED-20 (100 %), trimethoprim (10.0 %), nanofullerene-carbon black mixture (0.050 %), and hardener PEPA (10 %). The complex use of fillers provides not only a high level of protection in conditions of aggressive environments, but also stability over a long period of operation.

Conclusions. Based on the comprehensive studies conducted, the following was established.

1. It was experimentally proven that in three aggressive environments – acidic (10% H_2SO_4), acetone ($\text{C}_3\text{H}_6\text{O}$), saline solution (35‰, Na^+ , Cl^- , Mg^{2+} , SO_4^{2-}) – the developed coatings provide significantly higher values of specific resistance (within $\rho = 0.25\text{--}0.29 \Omega \cdot \text{m}^2$) and lower values of specific capacitance (within $c = 16\text{--}27 \text{ pF/m}^2$), compared to the epoxy matrix and well-known coatings from HEMPEL and HEMPALIN ENAMEL. This indicates the effective formation of a stable, nano-strengthened, and hydrophobic polymer structure. Significant barrier protection is created by the sample EC-3 (100 % of epoxy oligomer ED-20 + 10.0 % of trimethoprim + 0.050 % of fullerene-carbon black mixture ED-20 + 10.0 % of hardener PEPA), which provided maximum protective characteristics in all studied environments, demonstrating minimal changes in the values of specific resistance and specific capacitance during 30 days of exposure. In practical terms, the obtained results indicate the possibility of using the developed coating to improve the corrosion protection of navigation equipment, deck mechanisms, supporting metal structures, and other ship surfaces operated in aggressive marine conditions.

2. A model is proposed that reveals the idea of the mechanism of increasing the corrosion resistance of the developed epoxy composite coating modified with trimethoprim and a nanodispersed fullerene-carbon black mixture. The model is based on a comprehensive analysis of experimental results and summarizes the main structural and chemical processes that occur during the action of aggressive environments, in particular:

- chemical crosslinking of the polymer matrix due to the interaction of the primary amino groups of trimethoprim with the epoxy oligomer ED-20, which ensures the formation of additional covalent bonds and a decrease in the diffusion permeability of the coating;
- nanomodification associated with the formation of a labyrinth structure in the volume of the epoxy network due to the introduction of a nanodispersed fullerene-carbon black mixture, which inhibits the transfer of ions and molecules of the aggressive environment;
- hydrophobization of the polymer structure due to a decrease in the content of hydrophilic groups (--OH , --COOH), due to the synergistic action of fillers, including the $\pi\text{--}\pi$ interaction between trimethoprim and the graphite-like surface of the NFCM particles.

3. The practical effect of implementing the developed EC-3 coating consists in reducing the diffusion permeability of the polymer layer, slowing corrosion initiation on the metal substrate, preserving the protective integrity of the coating during prolonged exposure, and improving the operational and maintenance characteristics of water transport equipment surfaces. Compared with the base epoxy matrix, the developed composition demonstrated an increase in resistivity of up to 56%, and compared with commercial coatings HEMPEL and HEMPALIN ENAMEL, an advantage of 24–28%, which confirms its higher functional efficiency under simulated service conditions.

The developed epoxy composite coatings should be used to improve the operational and repair characteristics of metal structures and equipment for navigation aids used by vessels operating under prolonged exposure to aggressive environments.

Prospects for further research. Prospects for further research are associated with expanding the range of operational factors affecting the developed coatings, in particular by studying their resistance to ultraviolet radiation, cyclic temperature changes, mechanical wear, and long-term salt fog exposure. It is also advisable to investigate the adhesion strength of the coatings after prolonged service, their crack resistance, and the possibility of industrial implementation for the protection of shipboard navigation equipment, deck mechanisms, and other metal surfaces of water transport facilities.

The publication contains the results of research funded within the framework of the named scholarship of the Verkhovna Rada of Ukraine for young scientists – doctors of science for 2025 (Resolution of the Verkhovna Rada of Ukraine dated August 21, 2025 No. 4583-IX).

REFERENCES

1. Barhoumi, N., Ghanem, A., Koudhai, M., et al. (2022). Improving the mechanical, wear and anti-corrosion performance of polyester coating on structural steel by graphite addition. *Express Polym. Lett.*, 16 (5), 476–487. <https://doi.org/10.3144/expresspolymlett.2022.36>.
2. Li, H., Zhang, Q.-H., Meng, X.-Z., et al. (2023). A novel cerium organic network modified graphene oxide prepared multifunctional waterborne epoxy-based coating with excellent mechanical and passive/active anti-corrosion properties, *Chem. Eng. J.*, 465 (8), 142997. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.142997>.
3. Chen, J., Zhao, W. (2021). Silk fibroin-Ti3C2TX hybrid nanofiller enhance corrosion protection for waterborne epoxy coatings under deep sea environment. *Chem. Eng. J.*, 423, 130195. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.130195>.
4. Xianming Shi, Tuan Anh Nguyen, Zhiyong Suo, Yajun Liu, Recep Avci (2009). Effect of nanoparticles on the anticorrosion and mechanical properties of epoxy coating. *Surface and Coatings Technology*, 204 (3), 237–245. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2009.06.048>.
5. Mehdi Honarvar Nazari, Yan Zhang, Ali Mahmoodi, Gang Xu, Jiang Yu, Junliang Wu, Xianming Shi (2022). Nanocomposite organic coatings for corrosion protection of metals: A review of recent advances. *Progress in Organic Coatings*, 162, 106573. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2021.106573>.
6. Zhangmin Zhang, Rui Chen, Jie Hu, Yangyang Wang, et al (2021). Corrosion behavior of the reinforcement in chloride-contaminated alkali-activated fly ash pore solution. *Composites Part B: Engineering*, 224, 109215. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2021.109215>.
7. Verma, C, Olasunkanmi, LO, Akpan, ED, Quraishi, MA, Dagdag, O, El Gouri, M, Ebenso, EE (2020). Epoxy resins as anticorrosive polymeric materials: A review. *Reactive and Functional Polymers*, 156, 104741. <https://doi.org/10.1016/j.reactfunctpolym.2020.104741>.
8. Makhmetova, A. R., Negim, El-Sayed, Ainakulova, D. T., Yeligbayeva, G., Khatib, J. M. (2024). An Overview of Epoxy Resins as coating to protect metals from corrosion. *Complex Use of Mineral Resources*, 328(1), 20–32. <https://doi.org/10.31643/2024/6445.03>.
9. Xiaomei, Wang, Weili, Li, Xiao, Wang, Mingsheng, Bu, Xin, Sun, Zhengbai, Zhao, Lixin, Xu, Lizhuang, Chen, Zhaolei, Li, Mike, Tebyetekerwa (2024). Improved properties of epoxy composite coatings enabled by multi-dimension filler materials. *Progress in Organic Coatings*, 197, 108800. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2024.108800>.

10. Sienkiewicz, A., Czub, P. (2023). Modification of Epoxy Compositions by the Application of Various Fillers of Natural Origin. *Materials*, 16, 3149. <https://doi.org/10.3390/ma16083149>.
11. Mathew, L., Joseph, K. U., Joseph, R. (2007). Isora fibre: Morphology, chemical composition, surface modification, physical, mechanical and thermal properties—A potential natural reinforcement. *J. Nat. Fibers*, 3 (4), 13–27. https://doi.org/10.1300/J395v03n04_02.
12. Sapronov, O. O., Maruschak, P. O., Demchenko, V. L., Bishchak, R. T., Sharanov, V. D., Danylenko, D. O., Sapronova, A. V., Sotsenko, V. V., Vorobiov, P. O., Sokol, A. O., Yurenin, K. Yu., Aleksenko, V. L. (2025). Study of thermal effects in polymer coatings with increasing temperature. *Functional Materials*, 32 (3), 405–410. <https://doi.org/10.15407/fm32.03.405>.
13. Sapronov, O. O., Demchenko, V. L., Sharanov, V. D., Danylenko, D. O., Sapronova, A. V., Sotsenko, V. V., Vorobiov, P. O., Yurenin, K. Yu., Fostyk, P. P., Banha, M. M., Sytnyk, I. O. (2025). Investigation of properties and structure of polymer coatings based on epoxy polymer and trimethoprim. *Functional Materials*, 32 (4), 578–585. <https://doi.org/10.15407/fm32.04.578>.
14. Sapronov, O., Demchenko, V., Sharanov, V., Sapronova, A. (2025). Improvement of the characteristics of protective coatings intended for the protection of surfaces of aids navigation water transport. *Transport Development*, 1(24), 100–113. <https://doi.org/10.33082/td.2025.1-24.08>.
15. Sapronov, O. O., Dyadyura, K., Vorobiov, P. O., Sharanov, V. D., Karpash, M. O., Bishchak, R. T., Hrebenyk, L. (2023). Corrosion-Resistant Epoxy Coatings Filled with Nanoparticles of Vegetable Origin to Protect Water Vehicles. *Journal of Nano- and Electronic Physics*, 15(5), 1–7 [https://doi.org/10.21272/jnep.15\(5\).05025](https://doi.org/10.21272/jnep.15(5).05025).

Сапронов О. О., Сіманенков А. Л., Банга М. М., Даниленко Д. О., Шаранов В. Д., Сапронова А. В.
ПІДВИЩЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНО-РЕМОНТНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОВЕРХОНЬ
ОБЛАДНАННЯ ВОДНОГО ТРАНСПОРТУ ШЛЯХОМ ВПРОВАДЖЕННЯ ПОЛІМЕРНИХ
ПОКРИТТІВ

У роботі наведено результати експериментальних досліджень, спрямованих на підвищення експлуатаційно-ремонтних характеристик поверхонь водного транспорту шляхом розроблення та впровадження новітніх полімерних покриттів із покращеними антикорозійними характеристиками. Основною метою дослідження є встановлення закономірностей впливу різнодисперсних наповнювачів на корозійну тривкість епоксидних композитних покриттів. Як матрицю для створення захисних покриттів використано епоксидний олігомер ЕД-20, який полімеризували поліетиленполіаміном (ПЕПА). Для модифікації структури полімеру застосовано систему наповнювачів, що включає нанодисперсну фулерено-сажову суміш (30–40 нм) та мікродисперсний триметоприм (5–10 мкм). Оптимізацію складу композицій здійснено із застосуванням методу математичного планування експерименту з використанням програмного середовища STATGRAPHICS® Centurion XVI. Дослідження корозійної стійкості виконано методом імпедансної спектроскопії шляхом визначення питомого електричного опору та питомої ємності покриттів у трьох модельних агресивних середовищах: 10 % розчині сірчаної кислоти, ацетоні та морській воді (35‰). Встановлено, що введення триметоприму сприяє додатковому хімічному зшиванню полімерної матриці, тоді як нанодисперсний наповнювач формує ефект «лабіринтової структури», зменшуючи дифузійну проникність покриття. Експериментально підтверджено, що розроблені композиції забезпечують підвищення значення питомого опору (0,25–0,29 Ом·м²) та зниження питомої ємності (16–27 нФ/м²), що свідчить про формування щільної, гідрофобної та структурно стабільної полімерної сітки. Максимальними значеннями досліджуваних параметрів характеризується покриття ЕКП-3, яке перевищує показники базової матриці на 56 % та покриттів HEMPEL, HEMPALIN ENAMEL – на 24–28 %. Запропоновано узагальнену модель механізму підвищення корозійної стійкості, що базується на трьох ключових процесах: хімічному зшиванні, наномодифікації та гідрофобізації структури полімеру.

Ключові слова: водний транспорт; навігаційне обладнання; антикорозійний захист; склад покриття; модель; морське середовище.

© Sapronov O. O., Simanenkova A. L., Banha M. M.,
Danylenko D. O., Sharanov V. D., Sapronova A. V.

Статтю прийнято до редакції 13.04.2026

MODEL AND METHOD FOR SOLVING THE TRANSPORT PROBLEM WITH A THRESHOLD CHANGE IN TRANSPORTATION TARIFFS

Slavych V. P., Ph.D., Associate Professor, Associate Professor of the Department of Transport Systems and Technical Service of Kherson National Technical University, Kherson, Ukraine, e-mail: vslavich@ukr.net, ORCID: 0000-0001-7882-4198;

Afonin M. O., Ph.D., Associate Professor, Associate Professor of Transport Technologies Department in Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine, e-mail: maksym.o.afonin@lpnu.ua, ORCID: 0000-0001-5850-7478;

Rusavska O. O., Student of the Department of Transport Systems and Technical Service of Kherson National Technical University, Kherson, Ukraine, e-mail: s7998208@kntu.edu.ua.

The article presents a transport problem with a threshold change in transportation tariffs, in which the cost of transportation depends on the volume of cargo between specific suppliers and consumers. The relevance of the study is due to the spread of flexible tariff mechanisms in modern transport and logistics systems, under which reduced or wholesale tariffs are applied when a certain volume of transportation is exceeded. Similar approaches are used in cargo consolidation systems, long-term contracts, multimodal transportation and in organizing regular deliveries of large batches of products. A mathematical model of the transport problem is proposed, in which for each "supplier-consumer" pair basic and reduced transportation tariffs are set, as well as threshold values of cargo volumes, after which the alternative delivery cost is applied. The objective function of the problem is constructed taking into account the dynamic change in transportation costs depending on the volume of transport flow and the system of balance constraints of the transport problem. A modified method for constructing a reference plan based on the classical least cost method has been developed, which takes into account the possibility of switching to reduced tariffs when reaching transportation threshold values. A modified potential method has also been proposed for finding the optimal plan, which provides for repeated updating of the effective cost matrix and recalculation of potentials after each cargo redistribution. Unlike the classical transport problem, in the proposed model the structure of transport costs can change directly in the process of forming a transportation plan. The practical significance of the study lies in the possibility of using the developed model to improve the efficiency of freight transportation management in the conditions of wholesale tariffs and dynamic changes in the cost of delivery.

Key words: transport problem; transport logistics; potential method; reference plan; optimal plan; threshold tariffs; variable transportation cost; freight transportation.

DOI: 10.33815/2313-4763.2026.1.32.164-173

Introduction. Effective management of transport flows is one of the key tasks of modern logistics systems, as it directly affects the level of costs, delivery speed and overall productivity of supply chains. The tasks of optimal distribution of goods between suppliers and consumers are traditionally formalized in the form of a linear programming transport problem, which allows minimizing the total transportation costs subject to balance constraints.

In the classical formulation of the transport problem, the cost of transporting a unit of cargo between a specific supplier and a consumer is considered a constant value that does not depend on the volume of the transport consignment. This approach is sufficient for basic planning models, but does not take into account important practical features of real transport and logistics systems.

In modern conditions of operation of transport networks, differentiated tariff policies are increasingly used, which provide for a decrease in the cost of transportation with an increase in the volume of cargo between individual participants in the logistics process. Such mechanisms are typical for wholesale transportation, long-term contracts, cargo consolidation systems, as well as for integrated logistics platforms, where the cost of delivery is a function of the intensity of the transport flow.

The presence of threshold values of transportation volumes, after which reduced tariffs are applied, leads to the fact that the structure of transport costs becomes dependent on the transportation plan itself. This, in turn, significantly complicates the mathematical model of the problem and makes it nonlinear in nature. Under such conditions, classical methods of constructing

an optimal plan require significant modification, since the choice of transportation route affects not only the current cost, but also the future tariff structure in the system.

Thus, there is a need to develop new approaches to modeling transport problems that take into account the variability of transportation costs depending on the volume of transport flow. Of particular importance is the construction of algorithms that allow adapting classical optimization methods, in particular the potential method, to the conditions of threshold tariff functions without significantly complicating computational procedures.

In this regard, the study of transport problems with a variable transportation cost structure is a relevant scientific direction that has important applied significance for increasing the efficiency of management of modern transport and logistics systems.

Analysis of recent achievements and publications. In the work [1], a mathematical-information model of a special type of transport problem is proposed to increase the economic efficiency of freight transportation. The main attention is paid to the construction of a modified transport model and algorithms for determining rational transportation plans. However, the work does not consider the dependence of the cost of transportation on the size of the cargo and there is no mechanism for automatic change of tariffs when the specified threshold values are exceeded.

In [2], a modified transportation problem is considered in the case of grouping cargo suppliers and a method for finding reference and optimal transportation plans is proposed. The study is focused on the structural features of building a transport model, but it does not take into account the situation when the cost of transportation varies depending on the volume of transported cargo between specific suppliers and consumers.

In the study [3], a multi-criteria transportation problem is considered, taking into account product storage technologies and fuzzy sets. The work takes into account complex decision-making conditions and the multi-criteria nature of optimization, but it does not investigate the mechanism of the threshold change in transportation costs when certain transportation volumes are reached.

In the work [4], the problem of optimizing the process of cargo delivery of a gas supply enterprise was investigated. The main emphasis was placed on minimizing costs and improving the logistics processes of the enterprise. However, the work did not take into account the possibility of using different transportation tariffs depending on the size of the transported cargo.

In the article [5], a model of integrated design of a transport network and supply chain for perishable products using a fuzzy two-level decision support system is proposed. The work covers the issue of optimization of transport costs, but does not consider the transport problem with variable tariffs depending on threshold values of transport volumes.

In [6], a model of the transport problem in the case of cargo delivery by two different types of vehicles is considered. The study takes into account the features of the use of different types of transport and the corresponding tariffs, but the change in the cost of transportation depending on the quantity of cargo for a specific cell of the transport table is not considered.

The study [7] considers the problem of sustainable transport planning taking into account congestion and uncertain conditions. The main emphasis is on the adaptability of the transport system and taking into account external factors. However, the work does not propose mechanisms for changing the cost of transportation depending on the size of the transported cargo.

In [8], approaches to modeling transportation processes under variable system parameters and adaptive redistribution of freight flows are considered; however, the dependence of transportation tariffs on shipment volume and the mechanism of threshold-based cost changes for individual supplier–consumer pairs are not taken into account.

In the article [9] the problem of vehicle routing for combined passenger and freight transportation is considered. The main attention is paid to routing and coordination of transportation, however, there is no model of the change in the cost of delivery depending on the amount of cargo transported.

The paper [10] provides an overview of the use of artificial intelligence in logistics optimization problems. The study covers a wide range of modern methods for optimizing transport

processes, but the issue of constructing a transport problem with variable threshold tariffs is not considered separately.

In the article [11], optimization of freight transport routes in dynamic networks with carbon emissions in mind is investigated. The authors take into account environmental criteria and variable traffic conditions, but the mechanism of dependence of the transport tariff on the size of the cargo is absent in the work.

In [12], a multi-criteria multi-period routing problem for the delivery of perishable goods is considered. The proposed approach takes into account the level of consumer satisfaction and delivery time parameters, but does not take into account the change in transportation costs depending on the volume of transportation.

In [13], a comparative analysis of routing optimization algorithms in pharmaceutical supply chains is conducted. The main emphasis is on the efficiency of routing algorithms, but the transport problem with variable tariffs when threshold values are exceeded is not investigated.

In [14], a hybrid intelligent transport system for optimizing transportation routes is proposed. The study focuses on the use of intelligent decision-making methods, but the issue of the threshold change in transport costs depending on the volume of transportation is not considered.

The article [15] provides an overview of vehicle routing problems and corresponding algorithms for logistics systems. The work systematizes modern approaches to transport optimization, but does not contain models of the transport problem with variable tariffs depending on the size of the cargo between suppliers and consumers.

A comparative analysis of the reviewed studies has shown that most existing transportation models are based on the assumption of fixed transportation tariffs or take into account additional factors in the form of fuzzy parameters, multicriteria optimization, fixed costs, or routing constraints. In contrast to these approaches, the proposed study considers a transportation problem in which the transportation cost directly depends on the volume of the transport flow and changes when predetermined threshold values are reached. Such an approach makes it possible to model wholesale tariff mechanisms and discount systems that are practically not considered in existing transportation models and are not taken into account in classical transportation problem formulations.

Thus, the analysis of modern scientific research has shown that, despite the significant development of transportation models and optimization methods, insufficient attention has been paid to transportation problems in which transportation costs depend on cargo volumes and change when predetermined threshold values are reached. In addition, existing studies do not propose approaches for constructing initial feasible and optimal transportation plans under conditions of dynamic tariff changes during cargo redistribution. This creates the need for developing appropriate mathematical models and solution methods adapted to threshold tariff mechanisms.

The scientific novelty lies in the development of a transportation problem with a variable structure of transportation tariffs, in which the effective transportation cost matrix is iteratively dependent on the current transportation plan and is updated during its construction. Additionally, a modified method for constructing an initial feasible solution is developed, and the potential method is improved, both involving dynamic recalculation of effective costs and potentials at each step of the solution process.

Goal and problem statement. In modern transport and logistics systems, flexible tariff mechanisms are increasingly used, in which the cost of transportation depends on the volume of the transport consignment. In the practice of freight transportation, situations are common when, when a certain volume of delivery is exceeded, reduced or preferential tariffs are applied for individual routes. Similar approaches are used in wholesale transportation systems, long-term contracts, cargo consolidation, multimodal transport schemes and in organizing regular deliveries of large volumes of products.

The classical transport problem involves the use of a constant matrix of transportation costs, in which the tariff for each “supplier-consumer” pair does not depend on the volume of the transport flow. This formulation is effective for problems with fixed transport tariffs, but it does not allow

taking into account the change in the cost of transportation with an increase in the volume of delivery. As a result, the optimal plan obtained by classical methods may not correspond to the real economic conditions of the transport system, since it does not take into account the possibility of reducing costs through the use of wholesale tariffs.

In this regard, there is a need to develop a mathematical model of the transport problem, in which the cost of transportation is determined not only by the transportation route, but also by the amount of cargo transported. A feature of such a problem is that the structure of transport costs can change directly in the process of forming a transportation plan depending on the achievement of threshold values of transport flows.

The aim of the study is to develop a mathematical model of the transportation problem with a variable structure of transportation tariffs, in which the effective transportation cost matrix is iteratively dependent on the current transportation plan and is updated during its formation, as well as to develop methods for finding an initial feasible solution and an optimal plan based on modifications of the least cost method and the potential method.

To achieve the set goal, it is planned to:

- formalize the dependence of transport costs on the volume of transportation;
- construct the objective function of the problem taking into account the threshold change in tariffs;
- develop a modified method for constructing a reference transportation plan;
- to improve the potential method for problems with a variable structure of transport costs;
- to form an algorithm for iterative improvement of the transportation plan, taking into account the dynamic change in tariffs in the process of redistribution of cargo flows.

Thus, the problem statement consists in determining a transportation plan that satisfies the balance constraints of the transport system and ensures the minimization of total transportation costs under the conditions of applying threshold tariffs and changing the cost of transportation depending on the volume of transport flow.

The proposed model is intended for freight transportation planning problems in logistics systems with wholesale or contract-based tariffs, particularly for distribution of homogeneous goods between suppliers and consumers in centralized supply systems, logistics hubs, and distribution networks where discounted tariffs are applied when shipment volumes exceed predefined thresholds on individual routes.

Presentation of the main research material. Let there be given m cargo suppliers $A_1, A_2, \dots, A_i, \dots, A_m$, which have cargo stocks concentrated in the quantities $a_1, a_2, \dots, a_m$ of units, respectively. This cargo must be transported to n consumers $B_1, B_2, \dots, B_j, \dots, B_n$, whose needs are in $b_1, b_2, \dots, b_n$ the units, respectively.

Unlike the classical transportation problem, in the proposed model the cost of transportation depends not only on the transportation route, but also on the volume of cargo transported between the corresponding supplier and consumer.

For each supplier-consumer pair, the following values are set:

- 1) the basic cost of transporting a unit of cargo;
- 2) reduced (preferential) transportation cost;
- 3) the threshold value of the transportation volume, after which a reduced tariff is applied.

The basic transportation costs are given by the matrix:

$$C = \begin{pmatrix} C_{11} & C_{12} & \dots & C_{1n} \\ C_{21} & C_{22} & \dots & C_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ C_{m1} & C_{m2} & \dots & C_{mn} \end{pmatrix}, \quad (1)$$

where c_{ij} – the cost of transporting a unit of cargo from the cargo supplier A_i to the consumer of the cargo B_j ($i = \overline{1, m}; j = \overline{1, n}$).

Reduced transportation costs are given by the matrix:

$$C' = \begin{pmatrix} c'_{11} & c'_{12} & \dots & c'_{1n} \\ c'_{21} & c'_{22} & \dots & c'_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ c'_{m1} & c'_{m2} & \dots & c'_{mn} \end{pmatrix}. \quad (2)$$

Moreover, the following condition is met:

$$\forall_{i,j} c'_{ij} < c_{ij}.$$

The threshold values of transportation volumes are given by the matrix:

$$H = \begin{pmatrix} h_{11} & h_{12} & \dots & h_{1n} \\ h_{21} & h_{22} & \dots & h_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ h_{m1} & h_{m2} & \dots & h_{mn} \end{pmatrix} \quad (3)$$

where h_{ij} – the minimum transportation volume, after which $(i; j)$ a reduced tariff is applied for the route.

Let us denote the transportation plan by:

$$X = \{x_{11}; x_{12}; \dots; x_{1n}; x_{21}; x_{22}; \dots; x_{2n}; \dots; x_{m1}; x_{m2}; \dots; x_{mn}\}, \quad (4)$$

where x_{ij} – the amount of cargo transported from supplier A_i to consumer B_j .

Then the actual cost of transporting a unit of cargo for the route $(i; j)$ is determined by the relationship:

$$\tilde{c}_{ij}(x_{ij}) = \begin{cases} c_{ij}, & x_{ij} \leq h_{ij}, \\ c'_{ij}, & x_{ij} > h_{ij}. \end{cases} \quad (5)$$

In this case, when the threshold value h_{ij} is exceeded, the reduced tariff c'_{ij} is applied to the entire transportation volume x_{ij} for the corresponding supplier–consumer pair, i.e., the tariff switch has a full (non-marginal) effect.

Thus, when the established threshold value is exceeded, an alternative (reduced) transportation tariff is used for the corresponding route.

It is necessary to find a transportation plan (4) that:

- 1) ensures full removal of cargo from all suppliers;
- 2) satisfies the needs of all consumers;
- 3) minimizes the total cost of transportation taking into account the threshold change in tariffs.

The objective function of the problem has the form:

$$\begin{aligned} F &= \tilde{c}_{11}(x_{11}) \cdot x_{11} + \tilde{c}_{12}(x_{12}) \cdot x_{12} + \dots + \tilde{c}_{1n}(x_{1n}) \cdot x_{1n} + \tilde{c}_{21}(x_{21}) \cdot x_{21} + \tilde{c}_{22}(x_{22}) \cdot x_{22} + \\ &+ \dots + \tilde{c}_{2n}(x_{2n}) \cdot x_{2n} + \dots + \tilde{c}_{m1}(x_{m1}) \cdot x_{m1} + \tilde{c}_{m2}(x_{m2}) \cdot x_{m2} + \dots + \tilde{c}_{mn}(x_{mn}) \cdot x_{mn} = \\ &= \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \tilde{c}_{ij}(x_{ij}) \cdot x_{ij} \rightarrow \min \end{aligned} \quad (6)$$

Taking into account expression (5), the objective function (6) can be written in expanded form:

$$F = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \begin{cases} c_{ij} x_{ij}, & x_{ij} \leq h_{ij} \\ c'_{ij} x_{ij}, & x_{ij} > h_{ij} \end{cases} \rightarrow \min \quad (7)$$

It should be noted that due to the dependence of transportation costs on the volume of the transport flow x_{ij} , the proposed model belongs to the class of piecewise-linear transportation problems. The objective function contains threshold points of tariff changes, at which a transition from the basic transportation cost to a reduced (discounted) cost occurs. Thus, unlike the classical

linear transportation problem, the proposed model is characterized by a piecewise-linear cost function whose parameters change depending on transportation volumes.

Optimization is performed under the balance constraints of the transport problem:

$$\begin{cases} \sum_{j=1}^n x_{ij} = a_i, & i = \overline{1, m}, \\ \sum_{i=1}^m x_{ij} = b_j, & j = \overline{1, n}, \\ x_{ij} \geq 0. \end{cases} \quad (8)$$

Thus, the proposed mathematical model of the transport problem takes into account the change in transportation tariffs depending on the volume of transport flow between individual suppliers and consumers. Unlike the classical transport problem, in which the cost matrix is constant, in the proposed model the structure of transport costs changes in the process of forming a transport plan depending on the achievement of threshold values of supply volumes. This allows formalizing transport planning problems in the conditions of applying wholesale tariffs, discount systems or contractual terms of transport.

Based on the formulated mathematical model of the transport problem with threshold values of the transportation cost, we will consider the procedure for constructing a reference plan, which is an adaptation of the classical least cost method to the conditions of variable (threshold) tariffs.

Method and algorithm for finding the reference plan of a modified transportation problem.

To build the reference plan, a modified least cost method is used, which takes into account the change in transportation costs depending on the volume of cargo between a specific supplier-consumer pair.

In each cell of the transport table, the possible volume of transportation is defined as:

$$x_{ij}^{\max} = \min(A_i, B_j). \quad (9)$$

The rule for determining the cost of transportation. We enter the following parameter $\tilde{c}_{ij}$ - the effective cost of transportation, which will be determined under the condition of the following threshold transition:

$$\tilde{c}_{ij} = \begin{cases} c_{ij}, & x_{ij}^{\max} \leq h_{ij}, \\ c'_{ij}, & x_{ij}^{\max} > h_{ij}. \end{cases} \quad (10)$$

Thus, the transportation cost for each cell is dynamic and depends on the possible load volume.

Algorithm for constructing a reference plan.

Step 1. Initial analysis of the transport table. For all free cells, the possible volume of transportation is determined $x_{ij}^{\max}$ and the threshold condition is checked h_{ij} . Based on this, the current matrix of effective costs is formed $\tilde{c}_{ij}$.

Step 2. Selecting the minimum value. Among all free cells $(i_0; j_0)$, a cell is selected for which:

$$\tilde{c}_{i_0 j_0} = \min \tilde{c}_{ij}.$$

Step 3. Destination of transportation. The volume is recorded in the selected cell:

$$x_{i_0 j_0} = \min(A_{i_0}, B_{j_0}).$$

After that, an adjustment is made to the inventory and demand balances, and the corresponding row or column is excluded from further consideration (in case of complete exhaustion).

Step 4. Update values. After each step, all remaining cells are rechecked:

- 1) the possible volume of transportation is calculated;
- 2) the fulfillment of the threshold condition is checked;

3) the effective cost is updated $\tilde{c}_{ij}$.

Step 5. Iterative process. Steps 2–4 are repeated until all consumer needs are fully satisfied and suppliers' stocks are exhausted.

The proposed algorithm differs from the classical least cost method in that the choice is based not on static cost values, but on a dynamically changing matrix of effective costs, which takes into account the possible transition to a reduced (wholesale) price when a threshold transportation volume is reached.

The next stage after building a reference plan and taking into account threshold changes in transportation costs is the procedure for improving it in order to achieve optimal distribution of cargo flows.

Method for finding the optimal plan (modified potential method).

After constructing the reference plan, its improvement is performed based on the modified potential method, adapted to the conditions of variable (threshold) transportation costs.

Step 1. Checking the reference plan for degeneracy. The following condition is checked for the constructed reference plan:

$$N = m + n - 1,$$

where N – the number of occupied cells.

In case of violation of this condition, zero (fictitious) transportations are entered into the corresponding cells without violating the structure of the plan.

Step 2. Calculation of potentials. A system of potential equations is constructed for all occupied cells:

$$u_i + v_j = \tilde{c}_{ij},$$

where $\tilde{c}_{ij}$ is the effective cost of transportation, which is determined taking into account the threshold rule.

The potentials u_i, v_j are determined in the classical way with one of them fixed (for example, $u_1 = 0$).

Step 3. Checking the optimality conditions. For all free cells, the score is calculated:

$$\Delta_{ij} = \tilde{c}_{ij} - (u_i + v_j).$$

– If $\Delta_{ij} \geq 0$ for all free cells, the plan is optimal.

– If there are cells with $\Delta_{ij} < 0$ – the plan needs to be improved.

Step 4. Selecting a cell to improve the plan. In case of violation of optimality, a set of cells is considered for which:

$$\Delta_{ij} < 0.$$

For each such cell, a closed load redistribution cycle is built.

A feature of the modified approach is that the assessment Δ_{ij} is determined taking into account the current effective cost $\tilde{c}_{ij}$, which may change in the process of cargo redistribution.

Step 5. Construction of a cycle and redistribution of the load. For the selected cell, a cycle is constructed in which the vertices are alternately marked with the signs “+” and “–”.

It is further defined:

$$\theta = \min(x_{ij} \text{ in cells with a "–"}),$$

after which redistribution is performed:

– in cells with a “+” sign: $x'_{ij} = x_{ij} + \theta$;

– in cells with a “–” sign: $x'_{ij} = x_{ij} - \theta$.

Step 6. Update transportation costs. After each redistribution, a threshold condition check is performed:

- if after increasing or decreasing the volume the condition is met $x'_{ij} > h_{ij}$, then the reduced value is applied c'_{ij} ;
- if the condition is not met, the base value is used c_{ij} .

As a result, the effective value matrix changes $\tilde{c}_{ij}$, which requires recalculation of the potentials.

Step 7. Repeated iteration. After updating the plan, the algorithm returns to the stage of calculating potentials and checking optimality.

The procedure is repeated until the condition is met for all free cells:

$$\Delta_{ij} \geq 0.$$

Thus, the proposed method is a modification of the classical method of potentials for the case when the cost of transportation depends on the volume of cargo and can change when the specified threshold values are reached. Unlike the classical approach, during each iteration, dynamic updating of individual elements of the cost matrix is possible due to the transition between regular and wholesale tariffs. This, in turn, leads to the need to recalculate the potentials and re-check the optimality conditions after each redistribution of cargo in the cycle. This approach allows you to take into account the impact of variable tariffs on the total cost of transportation and provides the opportunity to find a more cost-effective transportation plan under threshold pricing conditions.

Conclusions. Thus, the paper considers a modified transport problem in which the cost of transportation depends on the volume of cargo between specific suppliers and consumers. The proposed model takes into account the threshold effect of tariff changes, which allows formalizing situations of wholesale transportation using reduced (discounted) costs.

It has been shown that the introduction of threshold tariff values leads to the formation of a piecewise-linear transportation problem model in which the structure of the cost function changes depending on transportation volumes. This makes it possible to describe more adequately the real operating conditions of transportation and logistics systems that apply wholesale and preferential tariff schemes.

A modified method for constructing a reference plan has been developed, which is based on the classical least cost approach, but supplemented by a procedure for preliminary verification of the possible volume of transportation and appropriate cost adjustment. This ensures a more correct choice of transport routes at the initial stage of solving the problem.

A modified potential method is also proposed for finding the optimal plan, which takes into account the dynamic change of the cost matrix in the process of iterative redistribution of loads. It is shown that this feature leads to the need to recalculate the potentials and check the optimality conditions after each cycle.

The proposed model allows taking into account threshold values of transportation volume and correctly describing the economic conditions of transport processes, expanding the capabilities of classical transport optimization methods.

The developed model can be applied in freight transportation practice to simulate real logistics systems with wholesale discounts and restrictions on transportation volumes.

Prospects for further research. Further research should be directed at expanding the proposed model by introducing stochastic or fuzzy parameters of transportation costs and threshold values of cargo volumes. This will allow taking into account the uncertainty of real logistics processes and increasing the adequacy of the model in practical application.

A separate direction of further research is the software implementation of the proposed algorithm and conducting numerical experiments to analyze the behavior of the model for different structures of transport problems and different values of threshold levels. This will allow assessing the stability of the algorithm and the features of the formation of an optimal plan in conditions of dynamic changes in transportation costs.

REFERENCES

1. Slavych, V. P., Dobrova, K. D. (2020). Model' ta metod znakhodzhennya opornoho ta optimal'nykh planiv modifikovanoyi transportnoyi zadachi u vypadku hrupuvannya postachal'nykiv vantazhu. *Prykladni pytannya matematychnogo modelyuvannya*. No 1. P. 187–193. <http://doi.org/10.32782/2618-0340/2020.1-3.19>.
2. Slavych, V. P., Biloushchenko, D. Yu. (2025). Model of the transport problem in the case of cargo delivery by two different types of vehicles. *Naukovyi visnyk KhDMA*. No 31. P. 178–186. <http://doi.org/10.33815/2313-4763.2025.2.31.178-186>.
3. Bera, R. K., Mondal, S. K. (2022). A multi-objective transportation problem with cost dependent credit period policy under Gaussian fuzzy environment. *Operational Research*. 22(4): 3147–3182. <http://doi.org/10.1007/s12351-022-00691-4>.
4. Bera, R. K., Mondal, S. K. (2023). A multi-objective transportation problem under quantity dependent credit period and cost structure policies in triangular intuitionistic fuzzy environment. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. 123: 106396. <http://doi.org/10.1016/j.engappai.2023.106396>.
5. Gütmen, S., Roy, S. K., Weber, G. W. (2024). An overview of weighted goal programming: a multi-objective transportation problem with some fresh viewpoints. *Central European Journal of Operations Research*. 32(3): 557–568. <http://doi.org/10.1007/s10100-023-00861-5>.
6. Luo, R., Ji, S., Ji, T. (2021). An effective chaos-driven differential evolution for multi-objective unbalanced transportation problem considering fuel consumption. *Applied Soft Computing*. 101: 107058. <http://doi.org/10.1016/j.asoc.2020.107058>.
7. Slavych, V. P. et al. (2025). Mathematical and information model of a special type of transport task as a tool for increasing economic efficiency of freight transportation. *Artificial intelligence as a tool to protect the economy from disinformation: innovative solutions and international practices*. Riga, Latvia: Baltija Publishing. 258 p. <http://doi.org/10.30525/978-9934-26-586-0>.
8. Mondal, M., Mandal, G., Shaikh, A. A., & Bhunia, A. K. (2025). Investigation of a multi-objective fixed charge transportation problem with quantity dependent transportation cost and discount policy via metaheuristics. *INFOR: Information Systems and Operational Research*, 63(3), 562–591. <https://doi.org/10.1080/03155986.2025.2492739>.
9. Ghosh, S., Küfer, K. H., Roy, S. K., Weber, G. W. (2023). Type-2 zigzag uncertain multi-objective fixed-charge solid transportation problem: time window vs. preservation technology. *Central European Journal of Operations Research*. 31(1): 337–362. <http://doi.org/10.1007/s10100-022-00811-7>.
10. Ghosh, S., Roy, S. K. (2021). Fuzzy-rough multi-objective product blending fixed-charge transportation problem with truck load constraints through transfer station. *RAIRO-Oper Res*. 55: S2923–S2952. <http://doi.org/10.1051/ro/2020129>.
11. Ghosh, S., Roy, S. K., Verdegay, J. L. (2022). Fixed-charge solid transportation problem with budget constraints based on carbon emission in neutrosophic environment. *Soft Computing*. 26(21): 11611–11625. <http://doi.org/10.1007/s00500-022-07442-9>.
12. Haque, S., Bhurjee, A. K., Kumar, P. (2022). Multi-objective non-linear solid transportation problem with fixed charge, budget constraints under uncertain environments. *Systems Science & Control Engineering*. 10(1): 899–909. <http://doi.org/10.1080/21642583.2022.2137707>.
13. Keshavarz E., Mahmoodirad A., Niroomand S. (2023). A transportation problem considering fixed charge and fuzzy shipping costs. *Decision Making Advances*. 1(1): 115–122. <http://doi.org/10.31181/dma11202313>.
14. Mahmoodirad, A., Niroomand, S. (2023). A heuristic approach for fuzzy fixed charge transportation problem. *Journal of Decision Analytics and Intelligent Computing*. 3(1): 139–147. <http://doi.org/10.31181/jdaic10005092023m>.

15. Mondal, A., Roy, S. K., Midya, S. (2023). Intuitionistic fuzzy sustainable multi-objective multi-item multi-choice step fixed-charge solid transportation problem. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*. 14(6): 6975–6999. <http://doi.org/10.1007/s12652-021-03554-6>.

Славич В. П., Афонін М. О., Русавська О. О. МОДЕЛЬ І МЕТОД РОЗВ'ЯЗАННЯ ТРАНСПОРТНОЇ ЗАДАЧІ З ПОРОГОВОЮ ЗМІНОЮ ТАРИФІВ ПЕРЕВЕЗЕННЯ

У статті представлено транспортну задачу з пороговою зміною тарифів перевезення, у якій вартість транспортування залежить від обсягу вантажу між конкретними постачальниками та споживачами. Актуальність дослідження обумовлена поширенням у сучасних транспортно-логістичних системах гнучких тарифних механізмів, за яких при перевищенні певного обсягу перевезення застосовуються знижені або оптові тарифи. Подібні підходи використовуються у системах консолідації вантажів, довгострокових контрактах, мультимодальних перевезеннях та при організації регулярних поставок великих партій продукції. Запропоновано математичну модель транспортної задачі, у якій для кожної пари «постачальник–споживач» задаються базові та знижені тарифи перевезення, а також порогові значення обсягів вантажу, після перевищення яких застосовується альтернативна вартість доставки. Побудовано цільову функцію задачі з урахуванням динамічної зміни вартості перевезення залежно від величини транспортного потоку та системи балансових обмежень транспортної задачі. Розроблено модифікований метод побудови опорного плану на основі класичного методу найменшої вартості, який враховує можливість переходу до знижених тарифів при досягненні порогових значень перевезення. Запропоновано також модифікований метод потенціалів для знаходження оптимального плану, у якому передбачено повторне оновлення матриці ефективних вартостей і перерахунок потенціалів після кожного перерозподілу вантажу. На відміну від класичної транспортної задачі, у запропонованій моделі структура транспортних витрат може змінюватися безпосередньо в процесі формування плану перевезень. Практичне значення дослідження полягає у можливості використання розробленої моделі для підвищення ефективності управління вантажними перевезеннями в умовах застосування оптових тарифів і динамічної зміни вартості доставки.

Ключові слова: транспортна задача; транспортна логістика; метод потенціалів; опорний план; оптимальний план; порогові тарифи; змінна вартість перевезення; вантажні перевезення.

© Slavych V. P., Afonin M. O., Rusavska O. O.

Статтю прийнято до редакції 11.05.2026

STOCHASTIC EFFICIENCY MODELING OF MULTIMODAL TRANSPORT SYSTEMS USING AN INTEGRATED PERFORMANCE INDICATOR AND MONTE CARLO SIMULATION

Zhyshchynskyi Y. S., PhD student, Kherson State Maritime Academy, Kherson, Ukraine, email: jekas1367@gmail.com, ORCID: 0009-0007-4020-4576;

Sharko O. V., Doctor of Technical Sciences, Professor, Kherson State Maritime Academy, Kherson, Ukraine, e-mail: mvsharko@gmail.com, ORCID: 0000-0001-9025-7990.

The growing complexity and uncertainty of multimodal transport systems require the development of advanced methodological approaches for performance evaluation. This paper presents a structured analysis of contemporary research on multimodal transportation efficiency, focusing on deterministic, multi-criteria, and stochastic modeling approaches. The review reveals that deterministic models, although widely used, fail to adequately capture the inherent variability of logistics processes, leading to overly optimistic performance estimates. Multi-criteria approaches improve the comprehensiveness of evaluation but often remain limited by their deterministic nature and subjective weighting schemes.

This study proposes a novel stochastic framework for assessing the performance of multimodal transport systems based on an Integrated Performance Indicator (IPE) that simultaneously accounts for delivery time, transportation cost, and reliability.

The proposed approach formalizes the transport process as a stochastic dynamic system, where key parameters such as travel time, delays, and operational costs are modeled as random variables. To capture the inherent uncertainty, a Monte Carlo simulation method is employed, allowing the estimation of the probability distribution of the IPE rather than relying on deterministic point estimates. Additionally, a nonlinear extension is considered to account for the increased sensitivity of system performance to risk factors. Simulation results demonstrate that deterministic approaches tend to overestimate system efficiency, while stochastic modeling reveals a significant reduction in expected performance due to variability and risks.

The findings confirm that incorporating stochastic modeling and integrated performance metrics provides a more realistic and robust basis for decision-making in multimodal logistics. The proposed framework can be applied to route selection, risk management, and strategic planning of transport operations, particularly in environments characterized by high uncertainty and dynamic disruptions.

Key words: multimodal transportation; logistics optimization; modeling; risk management; Integrated Performance Indicator.

DOI: 10.33815/2313-4763.2026.1.32.174-186

Introduction. Modern research in the field of multimodal transport systems focuses on improving the efficiency of logistics processes in the context of the growing complexity of global supply chains [1–4]. The main approaches to assessing efficiency can be divided into deterministic, multi-criteria and stochastic.

Deterministic models, which are widely used in classical transport problems [5], are based on the use of average or fixed values of parameters, such as delivery time, transportation cost and infrastructure capacity. In particular, in [6] a cost minimization model is proposed taking into account time and environmental factors. However, such approaches are based on fixed parameters and do not take into account the randomness of the transport process, which leads to an overestimation of efficiency.

Despite the simplicity of implementation and interpretation, such approaches have a significant drawback - they do not take into account the uncertainty and random nature of logistics processes. As a result, the resulting estimates may be significantly overestimated and do not reflect the real conditions of the functioning of transport systems, especially in conditions of instability.

Analysis of recent studies and publications. Multi-criteria models are more flexible, as they allow taking into account several factors simultaneously. For example, in [7] a combined approach using DEA and multi-criteria optimization was used, which takes into account time, cost and environmental indicators. However, most of these models remain deterministic and do not integrate uncertainty into the evaluation process. A separate direction is research devoted to the use of stochastic models and simulation modeling methods, in particular the Monte Carlo method [8].

Such approaches allow taking into account the randomness of the parameters of the transport process, including delays, weather conditions and technical failures. However, in most works stochastic analysis is used mainly to assess individual indicators, such as delivery time or the risk of delay, without integrating into a single generalized efficiency criterion. In [9] a stochastic model of transportation planning using mixed nonlinear programming was proposed. Similarly, in [10] Monte Carlo was used to analyze routes and costs. Despite this, most studies apply stochastic analysis only to individual parameters (time or cost).

Modern research also actively uses algorithmic and intelligent methods. For example, in [11], an approach based on reinforcement learning is proposed to take into account time uncertainty. However, such methods are difficult to interpret and do not always provide transparency in decision-making. Another important direction is robust optimization. In [12], it is shown that taking into account uncertainty allows to increase the stability of decisions, although this may increase costs.

In addition, considerable attention is paid to the environmental aspects of transportation. In [13], route optimization is considered taking into account CO₂ emissions and energy factors. However, a literature review [14] confirms that most current approaches face scalability, complexity, and limited real-time applicability.

Considerable attention in modern research is paid to the digitalization of logistics systems [15, 16], including the use of information platforms, Internet of Things technologies, blockchain and artificial intelligence. These approaches are aimed at increasing transparency, coordination and speed of data processing in transport systems. However, in most cases there is no formalized mathematical model that would allow to quantitatively assess the impact of digital solutions on the efficiency of logistics processes.

It should be noted that multi-criteria optimization methods [17], including approaches based on Pareto analysis and weight functions [18], allow to simultaneously take into account several efficiency indicators, in particular time, cost, energy consumption and environmental factors. However, most of such models, such as those shown in [19, 20], consider the criteria in a deterministic formulation, which limits their applicability in real conditions. In addition, the choice of weight coefficients is often subjective, which reduces the objectivity of the results obtained.

Thus, the analysis of modern scientific approaches allows us to identify a number of unresolved problems. First, there is no universal indicator that would simultaneously take into account the time, economic and risk characteristics of multimodal transportation. Second, there is a gap between stochastic modeling methods and multi-criteria approaches to assessing efficiency. Third, the impact of digital logistics systems on the parameters of transport models in a formalized form remains insufficiently studied. In this regard, the development of an integrated approach that combines stochastic modeling, multi-criteria optimization and assessment of the impact of digital technologies is relevant.

Purpose and objectives of the study. The object of the study is the process of functioning of multimodal transport systems under conditions of uncertainty, characterized by variability of delivery time, transport costs and reliability of logistics operations.

The subject of the study is methods and models for assessing the efficiency of multimodal transportation, taking into account the stochastic nature of transport processes, as well as the impact of digital logistics solutions on their parameters.

The choice of research methods is based on the analysis of modern scientific approaches, which revealed the limitations of deterministic models, insufficient integration of multi-criteria and stochastic approaches, as well as the lack of formal consideration of the digitalization of logistics systems.

The aim of the research is to improve the efficiency of multimodal maritime transportation by developing an intelligent risk-based decision support system that combines stochastic modeling, multi-criteria optimization, and assessment of the impact of digital technologies.

To achieve the set goal, the following tasks have been formulated:

- construction of a formal model;

- development of a simulation apparatus;
- quantitative assessment of efficiency.

Main Section. Multimodal transportation is considered as a complex stochastic system in which different types of transport, infrastructure elements and information flows interact. In the conditions of modern logistics chains, such systems operate under the influence of numerous random factors, in particular delays, changes in speed, infrastructure overload and external risks, which is confirmed by modern research in the field of multimodal transportation [21, 22]. Risk modeling is carried out using probability distributions to describe delays, cargo losses, weather effects and technical failures [23]. The main tool is the Monte Carlo method [8], which is one of the key tools of stochastic modeling and has significant advantages over deterministic and classical analytical approaches, especially when studying complex logistics systems. This method allows for the explicit consideration of random factors by using probability distributions of parameters. Unlike deterministic models that give one fixed value, Monte Carlo allows you to obtain a distribution of possible outcomes, which is especially important for transport systems where delivery times are random, delays are stochastic, and costs vary under the influence of external factors. In addition, it allows you to estimate not only the average value, but also the variance, confidence intervals, and probabilities of achieving a certain result, since probabilistic approaches demonstrate greater resistance to errors and biases compared to deterministic models. It also allows you to determine which parameters have the greatest impact on the result and how changing one factor changes the entire system, because unlike deterministic models, where there are 1–3 scenarios, Monte Carlo allows you to analyze thousands of scenarios and obtain statistically sound decisions.

The primary advantages of Monte Carlo simulation, as outlined in [24–26], include its rigorous, comprehensive, and probabilistic nature. This approach is particularly well-suited for risk management and making complex decisions. It is highly valuable in analyses where precision is critical. Relying solely on deterministic methods for significant strategic decisions without accounting for uncertainty can be risky.

Therefore, according to [26] and [27], multimodal transportation can be represented as:

$$MM = \{S_1, S_2, \dots, S_n\}, \quad (1)$$

where S_i is transport segment (river, sea, road);

n is number of route segments.

Total delivery time is defined as the sum of the travel times of individual route segments:

$$T = \sum_{i=1}^n \left(\frac{L_i}{V_i} + \Delta_i \right), \quad (2)$$

where: L_i is length of the i -th route segment;

V_i is random speed;

Δ_i is random delay (port, weather, operational);

n is number of segments.

Speed is modeled as a normally distributed random variable:

$$V_i \sim N(\mu V_i, \sigma V_i). \quad (3)$$

where: μ is the mathematical expectation;

σ is the square deviation;

N is normal distribution law (Gaussian distribution).

The distributions of random variables Δ_i can be determined by the exponential distribution:

$$\Delta_i \sim Exp(\mu \Delta_i, \sigma \Delta_i) \quad (4)$$

The probability of a missed deadline is then determined by the formula:

$$P_{delay} = P(T_{total} > T_{max}). \quad (5)$$

where: T_{max} is maximum allowable delivery time;

T_{total} is the total delivery time. It can be determined by:

$$T_{total} = \sum_{i=1}^n T_i. \quad (6)$$

Total transportation costs are determined:

$$C = C_{fuel} + C_{port} + C_{delay} + C_{risk}. \quad (7)$$

where C_{fuel} , C_{port} , C_{delay} , C_{risk} these are fuel costs, port costs, time costs and unforeseen costs respectively.

We get the expected value:

$$E(C) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N C(k). \quad (8)$$

Reliability is defined as the probability of meeting the delivery deadline:

$$R = P(T \leq T_{crit}), \quad (9)$$

where T_{crit} – maximum allowable delivery time.

Construction of a formal model. There is a methodology for multi-criteria optimization of maritime transport under conditions of uncertainty of the external environment [10]. Also, many researchers determine that the most rational way to solve transport problems under conditions of uncertainty is multi-criteria optimization, in which there is a vessel loading, delivery duration, transition speed, load on the main engine, fuel consumption, deviation from the route, transportation cost [10–13].

We propose to introduce an Integrated Performance indicator of Efficiency (*IPE*), which is a multi-criteria optimization parameter that combine s time efficiency, economic efficiency, risk resistance and reliability for multimodal transportation. The integral efficiency index (*IPE*) is defined as the weighted sum of the normalized utility functions of delivery time, transportation cost and route reliability and can be determined by the formula:

$$IPE(U_T, U_C, U_R, U_N) = w_T \cdot U_T + w_C \cdot U_C + w_R \cdot U_R + w_N \cdot U_N, \quad (10)$$

where $U_T = \frac{T_{ref}}{T_{total}}$ is delivery time, $U_C = \frac{C_{ref}}{C}$ is cost, $U_R = R = 1 - P_{delay}$, is route reliability; $U_N = \frac{NPV}{NPV_{ref}}$ is economic efficiency; T_{total} is expected delivery time; C is expected cost. T_{ref} , C_{ref} – base (initial) values of delivery time and cost, respectively; w_T, w_C, w_R, w_N is weighting factors.

$$w_T + w_C + w_R + w_N = 1, \quad (11)$$

Normalization is carried out relative to the baseline scenario T_{ref} , C_{ref} , which ensures the dimensionlessness of the indicator and the possibility of comparing alternative logistics solutions.

An integral indicator of the efficiency of a multimodal logistics system is proposed, which simultaneously takes into account the time, economic and risk characteristics of transportation, as well as the investment feasibility of digitalization.

Based on the calculation of the Saati matrix for 4 elements, the following values of weight coefficients were obtained $w_T = 0,34$, $w_C = 0,29$, $w_R = 0,20$, $w_N = 0,17$ to constrain the objective function:

$$\max_U IPE(U) \quad (12)$$

Where $U = (U_T, U_C, U_R, U_N)$ is logistics parameters. For $C(U) \leq C_{max}$, $T(U) \leq T_{max}$, $R(U) \leq R_{max}$. *IPE* application area summarized in a table 1.

Table 1 – Interpretation of IPE

<i>IPE</i>	<i>Interpretation</i>
> 0.8	Highly efficient system
0.5 – 0.8	Acceptable
< 0.5	Inefficient

The *IPE* evaluation criterion is defined as:

$$\Delta IPE = IPE_{SN} - IPE_{base}, \quad (13)$$

where IPE_{SN} is integral indicator of effectiveness from the implementation of solutions.

IPE_{base} is integral indicator of the effectiveness of the basic model.

If $\Delta IPE > 0$ – the solutions are effective, the implementation of the appropriate management policy is considered appropriate.

Let's take into account the military situation as a risk function, then $w_R = f(R)$, the result of *IPE* calculations is shown in Fig. 1

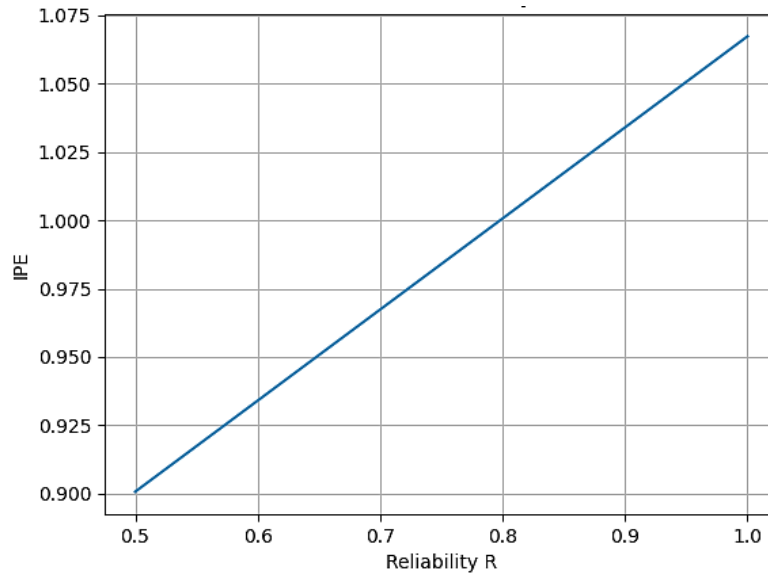


Figure 1 – Graph of the dependence of the integral efficiency indicator $IPE = f(R)$ on reliability

As shown in Fig. 1, the integral efficiency indicator has a monotonic dependence on the probability of delays. The increase in risk leads to a proportional decrease in the efficiency of the logistics system. It is determined that the critical zone is the value $P_{delay} > 0.4$, at which the system loses its economic feasibility. Instead, in the range of 0.05–0.25, an optimal balance between costs, time and reliability of transportation is ensured. at $R \approx 0.8 \rightarrow IPE \approx 1$ (balance point).

Areas of application of the integral efficiency indicator (*IPE*):

- route selection;
- transportation optimization;
- ETA planning;
- carrier selection;
- transshipment planning;
- fleet management;
- investments in digitalization;
- selection of logistics corridors;
- port efficiency assessment;
- route instability;
- military risks;
- alternative corridors (Danube, Black Sea, etc.).

Criteria efficiency limits:

If $w_T \gg w_C, w_R$ – then the system is based more on speed and it is possible to ignore costs.

If $P_{delay} \rightarrow 0.5$ – the *IPE* indicator becomes unstable, at $0.7 < R < 0.98$ – *IPE* is effective and the system is stable, outside this range – the system is risky.

Development of a simulation apparatus. Taking into account the uncertainty of the parameters of the transport process, the integral efficiency indicator is considered as a random variable:

$$IPE = IPE(T, C, R). \quad (14)$$

For its evaluation, the Monte Carlo method was used, which is one of the key tools of stochastic modeling and has significant advantages over deterministic and classical analytical approaches, especially when studying complex logistics systems. The main advantage of the Monte Carlo method is the ability to explicitly take into account random factors by using probability distributions of parameters.

Unlike deterministic models that give one fixed value, Monte Carlo allows you to obtain a distribution of possible results [24]. This is especially important for transport systems where: delivery time is random, delays are stochastic in nature, and costs change under the influence of external factors. Therefore, the Monte Carlo method provides a more realistic and justified assessment of the efficiency of multimodal transportation, which is critically important in dynamic and unstable logistics environments.

Accordingly, in each iteration we will simulate random values of speed and delays, and then calculate the delivery time, transportation cost, and reliability index. The total delay is defined as:

$$P_{delay_h} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N I(T_{total}^k > T_{max}) \quad (15)$$

where N is number of simulations; I is indicator function.

The code Monte Carlo algorithm is given shown in Figure 2.

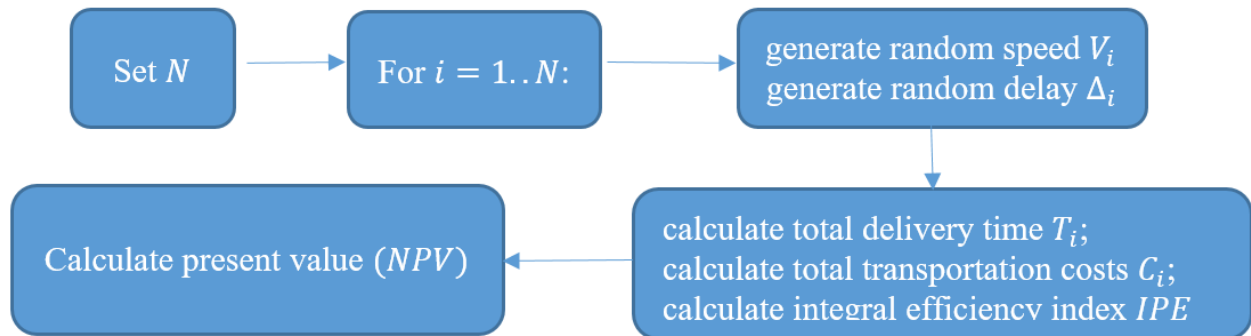


Figure 2 – Monte Carlo algorithm

Calculate for each iteration the time of passage of the i -th segment:

$$T_i = \frac{L_1}{V_{1,i}} + \Delta_{1,i} + \frac{L_2}{V_{2,i}} + \Delta_{2,i} \quad (16)$$

Costs:

$$C_i = f(T_i) \quad (17)$$

$$R_i = 1(T_i < T_{crit}) \quad (18)$$

The integral efficiency indicator is used as the objective function of the stochastic multi-criteria optimization problem of multimodal transportation.

$$IPE(U) = w_T \cdot \frac{T_{ref}}{T_i} + w_C \cdot \frac{C_{ref}}{C_i} + w_R \cdot R_i + w_N \cdot \frac{NPV}{NPV_{ref}} \quad (19)$$

Optimization is carried out by means of multiple Monte-Carlo simulation of possible configurations of the logistics system with the subsequent search for the configuration that provides the maximum value of the integral efficiency criterion.

Simulation result. Let's calculate for the base scenario, parameters: $T_{ref} = 60 \text{ hours}$, $C_{ref} = 3000\text{€}$, $NVP_{ref} = 7800000\text{€}$.

For an alternative scenario, we assume: $T = 55 \text{ hours}$, $C = 2700\text{€}$, $R = 0.82$, $NPV = 8800000\text{€}$.

Calculation:

$$w_T = 0.34, w_C = 0.29, w_R = 0.2, w_N = 0.17$$

$$R = 1 - 0.18 = 0.82$$

$$IPE(U) = 0.34 \cdot \frac{60}{55} + 0.29 \cdot \frac{3000}{2700} + 0.2 \cdot 0.82 + 0.17 \cdot \frac{8.8}{7.8} =$$

$$= 0.34 \cdot 1.091 + 0.29 \cdot 1.111 + 0.2 \cdot 0.82 + 0.17 \cdot 1.13 =$$

$$= 0.371 + 0.3223 + 0.246 + 0.164 = 1.021$$

$$IPE > 1, \Delta IPE = +0.11\%$$

With equal weight coefficients, $IPE = 1.021$ was obtained, which indicates an increase in the efficiency of the system compared to the basic variant. IPE has a monotonic dependence on the reliability of the route. An increase in the R indicator leads to a proportional increase in the efficiency of the logistics system.

Calculations considering the Monte Carlo distribution will be based on uncertainty of risk occurrence.

Simulation results ($N = 1000$) showed: $IPE = 0.52$.

The results shown in Fig. 3 show that IPE drops when we start to consider risks. Therefore, the real system is much less efficient due to uncertainty, since delays "eat" efficiency and speed variation has a critical impact.

The obtained distribution demonstrates that even with favorable average parameters, the system is characterized by a decrease in efficiency due to the influence of stochastic factors.

This confirms the need to consider risks when evaluating logistics decisions.

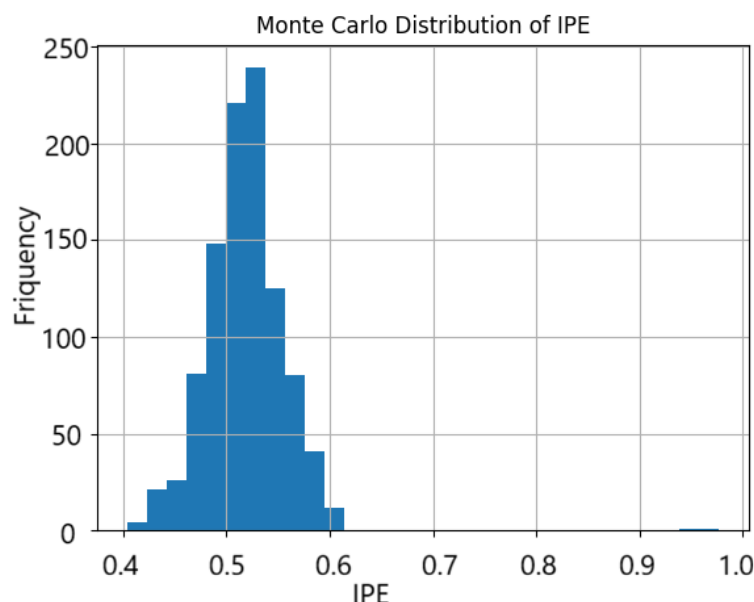


Figure 3 – Distribution of IPE depending on the frequency of risk occurrence

The integral performance indicator correlates with financial results, in particular with net present value (NPV), where the growth of IPE corresponds to the increase in the economic feasibility of logistics solutions: $NPV = f(IPE)$,

The adopted basic values and parameters for modeling are presented in the table 2.

Table 2 – Parameters for simulation

Parameter	Value
Transportation volume, t/year	120000
Base transportation cost, EUR/t	65
Annual costs, EUR	7800000
Discount rate	0,1
Delay before implementation, %	24,12
Delay after implementation, %	8,6
Cargo losses before implementation, %	3
Cargo losses after implementation, %	1
Project period, years	5
Number of Monte Carlo iterations	500

The formulation of the optimization problem can be reduced to $\max_{R,M}(R, M)$ on condition

$$T_{total} \leq T_{max}, C \leq C_{max}, P_{delay} \leq \varepsilon \quad (20)$$

where M – management policy (digital architecture).

A Python program was developed for modeling. Therefore, to normalize the pairwise comparison matrix, the following weighting coefficients were obtained:

$$w_T = 0.34, w_C = 0.29, w_R = 0.2, w_N = 0.17.$$

The initial parameter input screen and part of the code are shown in Fig. 4

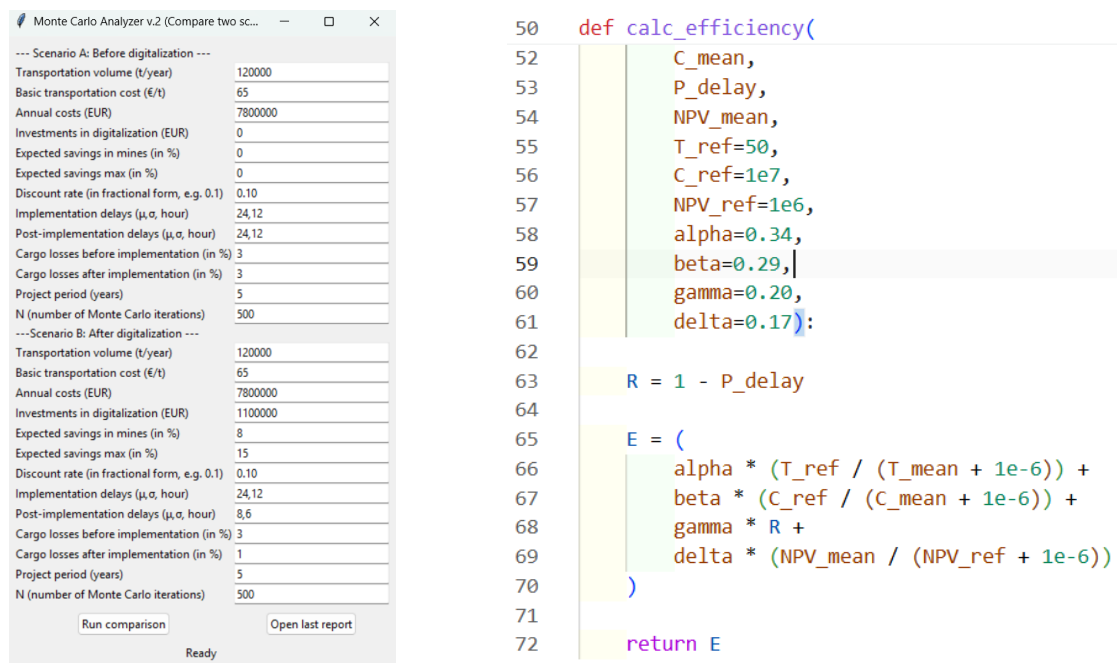


Figure 4 – The initial parameter input screen and part of the code of programm

Monte Carlo simulation is implemented by repeatedly generating random scenarios of the functioning of a multimodal transport system. In each iteration, the following are randomly generated: time delays; economic effect of digitalization; extreme logistics events; freight losses; total logistics costs. To generate random variables, the following are used: normal distribution – for modeling standard delays; uniform distribution – for estimating the range of savings; binomial mechanism – for generating extreme risk events. The part of the code where random variable generation is implemented is shown in Fig. 5.

```

131     for i in range(N):
132
133         saving = np.random.uniform(save_min, save_max)
134
135         delay_before = np.random.normal(mu_no, sigma_no)
136         delay_after = np.random.normal(mu_with, sigma_with)
137
138         delay_before = max(delay_before, 0)
139         delay_after = max(delay_after, 0)
140
141         # extreme events
142         if np.random.rand() < p_extreme:
143             delay_before += np.random.uniform(48, 120)
144
145         if np.random.rand() < p_extreme * 0.5:
146             delay_after += np.random.uniform(24, 72)
147
148         total_time = delay_after
149
150         cost_before = (
151             transport_base +
152             delay_before * 1000 +
153             loss_before * transport_base
154         )
155
156         cost_after = (
157             transport_base * (1 - saving) +
158             delay_after * 1000 +
159             loss_after * transport_base
160         )
161
162         annual_saving = cost_before - cost_after
163
164         npv = (
165             np.sum([
166                 annual_saving / ((1 + r) ** t)
167
168                 for t in range(1, T_proj + 1)
169             ])
170             - I
171         )
172
173         npv_results.append(npv)
174         time_results.append(total_time)
175         cost_results.append(cost_after)
176
177     npv_results = np.array(npv_results)
178     time_results = np.array(time_results)
179     cost_results = np.array(cost_results)
180
181     delay_prob = np.mean(time_results > np.mean(time_results))
182
183     summary = {
184         "npv_results": npv_results,
185         "time_results": time_results,
186         "cost_results": cost_results,
187
188         "mean_npv": np.mean(npv_results),
189         "std_npv": np.std(npv_results),
190
191         "mean_time": np.mean(time_results),
192         "mean_cost": np.mean(cost_results),
193
194         "delay_prob": delay_prob,
195
196         "p_positive": np.mean(npv_results > 0)
197     }
198
199     return summary

```

Figure 5 – The part of the code where random variable generation

Each iteration generates a separate scenario for the development of the logistics system, after which the integral efficiency indicators and net present value (NPV) are calculated.

1000 Monte-Carlo iterations were performed within the framework of the study, which allowed obtaining a statistically representative distribution of possible results.

A comparison of two scenarios is envisaged:

A (initial state) and B (state of the system after the implementation of risk assessment digitalization systems).

After modeling, the calculation results obtained are given in the table 3.

Table 3 – Simulation results

Scenario	Mean NPV (million €)	Median NPV (million €)	P(NPV>0)	Std dev (million €)
Before	0.88	0.52	57.60%	3.94
After	8.73	8.18	99.00%	3.93

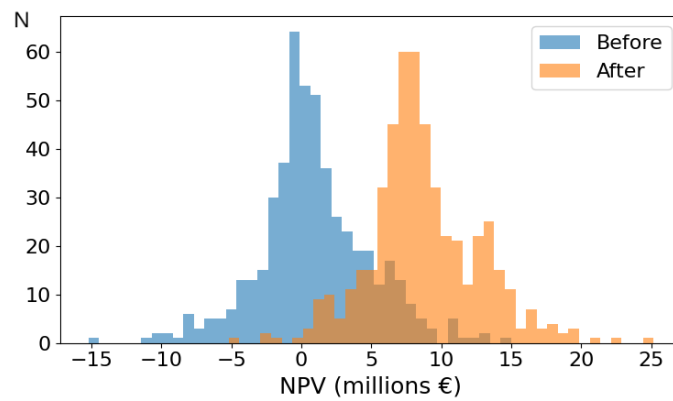
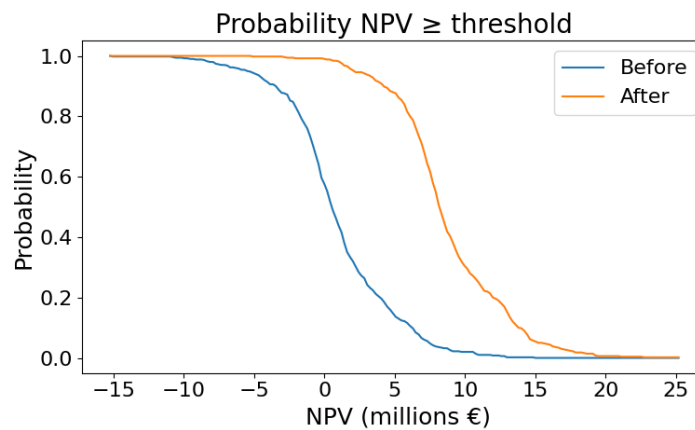
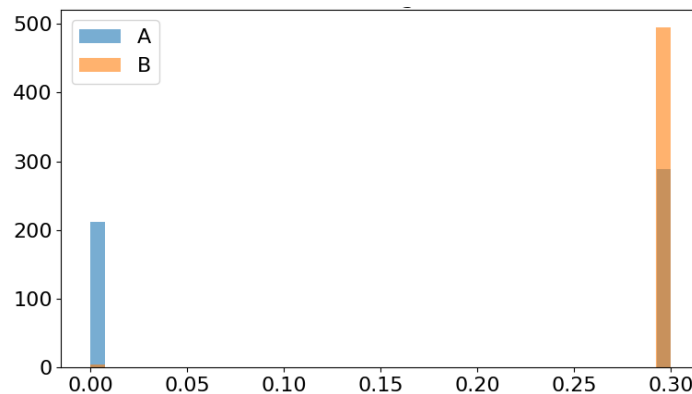
Graphs comparing the results are shown in Fig. 3.

$$IPE_A = 0.43, IPE_B = 0.53$$

$$\Delta IPE = 0.12 \approx 12\%$$

Probability of negative $NPV_A = 42.40\%$, $NPV_B = 1\%$.

Quantitative assessment of efficiency. The *IPE* distribution for scenario B is shifted towards higher values and is characterized by lower variability (Fig.6). This indicates an increase in the average level of efficiency (Fig. 7 and Fig. 8); a reduction in the risk of inefficient implementations and a stabilization of the logistics process.


Figure 6 – Comparison of distributions NPV_A i NPV_B

Figure 7 – Probability dependence NPV_A i NPV_B depending on costs

Figure 8 – Distribution of the integral indicator for the options A and B

Scenario B demonstrates a higher expected economic benefit compared to A – the implementation of digital solutions is economically feasible according to average estimates.

Implementation reduces the probability of losses (negative NPV).

Conclusions. The integral efficiency indicator is a generalized criterion for evaluating multimodal transportation, which combines time, economic and risk characteristics into a single function. Its application allows not only to compare alternative logistics solutions, but also to formalize the task of optimizing routes under uncertainty. Unlike classical approaches, the proposed indicator takes into account the stochastic nature of transport processes, which makes it suitable for practical use in modern conditions of instability of logistics systems.

The constructed mathematical model allows taking into account the random nature of key parameters of the transport process, in particular delivery time, delays and transportation costs. The results of simulation modeling showed that different management policies can significantly differ in terms of the "cost-risk" ratio.

The improvement of the integral indicator by 11% was due to the fact that the coordination of multimodal transportation allowed: to reduce unproductive downtime; to reduce transshipment costs; to reduce operating costs; to optimize the use of ship batches. This ensured a decrease in total logistics costs and an increase in net discounted income (NPV).

this was implemented by reducing and reducing additional delays in the event of crisis situations. As a result, the dispersion of the transport process decreased and its stability increased.

The proposed integral performance indicator allows for a comprehensive assessment of alternative logistics solutions and to justify the choice of the optimal management architecture for early risk detection; delay prediction; route reservation; adaptive transportation replanning.

REFERENCES

1. UNCTAD (2025). *Review of maritime transport*. <https://unctad.org/topic/transport-and-trade-logistics/review-of-maritime-transport>.
2. BIMCO (2022). *Logistics disruption reports*. <https://www.bimco.org>.
3. World Bank (2023). *Logistics performance index & maritime connectivity index*. <https://lpi.worldbank.org>.
4. OECD (2022). *Multimodal connectivity report*. <https://www.oecd.org/transport/>.
5. Hulyanytskyi, L. F., & Kotkova, A. A. (2020). Do klasyfikatsii zadach marshrutyzatsii transportnykh zasobiv [On the classification of vehicle routing problems]. *Scientific Bulletin of Uzhhorod University. Series: Mathematics and Informatics*, 1(36), 73–84. [https://doi.org/10.24144/2616-7700.2020.1\(36\).73-84](https://doi.org/10.24144/2616-7700.2020.1(36).73-84).
6. Yu, B. (2023). Optimization of multimodal transportation path selection under low-carbon and time-schedule situation. *BCP Business & Management*, 48, 205–212. <https://doi.org/10.54691/bcpbm.v48i.5268>.
7. *Route selection of periodic multimodal transport for logistics company: An optimisation approach*. (2024). *Research in Transportation Business & Management*. <https://doi.org/10.1016/j.rtbm.2024.101123>.
8. Kosobutskyi, P. S. (2014). *Statystychni ta Monte-Karlo alhorytmy modeliuvannia vypadkovykh protsesiv u makro- i mikrosystemakh u MathCAD [Statistical and Monte Carlo algorithms for modeling random processes in macro- and microsystems in MathCAD]*. Lviv Polytechnic Publishing House.
9. *Multi-modal transportation planning for multi-commodity rebalancing under uncertainty in humanitarian logistics*. (2021). *Advanced Engineering Informatics*, 47, 101223. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2020.101223>.
10. *Two phase Monte Carlo simulation approach for multimodal network routing problem*. (n.d.). *Transportation Research Board*. <https://trid.trb.org/View/2239967>.
11. *Multimodal transportation routing optimization based on multi-objective Q-learning under time uncertainty*. (2023). *Complex & Intelligent Systems*. <https://doi.org/10.1007/s40747-023-01308-9>.
12. Du, R. (2025). Robust optimization of multimodal transport routes: A case study. *Advances in Economics, Management and Political Sciences*, 155, 36–46. <https://doi.org/10.54254/2754-1169/2024.GA20643>.
13. *Low-carbon route optimization model for multimodal freight transport considering value and time attributes*. (2024). *Socio-Economic Planning Sciences*, 96, 102108. <https://doi.org/10.1016/j.seps.2024.102108>.
14. Chau, M. L. Y., & Gkiotsalitis, K. (2025). A systematic literature review on the use of metaheuristics for the optimisation of multimodal transportation. *Evolutionary Intelligence*. <https://doi.org/10.1007/s12065-025-01020-2>.
15. Melnyk, V. (2023). *Smart-lohistyka v umovakh tsyfrovizatsii [Smart logistics in conditions of digitalization]*. NAU.

16. Bugayko, D. O., et al. (2023). Factors influencing the efficiency of multimodal transportation. *Intellectualization of Logistics and SCM*. <https://doi.org/10.46783/smart-scm/2023-19-1>.
17. Sharko, O. V., Stepanchykov, D. M., Sharko, A. O., & Movchan, P. V. (2025). Bahatokryterialna optymizatsiia sytuatsiinoho upravlinnia morskymy perevezenniamy v umovakh nevyznachenosti [Multicriteria optimization of situational management of maritime transportation under uncertainty]. *Scientific Bulletin of Kherson State Maritime Academy*, 1(30), 171–186. <https://doi.org/10.33815/2313-4763.2025.1.30.171-186>.
18. Nikitina, L., & Yatsenko, I. (2023). *Modeli ta metody pryiniattia rishen [Models and methods of decision-making]*. NTU “KhPI”. <https://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/65270>
19. Naumov, V., Nahornyi, Y. & Lytvynova, Y. (2015). Model of multimodal transport node functioning. *Archives of Transport*. <https://doi.org/10.5604/08669546.1185202>.
20. Slavysh, V. P., & Biloushenko, D. Y. (2025). Model transportnoi zadachi u vypadku dostavky vantazhu dvoma riznymy vydamy transportnykh zasobiv [Transport problem model for cargo delivery by two different modes of transport]. *Scientific Bulletin of Kherson State Maritime Academy*, 2(31), 178–186. <https://doi.org/10.33815/2313-4763.2025.2.31.178-186>.
21. Kvietnyi, R. N., Bohach, I. V., Boiko, O. R., et al. (2013). *Kompiuterne modeliuвання system ta protsesiv. Metody obchyslen [Computer modeling of systems and processes. Methods of computation]* (Part I). VNTU.
22. Ponomarova, V., & Nosov, P. (2023). Metod avtomatyzovanoi identyfikatsii kvalifikatsiinykh parametriv dlia morskyykh operatoriv v umovakh ryzyku [Method of automated identification of qualification parameters for maritime operators under risk conditions]. *Scientific Bulletin of Kherson State Maritime Academy*, 1–2(26–27), 144–165. <https://doi.org/10.33815/2313-4763.2023.1-2.26-27.144-165>.
23. Burlachenko, D. A., & Melnyk, O. M. (2025). Modeliuвання povedinky ta imitatsiia nadzvychainykh sytuatsii dlia avtonomnoho sudna z otsinkoiu stabilnosti traiektorii rukhu [Modeling behavior and simulation of emergency situations for an autonomous vessel with trajectory stability assessment]. *Scientific Bulletin of Kherson State Maritime Academy*, 1(30), 195–208. <https://doi.org/10.33815/2313-4763.2025.1.30.195-208>.
24. Monte Carlo vs. deterministic: When to use which model. (2025). <https://nagarehq.com/blog/monte-carlo-vs-deterministic>.
25. Beltrán, J. C., Aristizábal, A. J., López, A., Castaneda, M., Zapata, S. & Ivanova, Y. (2020). Comparative analysis of deterministic and probabilistic methods for the integration of distributed generation in power systems. *Energy Reports*, 6(Suppl. 3), 88–104. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2019.10.025>.
26. Ozkan, O. & Kilic, S. (2019). A Monte Carlo simulation for reliability estimation of logistics and supply chain networks. *IFAC-PapersOnLine*, 52(13), 2080–2085. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2019.11.512>.
27. Farmahei, S. K. (2025). *Metod Monte-Karlo ta yoho zastosuvannya do modeliuвання skladnykh system [Monte Carlo method and its application to modeling complex systems]* (Master’s thesis). Kharkiv National University of Radio Electronics. <https://openarchive.nure.ua/bitstreams/a5a48acb-aa7d-46fc-b9d1-1b546ba13db4/download>.

Жищинський Ю. С. Шарко О. В. СТОХАСТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ МУЛЬТИМОДАЛЬНИХ ТРАНСПОРТНИХ СИСТЕМ З ВИКОРИСТАННЯМ ІНТЕГРОВАНОГО ПОКАЗНИКА ЕФЕКТИВНОСТІ ТА МОДЕЛЮВАННЯ МЕТОДОМ МОНТЕ-КАРЛО

Зростаюча складність та невизначеність мультимодальних транспортних систем вимагають розробки передових методологічних підходів до оцінки ефективності. У цій статті представлено структурований аналіз сучасних досліджень ефективності мультимодальних перевезень, зосереджуючись на детермінованих, багатокритеріальних та стохастичних підходах моделювання. Огляд показує, що детерміновані моделі, хоча й широко використовуються, не враховують належним чином притаманну мінливість логістичних процесів, що призводить до надмірно оптимістичних

оцінок ефективності. Багатокритеріальні підходи покращують повноту оцінки, але часто залишаються обмеженими своєю детермінованою природою та суб'єктивними схемами зважування. Запропоновано нову стохастичну структуру для оцінки ефективності мультимодальних транспортних систем на основі Інтегрованого показника ефективності (ІРЕ), який одночасно враховує час доставки, вартість транспортування та надійність.

Запропонований підхід формалізує транспортний процес як стохастичну динамічну систему, де ключові параметри, такі як час подорожі, затримки та експлуатаційні витрати, моделюються як випадкові величини. Для врахування невід'ємної невизначеності використовується метод моделювання Монте-Карло, що дозволяє оцінити розподіл ймовірностей ІРЕ, а не покладатися на детерміновані точкові оцінки. Результати моделювання показують, що детерміновані підходи схильні переоцінювати ефективність системи, тоді як стохастичне моделювання виявляє значне зниження очікуваної ефективності через мінливість та ризики.

Результати підтверджують, що поєднання стохастичного моделювання та інтегрованих показників ефективності забезпечує більш реалістичну та надійну основу для прийняття рішень у мультимодальній логістиці. Запропонована структура може бути застосована для вибору маршруту, управління ризиками та стратегічного планування транспортних операцій, особливо в середовищах, що характеризуються високою невизначеністю та динамічними збоями.

Ключові слова: мультимодальні перевезення; оптимізація логістики; моделювання; управління ризиками; інтегральний показник.

© Zhyshchynskyi Y. S., Sharko O. V.

Статтю прийнято до редакції 08.05.2026

ВИМОГИ ДО ОФОРМЛЕННЯ МАТЕРІАЛІВ

До друку приймаються статті українською чи англійською мовами, що містять результати власних оригінальних досліджень, які мають наукову і практичну цінність і не публікувалися досі. До друку не приймаються суто оглядові статті. Відповідальність за зміст статті несе автор.

Згідно з вимогами п. 3 Постанови Президії Вищої Атестаційної Комісії України № 7-05/1 від 15.01.2003 р., наукові статті, що надаються до друку, повинні містити наступні елементи: постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями; аналіз останніх досліджень і публікацій, у яких започатковано розв'язання даної проблеми, на які посилається автор; виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, яким присвячується стаття; формулювання цілей статті (постановка завдання); викладення основного матеріалу дослідження з повним обґрунтуванням отриманих наукових результатів; висновки щодо даного дослідження та перспективи подальших наукових досліджень у даному напрямку.

Обсяг статей – 10...15 сторінок, включаючи всі матеріали, у т. ч. таблиці, рисунки, графіки та список літературних джерел. Сумарний обсяг рисунків і таблиць повинен бути не більше 30% обсягу основної частини.

Оформлення статті. На першій сторінці рукопису зазначається код УДК, назва роботи, прізвище, ініціали та науковий ступінь (звання) автора(ів).

Код УДК – по лівому краю, розмір шрифту – 10.

Назва – по центру друкованими літерами (шрифт жирний, розмір шрифту – 14).

Інформація про автора(ів): прізвище, ініціали, науковий ступінь, вчене звання, посада, повна назва установи або громадської організації, держава, e-mail, ORCID автора – курсивом, по лівому краю, розміром шрифту 12.

Текст надається у форматі редактора MS Word шрифтом Times New Roman, розмір шрифту – 12, інтервал – 1.

Параметри сторінки (опція меню ФАЙЛ, Параметри сторінки):

- розмір паперу – А4: 210*297 мм;
- орієнтація аркуша – книжна (альбомна не допускається);
- поля – 2,00 см;
- палітурка – 0,00 см;
- колонтитули – 1,30 см;
- абзацний відступ – 1,25 см, вирівнювання за шириною, сторінки не нумерувати.

У статті наводяться тільки ті формули, рисунки, таблиці, що забезпечують розкриття змісту представленого дослідження, всі вони повинні мати посилання в тексті статті.

Формули повинні бути набрані за допомогою вбудованого редактора формул Equation Editor. Всі формули вставляються в таблицю з неокресленим контуром, що складається з двох колонок: у першій знаходиться формула без абзацу і вирівняна по центру, у другій – номер формули теж без абзацу і з вирівнюванням по центру. Межа між колонками таблиці встановлюється на позначці 14 см.

Це стосується також формул і символів формул, які стоять по тексту. Параметри в редакторі формул повинні в точності відповідати наведеним нижче. Розміри (опція меню редактора Equation Editor: РОЗМІР, Визначити ...):

- Звичайний 12 пт.
- Крупний індекс 7 пт.
- Дрібний індекс 5 пт.
- Крупний символ 18 пт.
- Дрібний символ 12 пт.

Таблиці набираються у Microsoft Word.

Рисунки повинні бути чорно-білими, бажано прозорими, і вставлені у файл статті. Формат рисунків (tif, psx, bmp тощо) повинен бути сумісний з редактором тексту Microsoft Word. Роздільна здатність рисунків – не менше 300 dpi.

Структура статті:

- вступ;
- постановка проблеми;
- аналіз останніх досліджень та публікацій;
- мета та задачі дослідження;
- виклад основного матеріалу (методи дослідження, розв'язання задач для забезпечення досягнення поставленої мети);
- основні результати та їх обговорення;
- висновки;
- перспективи подальших досліджень;
- список використаної літератури.

Основні розділи можуть мати назви, дещо відмінні від приведених вище найменувань зі збереженням їх загальної логічної послідовності.

Список використаної літератури подається загальним списком у кінці рукопису (послідовність – у порядку згадування по тексту) згідно зі встановленими вимогами стандарту ДСТУ 8302:2015. Список має налічувати 15...30 найменувань, з яких мінімум 2/3 опублікованих за останні 10 років, з них не менше 5 закордонних. Не менше 3 посилань має бути на статті з видань, що індексуються базами Scopus та/або Web of Science Core Collection. Обсяг самоцититування (посилання на свої попередні публікації) допускається не більше 1/3 загальної кількості джерел.

До статті також наводиться перелік літератури латиницею (**References**), для його оформлення використовується АРА-стиль. Список літератури транслітерується або перекладається англійською мовою. Транслітерувати інформацію необхідно відповідно до постанови Кабінету Міністрів України від 27.01.2010 «Про впорядкування транслітерації українського алфавіту латиницею» (транслітерацію української мови можна здійснити за посиланням <http://ukrlit.org/transliteratsiia#source=0JzQsNGA0YLQuNGI0LXQstGB0YzQutC40Lk> = [обрати стандарт: Паспортний (КМУ 2010)]). Транслітерувати джерела, які пишуться латиницею не потрібно.

Структуровані анотації українською мовою обсягом від 150 до 250 слів та англійською мовою обсягом не менше 1800 знаків надаються: на мові оригіналу статті перед вступом, на іншій мові – після тексту статті. У кінці анотацій наводяться ключові слова.

Основні вимоги до анотацій:

- анотація має бути написана так, щоб мати можливість бути представленою і сприйнятою читачем окремо від статті;
- анотація має бути позбавленою дублювання інформації, що наведена в заголовку статті;
- анотація має бути інформативною, змістовною, містити коротку інформацію про дослідження, що представлені в анотованій роботі – галузь, до якої відноситься робота, актуальність, застосовані методи, основні результати, їх значення для теорії та практики;
- речення, використані в анотації мають містити 10...20 слів, бути зрозумілими для читача без зайвої примітивізації;
- у тексті анотації слід використовувати ключові слова з тексту статті;
- анотація англійською мовою не має бути сліпим дублюванням анотації українською мовою, а бути самостійним цілісним текстом.

Документи, що подаються до редакції.

Для публікації автор повинен надати до редакції електронною поштою (на пошту journalnvksma@gmail.com) електронний варіант наступних документів:

- комп'ютерний варіант статті – файл, набраний у редакторі Microsoft Word;
- файл кожного рисунка, включеного в статтю, окремо.

Крім тексту статті автором(ами) надаються:

- структурована анотація та ключові слова українською і англійською мовами, включаючи назву статті та прізвища авторів двома мовами – на окремій сторінці;
- ліцензійний договір підписаний усіма авторами;
- відомості про авторів (прізвище, ім'я, по батькові, вчений ступінь, вчене звання, місце роботи, посада, домашня або службова адреса, контактний телефон, e-mail, наукові інтереси авторів, ORCID автора(ів)) – на окремій сторінці.

Статті, подані на розгляд, проходять перевірку на плагіат та подвійне сліпе рецензування. Для рецензування редакційна колегія може залучати сторонніх фахівців за відповідним напрямом.

Редакційна колегія залишає за собою право приймати рішення щодо відповідності представлених робіт напрямам журналу. Матеріали, що не оформлені згідно наведених правил, містять плагіат, чи не відповідають напрямам журналу будуть відхилені.

Положення про конфіденційність

Імена та електронні адреси, вказані користувачами на сайті цього журналу, будуть використані виключно для виконання внутрішніх технічних завдань цього журналу; вони не будуть поширюватись та передаватись стороннім особам.

DESIGN REQUIREMENTS FOR SCIENTIFIC WORKS

Only articles in Ukrainian or English containing the results of authors own original research, which have scientific and practical value and have not been published yet, could be accepted for publication. Purely review articles are not accepted for publication. The author is responsible for the content of the article.

According to the requirements of item 3 of the Resolution of the Presidium of the Supreme Certifying Commission of Ukraine No. 7-05/1 dated 15.01.2003, scientific articles submitted for publication should contain the following elements: statement of the problem in a general form and its connection with important scientific or practical tasks; analysis of the recent studies and publications in which the solution to the problem, which the author refers to, was initiated; selection of previously unresolved parts of a general problem, to which the article is devoted; formulation of article goals (statement of the task); presentation of the main material of the study with a full justification of obtained scientific results; conclusions and prospects for further scientific research in this area.

Article total volume allowed is 10...15 pages with all materials embodied, including tables, figures, graphs and reference list. The sum of figures and tables should be no more than 30% of the research body.

Article design. The following information shall be placed on the first page of the manuscript: Universal Decimal Classification (UDC) index, article title, surname, initials, and scientific degree (academic status) of the author (s).

Universal Decimal Classification (UDC) index is to be placed on the left side, font size – 10 pt.

Article title is to be placed in the centre in block letters (bold type, font size – 14 pt.).

Information about an author (s): surname, initials, academic degree, academic status, occupational title, full name of institution or public organization, country, e-mail address, author's ORCID is to be indicated in Italics, on the left side, font size – 12 pt.

The text is to be given in MS Word document format, font – Times New Roman, font size – 12 pt., line spacing – 1.

Page setup (menu option FILE, Page setup):

- paper size – A4: 210*297 mm;
- paper layout – book (album is forbidden);
- margins – 2.00 cm;
- casework – 0.00 cm;
- page header/footer – 1.30 cm;
- paragraph indent – 1.25 cm, full justification, no page numbering is required.

The article is to contain only those formulas, figures, tables that provide disclosure of the content of the presented research, all of them must be referenced in the text of the article.

Formulas should be typed using the built-in Equation Editor formula editor. All formulas are to be inserted into a table with no outline, consisting of two columns: the first column is to contain a formula without a paragraph and centre justified, the second one is to contain a formula number (if any), without a paragraph and centre justified. The border between the columns of the table is to be set at 14 cm.

This also applies to formulas and formula characters that appear in the text. The parameters in the formula editor must exactly match the following:

Sizes (Equation Editor menu option: SIZE, Determine ...):

- Regular 12 pt.
- Large index 7 pt.
- Small index 5 pt.
- Large character 18 pt.
- Small character 12 pt.

Tables are to be made up in Microsoft Word.

Figures should be black and white, preferably transparent, and inserted into the file and article print. Figure format (tif, pcx, bmp, etc.) must be compatible with the Microsoft Word text editor. Figure resolution is to be at least 300 dpi.

Article structure:

- introduction;
- statement of the problem;
- analysis of the recent research and publications;
- the purpose and objectives of the research;
- statement of the main material (research methods, problems solutions to ensure the achievement of the objectives);
- discussion of results;
- conclusions;
- directions for further research;
- reference list.

The main sections may have names that are slightly different from the names given above while maintaining the general logical sequence.

Reference list is to be given in the form of a general list at the end of the manuscript (the sequence is to be in the order of citation) in accordance with the established requirements of DSTU 8302: 2015 standard. The list should contain total 15...30 titles, of which at least 2/3 published in the last 10 years, of which at least 5 foreign. There should be at least 3 references to articles from publications indexed by the Scopus and/or Web of Science Core Collection databases. The amount of self-citation (links to your previous publications) is allowed to be no more than 1/3 of the total number of sources.

The article is to be followed by the reference list in Roman alphabet (**References**). ARA-style is to be used when executing it. The reference list is to be transliterated or translated into English. Information transliteration is required to be in accordance with the Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine dated 27.01.2010 “Concerning the regulation of Ukrainian alphabet transliteration by Roman alphabet” (Ukrainian language transliteration can be done at [http://ukrlit.org/transliteratsiia#source=0JzQsNGA0YLQuNGI0LXQstGB0YzQutC40Lk=\[selectstandard:Passport\(CMU2010\)\]](http://ukrlit.org/transliteratsiia#source=0JzQsNGA0YLQuNGI0LXQstGB0YzQutC40Lk=[selectstandard:Passport(CMU2010)])).

It is not required to transliterate the sources written in Roman alphabet.

Structured abstracts in Ukrainian (150 to 250 words) and English (not less than 1800 words) languages are given as follows: an abstract is given before the introduction if it has been executed in article source language, but if an abstract has been executed in a language different from article source one, an abstract is given after the text of the article. Keywords list is given under the abstract.

Basic requirements for abstracts:

- the abstract must be written in such a way as to be able to be presented and perceived separately from the article;
- the abstract must be devoid of duplication of information given in the title of the article;
- the abstract should be informative, meaningful, contain brief information about the research presented in the annotated paper - the field to which the work belongs, relevance, applied methods, main results, their significance for theory and practice;
- the sentences used in the abstract should contain 10...20 words, be understandable to the reader without excessive primitiveness;
- keywords from the text of the article should be used in the text of the abstract;
- the abstract in English should not be a blind duplication of the abstract in Ukrainian, but should be an independent, complete text.

The documents to be submitted to the editorial office.

In order to be published, the author is required to submit electronic (to journalnvksma@gmail.com) version of the following documents to the editorial office:

- electronic article – a file, typed in Microsoft Word editor;

– a separate file of each figure included in the article.

Along with the article text, the author (s) must submit:

– structured abstract with keywords list in both Ukrainian and English languages, including article's title and author (s) surname (s) in three languages – on a separate page;

– license contract;

– information about authors (surname, name, middle name, academic degree, academic title, place of employment, occupation title, home or work address, contact telephone number, e-mail address, scientific interests of authors, author (s) ORCID – on a separate page.

Articles submitted for consideration are checked for plagiarism and double-blind peer review. For review, the editorial board can involve external experts in the relevant direction.

The editorial board reserves the right to make decisions regarding the compliance of the presented works with the directions of the magazine. Materials that are not designed according to the above rules, contain plagiarism, or do not correspond to the directions of the journal will be rejected.

Privacy Statement

The names and email addresses provided by users on journal's site, shall be used solely to perform the internal technical tasks of this journal; they shall not be distributed or transmitted to any outside parties.

ЗМІСТ

ІНЖЕНЕРІЯ У ТРАНСПОРТНІЙ ГАЛУЗІ

- Баловнєв А. І., Врублевський Р. Є., Левінський М. В., Нікольський М. В.,
Нікольський В. В., Слободянюк М. В.** 6
ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ СОПЛОВОГО КІЛЬЦЯ ТУРБОНАГНІТАЧА
ДВОПАЛИВНОГО СУДНОВОГО ДИЗЕЛЯ НА ОСНОВІ ТЕРМОМЕХАНІЧНОГО
ТА ГАЗОДИНАМІЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ

- Тарасенко Т. В., Залож В. І.** 20
ОЦІНЮВАННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ СУДЕН ВНУТРІШНЬОГО
ПЛАВАННЯ ЗА ЕКСПЛУАТАЦІЙНИМИ ПАРАМЕТРАМИ СУДНОВИХ
ДВИГУНІВ

СУДНОВОДІННЯ ТА ЕНЕРГЕТИКА СУДЕН

- Nosov P. S.** 34
GENERALIZED MODEL OF CONTROL OF ERGATIC NAVIGATIONAL
SUPPORT SYSTEMS WITH AN INTEGRAL INDICATOR OF THE INFLUENCE
OF THE HUMAN FACTOR

- Бень А. П., Пелихівський Л. О., Вороненко С. В.** 58
МОДЕЛЬ ОЦІНЮВАННЯ РИЗИКУ ЗІТКНЕННЯ АВТОНОМНИХ НАДВОДНИХ
СУДЕН З УРАХУВАННЯМ ВПЛИВУ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА

- Кучеренко В. Ю., Мельник О. М.** 71
ЗНИЖЕННЯ ШУМОВОГО ЗАБРУДНЕННЯ СУДЕН ШЛЯХОМ СПЕКТРАЛЬНОЇ
ІДЕНТИФІКАЦІЇ ВІБРОАКУСТИЧНИХ ПРОЦЕСІВ ДИЗЕЛЬ-ГЕНЕРАТОРА

- Нікольський В. В., Малахов О. В., Нікольський М. В., Палагін О. М.,
Найдьонов А. І.** 87
СИСТЕМА МОНІТОРИНГУ ПАРАМЕТРІВ МІКРОКЛІМАТУ ЖИТЛОВИХ
ПРИМІЩЕНЬ СУДНА

- Петровський А. В.** 100
КОНЦЕПТУАЛЬНА ДИНАМІЧНА МОДЕЛЬ ФУНКЦІОНАЛЬНОГО СТАНУ
ОПЕРАТОРА З УРАХУВАННЯМ ВЗАЄМОДІЇ ФІЗІОЛОГІЧНИХ,
КОГНІТИВНИХ ТА ОПЕРАЦІЙНИХ ФАКТОРІВ ІЗ ML-КОРЕКЦІЄЮ

- Товстокорий О. М., Нагрибельний Я. А., Матейчук В. М.** 114
ТЕОРІЯ РУХУ СУДНА НА ПОВОРІТІ ПРИ БУКСИРУВАННІ
ІЗ ВРАХУВАННЯМ ОСТАННІХ ДОСЯГНЕНЬ ТЕОРІЇ ТА ПРАКТИКИ

ТРАНСПОРТНІ ТЕХНОЛОГІЇ

- Afonin M. O., Slavych V. P., Babiichuk K. O.** 131
TRANSPORTATION PROBLEM MODEL WITH PRIORITIES FOR CARGO
SUPPLIERS

- Ibrahim A. M., Klevtsov K. M.** 141
AN ANALYTICAL ASSESSMENT OF LEGAL RISKS IN MULTIMODAL
TRANSPORT INVOLVING MARITIME TRANSPORT DURING EMERGENCIES

Sapronov O. O., Simanenkova A. L., Banha M. M., Danylenko D. O., Sharanov V. D., Sapronova A. V. IMPROVEMENT OF THE OPERATIONAL AND MAINTENANCE PERFORMANCE CHARACTERISTICS OF WATER TRANSPORT EQUIPMENT SURFACES THROUGH THE IMPLEMENTATION OF POLYMER COATINGS	152
Slavych V. P., Afonin M. O., Rusavska O. O. MODEL AND METHOD FOR SOLVING THE TRANSPORT PROBLEM WITH A THRESHOLD CHANGE IN TRANSPORTATION TARIFFS	164
Zhyshchynskyi Y. S., Sharko O. V. STOCHASTIC EFFICIENCY MODELING OF MULTIMODAL TRANSPORT SYSTEMS USING AN INTEGRATED PERFORMANCE INDICATOR AND MONTE CARLO SIMULATION	174
ВИМОГИ ДО ОФОРМЛЕННЯ МАТЕРІАЛІВ	187

CONTENTS

ENGINEERING IN TRANSPORT INDUSTRY

- Balovniev A. I., Vrublevskiy R. Ye., Levinskiy M. V., Nikolskiy M. V.,
Nikolskiy V. V., Slobodianiuk M. V.** 6
IMPROVING THE RELIABILITY OF A DUAL-FUEL MARINE DIESEL ENGINE
TURBOCHARGER NOZZLE RING BASED ON THERMOMECHANICAL AND
GAS-DYNAMIC MODELING

- Tarasenko T. V., Zalozh V. I.** 20
ENERGY EFFICIENCY ASSESSMENT OF INLAND VESSELS VIA OPERATIONAL
PARAMETERS OF MARINE ENGINES

NAVIGATION AND SHIP POWER ENGINEERING

- Nosov P. S.** 34
GENERALIZED MODEL OF CONTROL OF ERGATIC NAVIGATIONAL
SUPPORT SYSTEMS WITH AN INTEGRAL INDICATOR OF THE INFLUENCE OF
THE HUMAN FACTOR

- Ben A. P., Pelykhivskiy L. O., Voronenko S. V.** 58
A COLLISION RISK ASSESSMENT MODEL FOR AUTONOMOUS SURFACE
VESSELS CONSIDERING ENVIRONMENTAL INFLUENCES

- Kucherenko V. Yu., Melnyk O. M.** 71
REDUCING SHIP NOISE POLLUTION THROUGH SPECTRAL IDENTIFICATION
OF DIESEL GENERATOR VIBROACOUSTIC PROCESSES

- Nikolskiy V. V., Malakhov O. V., Nikolskiy M. V., Palagin O. N.,
Naydyonov A. I.** 87
SYSTEM FOR MICROCLIMATE PARAMETERS MONITORING OF THE
VESSEL'S HOUSING AREAS

- Petrovskiy A. V.** 100
CONCEPTUAL DYNAMIC MODEL OF OPERATOR FUNCTIONAL STATE
CONSIDERING THE INTERACTION OF PHYSIOLOGICAL, COGNITIVE, AND
OPERATIONAL FACTORS WITH ML-BASED CORRECTION

- Tovstokory O. M., Nahrybelnyi Y. A., Matejchuk V. M.** 114
TOWING TURN THEORY TAKING INTO ACCOUNT THE LATEST
ADVANCEMENTS IN THEORY AND PRACTICE

TRANSPORT TECHNOLOGIES

- Afonin M. O., Slavych V. P., Babiichuk K. O.** 131
TRANSPORTATION PROBLEM MODEL WITH PRIORITIES FOR CARGO
SUPPLIERS

- Ibrahim A. M., Klevtsov K. M.** 141
AN ANALYTICAL ASSESSMENT OF LEGAL RISKS IN MULTIMODAL
TRANSPORT INVOLVING MARITIME TRANSPORT DURING EMERGENCIES

Sapronov O. O., Simanenkova A. L., Banha M. M., Danylenko D. O., Sharanov V. D., Sapronova A. V. IMPROVEMENT OF THE OPERATIONAL AND MAINTENANCE PERFORMANCE CHARACTERISTICS OF WATER TRANSPORT EQUIPMENT SURFACES THROUGH THE IMPLEMENTATION OF POLYMER COATINGS	152
Slavych V. P., Afonin M. O., Rusavska O. O. MODEL AND METHOD FOR SOLVING THE TRANSPORT PROBLEM WITH A THRESHOLD CHANGE IN TRANSPORTATION TARIFFS	164
Zhyshchynskyi Y. S., Sharko O. V. STOCHASTIC EFFICIENCY MODELING OF MULTIMODAL TRANSPORT SYSTEMS USING AN INTEGRATED PERFORMANCE INDICATOR AND MONTE CARLO SIMULATION	174
DESIGN REQUIREMENTS FOR SCIENTIFIC WORKS	190

ДЛЯ НОТАТОК

Наукове видання

НАУКОВИЙ ВІСНИК
ХЕРСОНСЬКОЇ ДЕРЖАВНОЇ МОРСЬКОЇ АКАДЕМІЇ

Науковий журнал

Виходить двічі на рік

№ 1 (32)

Видається з 2009 року

Відповідальний за випуск *Р. Є. Врублевський*
Технічний редактор *Г. А. Врублевська*
Коректура англійської мови *А. С. Волкова*

Формат 60x84/16. Папір офсетний.
Ум. др. арк. 12,38.
Підписано до друку 25.06.2026.
Тираж 100 прим.

Видавець і виготовлювач
Херсонська державна морська академія,
просп. Незалежності, 20, м. Херсон, 73000
Ел. адреса: rvv@ksma.ks.ua

Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої
справи до Державного реєстру
ДК № 4319 від 10.05.2012