

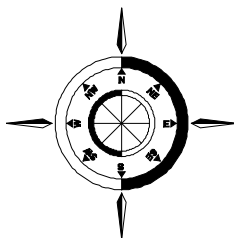
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
"ОДЕСЬКА МОРСЬКА АКАДЕМІЯ"

АВТОМАТИЗАЦІЯ СУДНОВИХ ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ

Науково-технічний збірник

ВИПУСК 31



Одеса
2026

УДК 681.5:629.12(045)

A22 Автоматизація суднових технічних засобів: науково-технічний збірник. – 2026. – Вип. 31. – Одеса: НУОМА. – 220 с.

Збірник присвячений проблемам розрахунку, проектування і експлуатації суднових автоматизованих технічних засобів. Узагальнено досвід експлуатації і наведені результати досліджень суднових систем автоматичного управління і регулювання.

Для науковців і спеціалістів.

Затверджено до друку вченою радою Національного університету "Одеська морська академія" 28.05.2026, протокол № 10.

Редакційна колегія: д.т.н., проф. С. І. Горб (науковий редактор); к.т.н., доц. А. К. Сандлер (відповідальний секретар); д.т.н., проф. В. В. Бодашко; д.т.н., проф. Л. Л. Вагущенко; д.т.н., проф. В. А. Голіков; д.т.н., проф. М. В. Міусов; д.т.н., проф. В. В. Нікольський; д.т.н., проф. О. А. Оніщенко; д.т.н., проф. С. В. Сагін; д.т.н., проф. П. С. Суворов; Prof., Dr.-Ing.Reinhard Langmann.

Адреса редакційної колегії: 65052, г. Одеса, вул. Дідріхсона, 8, Національний університет "Одеська морська академія" (НУОМА), кафедра ТАУ та ОТ. Тел./факс (048) 793-24-75 E-mail: gs@onma.edu.ua

Свідоцтво про державну реєстрацію: серія КВ, № 15286-38588.

Включено до Переліку наукових фахових видань України наказом Міністерства освіти і науки України від 02.07.2020 № 886.

Індексується у науково-метричній базі даних Index Copernicus.

ISSN 1819-3293 (Print)

ISSN 2415-3915 (Online)

© Національний університет "Одеська морська академія"

УДК 621.431.74

DOI: 10.31653/1819-3293-2026-1-31-03-12

ARTICLE HISTORY

Received 11.03.2026

Accepted 07.04.2026

Будуров Микола Ігорович
Національний університет "Одеська морська академія", Одеса,
Україна
budurovuk@gmail.com

Оптимізація налаштування електронного регулятора частоти обертання суднового дизель-генератора

Budurov Mykola
National University "Odessa Maritime Academy", Odessa, Ukraine
budurovuk@gmail.com

Optimization of Electronic Speed Governor Settings for Marine Diesel Generator

Резюме. Обґрунтовано методику налаштування електронного регулятора частоти обертання контролерного типу суднового дизель-генератора, яка враховує істотність зміни навантаження при найімовірніших ступеневих збуреннях. Виявлено закономірності впливу параметрів налаштування електронного регулятора на показники роботи суднової дизель-генераторної установки в умовах експлуатації. За рахунок оптимізації налаштування покращена стабільність частоти обертання дизель-генератора без порушення регламентованих стандартами вимог до регулювання частоти обертання під час максимально допустимого скидання навантаження.

Summary. A methodology for tuning a controller-based electronic speed governor of a marine diesel generator has been substantiated, taking into account the significance of load variations under the most probable step disturbances. The relationships between the governor tuning parameters and the performance indicators of the marine diesel generator set under operating conditions have been established. Optimization of the governor settings improves diesel generator speed stability while maintaining

compliance with standard requirements for speed control during maximum permissible load shedding.

Дизель-генератори (ДГ) використовуються у складі енергетичних установок більшості суден та мають прогнозовану довгострокову перспективу [1]. Останніми роками у системах автоматичного регулювання допоміжних дизелів широкого поширення набули електронні регулятори частоти обертання (РЧО), побудовані на базі програмованих логічних контролерів. Водночас у процесі експлуатації ДГ із такими РЧО часто виникають проблеми забезпечення якості регулювання частоти обертання, пов'язані з незадовільною динамікою регулятора під час зміни навантаження на ДГ. У результаті знижується стабільність частоти обертання ДГ на різних режимах роботи судна, що безпосередньо впливає на безпеку мореплавства. Нижче наведено характерні експлуатаційні випадки.

У 2021 – 2022 роках при експлуатації танкерів "NOBLEWAY", "BRIGHTWAY" та "FAIRWAY", обладнаних допоміжними дизельними установками HYUNDAI-HIMSEN 5H21/32, зафіксовано коливання параметрів електричного струму та обмінні коливання потужності при паралельній роботі ДГ, що призводило до їх самовільного від'єднання від суднової електромережі. Встановлено, що зазначені явища зумовлені некоректними налаштуваннями РЧО, які призводили до появи автоколивань у системі автоматичного регулювання частоти обертання (CAPЧ).

У період 2022 – 2023 років у процесі експлуатації танкерів "CATALAN SEA" та "LIGURIAN SEA" із допоміжними дизелями HYUNDAI-HIMSEN 7H17/28 виявлена незадовільна ефективність автоматичного регулювання частоти обертання у широкому діапазоні швидкісних режимів, що потребувало частого переналаштування регуляторів.

У 2023 – 2024 роках під час експлуатації танкерів "PACIFIC DIAMOND" та "PACIFIC QUARTZ" із ДГ DAIHATSU 6DK-20, а також танкерів "PACIFIC BLUE" та "PACIFIC JADE" із ДГ YANMAR 6EY22ALW, налаштування регуляторів не забезпечували задовільної реакції під час вмикання/вимкнення споживачів великої потужності, що призводило до зниження стабільності частоти обертання та, у ряді випадків, до відключення дизель-генераторних установок від суднової електромережі.

У період 2024 – 2025 років на танкерах "ATLANTIC EMERALD" та "ATLANTIC JADE" із ДГ HYUNDAI-HIMSEN 6H22CDF, а також на танкерах "ATLANTIC BLUE" та "ATLANTIC GOLD" із ДГ DAIHATSU 6DE-23, виявлено зниження стабільності частоти обертання при

ступеневому навантаженні середньої величини, що призвело до збоїв у роботі чутливого електрообладнання.

Це означає, що в експлуатації існує необхідність ручного переналаштування електронних РЧО під час зміни режимів роботи ДГ на основі візуальної оцінки стабільності частоти обертання, що ускладнює технічне обслуговування та підвищує ймовірність відмов [2].

Як наслідок, актуальною є проблема забезпечення якості регулювання частоти обертання судових ДГ з електронними РЧО контролерного типу без необхідності вимушеного періодичного ручного переналаштування в процесі експлуатації.

У зв'язку з викладеним метою роботи є забезпечення якісної роботи контролерних електронних РЧО судових ДГ в експлуатації.

Для оптимізації параметрів електронних РЧО доцільно використовувати математичне моделювання [3], яке дозволяє проводити дослідження з меншими витратами ресурсів, уникати спотворення отриманих результатів випадковими факторами та відтворювати різноманітні комбінації експлуатаційних умов судових дизелів.

Як об'єкт дослідження обрано ДГ MAN 5L23/30H Mk3 ECR з електронним контролерним РЧО SaCoS_{one} компанії Everllence та виконавчим механізмом (ВМ) Regulateurs Europa типу 2800. Дана дизель-генераторна установка має номінальну потужність 500 кВт і номінальну частоту обертання 720 хв^{-1} , є чотиритактною, тронковою, нереверсивною.

Для моделювання використана модель САРЧ судового чотиритактного дизеля з електронним РЧО та гідравлічним ВМ, в якій враховується циклова нестабільність крутного моменту [4]. Модель дозволяє аналізувати вплив параметрів налаштування РЧО на динамічні властивості САРЧ дизеля та враховує запізнення у каналі передачі керуючого впливу від регулятора до дизеля, зумовлене циклічністю подачі палива та особливостями зміни крутного моменту в кривошипно-шатунному механізмі.

Нижче приведені значення параметрів моделі відповідно до конструкторської документації [5]:

час розгону ДГ $T_d = 1,8 \text{ с}$;

кут випередження упорскування палива $\varphi_i = -14,5 \text{ град. ПКВ}$;

нерівномірність вимірювача частоти обертання $\delta_c = 0,08 \text{ відн. од.}$;

коефіцієнт підсилення пропорційної ланки $k_p = 0,1 \dots 5 \text{ відн. од.}$;

час інтегруючої ланки $T_i = 0,5 \dots 8 \text{ с}$;

коефіцієнт передачі диференціюючої ланки $k_d = 0 \dots 1 \text{ відн. од.}$;

відносна ширина зони нечутливості $\varepsilon = 0,002 \text{ відн. од.}$;

коефіцієнт передачі зони нечутливості $k_g = 1 \text{ відн. од.}$;

нерівномірність керуючого елемента ВМ $\delta_{c.a} = 0,04 \text{ відн. од.}$;

час ВМ РЧО $T_c = 0,47$ с;

коефіцієнт зворотного зв'язку $k_{fb} = 0$ відн. од.;

коефіцієнт використання ходу регулятора під час переходу від нульової до номінальної подачі палива $k_{u,m} = 0,8$ відн. од.

Аналіз потужностей споживачів танкера та їхнього співвідношення з потужністю ДГ (з урахуванням кількості працюючих споживачів на різних експлуатаційних режимах та ймовірності їхнього вмикання) показав, що САРЧ суднових дизель-генераторних установок в умовах реальної експлуатації має забезпечувати необхідну динаміку в широкому діапазоні змін навантаження [6]. У зв'язку з цим, визнано доцільним провести дослідження впливу величини ступеневої зміни відносного моменту навантаження ΔM_r у діапазоні 10 ... 100 % на закидання частоти обертання ДГ. Дослідження виконано при зміні коефіцієнта підсилення пропорційної ланки k_p , часу інтегруючої ланки T_i , а також коефіцієнта передачі диференціюючої ланки k_d . Обрані діапазони варіювання параметрів налаштування електронного РЧО суднового ДГ у конструктивно визначених межах становили: $k_p = 1 \dots 2,5$ відн. од.; $T_i = 0,65 \dots 1,85$ с; $k_d = 0 \dots 0,1$ відн. од. Параметри варіювання k_p та T_i змінювалися у 1,25 та 1,3 разів відповідно. Значення параметра k_d змінювалося з кроком 0,025.

У реальних умовах експлуатації суднових ДГ чим менші амплітуди ступеневих збурень, тим більша ймовірність їхнього виникнення. Відповідно, обґрунтованим можна вважати налаштування САРЧ ДГ з електронним РЧО контролерного типу на таку амплітуду збурення, що має більшу ймовірність виникнення і водночас має істотний вплив на динаміку САРЧ ДГ.

На рис. 1 наведено перехідні процеси в САРЧ ДГ MAN 5L23/30H Mk3 ECR із налаштуваннями пропорційно-інтегро-диференціюючого (ПІД) контролера електронного РЧО SaCoS_{one}: $k_p = 1,0$ відн. од.; $T_i = 1,85$ с; $k_d = 0$ відн. од.

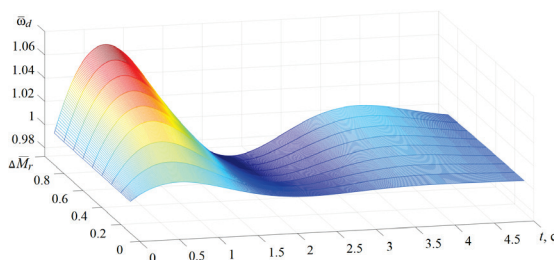


Рис. 1. Перехідні процеси в САРЧ ДГ при скиданні навантаження ΔM_r із налаштуваннями ПІД контролера електронного РЧО $k_p = 1,0$ відн. од.; $T_i = 1,85$ с; $k_d = 0$ відн. од.

Із рис. 1 випливає, що для збурень 10 і 20 % динамічний закид частоти обертання становить відповідно 1,1 та 1,5 % від номінальної частоти обертання ДГ, а час регулювання не перевищує 2 с. У діапазоні збурень 30 ... 100 % закидання частоти обертання ДГ становить 2,0 ... 6,5 %, а час регулювання знаходиться в межах 3,0 ... 4,5 с.

На рис. 2 наведено перехідні процеси в САРЧ ДГ MAN 5L23/30H Mk3 ECR із налаштуваннями ПІД контролера електронного РЧО SaCoS_{one}: $k_p = 1,25$ відн. од.; $T_i = 1,45$ с; $k_d = 0,025$ відн. од.

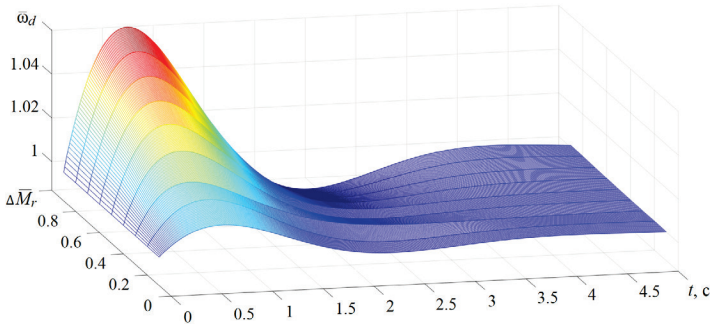


Рис. 2. Перехідні процеси в САРЧ ДГ при скиданні навантаження ΔM_r із налаштуваннями ПІД контролера електронного РЧО:
 $k_p = 1,25$ відн. од.; $T_i = 1,45$ с; $k_d = 0,025$ відн. од.

Із рис. 2 випливає, що при збуреннях 10 і 20 % динамічний закид частоти обертання становить відповідно 0,9 та 1,4 % від номінальної частоти обертання ДГ, а час регулювання не перевищує 2,5 с. Для збурень 30 ... 50 % закидання частоти обертання ДГ знаходиться в межах 2 ... 3 %, при цьому час регулювання не перевищує 3 с. За зміни навантаження в діапазоні 60 ... 100 % закидання зростає до 3,5 ... 6,0 %, а час регулювання до 4 с.

На рис. 3 наведено перехідні процеси в САРЧ ДГ MAN 5L23/30H Mk3 ECR із налаштуваннями ПІД контролера електронного РЧО SaCoS_{one}: $k_p = 1,55$ відн. од.; $T_i = 1,10$ с; $k_d = 0,05$ відн. од.

Із рис. 3 випливає, що при збуреннях 10 і 20 % динамічний закид частоти обертання становить відповідно 1,3 та 1,6 % від номінальної частоти обертання ДГ, а час регулювання не перевищує 3 с. Для збурень 30 ... 50 % закидання частоти обертання ДГ знаходиться в межах 2,1 ... 2,8 % при часі регулювання до 3 с. У разі збурень 60 ... 100 %, закидання становить 3,0 ... 5,8 % і час регулювання не перевищує 3,5 с.

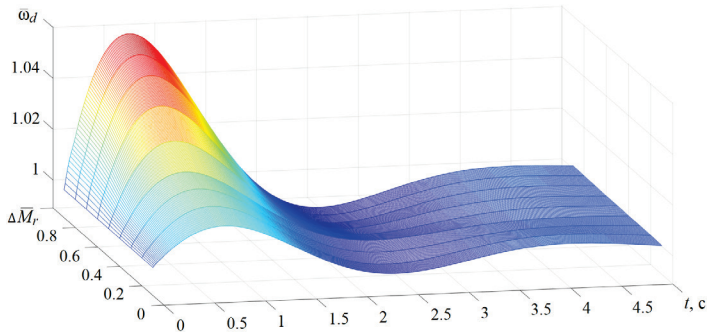


Рис. 3. Перехідні процеси в САРЧ ДГ при скиданні навантаження ΔM_r із налаштуваннями ПД контролера електронного РЧО:
 $k_p = 1,55$ відн. од.; $T_i = 1,1$ с; $k_d = 0,05$ відн. од.

На рис. 4 наведено перехідні процеси в САРЧ ДГ HYUNDAI MAN 5L23/30H Mk3 ECR із налаштуваннями ПД контролера електронного РЧО SaCoS_{one}: $k_p = 1,95$ відн. од.; $T_i = 0,85$ с; $k_d = 0,075$ відн. од.

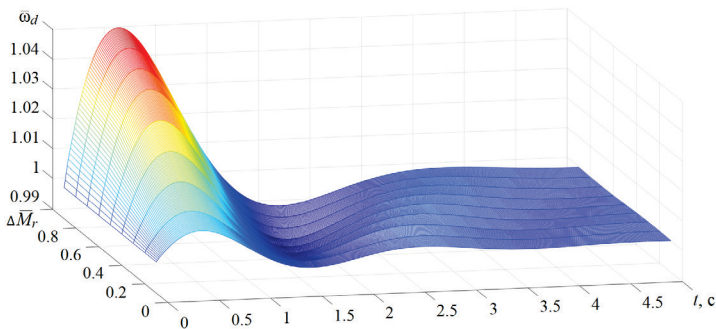


Рис. 4. Перехідні процеси в САРЧ ДГ при скиданні навантаження ΔM_r із налаштуваннями ПД контролера електронного РЧО:
 $k_p = 1,95$ відн. од.; $T_i = 0,85$ с; $k_d = 0,075$ відн. од.

Із рис. 4 випливає, що при збуреннях 10 і 20 % динамічний закид частоти обертання становить відповідно 1,0 та 1,3 % від номінальної частоти обертання ДГ, при цьому час регулювання не перевищує 2,5 с. Для збурень 30 ... 50 % закидання частоти обертання ДГ знаходиться в межах 2 ... 3,5 % при часі регулювання до 3 с. У разі збурень 60 ... 100 %, закидання становить 4 ... 5 % і час регулювання не перевищує 3,5 с.

На рис. 5 наведено перехідні процеси в САРЧ ДГ MAN 5L23/30H Mk3 ECR із налаштуваннями ПІД контролера електронного РЧО SaCoS_{one}: $k_p = 2,45$ відн. од.; $T_i = 0,65$ с; $k_d = 0,1$ відн. од.

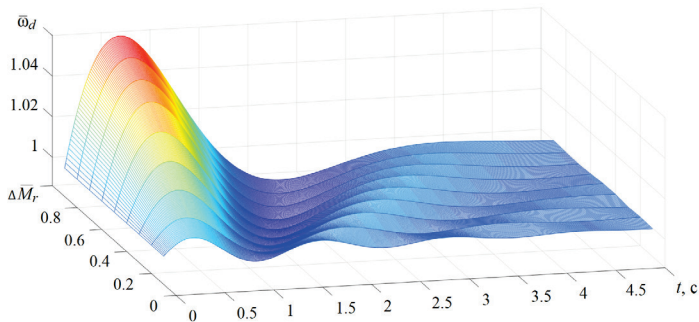


Рис. 5. Перехідні процеси в САРЧ ДГ при скиданні навантаження ΔM_r із налаштуваннями ПІД контролера електронного РЧО:
 $k_p = 2,45$ відн. од.; $T_i = 0,65$ с; $k_d = 0,1$ відн. од.

Із рис. 5 випливає, що при збуреннях 10 і 20 % динамічний закид частоти обертання становить 0,8 та 1,3 % від номінальної частоти обертання ДГ, а час регулювання відповідно 1,7 та 1,9 с. За збурень 30 ... 50 % закидання частоти обертання ДГ не перевищує 3 % при часі регулювання 3 с. У разі збурень 60 ... 100 %, закидання становить 4 ... 6 %, а час регулювання не перевищує 3,5 с.

Із рис. 1 – 5 випливає, що при будь-яких (в обраному діапазоні варіювання) налаштуваннях регулятора при значеннях ΔM_r до 20 % динамічний закид частоти обертання становить 0,8 ... 1,6 % від номінальної частоти обертання ДГ, а час регулювання не більше 2 с. Це означає, що істотність впливу на динаміку САРЧ величини ступеневої зміни навантаження до 20 % ΔM_r є несуттєвою. У зв'язку з цим, оптимізація ПІД контролерів електронних РЧО, які можуть налаштовуватися в експлуатації в залежності від величини відхилення фактичної частоти обертання ДГ від заданої, доцільна у діапазоні величин збурення 20 ... 100 %.

Для оптимізації із урахуванням істотності впливу ступеневих збурень на динаміку САРЧ обґрунтовано є величина збурення 20 %, оскільки в експлуатації суднових ДГ менші амплітуди є імовірнішими. Для такої величини оптимальне налаштування ПІД контролера становить: $k_p = 1,95$ відн. од.; $T_i = 0,85$ с; $k_d = 0$ відн. од.

У дослідженні під "оптимальним" налаштуванням електронного РЧО розуміється таке, що забезпечує мінімум закидання регульованої величини при максимальному скиданні навантаження з дотриманням дозволеного стандартами часу регулювання частоти обертання ДГ.

У табл. наведено порівняння експериментальних значень показників якості зі штатним ($k_p = 2,45$ відн. од.; $T_i = 0,65$ с; $k_d = 0,1$ відн. од.) та запропонованим ($k_p = 1,95$ відн. од.; $T_i = 0,85$ с; $k_d = 0$ відн. од.) налаштуванням ПІД контролера електронного РЧО для шести варіантів скидання/накидання навантаження.

Таблиця

Експериментальні значення показників якості

Зміна навантаження, %	Штатне налаштування		Запропоноване налаштування	
	закидання частоти обертання ДГ, хв^{-1}	час регулювання, с	закидання частоти обертання ДГ, хв^{-1}	час регулювання, с
100 $\rightarrow$ 0	43	2,7	52	2,9
100 $\rightarrow$ 50	40	3,5	19	3,3
100 $\rightarrow$ 75	37	3,4	11	2,7
0 $\rightarrow$ 25	39	3,5	13	2,8
0 $\rightarrow$ 50	45	3,7	24	3,2
50 $\rightarrow$ 100	43	4,0	23	3,7

При запропонованому налаштуванні РЧО регламентовані вимоги до закидання частоти обертання та часу регулювання дотримуються в усіх перехідних режимах. Таким чином, оптимальним для найімовірнішого суттєвого збурення 20 % налаштуванням ПІД контролера електронного регулятора дизель-генераторної установки вдалося підвищити стабільність частоти обертання до 12 %.

У ході дослідження САРЧ ДГ з електронним РЧО встановлено:

збільшення коефіцієнта підсилення пропорційної ланки ПІД контролера вище 2 відн. од. зменшує величину закидання частоти обертання ДГ, проте при збуреннях, вищих за 20 %, виникає перерегулювання в САРЧ дизель-генераторної установки. При значеннях 1 ... 1,5 відн. од. перерегулювання істотно зменшується, проте стабільність частоти обертання ДГ погіршується;

зниження часу інтегруючої ланки нижче 0,85 с збільшує нестабільність до 0,8 % від номінальної частоти обертання ДГ при зміні навантаженні до 40 %, а значення T_i 1,45 ... 1,85 с – тривалість

перехідного процесу регулювання – на 0,3 ... 0,8 с при зміні навантаження 40 ... 100 %;

збільшення коефіцієнта передачі диференціюючої ланки не покращує динаміку САРЧ при значеннях коефіцієнта підсилення пропорційної ланки 1,5 ... 2 відн. од.

Із цього випливає, що для електронного РЧО суднових ДГ доцільно обнулення диференціюючої складової у поєднанні з підвищенням коефіцієнта підсилення пропорційної ланки до 1,5 ... 2 відн. од. При цьому інтегруючу складову рекомендується задавати у межах 0,85 ... 1,45 с для покращення стабільності частоти обертання ДГ при збуреннях до 40 %, та зменшенні тривалості перехідного процесу регулювання при зміні навантаження на ДГ 40 ... 100 %.

Запропонована методика вибору параметрів налаштування РЧО дозволила адаптувати роботу САРЧ до реальних умов експлуатації ДГ, а також усунути необхідність вимушеного періодичного ручного переналаштування регуляторів. При цьому показано, що навіть у налаштованому заводом-виробником електронному РЧО суднових ДГ є резерви оптимізації експлуатаційних режимів з урахуванням істотності впливу величини скидання/накидання навантаження та ймовірності її виникнення в експлуатації.

ЛІТЕРАТУРА REFERENCES

1. Babamohammadi S., Birss A., Pouran H., Pandhal J., Borhani T. Emission control and carbon capture from diesel generators and engines: A decade-long perspective. // Carbon Capture Science & Technology. – 2025. – Vol. 14. – № 100379. – 34 p.
2. Stoumpos S., Bolbot V., Theotokatos G., Boulougouris E. Safety performance assessment of a marine dual-fuel engine by integrating failure mode, effects, and criticality analysis with simulation tools. // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment. – 2022. – № 236 (2). – P. 376 – 393.
3. Gorb S., Popovskii A., Budurov M. Adjustment of speed governor for marine diesel generator engine. // International Journal of GEOMATE. – 2023. – Vol. 25. – № 109. – P. 125 – 132.
4. Budurov M., Gorb S., Popovskii A. Optimization of electronic speed governors sensitivity for marine diesel engines. // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2025. – Vol. 2. – № 8 (134). – P. 26 – 35.
5. Project guide for GenSet MAN L23/30H. – Режим доступу: https://man-es.com/applications/projectguides/4stroke/manualcontent/L23-30H_GenSet_TierII.pdf (дата звернення: 22.03.2026).

6. Горб С. І., Поповський О. Ю., Будуров М. І. Оптимізація налаштування регулятора частоти обертання дизель-генератора. // Автоматизація суднових технічних засобів: наук.-техн. зб. – 2023. – Вип. 28. – Одеса: НУ "ОМА". – С. 3 – 16.

Abstract. In recent years, electronic speed governors implemented on the basis of programmable logic controllers have become widely used in automatic control systems of marine diesel generators. At the same time, during the operation of auxiliary diesel engines equipped with such controllers, problems often arise in ensuring control quality due to insufficient dynamic performance under load changes, which directly affects maritime safety.

The operational cases presented in this study indicate the need for forced periodic manual retuning of controller-based electronic governors in marine diesel generator units based on visual assessment of speed stability. In this regard, to ensure the required operational control quality, a study was conducted using mathematical modeling to investigate the effect of step changes in the relative load torque within the range of 10 ... 100 % on the speed deviation of a diesel generator, considering variations within the design-specified ranges of proportional gain, integral time, and derivative gain.

The results show that when using electronic governors with PID controllers, the operation of marine diesel generators should be adapted to variable operating conditions by optimizing controller settings for a step change in relative load torque of approximately 20 %, which has a higher probability of occurrence among significant load variations in practice. For such a disturbance, it is advisable to set the derivative component of the PID controller to zero while increasing the proportional gain to 1.5 ... 2.0 rel.un. At the same time, the integral component is recommended to be set within the range of 0.85 ... 1.45 s to reduce speed instability of the auxiliary unit while maintaining the transient response duration within the limits prescribed by standards.

A methodology for selecting PID controller parameters of electronic governors for marine diesel generators under the most probable significant load shedding / acceptance has been proposed, allowing optimization of the automatic speed control system in accordance with real operating conditions. The methodology was validated on a marine diesel generator unit MAN 5L23/30H Mk3 ECR equipped with SaCoS_{one} electronic governor, demonstrating an improvement in speed stability of up to 12 % without violating the standard requirements for speed control during maximum permissible load shedding.

УДК 621.431.74

DOI: 10.31653/1819-3293-2026-1-31-13-31

ARTICLE HISTORY

Received 20.02.2026

Accepted 24.03.2026

Горб Сергій Іванович
Національний університет "Одеська морська академія", Одеса,
Україна
gs@onma.edu.ua

Ефективність мовних моделей штучного інтелекту для оцінювання операційних ризиків на судах

Gorb Sergii
National University "Odessa Maritime Academy", Odessa, Ukraine
gs@onma.edu.ua

The Effectiveness of Artificial Intelligence Language Models in Assessing Operational Risks on Ships

Резюме. Незважаючи на зростання інтересу до застосування штучного інтелекту в судновій практиці, судноплавні компанії висловлюють сумніви щодо надійності цієї технології під час оцінювання операційних ризиків. У статті наведено порівняльне оцінювання ефективності відомих мовних моделей штучного інтелекту для підтримки оцінювання операційних ризиків на судах. Запропоновано систему критеріїв, що дає змогу оцінити властивості моделей, які безпосередньо впливають на практичну надійність їх застосування в судновій діяльності, а також визначити моделі, що забезпечують найвищу якість аналізу. Установлено, що найбільш доцільним є використання штучного інтелекту для первинної ідентифікації ризиків, формування переліку запобіжних заходів і прискорення документування результатів. Водночас ефективність такого підходу залежить від правильного вибору моделі та обов'язкової експертної верифікації отриманих висновків.

Summary. Despite the growing interest in applying artificial intelligence in shipboard practice, shipping companies express doubts about the

reliability of this technology in operational risk assessment. The article presents a comparative evaluation of the performance of well-known artificial intelligence language models in supporting operational risk assessment on board ships. A system of criteria is proposed to assess the properties of the models that directly affect the practical reliability of their application in ship operations, as well as to identify the models that provide the highest quality of analysis. It was found that the most appropriate use of artificial intelligence is for the initial identification of risks, the development of a list of preventive measures, and the acceleration of result documentation. At the same time, the effectiveness of this approach depends on the correct choice of model and the mandatory expert verification of the conclusions obtained.

Міжнародний кодекс з управління безпечною експлуатацією суден та запобіганням забруднення (ISM Code) вимагає, щоб власники суден або інші суб'єкти, які взяли на себе відповідальність від судновласника за експлуатацію судна, визначили своєю метою "оцінювати всі виявлені ризики для своїх суден, персоналу та навколишнього середовища та встановлювати відповідні заходи захисту". Ця вимога набула чинності з 1 липня 2010 року відповідно до резолюції Міжнародної морської організації (ІМО) MSC.273(85).

У національному законодавстві аналогічні положення містяться у пунктах 1.1 Додатків 1 та 2 до *Положення про систему управління безпекою судноплавства на морському та річковому транспорті*, що затверджено наказом Міністерства транспорту України від 20.11.2003 № 904. У цьому документі також визначено, що метою діяльності судноплавної компанії є "забезпечення захисту від усіх ризиків, що виявлені". Термін впровадження цієї вимоги – 1 липня 2004 року, тобто на 6 років раніше, ніж аналогічної вимоги ISM Code.

У Керівництві [1] зазначається, що ISM Code не визначає будь-якого конкретного підходу до управління ризиками і судноплавна компанія повинна самостійно обрати методи, що відповідають її організаційній структурі, типу суден та характеру господарської діяльності. Обрані методи можуть бути більш або менш формалізованими, але вони мають бути систематичними, забезпечувати повноту та ефективність оцінювання і реагування на ризики, а також бути належним чином задокументованими для підтвердження обґрунтованості рішень.

Відповідно до п. 6.4 ДСТУ ISO 31000:2018 *Менеджмент ризиків. Принципи та настанови*, оцінювання ризику включає три послідовні етапи:

1. *Ідентифікацію ризику* — виявлення, розпізнавання та опис ризиків, які можуть вплинути на досягнення цілей організації;

2. *Аналіз ризику* — з'ясування природи та характеристик ризику, включно з оцінкою рівня ризику, невизначеностей, джерел ризику, можливих наслідків, ймовірностей та ефективності наявних засобів управління ризиком;

3. *Порівняльну оцінку ризику* — співставлення отриманих результатів з установленими критеріями для визначення необхідності додаткових дій.

Результати оцінювання ризику формують основу для подальшої обробки ризику, яка передбачає вибір і реалізацію відповідних варіантів реагування. Можливі варіанти реагування охоплюють:

уникнення ризику шляхом відмови від діяльності, яка його спричиняє;

прийняття або навіть посилення ризику з метою використання сприятливої можливості;

усунення джерела ризику;

зміну ймовірності реалізації ризику;

зміну потенційних наслідків ризику;

розподіл ризику між сторонами (наприклад через аутсорсинг чи страхування);

свідоме утримання ризику на основі обґрунтованого рішення.

Методи аналізу ризиків детально викладено у ДСТУ EN IEC 31010:2022.

Практика показує, що нормативні процедури оцінювання ризиків та їх реалізація в Керівництвах із систем управління безпекою на морських судах виявились надмірно складними для судових екіпажів [2 – 4]. Тому основна увага зосереджується не на якості аналізу, а на формальному заповненні звітних форм. Непоодинокими є випадки, коли на судах звітні форми з аналізу ризиків заповнюються після проведення судових операцій [5].

У публікаціях [6 – 8] запропоновано уніфікувати заходи для оцінювання ризиків та покращення адміністрування роботи з ризиками. Однак ці заходи не забезпечують кардинального покращення оцінювання операційних ризиків на судах [5].

Найбільш результативним заходом щодо покращення оцінювання операційних ризиків на судах є використання мовних моделей штучного інтелекту (ШІ) [2, 5]. Експериментальне дослідження показало, що використання такого заходу значно підвищує якість оцінювання ризиків та суттєво скорочує трудовитрати.

Однак виявилася **практична проблема**: незважаючи на зростання інтересу до застосування ШІ у судновій практиці [9], судноплавні компанії висловлюють сумніви щодо надійності цієї технології під час оцінювання операційних ризиків. Основні аргументи полягають у тому, що:

моделі ШІ можуть генерувати галюцинації та помилкові твердження;

відсутня впевненість, що запропоновані ШІ рекомендації повністю відповідають вимогам регуляторних актів ІМО та національним правилам;

немає достатнього підтвердження надійності експертних оцінок, сформованих засобами ШІ.

У зв'язку з цим **метою дослідження** є порівняльне оцінювання відомих мовних моделей ШІ для підтримки оцінювання операційних ризиків на судах з акцентом на тих властивостях, які визначають практичну надійність їх застосування.

Для порівняльного аналізу необхідно визначити набір критеріїв оцінювання їхніх відповідей. Кількість таких критеріїв має бути достатньою для забезпечення змістовної повноти аналізу, але водночас не надмірною, щоб не ускладнювати процедуру аналізу без істотного підвищення його результативності. Отже, доцільно орієнтуватися на оптимальний баланс між повнотою та простотою системи критеріїв. Рациональність добору критеріїв повинна визначатися метою порівняння і практичною значущістю критеріїв для прийняття рішення щодо вибору моделі, а не лише формальним інтересом до широти її можливостей. Якщо певний критерій не впливає на підсумковий висновок про доцільність використання тієї чи іншої моделі, його варто розглядати як надмірний. У цьому контексті може бути застосоване таке практичне правило: якщо видалення критерію не змінює вибір моделі, то цей критерій, імовірно, не має вирішального значення для аналізу.

У межах цього дослідження порівняння мовних моделей під час оцінювання операційних ризиків на судах запропоновано здійснювати за кількістю суттєвих ризиків, виявлених моделями, а також на основі комплексу критеріїв із визначеною інтерпретацією балів, що охоплює:

кількість фраз із ознаками галюцинації (фактично помилкових тверджень, вигаданих посилань) –

1 – багато хибних, вигаданих тверджень, які роблять висновки ненадійними,

2 – помилкових чи сумнівних тверджень помітно більше допустимого, частина їх впливає на розуміння ризиків,

3 – є окремі сумнівні або слабо підтверджені фрази, але основна аргументація залишається правдоподібною,

4 – є поодинокі неточності, які не впливають на результат оцінювання ризиків,

5 – ключові твердження правдоподібні і не містять ознак галюцинації;

операційну небезпеку – наявність порад або висновків, що суперечать вимогам регуляторних актів ІМО чи національних правил –

1 – відповідь містить небезпечні рекомендації або висновки, які прямо суперечать обов'язковим вимогам і здатні призвести до неправильних дій,

2 – є принаймні одна рекомендація або інтерпретація норми, що створює практичний ризик,

3 – в цілому відповідь безпечна, але є спірні або недостатньо точні формулювання, які можуть викликати неправильне тлумачення,

4 – відповідь нормативно та операційно коректна, можливі лише малозначущі відхилення від практичної безпеки,

5 – відповідь повністю безпечна, не містить ризикованих порад та узгоджена із застосовними вимогами;

рівень експертної довіри до прогнозів категорії витрат та імовірності виникнення ризиків –

1 – прогнози виглядають випадковими, внутрішньо непереконливими або явно помилковими,

2 – окремі оцінки мають слабе обґрунтування і виглядають неправдоподібними,

3 – прогнози загалом прийнятні, але спираються на неповне обґрунтування,

4 – прогнози добре аргументовані і переважно переконливі, сумніви стосуються лише окремих оцінок чи деталей, у тому числі через часткове порушення заданої процедури оцінювання ризиків,

5 – прогнози послідовно обґрунтовані, логічні та викликають високий рівень експертної довіри;

емпірична підтверджуваність - частка тверджень, які відповідають даним звітам про аварії, інциденти та спостереженням портового контролю (тобто підтверджених практикою) –

1 – більшість тверджень не підтверджується практикою чи спостереженнями, або суперечить їм,

2 – зв'язок з практикою простежується слабо, підтверджуються лише окремі положення,

3 – значна частина тверджень узгоджується з практикою, але підтвердження охоплює не всі ключові елементи,

4 – більшість ключових тверджень підтверджується матеріалами реальних випадків, інцидентів чи спостережень,

5 – всі ключові твердження підтверджуються практикою або добре узгоджуються з емпіричними даними;

релевантність і глибину відповіді – відповідь дана по суті відповідно до очікувань від запиту та заданої процедури оцінювання ризиків без відхилення у загальні міркування –

1 – відповідь в основному не відповідає запиту та заданій процедурі оцінювання ризиків або майже повністю йде "убік",

2 – пропущені важливі етапи заданої процедури оцінювання ризиків або відповідь є поверховою та/або шаблонною,

3 – відповідь в основному релевантна запиту та заданій процедурі оцінювання ризиків, але глибина розкриття недостатня,

4 – відповідь добре сфокусована на поставлених завданнях, але розкриває не всі аспекти ризиків або частково порушує задану процедуру оцінювання ризиків,

5 – відповідь повністю відповідає запиту та заданій процедурі оцінювання ризиків та не містить загальних міркувань;

консистентність – логічну узгодженість та відсутність суперечностей між частинами відповіді –

1 – відповідь внутрішньо суперечлива і суперечності роблять її непридатною для використання,

2 – є помітні логічні неузгодженості, що впливають на інтерпретацію та висновки,

3 – загальна логіка збережена, але зустрічаються окремі неузгоджені положення,

4 – відповідь майже повністю логічно узгоджена, можливі лише малоістотні розбіжності або пропуски фрагментів, що підтверджують логіку оцінювання ризиків, або через часткове порушення заданої процедури оцінювання ризиків,

5 – відповідь повністю послідовна, логічно зв'язна і не містить внутрішніх протиріч;

структурованість – ступінь логічної організації та впорядкованості інформації –

- 1 – відповідь хаотична, логіка викладу не простежується,
- 2 – є окремі елементи структури, але порядок викладу непослідовний,
- 3 – структура відповіді в цілому зрозуміла, хоча організація матеріалу могла б бути кращою,
- 4 – відповідь в цілому добре організована, логіка викладу ясна, є лише незначні логічні недоліки,
- 5 – відповідь зразково структурована, логічно організована і зручна для аналізу;

грунтовність пояснення ризиків – змістовна обґрунтованість природи ризику, механізмів його виникнення та можливих наслідків –

- 1 – пояснення природи ризиків фактично відсутнє або зводиться до шаблонних фраз,

- 2 – названі окремі причини або наслідки ризиків, але механізм виникнення ризиків розкритий слабо,

- 3 – ризики пояснені прийнятно (зазначено основні причини, механізм та наслідки), але без достатньої деталізації,

- 4 – дано докладне і переважно переконливе пояснення ризиків, хоча окремі ланки аргументації розкрито не в повному обсязі,

- 5 – дано глибоке та змістовне пояснення природи ризиків, механізмів їх виникнення та ймовірних наслідків;

точність застосування професійної, у тому числі морської термінології –

- 1 – термінологія використовується невірно, непрофесійно або з грубим змішуванням понять,

- 2 – терміни частково коректні, але помітна плутанина, що знижує якість аналізу,

- 3 – термінологія в цілому прийнятна і неточності не руйнують сенс відповіді,

- 4 – професійні терміни застосовуються в основному точно і доречно, зустрічаються лише поодинокі неточності або надмірні спрощення,

- 5 – термінологія коректна, професійна і використовується строго за контекстом.

Запропонований комплекс критеріїв не слід розглядати як універсальний. У разі наявності специфічних вимог до оцінювання операційних ризиків наведений перелік може бути розширений шляхом включення додаткових критеріїв.

Для реалізації завдання цього дослідження пропонується провести оцінювання ризиків на прикладі конкретної суднової операції, для якої накопичено фактичний досвід і може бути здійснений експертний аналіз отриманих результатів. Такою судновою операцією обрано роботу, що аналізувалась у публікації [5] для Oil Tanker "**Diamondway**" (delivered 21.06.2016, IMO Nr. 9742895, automation class A1, Length Overall 277 m, Breadth 48 m, Depth 23,1 m, Laden Speed 14,60 Kts, Displacement 79016,2 Mts).

Зміст роботи: *"Ремонт тріщин у корпусі Scrubber методом зварювання. Тріщини знаходяться на висоті до 3 метрів від підлоги."*

Для порівняльного аналізу було відібрано низку сучасних великих мовних моделей, що репрезентують різні підходи до генеративного ШІ та належать до різних екосистем розробників.

До переліку включено як базові версії моделей, так і конфігурації з увімкненими режимами посиленого міркування, глибокого мислення або дослідження. Це дало змогу оцінити не лише загальну якість відповідей, а й вплив спеціалізованих режимів на глибину аналізу, логічну послідовність, точність аргументації та здатність моделей розв'язувати складні прикладні завдання.

Перелік вибраних моделей (у дужках скорочені позначення):

Claude Sonnet 4.6 (CS 4.6) – велика мовна модель, розроблена компанією Anthropic; використовується як базова модель у чат-боті Claude та призначена для діалогу, аналізу текстів, програмування й роботи зі складними запитамі;

Claude Sonnet 4.6 з увімкненим режимом "міркування" (CS4.6-R) – та сама модель, але в конфігурації з посиленим режимом міркування для глибокого покрокового аналізу завдань;

DeepSeek-R1 (DS-R1) – модель, розроблена китайською компанією DeepSeek з орієнтацією на складні логічні, математичні та програмні задачі;

DeepSeek-R1 з увімкненим режимом "глибоке мислення" (DS-R1-DT) – для більш ретельного аналізу складних запитів;

ERNIE 5.0 (ERNIE 5.0) – велика мультимодальна модель, розроблена китайською компанією Baidu; навчалася працювати не лише з текстом, а й із зображеннями, аудіо та відео в межах єдиної архітектури;

Gemini 3.1 з увімкненим режимом "професійне мислення" (Gem 3.1-PT) – модель, розроблена Google DeepMind, яка використовується в екосистемі Gemini для професійних і аналітичних сценаріїв;

GPT-5.4 (GPT-5.4) – велика мовна модель компанії OpenAI, що лежить в основі чат-бота ChatGPT та використовується для широкого спектра завдань;

GPT-5.4 з увімкненим режимом "міркування" (GPT-5.4-R) – для багатокрокового розв’язання задач;

Grok 4.1 (Grok 4.1) – модель, розроблена компанією xAI, яка використовується в чат-боті Grok та орієнтована на інтерактивне спілкування, пошук інформації й аналітичну підтримку користувача;

Kimi K2.5 з увімкненим режимом "міркування" (Kimi K2.5-R) – модель китайської компанії Moonshot AI, що застосовується в чат-боті Kimi та орієнтована на складні агентні сценарії, міркування, пошук і роботу з великими обсягами інформації;

Microsoft Copilot з увімкненим режимом "глибоке мислення" (Copilot-DT) – не окрема модель, а чат-бот/AI-асистент компанії Microsoft, який використовує великі мовні моделі у власному інтерфейсі; режим «глибоке мислення» призначений для складніших аналітичних задач;

Mistral з увімкненим режимом "міркування" (Mistral-R) – модель, розроблена французькою компанією Mistral AI, використовується в чат-інтерфейсі Le Chat з орієнтацією на генерацію, аналіз і технічні сценарії (без режиму «міркування») та з режимом «глибоке дослідження» модель припустилася грубих помилок, у зв’язку з чим ці режими не були використані для порівняння);

Qwen3.5-Plus (Qwen 3.5+) – велика мовна модель, створена компанією Alibaba Cloud (дочірня структура в Сінгапурі китайської Alibaba Group) для аналітичних і дослідницьких завдань;

Qwen3.5-Plus з увімкненим режимом "глибокого дослідження" (Qwen 3.5+DR) – з акцентом на багатокроковий пошук, аналіз і синтез інформації;

Perplexity Deep Research (PPLX-MM) – не окрема модель, а спеціальний дослідницький режим платформи **Perplexity**, який автоматично використовує **комбінацію моделей** для проведення глибокого аналізу (у цьому режимі платформа не розкриває вибір моделей, які використовувалися для відповіді).

Усі досліджувані моделі виконали оцінювання ризиків для заданої судової операції та в більшості випадків продемонстрували результати, що перевищували якість традиційного "ручного" аналізу. Водночас між моделями спостерігалися суттєві відмінності як у повноті ідентифікації ризиків, так і в якості обґрунтування, нормативній коректності рекомендацій, рівні структурованості та надійності повторної оцінки залишкових ризиків.

Сумарно моделями для заданої суднової операції ідентифіковані ризики:

1. **Пожежа** або локальний вибух у зоні Scrubber внаслідок виконання вогневих робіт;
2. **Отруєння** токсичними **газами** в робочій зоні;
3. **Падіння з висоти** до 3 метрів;
4. **Ураження електричним струмом** від зварювального обладнання;
5. **Опіки** очей і шкіри, термічні травми;
6. **Падіння інструменту** та оснащення на людей, що знаходяться нижче місця виконання робіт;
7. **Пошкодження корпусу** Scrubber через неправильну технологію зварювання;
8. **Перегрів персоналу** під час роботи всередині димової труби;
9. **Забруднення** навколишнього середовища через можливі витoki промивної води.

У табл. 1 наведено перелік ризиків, ідентифікованих досліджуваними моделями під час оцінювання заданої суднової операції.

Аналіз цих даних дає підстави стверджувати, що сучасні мовні моделі достатньо впевнено розпізнають очевидні та безпосередньо пов'язані з описом роботи ризики, тоді як непрямі або менш очевидні небезпеки виявляються ними гірше. Використання режимів міркування, глибокого мислення та глибокого дослідження загалом сприяло збільшенню кількості ідентифікованих ризиків, хоча не завжди супроводжувалося підвищенням якості обґрунтування.

За результатами оцінювання за запропонованими критеріями у відповідях досліджуваних моделей виявлено низку характерних недоліків, які відрізнялися як за змістом, так і за потенційним впливом на практичну надійність застосування моделей у судновій діяльності.

Модель **CS 4.6** після вжитих заходів захисту за деякими ризиками суттєво знижує одразу й прогнозовані втрати і ймовірності виникнення ризиків, що виглядає надто оптимістично без відповідного пояснення; названі небезпеки є практично правдоподібними та конкретні заходи відповідають практиці, але модель не наводить посилання на конкретні документи; поєднанню категорії втрат "дуже низькі" та категорії ймовірності "низька" помилково присвоєна категорія ризику "низький" замість "несуттєвий".

Таблиця 1

Ризики, ідентифіковані моделями

Ризик	CS 4.6	CS 4.6-R	DS-R1	DS-R1-DT	ERNIE 5.0	Gem 3.1-PT	GPT-5.4	GPT-5.4-R	Grok 4.1	Kimi K2.5-R	Copilot-DT	Mistral-R	Qwen 3.5+	Qwen 3.5+DR	PPLX-MM
Пожежа	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Отруєння газами	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Падіння з висоти	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Ураження електричним струмом	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Опіки	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Падіння інструменту	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Попшкодження корпусу	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Перегрів персоналу	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Забруднення	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+

Модель **CS 4.6-R** аналогічно **CS 4.6** не наводить посилання на конкретні документи щодо названих небезпек та конкретних заходів.

Модель **DS-R1** помилково врахувала, що роботи виконуються всередині Scrubber, тоді як у описі судна зазначено лише "The Scrubber is installed ... inside the ship's smokestack"; ввела спірний сценарій "порушення інертного середовища / вибух у вантажних танках" через роботи біля Scrubber у димовій трубі; залишкові ризики штучно занижені (5 із 6 визнані несуттєвими); зв'язок пропонованих заходів з практикою простежується слабо і модель не наводить посилання на конкретні документи; окремі заходи щодо впливу на ризики викладені недостатньо докладно; модель одночасно вважає категорію ризику "отруєння газами" – "критичним" до заходів, а після заходів знижує його до "несуттєвого" без переконливого пояснення; окремі ланки аргументації ризиків розкрито не в повному обсязі; використаний термін "дедвейт" замість "водотоннажність".

Модель **DS-R1-DT** помилково припускає близьке проходження трубопроводів Inert Gas System біля місця ремонту; невдало рекомендує укривати сусідні трубопроводи "азбестовими полотнами", тоді як сучасні зварювальні blankets зазвичай позиціонуються як asbestos-free; так само як і у моделі **DS-R1** залишкові ризики штучно занижені та відсутні посилання на конкретні документи; ймовірність пожежі та отруєння обґрунтовується існуванням процедур контролю, які потім знову подаються як заходи реагування; окремі ланки аргументації ризиків розкрито не в повному обсязі; використана помилкова термінологія "чергування скрубера".

Модель **ERNIE 5.0** запропонувала надмірно загальний опис заходів впливу на ризики, що потенційно може порушити практичну безпеку; у первинній оцінці ризику є явна помилка: поєднанню категорії втрат "великі" та категорії ймовірності "висока" помилково присвоєна категорія ризику "критичний" замість "високий"; модель неодноразово знижує категорію втрат після заходів без обґрунтування; уся аргументація надана без нормативної чи емпіричної підстави; глибина розкриття ризиків недостатня; консистентність знижена через помилку в розрахунку категорії ризику; відповідь добре структурована, але структура відповіді наповнена недостатньо; причини ризиків і заходи надані загальними фразами без технічної конкретики; є спрощення професійної термінології ("використовувати правильні матеріали та інструменти").

Модель **Gem 3.1-PT** помилково врахувала, що роботи виконуються всередині Scrubber, тоді як у описі судна зазначено лише "The Scrubber is installed ... inside the ship's smokestack"; загальна довіра до прогнозів витрат та імовірності не висока через слабе обґрунтування категорій і надто оптимістичне зменшення втрат, зокрема до рівня "дуже низька" для падіння з висоти; глибина розкриття ризиків недостатня; відповідь добре структурована, але структура відповіді наповнена недостатньо; пояснення ризиків надмірно короткі, механізми розвитку подій розкриті поверхово, а для залишкового ризику майже немає окремого аргументування, чому саме обрана нова категорія втрат і імовірності;

Модель **GPT-5.4** оцінена як якісна, але вона не дотягує до зразкової через те, що частина повторних оцінок після заходів виглядає занадто оптимістичною, особливо там, де знижено не лише імовірність, а й саму тяжкість наслідків.

Модель **GPT-5.4-R** також оцінена як якісна, але вона не дотягує до зразкової через те, що категорія імовірності виникнення отруєння газами після заходів щодо впливу на ризик різко зменшується від "середньої" до "дуже низької". Це виглядає методично припустимо, але досить оптимістично без обґрунтування, чому саме "дуже низька", а не "низька".

Модель **Grok 4.1** дала рекомендацію "провести газовий аналіз простору Scrubber з використанням системи інертного газа", яка є некоректною, оскільки ця система не призначена для газоаналізу Scrubber. Також у відповіді наведено характеристики вантажних насосів, які не мають відношення до оцінювання ризиків при виконанні заданої роботи. Ці неточності віднесені до галюцинацій моделі, а рекомендація "використання системи інертного газа" також до операційної небезпеки. Повторна оцінка категорії ризику "падіння з висоти" – "несуттєвий" – після запропонованих заходів виглядає занадто оптимістичною. Модель не наводить посилання на конкретні документи щодо названих небезпек та конкретних заходів. Окремі заходи щодо впливу на ризики викладені недостатньо докладно. Окремі ланки аргументації ризиків розкрито не в повному обсязі. Використано термін "вибухозахисне зварювальне обладнання", хоча такий клас не існує. Використано термін "вибухозахищене зварювальне обладнання", хоча такий клас не існує. Також використано некоректну аббревіатуру для неруйнівного контролю зварювання.

Модель **Kimi K2.5** окремі заходи щодо впливу на ризики виклала недостатньо докладно; використано термін "гарячий наряд" замість "пожежний наглядовий пост".

Модель **Copilot-DT** допустила "можливий контакт з інертним газом", хоча основа такого контакту відсутня; рекомендація "при необхідності – використання інертного газу для витіснення парів" у контексті зварювальних робіт біля Scrubber є ризикованою, оскільки може створити кисневе збіднення робочого простору; поєднанню категорії втрат "середні" та категорії ймовірності "дуже низька" помилково присвоєна категорія ризику "несуттєвий" замість "низький"; поєднанню категорії втрат "великі" та категорії ймовірності "низька" помилково присвоєна категорія ризику "низький" замість "середній"; модель неодноразово знижує категорію втрат після заходів без обґрунтування; уся аргументація надана без нормативної чи емпіричної підстави; розкрито не всі аспекти ризиків; консистентність знижена через помилки в перерахунку категорій залишкових ризиків; недоречно використаний термін "газозневоднення".

Модель **Mistral-R** запропонувала надмірно загальний опис заходів впливу на ризики, що потенційно може порушити практичну безпеку; після заходів модель без обґрунтування знижує категорію втрат майже для всіх ризиків, зокрема для пожежі/вибуху – з "дуже великих" до "середніх"; аргументація тримається на загальних міркуваннях без емпіричної чи нормативної опори; глибина розкриття ризиків недостатня; окремі заходи щодо впливу на ризики викладені недостатньо докладно; порушено структуру відповіді, яка вимагається процедурою оцінювання ризиків; пояснення причин ризиків і заходів дуже короткі; професійна термінологія надмірно спрощена.

Модель **Qwen 3.5+** ідентифікувала недостатню кількість ризиків, дала надмірно коротку відповідь, аргументація якої тримається на загальних міркуваннях без емпіричної чи нормативної опори; глибина розкриття ризиків недостатня; окремі заходи щодо впливу на ризики викладені недостатньо докладно; є перепустки фрагментів, які підтверджують логіку оцінювання ризиків; недостатньо розкрито етапи оцінювання ризиків; пояснення причин ризиків і заходів дуже короткі; є поодинокі неточності в професійній термінології (втома металу конструкції, наявність залишкових газів вихлопу).

Модель **Qwen 3.5+DR** оформила відповідь у вигляді звіту у форматі pdf на 17 сторінках, 8 з яких – список використаних джерел інформації з інтернет-посиланнями; у докладній відповіді твердження правдоподібні але повідомлено, що роботи виконуються всередині

Scrubber, тоді як у описі судна зазначено лише "The Scrubber is installed ... inside the ship's smokestack"; рекомендація витіснити пари інертним газом у зоні робіт може створювати кисневе збіднення; рівень експертної довіри до прогнозів, релевантність та консистентність відповіді знижено через порушення заданої процедури оцінювання ризиків; використаний невдалий термін "стрічкові платформи" (у відсотковому відношенні цю помилку можна вважати незначною).

Комбінація моделей **PPLX-MM** допустила найменші невідповідності при оцінюванні ризиків, але помилково віднесла до ризиків "порушення вимог системи управління безпекою/охорони праці та регуляторних вимог", хоча відповідно до процедури оцінювання ризиків ризики повинні були формулюватися у термінах можливих негативних подій/наслідків, які можуть статися в майбутньому внаслідок виконання роботи.

У табл. 2 мовні моделі порівняно за допомогою запропонованих критеріїв. З табл. 2 і загалом з дослідження зроблено **висновки**:

1. Проведене дослідження показало, що сучасні мовні моделі ШІ загалом здатні ефективно підтримувати оцінювання операційних ризиків на судах, однак їх практична придатність істотно залежить від конкретної моделі та режиму її використання. За однакової постановки завдання моделі продемонстрували помітні відмінності за рівнем експертної довіри, емпіричною підтверджуваністю, релевантністю, глибиною пояснення ризиків, а також за наявністю ознак галюцинацій і потенційно небезпечних рекомендацій.

2. Найвищі підсумкові результати у дослідженні продемонстрували моделі GPT-5.4-R, PPLX-MM, CS 4.6-R та Kimi K2.5-R, які забезпечили найбільш збалансоване поєднання операційної безпеки, структурованості, консистентності, ґрунтовності пояснення та точності професійної термінології. Особливо слід відзначити PPLX-MM, яка допустила найменше змістових невідповідностей, а також GPT-5.4-R і CS 4.6-R, що забезпечили найбільш збалансоване поєднання якості аналізу і логічної послідовності відповіді.

Основні обмеження застосування моделей GPT-5.4 та GPT-5.4-R пов'язані не з явними помилками чи небезпечними порадами, а переважно з дещо оптимістичним зниженням окремих залишкових ризиків після запровадження заходів контролю, що вимагає додаткової експертної перевірки при практичному застосуванні.

У моделі CS 4.6-R недостатня опора на конкретні нормативні джерела, через що навіть якісно сформована відповідь у практиці потребує додаткової верифікації.

Таблиця 2

Критеріальні оцінки моделей

Критерій	CS 4.6	CS 4.6-R	DS-R1	DS-R1-DT	ERNIE 5.0	Gem 3.1-PT	GPT-5.4	GPT-5.4-R	Grok 4.1	Kimi K2.5-R	Copilot-DT	Mistral-R	Qwen 3.5+	Qwen 3.5+DR	PPLX-MM
Кількість фраз із ознаками галюцинації	-	-	2	1	-	1	-	-	2	-	1	-	-	1	-
Операційна безпека	5	5	5	5	4	5	5	5	4	5	2	4	5	5	5
Рівень експертної довіри	3	5	2	2	2	2	3	4	4	5	2	3	4	4	5
Емпірична підтверд-жуваність	3	3	2	2	2	5	5	5	3	5	2	2	2	5	5
Релевантність і глибина відповіді	5	5	4	5	3	3	5	5	4	4	4	3	3	4	4
Консистентність	4	5	4	4	4	5	5	5	5	5	4	4	4	4	5
Структурованість	5	5	5	5	4	4	5	5	5	5	5	3	3	5	5
Грунтовність пояснення	5	5	4	5	3	2	5	5	4	5	5	3	3	5	5
Точність професійної термінології	5	5	4	4	4	5	5	5	4	4	4	4	4	5	5

3. Дослідження також показало, що режими "міркування", "глибокого мислення" та "глибокого дослідження" загалом підвищують результативність моделей. Однак такий ефект не є автоматичною гарантією якості, оскільки в окремих випадках посилені режими одночасно породжували нові галюцинації, надлишкові припущення або методичні відхилення.

4. Найбільш проблемними у дослідженні виявилися моделі Copilot-DT, ERNIE 5.0, DS-R1, DS-R1-DT, Mistral-R і частково Qwen 3.5+, оскільки саме для них характерні нижчі оцінки за рівнем експертної довіри, емпіричною підтверджуваністю або операційною безпекою. Допущені окремими моделями поодинокі небезпечні поради в сфері судових робіт мають принципове значення, тому використання їх без експертного контролю не може вважатися допустимим.

5. Запропонований набір критеріїв є практично цінним, оскільки дає змогу оцінювати не лише формальну повноту відповіді, а передусім ті властивості моделей, які безпосередньо визначають надійність їх застосування в судовій практиці.

6. Практичне значення отриманих результатів полягає в тому, що мовні моделі доцільно розглядати не як заміну судового командного складу, а як інструмент інтелектуальної підтримки під час підготовки, перевірки та уточнення оцінок ризику. Найбільш доцільним є їх використання для первинної ідентифікації ризиків, формування переліку заходів та прискорення документування результатів.

7. Загальний висновок дослідження полягає в тому, що використання мовних моделей ШІ для оцінювання операційних ризиків на судах є перспективним і може забезпечувати суттєве підвищення якості аналізу. Проте ефективність такого підходу визначається правильним вибором моделі і обов'язковою експертною верифікацією її висновків. Для експертної верифікації можуть бути залучені й інші моделі ШІ.

Зроблені висновки не є статичними, оскільки природа систем ШІ є динамічною: вони постійно навчаються, удосконалюються та адаптуються до вирішуваних завдань [10].

ЛІТЕРАТУРА REFERENCES

1. A Guide to Risk Assessment in Ship Operations – No 127: IACS Rec. 2012/Rev.1 2021. – 6 p.

2. Горб С.І., Сагайдак О.І., Горб О.С. Використання штучного інтелекту для оцінки ризиків на морських судах // Автоматизація суднових технічних засобів: наук.-техн. зб. – 2024. – Вип. 29. – Одеса: НУОМА. – С. 33 – 42.

3. Waldemar Daszuta, Samrat Ghosh. Seafarers' perceptions of competency in risk assessment and management: an empirical study. //WMU Journal of Maritime Affairs. – 2018. – Volume 17. – P. 543 – 564.

4. Samrat Ghosh, Waldemar Daszuta. Failure of risk assessment on ships: factors affecting seafarer practice. //Australian Journal of Maritime & Ocean Affairs. – 2019. – Volume 11. – Issue 3. – P. 185 – 198.

5. Горб С. І. Аналіз операційних ризиків на судах з використанням штучного інтелекту // Автоматизація суднових технічних засобів: наук.-техн. зб. – 2025. – Вип. 30. – Одеса: НУОМА. – С. 21 – 40.

6. Gorb Sergey, Gorb Alex. Measuring risk; a practical approach. //Seaways. – 2013. – March. – P. 11 – 14.

7. Горб С.И., Горб А.С. Оценка рисков в техническом менеджменте судов. //Автоматизация судовых технических средств: науч. -техн. сб. – 2012. – Вып. 18. – Одесса: ОНМА. – С. 13 – 22.

8. Горб С., Горб А. Бег на месте? Оценки рисков в судоходных компаниях. //Порты Украины. – 2012. – № 7. – С. 30 – 32.

9. Irmina Durlik, Tymoteusz Miller, Ewelina Kostecka, Tomasz Tunski Artificial Intelligence in Maritime Transportation: A Comprehensive Review of Safety and Risk Management Applications. // Applied Sciences. – 2024. – Vol. 14. – Iss. 18, 8420. – 32 p.

10. ISO/IEC 23894:2023. Information technology – Artificial intelligence – Guidance on risk management.

Abstract. The study examines the potential for the practical application of modern artificial intelligence language models in the assessment of operational risks on board marine vessels. The relevance of the research lies in the fact that shipping companies continue to treat such technologies with caution because of the risk of hallucinations, possible methodological errors, and the insufficient substantiation of generated conclusions.

The aim of the study is to provide a comparative evaluation of well-known artificial intelligence language models with regard to their suitability for supporting shipboard risk assessment procedures. To this end, a system of criteria is proposed that focuses on properties directly affecting the reliability of practical application, including the presence of hallucination indicators, the operational safety of recommendations, the level of expert

confidence, empirical verifiability, the relevance and depth of the response, consistency, structural coherence, the validity of risk justification, and the accuracy of professional terminology.

The comparison was carried out using a specific shipboard operation involving the welding repair of cracks in the Scrubber casing, which made it possible to compare model outputs with the actual requirements of shipboard practice and accumulated expert experience. The results show that most of the models examined successfully identify the principal obvious risks associated with hot work, exposure to toxic gases, work at height, electric shock, and thermal injury. At the same time, the quality of model outputs varies considerably: alongside strong-performing solutions, cases were identified of unjustifiably optimistic reassessment of residual risk, the use of questionable assumptions, and isolated potentially unsafe recommendations.

The study demonstrates that language models are most appropriately used as an intelligent support tool for the initial identification of hazards, the development of preventive measures, and the acceleration of documentation processes. It is concluded that the use of artificial intelligence in shipboard risk assessment is promising, provided that the model is selected appropriately and that all generated conclusions are subjected to mandatory expert verification.

УДК 621.431.74

DOI: 10.31653/1819-3293-2026-1-31-32-39

ARTICLE HISTORY

Received 20.02.2026

Accepted 20.03.2026

Горб Сергій Іванович¹, Будуров Микола Ігорович²
Національний університет "Одеська морська академія", Одеса, Україна
gs@onma.edu.ua¹, budurovuk@gmail.com²

Забезпечення регламентованого перевантаження головних дизелів на суднах із гвинтами, крок яких регульований

Gorb Sergii¹, Budurov Mykola²
National University "Odessa Maritime Academy", Odessa, Ukraine
gs@onma.edu.ua¹, budurovuk@gmail.com²

Ensuring Prescribed Overload of Main Diesel Engines on Vessels with Controllable Pitch Propellers

Резюме. Проаналізовано вимоги щодо забезпечення короточасного перевантаження головних суднових дизелів понад номінальну потужність у критичних навігаційних ситуаціях, а також практична реалізація цих вимог при комбінаторному керуванні частотою обертання двигуна та кроком гребного гвинта. Розрахунковим дослідженням встановлено, що режим регламентованого перевантаження на 10 % від номінальної потужності доцільно здійснювати з пріоритетом у збільшенні частоти обертання, а не збільшенням кроку гвинта. Це забезпечить зменшення теплового навантаження деталей циліндро-поршневої групи дизеля за критерієм мінімуму температури газів на лінії розширення та підвищить надійність рушійної установки при регламентованому перевантаженні.

Summary. The requirements for ensuring short-term overloading of main marine diesel engines beyond their rated power in critical navigational situations have been analyzed, along with the practical implementation of these requirements under combinatorial control of engine rotational speed and propeller pitch. A computational study has established that the regulated

overload mode by 10 % of the rated power should preferably be achieved by prioritizing an increase in rotational speed rather than propeller pitch. This approach will reduce the thermal load on the cylinder-piston group components of the diesel engine based on the criterion of minimum gas temperature along the expansion line and improve the reliability of the propulsion plant during overload prescribed by regulations.

Морським суднам періодично може знадобитися розвинути швидкість, що перевищує штатну експлуатаційну. Подібна необхідність виникає в критичних ситуаціях: ухилення від зіткнення або несанкціонованого переслідування, виконання екстреного розвороту, маневри у вузькостях і при сильній течії, при роботі в льодових водах, а також для виходу із серії послідовних ударів хвиль об борт судна.

У зв'язку з цим на морських судах передбачається можливість короточасного перевантаження головних двигунів (ГД) понад номінальну потужність за рішенням капітана. Відповідно, даний режим закладається в системи керування ГД та активується капітаном у разі загрози безпеці судна.

Уніфікованими вимогами The International Association of Classification Societies –

пункт 3.3 M51 (Rev. 4 Feb 2015, corr. 1 Oct. 2018),

пункти 7.2 і 8.4 M71 (Corr. 1 June 2016),

пункт 5.3.3 M88 (Apr. 2025) –

передбачено типове схвалення ГД внутрішнього згоряння після випробувань із потужністю 110 % від номінальної, яка може досягатися збільшенням частоти обертання на 3,2 % понад номінальну (якщо двигун працює за гвинтовою залежністю) або збільшенням навантаження на 10 % при номінальній частоті обертання, якщо двигун може використовуватися/використовується на судах з гвинтами, крок яких регульований (ГРК). Причому, якщо двигун випробовується на судні під час роботи за гвинтовою залежністю, тривалість перевантажувального режиму повинна бути 30 хвилин (п. 5.3.3 M88).

Аналогічні чи близькі вимоги до режимів перевантаження головних судових дизелів є у Правилах класифікаційних товариств (табл. 1).

Вимоги до випробувань ГД не поширюються на вибір режимів дизелів під час їх експлуатації на судах, однак виробники двигунів у конструкторській документації враховують регламентовані випробування і зазвичай обмежують перевантажувальні режими допустимою потужністю 110 %, при цьому обумовлюючи максимальну тривалість роботи з такою потужністю.

Таблиця 1

Вимоги деяких Класифікаційних товариств щодо режимів
перевантаження ГД

Правило	Вимога
American Bureau of Shipping, Rules for building and classing of marine vessels. Part 4. Chapter 2. Section 1. January 2025.	п. 13.5.4 – ГД мають працювати при заданих навантаженнях, які обираються з урахуванням сфери застосування та мають охоплювати як нормальний, так і аварійний режими роботи, включаючи режим 110 % номінальної потужності за паспортною гвинтовою характеристикою та при постійній номінальній частоті обертання (при використанні ГРК); п. 13.5.4 (b) – ГД має забезпечувати режим із максимально допустимим крутним моментом 110 % при 100 % частоті обертання для ГД із ГРК або з максимально допустимою виробником потужністю 110 % при 103,2 % номінальної частоти обертання відповідно до паспортної гвинтової характеристики для ГД із гвинтами, крок яких фіксований (ГФК) – із тривалістю, затвердженою виробником для короточасного використання.
Det Norske Veritas, Rules for classification of ships. Part 4. Chapter 3. Section 1. July 2025.	п. 2.1.3 – максимальна безперервна потужність ГД має бути визначена таким чином, щоб можна було досягти перевантажувальної потужності у 110 % від номінальної.
Lloyd's Register, LR-RU-001: Rules and Regulations for the Classification of Ships, Part 5, Chapter 2, Section 11. July 2025.	table 2.11.1, 2.11.2 – випробування ГД на судні з потужністю 110 % від номінальної; на судні з ГФК при 103,2 % номінальної частоти обертання тривалістю 30 хвилин; на судні із ГРК тривалістю, погодженою з виробником.
Bureau Veritas, Rules for classification of steel ships. Part C. Chapter 1. Section 2. July 2025.	п. 4.1.2 (d) – розширений звіт про прийнятно-здавальні випробування має включати випробування при максимально допустимому крутному моменті (110 %) при 100 % частоті обертання для ГД із ГРК ... тривалістю не менше 1/2 години.

Наприклад, у технічній документації головних малообертових дизелів MAN B&W S70MC6 (2009 р.) та G70ME-C10.5-GI (2025 р.) зазначено, що перевантаження, яке відповідає 110 % номінальної потужності, може бути дозволене протягом обмеженого періоду часу – однієї години кожні 12 годин. Така ж вимога міститься в технічній документації головного середньообертового дизеля Wärtsilä L20 (2002 р.). Частота обертання двигуна, за якої може досягатися потужність 110 %, зазвичай не регламентується, однак мається на увазі, що вона не може бути меншою за номінальну.

На судах із ГФК, перевантажувальна потужність 110 % досягається збільшенням частоти обертання двигуна понад номінальну на 3,2 %.

На судах із ГРК така потужність може досягатися як збільшенням частоти обертання, так і збільшенням кута повороту гвинта. Проте фактично для вибору співвідношення частоти обертання двигуна і кроку гвинта використовується комбінаторне керування (комбінаторні діаграми), яке на ходових режимах судна передбачає задання максимального кроку гвинта та зміну швидкості судна за рахунок зміни частоти обертання двигуна [1, 2]. Якщо обмежувачем навантаження двигуна задано часткове навантаження, крок гребного гвинта зменшується до значення, що відповідає цьому навантаженню.

Наближення кроку гвинта до максимального значення забезпечує найвищу економічність установки, оскільки при великому кроці зменшується витрата палива на мильо шляху [3, 4].

Якщо використовується комбінаторне керування спільно з обмежувачем навантаження двигуна, перевантажувальна потужність в екстремальних навігаційних ситуаціях забезпечується вимкненням на містку обмежувача навантаження. При такому відключенні ГД не може розвинути потужність понад 110 %, оскільки відповідно до резолюції МЕРС.335(76) від 17.06.2021 з поправками у нього повинен бути обмежувач, який блокує подачу палива (паливний індекс/хід рейки паливних насосів) понад допустиме максимальне значення (як правило, це 1,065 від номінальної подачі, якщо ГД працює за гвинтовою залежністю, або 1,1 від номінальної подачі, якщо частота обертання ГД неспроможна збільшуватися понад номінальне).

При відключенні обмежувача навантаження є можливість коригувати крок гвинта потенціометром на пульті керування містка [2]. Потенціометр дає змогу зменшити крок, якщо навантаження двигуна стало надмірним, і збільшити крок, якщо вимкнення обмежувача не забезпечило необхідного перевантажувального режиму.

Таким чином, у практиці експлуатації суден з комбінаторним керуванням перевантажувальні режими, як правило, забезпечуються додатковим розворотом лопатей ГРК без зміни частоти обертання ГД. Це зберігає максимальну економічність рушійної установки, але ставиться під сумнів прагнення покращувати економічність установки, коли на перевантажувальних режимах з урахуванням їх короткочасності в балансі тривалості ходових режимів судна важливіше забезпечити задовільний перебіг робочих процесів у ГД і відповідно – надійність рушійної установки.

У зв'язку з цим актуальним є дослідження варіантів режимів перевантаження ГД при різних поєднаннях навантаження на дизель розворотом лопатей гвинта та частоти обертання. **Мета роботи** полягає у визначенні найкращого поєднання кроку гребного гвинта та частоти обертання ГД при навантаженні 100 ... 110 %.

Як об'єкт дослідження обрано ГД МаК 9М25С судна "TIMBER NAVIGATOR" з електронним регулятором *Regulateurs Europa Viking 35* із логічним пристроєм, який впливає на крок гвинта та дозволяє задавати до п'яти точок для формування криволінійної залежності обмеження навантаження ГД. На даному судні використовується комбінаторне керування, відповідно до якого на ходових режимах крок гребного гвинта встановлюється максимальним у межах обмеження навантаження ГД, а швидкість судна регулюється зміною частоти обертання ГД шляхом переміщення рукоятки керування на містку в діапазоні 6 ... 10 умовних одиниць.

Технічні характеристики та показники робочих процесів ГД представлені в [5]. В якості оцінювання теплової напруженості деталей циліндро-поршневої групи дизеля обрана температура газів на лінії розширення [6]. Для моделювання використано методику чисельного моделювання [7] та дані ходових випробувань судна [8].

У табл. 2 порівняно режими перевантаження 110 % потужності для двох варіантів поєднань частоти обертання ГД та подачі палива:

режим 1 – частота обертання 750 хв^{-1} (100 %) та подача палива 0,002545 кг/цикл (110 %);

режим 2 – частота обертання 774 хв^{-1} (103,2 %) та подача палива 0,002712 кг/цикл (106,5 %), що також забезпечує перевантаження за потужністю 110 %.

Таблиця 2

Результати моделювання режимів перевантаження ГД МаК 9М25С

№ з/п	Показник	Режим 1	Режим 2
1	Максимальний тиск циклу, кгс/см ²	206,2	203,7
2	Максимальна температура циклу, К	2033,4	2008,1
3	Температура в циліндрі на момент початку випуску, К	818,8	813,2
4	Частка тепла, що відводиться у стінки циліндра на робочих ходах, %	9,4	9,3
5	Середня умовна температура стінок циліндра, К	646,6	642,0
6	Дійсний коефіцієнт надлишку повітря	1,60	1,64
7	Сумарний коефіцієнт надлишку повітря	2,14	2,17
8	Середня температура газів перед турбіною, К	838,5	833,2
9	Сумарний індикаторний ККД	0,473	0,475

Із табл. 2 випливає, що на режимі 2 порівняно з режимом 1 покращується наддування циліндрів, внаслідок чого максимальна температура циклу і відповідно температури газів на лінії розширення зменшуються на 25 К. Одночасно зменшується на 5 К середня температура газів перед турбіною. Це означає, що режим обмеженого часу перевантаження ГД доцільніше забезпечувати за рахунок пріоритету у збільшенні частоти обертання, а не збільшенням кроку гвинта.

У результаті дослідження пропонується на судах із ГРК для перевантаження ГД до потужності 110 % збільшувати частоту обертання дизеля до 103,2 %. Така рекомендація має виконуватися з одночасним налаштуванням обмежувача, який блокує подачу палива (паливний індекс/хід рейки паливних насосів) понад допустиме максимальне значення 106,5 %.

Також слід врахувати, що при великому опорі руху судна обмеження подачі палива 106,5 % може не дозволити збільшити частоту обертання ГД до 103,2 %. У такому випадку, щоб не зменшувати крок вручну, рекомендується виконати конструкторське опрацювання автоматизації процесу коригування кроку гребного гвинта. Відповідний пристрій має зменшувати крок гребного гвинта, якщо частота обертання ГД не досягла 103,2 %.

Таким чином, для ГД, які працюють на ГРК, встановлено, що регламентований режим перевантаження 110 % доцільно здійснювати

з пріоритетом у збільшенні частоти обертання, а не збільшенням кроку. Це забезпечить зменшення теплового навантаження деталей циліндро-поршневої групи дизеля за критерієм мінімуму температури газів на лінії розширення та підвищить надійність рушійної установки у критичних навігаційних ситуаціях.

Наступні дослідження плануються в області обґрунтування доцільності інтеграції засобів автоматизації процесу коригування кроку гребного гвинта у програмне забезпечення систем автоматичного керування.

ЛІТЕРАТУРА REFERENCES

1. Pitch Control System QTAGG. – Västerås: Q-TAGG R&D AB, 2023. – 2 р.
2. Горб С. И., Лялькин А. С., Чертков Г. И., Верлатый Н. И. Опыт эксплуатации и настройки системы управления главными двигателями и винтами регулируемого шага KAMEWA на судах типа "Юлиус Фучик": Морской транспорт. Серия "Техническая эксплуатация флота". Экспресс-информация. – Вып. 3(599). – М.: В/О "Мортехинформреклама", 1985. – 35 с.
3. Moon J., Je M., Hwang S. A study on performance and exhaust emission characteristics according to the controllable pitch propeller operation of two-stroke diesel engine in sailing condition. // Journal of Advanced Marine Engineering and Technology. – 2024. – Vol. 48. – No. 6. – P. 384 – 391.
4. Tian W., Lang X., Zhang C., Yan S., Li B., Zang S. Optimization of Controllable-Pitch Propeller Operations for Yangtze River Sailing Ships. // Journal of Marine Science and Engineering. – 2024. – Vol. 12. – Iss. 9, 1579. – 21 p.
5. Горб С. И., Будуров М. И. Вибір режимів перевантаження головного дизеля на судні із гвинтом, крок якого регульований. // Суднова електроінженерія, електроніка і автоматика: матеріали XII Міжнар. наук.-техн. конф., м. Одеса, 22 – 23 листоп. 2022 р. / Нац. ун-т "Одес. морська акад.". – Одеса, 2023. – С. 101 – 107.
6. Gorb S. I., Budurov M. I. Increasing the accuracy of a marine diesel engine operation limit by thermal factor. // International Review of Mechanical Engineering. – 2021. – Vol. 15. – № 3. – P. 115 – 121.
7. Горб С. И., Карпілов О. Ю. Розрахунок робочих процесів суднового дизеля: навч. посіб. – Одеса: НУ "ОМА", 2020. – 88 с.

8. Acceptance test record № 271204 of engine MaK 9M25C. – 2011. – № 45229. – 21 p.

Abstract. The study examines the problem of ensuring a regulated short-term overload mode of main marine diesel engines on vessels equipped with controllable pitch propellers in situations where the vessel must temporarily develop a speed higher than its normal operating speed, for example, when avoiding a collision, performing an emergency maneuver, navigating in confined waters, operating in strong currents, or sailing in ice conditions.

The regulatory prerequisites for such an operating mode are considered, and it is shown that the possibility of overloading the main engine up to 110 % of its rated power is stipulated by the requirements of classification and regulatory documents, as well as by the manufacturers' technical documentation for marine diesel engines.

The main focus is placed on selecting the most rational method of implementing overload operation on vessels with controllable pitch propellers, where the required power can be achieved either by increasing engine speed, by increasing propeller pitch, or by a combined use of both. It is noted that in actual practice, under combinator control, priority is usually given to increasing propeller pitch. However, such an approach is not optimal from the standpoint of the diesel engine's thermal stress and the reliability of the propulsion plant.

To substantiate the optimal solution, a computational study was carried out using the MaK 9M25C main engine of the vessel TIMBER NAVIGATOR equipped with a combinator control system as an example.

As an evaluation criterion, the gas temperature along the expansion line of the working cycle was selected, since it characterizes the thermal load on the components of the cylinder-piston group. A comparison of two variants of the 110 % overload mode showed that the preferable option is the one in which priority is given to increasing engine speed to 103,2 % while limiting fuel supply to 106,5 %, rather than to increasing propeller pitch at nominal engine speed. This option improves cylinder charging, reduces gas temperatures along the expansion line and before the turbine, and thereby decreases the engine's thermal stress.

The practical value of the study lies in the fact that its conclusions make it possible to improve the reliability of the main diesel engine in critical navigational situations. The article is of applied significance for the design and adjustment of automatic control systems for ship propulsion plants equipped with controllable pitch propellers.

УДК 621.431.74

DOI: 10.31653/1819-3293-2026-1-31-40-54

ARTICLE HISTORY

Received 02.04.2026

Accepted 05.05.2026

Горб Сергій Іванович¹, Будуров Микола Ігорович²,
Поповський Олексій Юрійович³

Національний університет "Одеська морська академія", Одеса, Україна
gs@onma.edu.ua¹, budurovuk@gmail.com²,
alexejpopovskij57@gmail.com³

Ефективність методів пошуку екстремуму при оптимізації електронного регулятора частоти обертання суднового дизеля

Gorb Sergii¹, Budurov Mykola², Alexey Popovskii³
National University "Odessa Maritime Academy", Odessa, Ukraine
gs@onma.edu.ua¹, budurovuk@gmail.com²,
alexejpopovskij57@gmail.com³

Effectiveness of Extremum-Search Methods in Optimizing the Electronic Speed Governor of a Marine Diesel Engine

Резюме. Досліджено ефективність спеціалізованих методів пошуку екстремуму при оптимізації налаштувань електронного регулятора частоти обертання Nabtesco MG-800 у складі головного суднового дизеля MAN B&W 6S60MC-C7 в умовах дії морського хвилювання. Показано, що градієнтний метод забезпечує високу швидкість збіжності, але є чутливим до локальних екстремумів, тоді як симплексний метод надійніше визначає область глобального оптимуму, проте вимагає контролю граничних умов. Безградієнтний метод Гук-Джівса забезпечує найглибше мінімізування критерію за рахунок більшої кількості ітерацій і підвищених обчислювальних витрат. Визначено вплив вибору кроку пошуку та діапазонів зміни параметрів на ймовірність збіжності до локальних екстремумів.

Summary. The effectiveness of specialized extremum-search methods for optimizing the tuning parameters of the Nabtesco MG-800 electronic speed

governor as part of the main marine diesel engine MAN B&W 6S60MC-C7 under sea-wave operating conditions has been investigated. It is shown that the gradient method provides a high convergence rate but is sensitive to local extrema, whereas the simplex method more reliably identifies the region of the global optimum, although it requires control of boundary constraints. The derivative-free Hooke–Jeeves method ensures the deepest minimization of the criterion at the cost of a larger number of iterations and increased computational effort. The influence of the choice of search step and the ranges of parameter variation on the probability of convergence to local extrema has been determined.

Сучасні регулятори частоти обертання (РЧО) суднових дизельних установок функціонують на основі складних алгоритмів, у яких реалізуються нелінійності, зумовлені обмеженням внутрішніх сигналів і динамічною адаптацією блоків перетворення залежно від параметрів збурюючих впливів. Суттєві нелінійності в системі автоматичного регулювання частоти обертання (САРЧ) дизельних установок також пов'язані з циклічністю робочого процесу дизелів, особливостями їхніх навантажувальних характеристик і коливаннями навантаження в умовах морського хвилювання.

При оптимізації конструктивних і налаштувальних параметрів РЧО нелінійний характер системи автоматичного регулювання може призводити до виникнення локальних екстремумів. У результаті знайдені значення параметрів можуть виявитися лише локально, а не глобально оптимальними. Подібна проблема спостерігалася при оптимізації гідравлічних ізодромних регуляторів [1 – 5] і частково проявилася в ході оптимізації електронного контролерного регулятора Kongsberg DGS C20 [6].

У роботі [1] застосовано градієнтний метод знаходження екстремуму цільової функції для оптимізації регресійної моделі гідромеханічного РЧО у складі головного двигуна (ГД) судна. Процес оптимізації охоплював амплітудно-частотні характеристики дизельної установки та регулятора. Суть методу полягає в тому, що в будь-якій точці факторного простору обчислюється вектор градієнта функції, який вказує напрямок найшвидшого спадання (зростання) функції. У цьому напрямку здійснюється рух протягом певного кроку. У кінці кроку градієнт знову обчислюється, і процедура розрахунку повторюється. Швидкість наближення до екстремуму функції залежить від алгоритму вибору кроку переміщення уздовж градієнта. Найчастіше крок вибирається з умови руху вздовж градієнта доти, доки не припиняється спадання (зростання) оптимізованої функції.

У роботі [2] показано, що перевагами стандартного симплексного методу пошуку екстремуму для гідравлічного РЧО є його простота, можливість урахування обмежень на значення факторів, а також можливість додавання або виключення з розгляду окремих факторів у процесі експерименту.

Застосування комплексного методу пошуку екстремуму [3] у розв'язуванні задачі при потраплянні в область локального екстремуму у факторному просторі призводило до зупинки процедури оптимізації, оскільки відповідно до алгоритму методу відбувається зменшення кроку розрахунку. Крім того, на початкових етапах оптимізаційної процедури експерименти проводяться із використанням генератора випадкових чисел, що у більшості випадків для вже достатньо оптимізованої конструкції РЧО призводило до погіршення оптимізованих параметрів.

Кращих результатів оптимізації було досягнуто при застосуванні математичного методу пошуку екстремуму Гука-Дживса [4], ідея якого полягає у поєднанні двох оптимізаційних процедур: "дослідного" пошуку з циклічним перебором оптимізованих змінних і "прискорювального" пошуку за зразком. "Дослідний" пошук спрямований на виявлення локальної поведінки цільової функції та визначення напрямків руху "вздовж ярів". Пошук за зразком полягає у виконанні одного кроку з нової точки, координати якої відповідають успішним припущенням параметрів, уздовж прямої, що з'єднує цю точку з початковою. Перевагою методу є те, що застосування не призводить до погіршення значення цільової функції порівняно з її значенням як у початковій, так і в наступних базових точках факторного простору, навіть за наявності кількох локальних мінімумів у їх околі.

У роботі [5] використано метод випадкового пошуку екстремуму, який характеризується як ефективний і досить простий в реалізації при оптимізації складних аналітичних моделей. За наявності у факторному просторі великої кількості локальних екстремумів метод рекомендовано застосовувати з використанням адаптивного алгоритму зі змінним кроком. У цьому алгоритмі випадкові вибірки використовуються для визначення напрямку пошуку, а довжина кроку змінюється відповідно до досягнутого рівня мінімізації цільової функції. Такий адаптивний підхід дозволяє балансувати між глобальним пошуком і локальним уточненням, підвищуючи ймовірність знаходження глобального мінімуму в складних багатовимірних просторах.

При оптимізації електронного РЧО у факторному просторі збурень, що діють на дизель під час хвилювання моря, оптимізаційні процедури

також потрапляють у локальні екстремуми критерію оптимальності [6]. Наприклад, при використанні стандартного градієнтного методу у практичній задачі оптимізації налаштування електронного регулятора Nabtesco MG-800 було отримано значення критерію оптимальності, що перевищує аналогічний показник для методу покоординатної оптимізації на 19 % [7]. Таким чином, унаслідок збіжності до локального екстремуму значення критерію оптимальності виявилось гіршим, що також супроводжувалося збільшенням нестабільності частоти обертання ГД.

Однак, поширити результати досліджень із гідравлічними РЧО на електронні не представляється можливим, оскільки дизельні установки з електронними регуляторами контролерного типу, які останніми роками набули широкого поширення, мають додаткові налаштування, зокрема параметрів логічної частини, обробки та обмеження сигналів, виконавчого механізму (ВМ), адаптивної корекції тощо. У зв'язку з цим завдання оптимізації налаштування електронних РЧО суттєво ускладнилося та стало більш багатofакторним.

Таким чином, існує практична проблема вибору методу пошуку екстремуму при оптимізації електронного РЧО дизелів, динамічні режими яких пов'язані з морським хвилюванням.

Метою дослідження є оцінка можливостей застосування спеціалізованих методів пошуку екстремуму при оптимізації налаштування електронного РЧО ГД для забезпечення знаходження глобального оптимуму та зменшення ймовірності потрапляння в локальні екстремуми критерію оптимальності в умовах хвилювання моря.

Оскільки цільова функція у зазначеній задачі має складний характер і її графічна інтерпретація являє собою поверхню з множиною локальних мінімумів, як критерій оптимальності обрано мінімум нестабільності регульованого параметра, тобто амплітуди коливань частоти обертання дизеля $\Delta\omega_d$. Цей мінімум має досягатися при найімовірніших значеннях зміни амплітуди збурення (δ_λ) та періоду коливань (хитами судна) на головну дизельну установку [7].

У роботі [8] показано, що при оптимізації параметрів РЧО в умовах хвилювання моря досягаються практично однакові результати як при використанні детермінованої функції збурюючого впливу на ГД, яка враховує зворотний вплив дизеля на збурення, так і при використанні звичайної синусоїди. У зв'язку з цим для модельного дослідження динамічних характеристик САРЧ використана форма збурюючого впливу у вигляді синусоїдальної функції.

Для розв'язання задачі оптимізації використано модель із роботи [9], яка дозволяє аналізувати вплив конструктивних і параметрів

налаштування РЧО на динамічні властивості САРЧ дизеля. Модель враховує циклову нестабільність крутного моменту протягом робочого циклу, інерційні властивості дизеля та запізнення в каналі передавання керуючого впливу від регулятора (зумовлені циклічністю подачі палива та особливостями формування крутного моменту в кривошипно-шатунному механізмі).

Процедуру оптимізації проведено для ГД MAN B&W 6S60MC-C7, обладнаного електронним РЧО Nabtesco MG-800. Двигун із прямою передачею на гребний гвинт, крок якого фіксований, має наступні технічні характеристики [10]:

- діаметр циліндра – 600 мм;
- хід поршня – 2400 мм;
- номінальна потужність – 13560 кВт;
- номінальна частота обертання – 105 хв⁻¹;
- середній індикаторний тиск – 19 кгс/см²;
- максимальний тиск згоряння – 150 кгс/см².

Для зменшення впливу обмежень подачі палива на динаміку САРЧ дослідження виконувалося при середньому навантаженні двигуна 75 % від номінального, що відповідає експлуатаційному режиму з частотою обертання 95,4 хв⁻¹.

Числові значення використаних параметрів моделі відповідають конструкторській документації досліджуваного дизеля та РЧО [11]:

- час розгону дизеля $T_d = 2,3$ с;
- кут випередження упорскування палива на номінальному режимі $\varphi_i = -2,5$ град. ПКВ;
- час запізнення $\tau_d = 0,026$ с;
- час ВМ РЧО $T_c = 0,4$ с;
- нерівномірність керуючого елемента ВМ $\delta_{c.a} = 0,04$ відн. од.;
- час розгону виконавчого електродвигуна $T_e = 0,03$ с;
- коефіцієнт підсилення пропорційної ланки $k_p = 2,2$ відн. од.;
- час інтегруючої ланки $T_i = 2$ с;
- коефіцієнт передачі диференціюючої ланки $k_d = 0$ відн. од.
- відносна ширина зони нечутливості $\varepsilon = 0,005$ відн. од.;
- коефіцієнт передачі зони нечутливості $k_g = 0,5$ відн. од.;
- коефіцієнт передачі ланки форсування розгону і гальмування виконавчого електродвигуна $k_a = 0,4$ відн. од.;
- коефіцієнт передачі зворотного зв'язку за частотою обертання виконавчого електродвигуна $k_n = 0,06$ відн. од.;
- коефіцієнт використання ходу регулятора при переході від нульової подачі палива до номінальної $k_{u.m} = 0,8$ відн. од.;
- коефіцієнт зворотного зв'язку $k_{f.b} = 0$ відн. од.

Дослідження впливу параметрів електронного РЧО на значення мінімуму цільової функції виконано по черговим варіюванням кожного з обраних налаштувань окремо ($\varepsilon = 0 \dots 0,08$ відн. од.; $k_p = 0,1 \dots 5$ відн. од.; $T_i = 0,5 \dots 8$ с) пошуковими методами пакету комп'ютерної математики (градієнтним – Gradient descent, симплексним – Simplex search, методом Гука-Дживса – Pattern search). Вбудовані процедури оптимізації для завершення ітераційного процесу мінімізації цільової функції за замовчуванням використовують значення величини кроку. При цьому час моделювання обрано рівним подвійному періоду хитавиці, що виключив вплив тривалості перехідного процесу на точність визначення критерію оптимальності.

На рис. 1 зображений, як приклад, результат пошуку мінімуму критерію оптимальності при оптимізації відносної ширини зони нечутливості регулятора градієнтним методом.

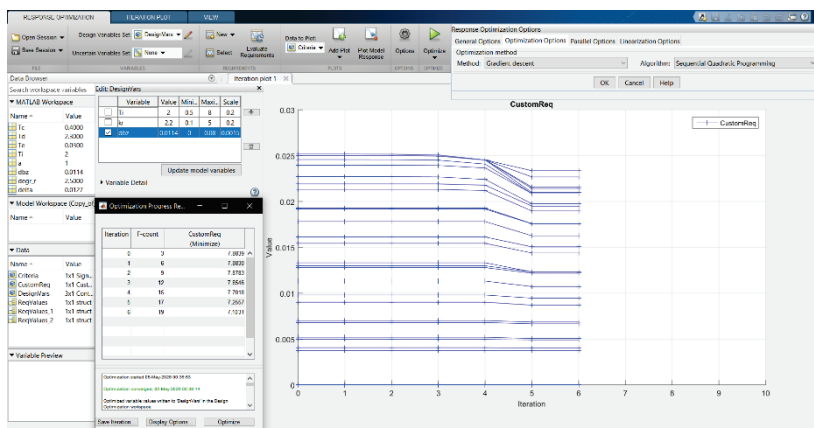


Рис. 1. Результат оптимізації відносної ширини зони нечутливості РЧО градієнтним методом

На рис. 1 видно, що процедура оптимізації градієнтним методом, яка за замовчуванням для оптимізації відгуку використовує алгоритм послідовного квадратичного програмування у функції `fmincon` (із урахуванням заданих обмежень), може виявитися недостатньо ефективним у виборі нового напрямку руху пошуку екстремуму. Це пояснюється тим, що для складних цільових функцій, функціональні поверхні яких мають множину локальних мінімумів, вибір точки

мінімуму на попередній ітерації як початкової для пошуку наступного мінімального значення, може не забезпечити високої ймовірності знаходження глобального мінімуму.

На рис. 2 зображений, як приклад, результат пошуку мінімуму критерію оптимальності при оптимізації коефіцієнта підсилення пропорційної ланки регулятора симплексним методом.

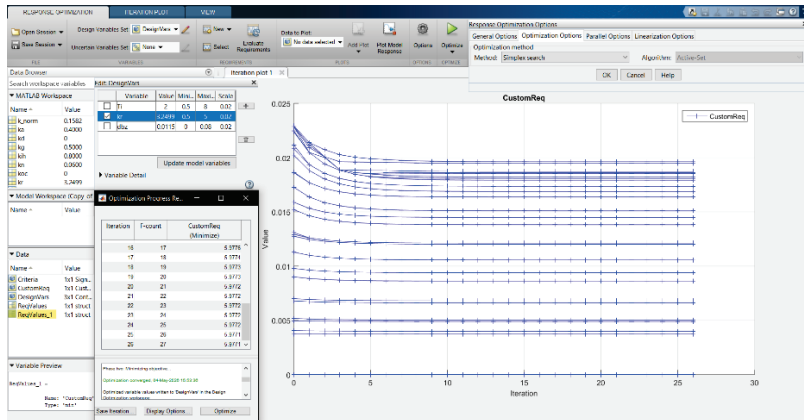


Рис. 2. Результат оптимізації коефіцієнта підсилення пропорційної ланки РЧО симплексним методом

На рис. 2 видно, що симплексний метод пошуку для оптимізації відгуку, який використовує функцію `fminsearch`, може виявлятися ефективним для моделей, які містять нелінійності, проте метод є недостатньо адаптованим до ситуацій з обмеженнями на параметри оптимізації.

На рис. 3 зображений, як приклад, результат пошуку мінімуму критерію оптимальності при оптимізації часу інтегруючої ланки регулятора методом Гука-Дживса.

На рис. 3 видно, що метод Гука-Дживса, який використовує функцію `patternsearch`, реалізує розширений метод глобального пошуку для оптимізації відгуку, що потребує значної кількості ітерацій. Це пов'язано з різною величиною кроків приростів за різними аргументами цільової функції, оскільки допустимі діапазони зміни кожного оптимізованого параметра можуть відрізнятися один від одного на порядки.

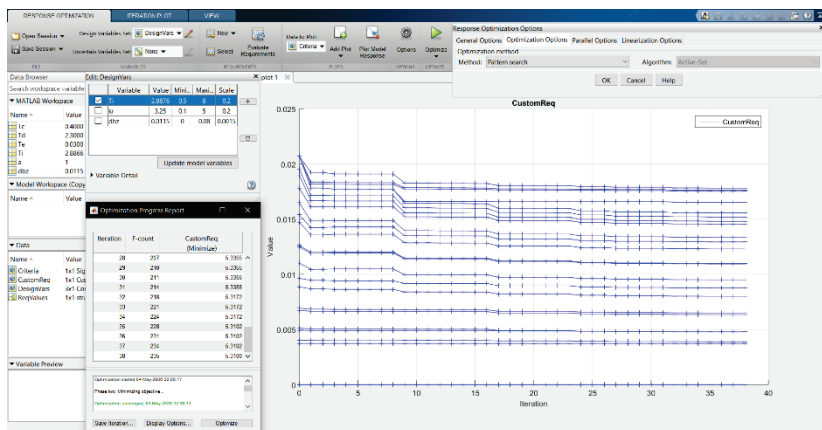


Рис. 3. Результат оптимізації часу інтегруючої ланки РЧО методом Гаука-Дживса

Результати оптимізації при варіюванні параметрів відносної ширини зони нечутливості ε , відн. од., коефіцієнта підсилення пропорційної ланки k_p , відн. од., та часу інтегруючої ланки T_i , с, електронного РЧО зведені у табл. 1.

Таблиця 1

Результати почергової оптимізації кожного з обраних налаштувань РЧО

Спеціалізований метод пошуку	Оптимізовані значення параметрів	Значення критерію оптимальності $\Delta\bar{\omega}_d \cdot 10^{-2}$
Гradientний	$\varepsilon = 0,0114$	2,394
	$k_p = 3,25$	1,977
	$T_i = 2,88$	1,816
Симплексний	$\varepsilon = 0,0115$	2,392
	$k_p = 3,249$	1,975
	$T_i = 2,879$	1,815
Гаука-Дживса	$\varepsilon = 0,0115$	2,392
	$k_p = 3,25$	1,975
	$T_i = 2,8876$	1,809

У результаті почергової оптимізації параметрів РЧО спеціалізованими методами встановлено, що визначальний вплив на глибину мінімуму критерію оптимальності чинить коефіцієнт підсилення пропорційної ланки, знаходження якого графічно виглядає як поступовий вихід на плато. Суттєвий вплив спостерігається також з боку часу інтегруючої ланки та менш виражений з боку відносної ширини зони нечутливості, проте їхні значення мають при графічному представленні вигляд чітко виражених мінімумів.

Перевірку зміни положення екстремуму при знайдених оптимумах параметрів налаштування виконано для випадків попарної оптимізації параметрів: ε та k_p ; T_i та ε ; k_p та T_i .

На рис. 4 зображений, як приклад, процес оптимізації симплексним методом за коефіцієнтом підсилення пропорційної ланки та часом інтегруючої ланки електронного регулятора одночасно.

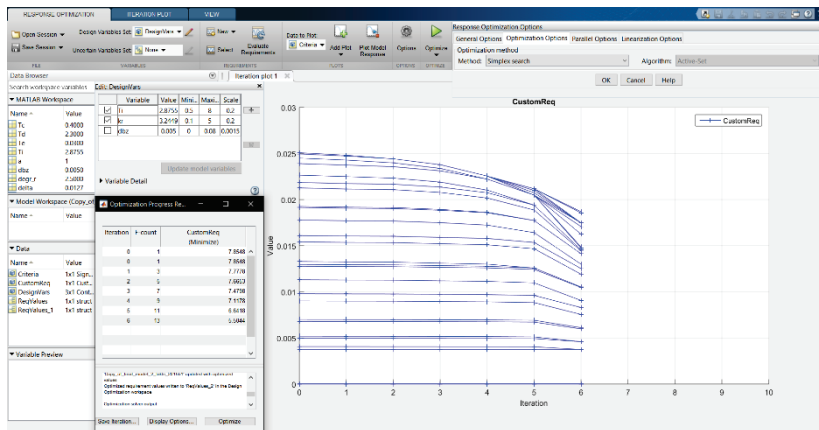


Рис. 4. Результат попарної оптимізації коефіцієнта підсилення пропорційної ланки та часу інтегруючої ланки РЧО симплексним методом

Із рис. 4 випливає, що під час застосування симплексного методу може виникати потреба в обмеженні кількості ітерацій через те, що задані граничні значення параметрів можуть ігноруватися в процесі пошуку оптимуму.

Результати попарної оптимізації параметрів електронного РЧО спеціалізованими методами пошуку екстремуму зведені у табл. 2.

Таблиця 2

Результати попарної оптимізації обраних налаштувань
електронного РЧО

Спеціалізований метод пошуку	Оптимізовані значення параметрів	Значення критерію оптимальності $\Delta\bar{\omega}_d \cdot 10^{-2}$
Гradientний	$\varepsilon = 0,008; k_p = 3,225$	2,042
	$T_i = 2,841; \varepsilon = 0,0091$	2,063
	$k_p = 3,25; T_i = 2,854$	1,875
Симплексний	$\varepsilon = 0,0112; k_p = 3,2571$	1,959
	$T_i = 2,8499; \varepsilon = 0,0109$	1,989
	$k_p = 3,2449; T_i = 2,8755$	1,867
Гука-Дживса	$\varepsilon = 0,0111; k_p = 3,2566$	1,954
	$T_i = 2,848; \varepsilon = 0,011$	1,987
	$k_p = 3,242; T_i = 2,875$	1,868

Перевірка знайдених оптимумів у випадках попарної оптимізації цільової функції спеціалізованими методами показала, що положення екстремуму може змінюватися:

під час оптимізації відносної ширини зони нечутливості електронного РЧО разом із коефіцієнтом підсилення пропорційної ланки або з часом інтегруючої ланки спостерігається певне поглиблення екстремуму;

при одночасній оптимізації коефіцієнта підсилення пропорційної ланки та часу інтегруючої ланки відбувається незначне зміщення екстремуму в просторі параметрів.

Визначено, що зміна значень одного з параметрів k_p або T_i зумовлює також зміну значення відносної ширини зони нечутливості регулятора.

На рис. 5 зображений, як приклад, процес оптимізації базових значень параметрів РЧО градієнтним методом за трьома обраними налаштуваннями одночасно.

На рис. 5 видно процес пошуку оптимуму цільової функції градієнтним методом, однак, глобальний мінімум було знайдено лише після повторного пошуку екстремуму з точки локального екстремуму.

Результати багатопараметричної оптимізації електронного РЧО спеціалізованими методами пошуку екстремуму зведені у табл. 3.

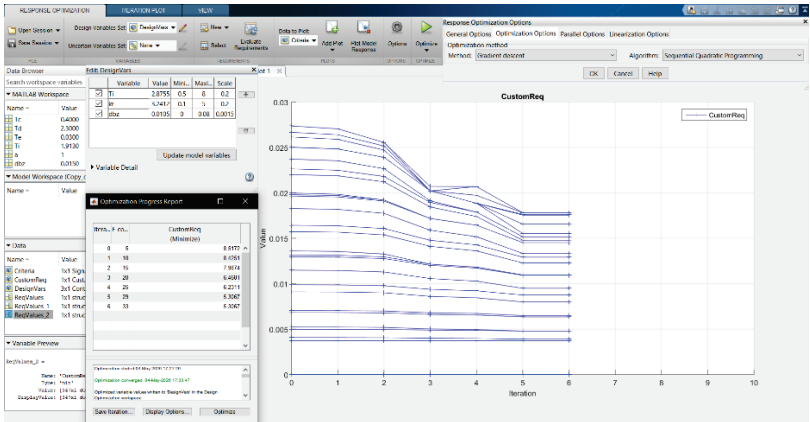


Рис. 5. Процес багатопараметричної оптимізації параметрів налаштування електронного РЧО градієнтним методом

Таблиця 3
Результати багатопараметричної оптимізації обраних налаштувань електронного РЧО

Спеціалізований метод пошуку	Оптимізовані значення параметрів	Значення критерію оптимальності $\Delta\omega_d \cdot 10^{-2}$
Гرادієнтний	$\epsilon = 0,0105$; $k_p = 3,2412$; $T_i = 2,8755$	1,819
Симплексний	$\epsilon = 0,0113$; $k_p = 3,2518$; $T_i = 2,883$	1,804
Гука-Дживса	$\epsilon = 0,0114$; $k_p = 3,2529$; $T_i = 2,875$	1,803

Таким чином, градієнтний метод має високу швидкість збіжності, але може не забезпечити пошук глобального мінімуму, зокрема, через наявність нелінійностей (нечутливості, насичення, запізнення тощо) та збіжність до локально неоптимальних розв’язків. Це означає, що у разі його використання може знадобитися або попереднє звуження області допустимих значень оптимізаційних параметрів, або у деяких випадках повторного пошуку екстремуму з точки локального мінімуму.

Симплексний метод забезпечив достатньо точний пошук області глобального оптимуму та продемонстрував ефективність при

оптимізації параметрів електронного регулятора у складі системи автоматичного регулювання з вираженими нелінійностями. Водночас при його застосуванні можливий вихід за межі заданих обмежень, що потребує контролю граничних умов, зокрема, обмеженням кількості ітерацій.

Безградієнтний метод Гаука-Дживса дозволив отримати найточніший результат оптимізації та продемонстрував послідовне наближення до глобального оптимального розв'язку, незважаючи на локальні особливості цільової функції. Метод виявив високу стійкість до впливу нелінійностей системи автоматичного регулювання, однак характеризувався найтривалішим процесом збіжності і, відповідно, підвищеними обчислювальними витратами.

На рис. 6 наведена перевірка знайденого оптимуму методом Гаука-Дживса за трьома обраними параметрами електронного РЧО одночасно при використанні оптимізованих значень налаштування.

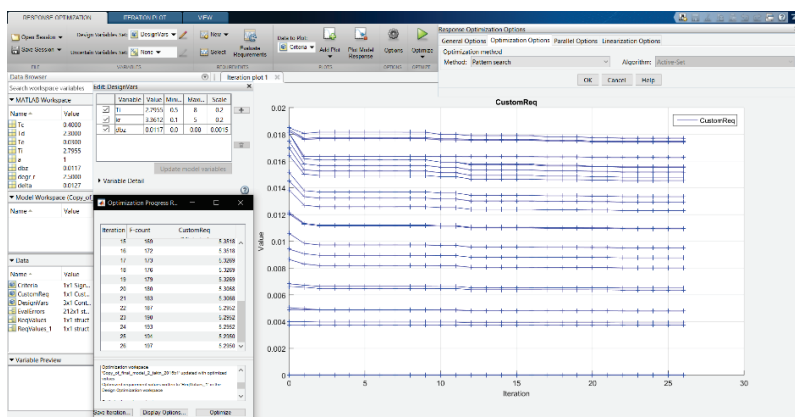


Рис. 6. Перевірка знайденого оптимуму методом Гаука-Дживса

Із рис. 6 випливає, що мінімум критерію оптимальності при перевірці методом Гаука-Дживса поглибився на $0,035 \cdot 10^{-2}$ при незначному зменшенні екстремуму в просторі параметрів $\varepsilon = 0,0117$; $k_p = 3,3612$; $T_i = 2,7955$.

У результаті дослідження також встановлено:

у разі звуження області значень оптимізаційних параметрів (наприклад, при їхньому попередньому ручному опрацюванні) при використанні спеціалізованих методів пошуку екстремуму ймовірність

зупинки процедури оптимізації через "зустрінутий" у факторному просторі локальний екстремум знижується приблизно до 70 %;

залежність цільової функції від параметрів оптимізації регулятора має негладкий характер, що на окремих кроках оптимізаційної процедури призводить до прийняття не найкращих рішень щодо переміщення у факторному просторі та підвищує ймовірність помилкового віддалення від точки глобального екстремуму;

при використанні спеціалізованих методів пошуку екстремуму в задачі оптимізації налаштування електронного РЧО суднового ГД часто спостерігається зміна положення екстремуму або збіжність до локальних екстремумів критерію оптимальності, яка зумовлена, зокрема, вибором кроку пошуку (у тому числі при його автоматичному визначенні).

При зміні параметрів електронного РЧО контролерного типу залежно від режиму роботи ГД імовірність виникнення локальних екстремумів критерію оптимальності в факторному просторі збурень на дизель, характерних для реальної експлуатації морських суден (стохастичному збуренні), може збільшитися, що потребує додаткової перевірки.

Висловлюємо вдячність М. В. Левінському за змістовне обговорення процедури оптимізації із використанням користувацьких вимог [12] та надані рекомендації.

ЛІТЕРАТУРА REFERENCES

1. Горб С. И., Бурденко А. Ф. Метод оптимизации гидромеханических регуляторов частоты вращения главных двигателей. // Автоматизация судовых технических средств: науч.-техн. сб. – 1999. – Вып. 4. – Одесса: ОГМА. – С. 52 – 57.
2. Горб С. И. Моделирование судовых энергетических установок и систем управления: Учебное пособие. – М.: Мортехинформреклама, 1993. – 68 с.
3. Банди Б. Методы оптимизации: Вводный курс. Пер. с англ. – М.: Радио и связь, 1988. – 128 с.
4. Горб С. И., Бурденко А. Ф. Усовершенствованный метод оптимизации гидромеханических регуляторов частоты вращения главных двигателей. // Автоматизация судовых технических средств: науч.-техн. сб. – 2000. – Вып. 5. – Одесса: ОГМА. – С. 28 – 32.

5. Горб С. И., Бурденко А. Ф. Оптимизация сложного объекта методом случайного поиска экстремума. // Автоматизация судовых технических средств: науч.-техн. сб. – 2001. – Вып. 6. – Одесса: ОГМА. – С. 18 – 23.

6. Горб С. И., Будуров Н. И. Оптимизация автоматического регулирования частоты вращения судового дизеля. // Автоматизация судовых технических средств: науч.-техн. сб. – 2021. – Вып. 27. – Одесса: НУ "ОМА". – С. 3 – 21.

7. Будуров М. І. Оптимізація електронного регулятора частоти обертання судового дизеля. Дисертація ... доктора філософії. – Одеса: НУОМА. – 2025. – 182 с. № 0825U004364

8. Залитис В. А. Исследование процессов регулирования нагрузки пропульсивного комплекса дизель – ВРШ в условиях волнения. // Тр. ЦНИИМФ. – 1980. – Вып. 259. – С. 65 – 75.

9. Budurov M., Gorb S., Popovskii A. Optimization of electronic speed governors sensitivity for marine diesel engines. // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2025. – Vol. 2. – № 8 (134). – P. 26 – 35.

10. Shop test result for main engine HYUNDAI-MAN B&W 6S60MC-C7. – 2011. – № K630-IR11A-5984. – 18 p.

11. Tenkey data list for MG-800 Electronic governor system of Nabtesco Corporation. – 2011. – № 74H63927-82B. – 16 p.

12. Optimisation in MatLab Simulink using custom requirement. – Режим доступу: <https://www.youtube.com/watch?v=EfldQ8YopgI> (дата звернення: 04.05.2026).

Abstract. The study focuses on the problem of tuning electronic speed governors for marine diesel engines operating under sea-wave-induced dynamic modes, where pronounced nonlinearities and multiple local extrema of the optimality criterion significantly complicate the search for globally optimal settings. In such automatic speed control systems, nonlinear effects arise from internal signal limitations, deadband, delays, actuator dynamics, and the cyclic nature of the diesel working process, which often lead to convergence of optimization procedures to locally, rather than globally, optimal solutions. Under these conditions, the choice and configuration of extremum-search algorithms have a decisive influence on the quality of the obtained tuning parameters and on the stability of the controlled engine speed.

The aim of this work is to evaluate the effectiveness of specialized extremum-search methods for optimizing the tuning parameters of the

Nabtesco MG-800 electronic speed governor of the main marine diesel engine MAN B&W 6S60MC-C7 under sea-wave conditions. Using a mathematical model of the automatic speed control system, the influence of the relative width of the deadband, proportional gain, and integrator time on the minimum of the engine-speed instability criterion was investigated by means of gradient, simplex, and Hooke–Jeeves pattern-search methods implemented in a computer mathematics package. It is shown that the gradient method provides a high convergence rate but can fail to locate the global minimum due to the presence of nonlinearities and convergence to local extrema, which may require narrowing the admissible parameter ranges or restarting the search from the previously found local optimum. The simplex method more reliably identifies the region of the global optimum and demonstrates good performance in systems with pronounced nonlinearities, although it may violate specified parameter bounds and therefore requires careful control of boundary conditions and limitation of the number of iterations. The derivative-free Hooke–Jeeves method ensures the deepest minimization of the optimality criterion and exhibits high robustness to nonlinearities, at the expense of a larger number of iterations and increased computational effort. The influence of the search step and admissible parameter ranges on the probability of convergence to local extrema has been clarified, and practical recommendations have been formulated for the sequential, pairwise, and multi-parameter optimization of electronic speed governor tuning parameters for marine diesel engines using built-in extremum-search procedures of a computer mathematics package.

УДК 629.5.083.4:004.8

DOI: 10.31653/1819-3293-2026-1-31-55-65

ARTICLE HISTORY

Received 01.03.2026

Accepted 27.03.2026

Левінський Максим Валерійович¹, Левінський Валерій Михайлович²
Національний університет «Одеська морська академія», Одеса,
Україна¹
Одеський національний технологічний університет, Одеса, Україна²
MaxLevinskyi@gmail.com¹, ValeryLevinskyi@gmail.com²

Предиктивна модель оцінювання ризиків затримання суден із застосуванням штучного інтелекту та ансамблевих методів машинного навчання

Levinskyi Maksym¹, Levinskyi Valeriy²
National University «Odessa Maritime Academy», Odessa, Ukraine¹
Odessa National Technological University, Odessa, Ukraine²
MaxLevinskyi@gmail.com¹, ValeryLevinskyi@gmail.com²

Predictive model for ship detention risk assessment using artificial intelligence and ensemble machine learning methods

Резюме. У статті розглядається підхід до автоматизації оцінювання ризиків державного портового контролю (PSC) на основі аналізу даних щорічних звітів восьми регіональних меморандумів (MoU). Запропоновано методику застосування інструментів штучного інтелекту — зокрема, NLP-моделей та ансамблевих методів машинного навчання — для синтезу даних із гетерогенних джерел (Paris MoU, Tokyo MoU, Black Sea MoU, EMSA та ін.). Результатом роботи є концепція предиктивної моделі на основі логістичної регресії, що дозволяє прогнозувати ймовірність затримання судна $P(d)$ на основі п'яти ключових ознак: юрисдикції прапора, рейтингу визнаної організації (RO), віку судна, регіонального коефіцієнта та історії попередніх інспекцій. Встановлено, що Tokyo

MoU демонструє найвищий середній рівень затримань, та має найбільш репрезентативну вибірку для навчання. Практична значущість підтверджується можливістю інтеграції моделі в системи управління безпекою судноплавних компаній та освітні програми морських закладів вищої освіти.

Summary. *The article presents an approach to automating Port State Control (PSC) risk assessment based on the analysis of annual reports from eight regional memoranda of understanding (MoU). A methodology is proposed for applying artificial intelligence tools — namely NLP models and ensemble machine learning methods — for synthesizing data from heterogeneous sources (Paris MoU, Tokyo MoU, Black Sea MoU, EMSA, etc.). The result is a conceptual predictive model based on logistic regression for estimating ship detention probability $P(d)$ using five key features: flag jurisdiction, recognized organization (RO) rating, ship age, regional coefficient, and previous inspection history. It is established that the Tokyo MoU demonstrates the highest average detention rate, and its dataset is the most representative for model training. The practical value is confirmed by the possibility of integrating the model into safety management systems of shipping companies and maritime higher education programs.*

Міжнародне морське право постійно ускладнюється та розширюється: відповідно до Резолюції Асамблеї ІМО А.1187(33) [13], неповний перелік обов'язкових вимог міжнародних конвенцій з морського судноплавства налічує близько 1000 позицій. За такої кількості регуляторних вимог порушення з боку суден є практично неминучими, що і призводить до їх затримання органами державного портового контролю (Port State Control, PSC). Разом з тим саме інспекційна діяльність PSC формує унікальний масив даних, який відкриває принципово нові можливості для застосування інструментів штучного інтелекту з метою проактивного управління ризиком затримання. Зі зростанням інтенсивності світового судноплавства та прискореним запровадженням нових екологічних стандартів (СІІ, EU-ETS) перехід від реактивного до проактивного аналізу стає нагальною потребою галузі [15].

Аналіз наукових публікацій свідчить про зростаючий інтерес до застосування методів машинного навчання для автоматизації ризик-орієнтованого відбору суден на перевірку. У дослідженнях [7 – 9] апробовано ансамблеві методи (Gradient Boosting, Random Forest), машини опорних векторів (SVM) та баєсівські мережі, що

демонструють точність виявлення затримань на рівні 71 – 78 % порівняно з 42 % при ручному відборі суден інспекторами Paris MoU. Зокрема, авторами [11] показано, що схема вибору ознак на основі SVM дозволяє суттєво підвищити якість передбачення затримань навіть за умов незбалансованих класів. У роботі [12] розроблено ієрархічну класифікацію категорій дефектів з використанням теорії перспектив, що дозволяє врахувати нелінійність суджень про ризик. Зазначені підходи підтвердили перспективність застосування ШІ в галузі PSC, однак мають суттєві обмеження.

Водночас переважна більшість наявних досліджень зосереджена на даних одного меморандуму – Paris MoU або Tokyo MoU – та не розглядає проблему синтезу гетерогенних PDF-звітів із різних регіонів. Невирішеними залишаються питання: автоматизованого об'єднання баз даних восьми регіональних меморандумів в єдину стандартизовану навчальну вибірку; врахування регіонально-специфічних вагових коефіцієнтів у межах єдиної моделі; динамічного донавчання моделі при виході нових щорічних звітів без повного перенавчання. Усунення зазначених прогалин є завданням пропонованого дослідження.

Метою даної роботи є розробка концептуальної архітектури предиктивної моделі оцінювання ризиків затримання суден на основі синтезу даних із восьми регіональних меморандумів із застосуванням NLP-моделей та ансамблевих методів машинного навчання, а також формалізація математичного апарату моделі у вигляді функції ймовірності затримання $P(d)$.

Як основний корпус дослідження були використані щорічні звіти восьми регіональних меморандумів за 2023 – 2024 р.: Paris MoU, Tokyo MoU, Black Sea MoU, Indian Ocean MoU, Mediterranean MoU, Abuja MoU, Caribbean MoU та Viña del Mar Agreement [1 – 3]. Додатковим джерелом слугували аналітичні матеріали Європейського агентства морської безпеки (EMSA) та доповідь EMSAFE 2025 [4]. Сукупний масив налічує понад 80 000 записів про інспекції.

Оскільки вихідні звіти MoU являють собою PDF-документи з різною структурою та форматуванням, для їх автоматизованої обробки застосовувались моделі обробки природної мови (NLP): на етапі вилучення інформації використовувалась бібліотека spaCy та регулярні вирази; стандартизація несумісних одиниць виміру та класифікаційних кодів дефектів здійснювалась з використанням крос-референсної таблиці THETIS [16]. Підсумкова база даних об'єднана в єдиний стандартизований формат JSON/CSV для подальшого навчання моделі. Конвеєр обробки даних включає чотири кроки.

Крок 1. Вилучення даних: PDF → текстовий шар (pdfminer) → NLP-парсинг → структуровані записи.

Крок 2. Нормалізація: кодування дефектів за THETIS-кодами, уніфікація прапорів за ISO 3166-1.

Крок 3. Збагачення даних: додавання Equasis-атрибутів (тип/вік судна, RO, клас).

Крок 4. Формування навчальної вибірки: часова стратифікація (80/20 train/test split).

На основі синтезованих даних за 2023 – 2024 р. виявлено значну гетерогенність показників затримань у різних регіонах світу. Як випливає з табл. 1, діапазон ставок затримання варіюється від 0,62 % (Абуѐа МоU) до 5,0 % (Тоkуо МоU), що вказує на необхідність включення до моделі регіонально-специфічних вагових коефіцієнтів.

Таблиця 1

Порівняльний аналіз ефективності PSC за регіонами (2023–2024 р.)

Меморандум / Регіон	Інспекцій	Затримань	Ставка затримання, %	Рівень ризикy	ІІІ- цінність даних
Black Sea MoU	4 000	188	4,71	Високий	Середня
Tokyo MoU	32 054	1 600	5,0	Високий	Висока
Paris MoU	17 000	800	4,7	Високий	Висока
Indian Ocean MoU	5 000	200	4,0	Високий	Середня
Mediterranean MoU	6 000	200	3,3	Середній	Середня
Viña del Mar	3 500	95	2,7	Середній	Низька
Caribbean MoU	540	15	2,8	Середній	Дуже низька
Abuja MoU	3 204	20	0,62	Низький	Низька

Примітка: «Ставка затримання» – відношення кількості затриманих суден до загальної кількості інспекцій у регіоні за звітний період. Рівень ризику: до 1,5 % – низький; від 1,5 до 3,5 % – середній; від 3,5 % – високий. ІІІ-цінність даних: до 1000 – дуже низька; від 1000 до 4000 – низька; від 4000 до 12000 – середня; від 12000 – висока.

За рівнем ризику особливу увагу привертають Black Sea MoU, Tokyo MoU, Paris MoU. На протилежному полюсі – Abuja MoU: настільки низьке значення найімовірніше свідчить не стільки про високий технічний стан суден, скільки про менш жорсткі критерії класифікації дефектів порівняно з Paris або Tokyo MoU.

З точки зору репрезентативності навчальної вибірки найбільш цінним є масив Tokyo MoU: такий обсяг дозволяє моделі виявляти рідкісні, але критичні патерни дефектів, які губляться в малих вибірках. Оптимальним підходом є зважена агрегація даних усіх меморандумів з урахуванням їх обсягу та застосуванням техніки SMOTE для балансування класів (затримані / незатримані судна) [7].

Аналіз даних за 2023 – 2024 р. виявив групу прапорів із системно високим рівнем невідповідності в усіх ключових меморандумах. Як показано в табл. 2, прапори Камеруну та Танзанії демонструють середні ставки затримання на рівні 24,8 % та 22,1 % відповідно – у 5 – 6 разів вище середньосвітового показника [1, 2].

Таблиця 2
Ефективність прапорів держав за регіонами Paris MoU та Tokyo MoU
(2023 – 2024 р.)

Прапор судна	Paris MoU, %	Tokyo MoU, %	Середнє, %	Категорія ризику
Камерун	22,3	27,3	24,8	Критичний ризик
Танзанія	20,5	23,7	22,1	Критичний ризик
Сент-Кітс і Невіс	11,5	28,6	20,1	Дуже високий ризик
Беліз	15,4	19,2	17,3	Високий ризик
Грузія	12,0	16,5	14,3	Високий ризик
Того	10,8	13,9	12,4	Високий ризик
Панама	3,1	3,8	3,5	Низький ризик
Маршаллові о-ви	2,1	2,6	2,4	Низький ризик
Багами	1,5	1,9	1,7	Мінімальний ризик
Ліберія	1,8	2,2	2,0	Мінімальний ризик

Особливий інтерес становить дисперсія ризику за регіонами для одного прапора. Так, для Сент-Кітс і Невіс рівень затримань у Tokyo MoU (28,6 %) майже в 2,5 рази перевищує показник Paris MoU (11,5 %). Це підтверджує необхідність включення до моделі крос-регіональних вагових коефіцієнтів: значення f_i (ризик прапора) має розраховуватись окремо для кожного регіону, а не як глобальна скалярна величина.

Ефективність визнаної організації є другим за значимістю предиктором. Лідери галузі — ABS, DNV та Lloyd's Register — стабільно зберігають статус «High Performance» [10]. Організації категорії «Low Performance» (International Register of Shipping, Hellenic Register) створюють системні ризики. Згідно з даними Black Sea MoU, дефекти, пов'язані з недоглядом RO, концентруються переважно у сферах безпеки мореплавства (18,5 %) та пожежної безпеки (16,3 %) [3]. У моделі пропонується не бінарна класифікація RO, а тривірнева порядкова ознака з нелінійним штрафом за належність до категорії Low Performance.

Запропонована модель базується на ансамблевих методах машинного навчання (Gradient Boosting / XGBoost), які на фінальному кроці відкалібровані методом логістичної регресії для отримання інтерпретованих імовірнісних оцінок [8]. Модель приймає на вхід вектор ознак $X = \{f_1, f_2, f_3, f_4, f_5\}$ відповідно до структури, представленої в табл. 3 (профілі дефектів за типами суден) та табл. 4 (опис ознак).

Таблиця 3
Профілі дефектів у розрізі типів суден, % від загальної кількості виявлених порушень (EMSAFE 2025) [4]

Тип судна	Пожежна безпека, %	Конструкція / механізми, %	SOLAS Навігація, %	MARPOL, %	Рятув. засоби, %	ISM/ SMS, %
Генеральний вантаж	27	18	15	12	16	12
Балкери	20	27	14	11	15	13
Хімічні танкери	18	15	12	22	14	19
Контейнеро-вози	22	16	13	14	17	18
Нафтові танкери	16	14	11	26	16	17

* Позначено домінуючу категорію дефектів для кожного типу судна

Таблиця 4

Вектор ознак предиктивної моделі: склад, ваги та джерела даних

Вектор ознак	Найменування ознаки	Вага (β)	Тип даних	Примітка
f_1	Коеф. ризику прапора	0,28	Динамічний	Ключовий класифікатор держави прапора
f_2	Рейтинг RO	0,22	Категоріальний	High / Medium / Low – три рівні
f_3	Вік судна	0,18	Неперервний (нелін.)	Нелінійна функція: експон. зріст > 15 р.
f_4	Рег. коефіцієнт	0,17	Статистичний	Коригування на регіональну специфіку
f_5	Історія інспекцій	0,15	Часовий ряд	Зважене середнє за 36 міс.

Домінуючі категорії дефектів (позначені в табл. 3) є пріоритетними змінними при спеціалізації моделі під конкретний сегмент флоту. Для суден генеральних вантажів це пожежна безпека (27 %); для балкерів – структурні дефекти корпусу і механізмів (27 %).

Значення ваг β , що наведені в табл. 4, запропоновані як апіорні оцінки для концептуальної моделі. $\beta_1 = 0,28$ (прапор) – аргументовано через 15-кратний розрив ставок затримання між Камерун 22 – 27 % проти Багам 1,5 – 1,9 % (див. табл. 2).

$\beta_2 = 0,22$ (RO) – через пряму залежність якості технагляду від категорії організації, підкріплено посиланнями [3, 10].

$\beta_3 = 0,18$ (вік) – через нелінійне зростання після 15 років, вже описане функцією $\phi(Age)$.

$\beta_4 = 0,17$ (регіональний коефіцієнт) – через системні відмінності між меморандумами у суворості класифікації дефектів: наприклад, розрив між Абуџа МоУ (0,62 %) та Токуо МоУ (5,0 %) за однакового технічного стану суден свідчить не про реальну різницю в ризику, а про різні інспекційні стандарти (див. табл. 1).

$\beta_5 = 0,15$ (історія інспекцій) – через те, що цей показник є похідним: він вже опосередковано відображає вплив прапора та RO, зафіксований у попередніх перевірках.

Їх емпіричне уточнення є завданням подальших досліджень.

Ключовим елементом моделі є функція $P(d)$ — ймовірність затримання судна (Detention Probability), що приймає значення в діапазоні $[0, 1]$. Для її визначення використовується такий двоетапний підхід.

Крок 1. Обчислення зваженої лінійної комбінації ознак

$$z = \beta_0 + \beta_1 f_1 + \beta_2 f_2 + \beta_3 \varphi(\text{Age}) + \beta_4 f_4 + \beta_5 f_5,$$

де $\varphi(\text{Age})$ — нелінійна функція зносу судна, що відображає експоненціально зростаючий ризик у міру старіння:

$$\varphi(\text{Age}) = \ln(1 + \max(0, \text{Age} - 15)).$$

Крок 2. Застосування логістичної (сигмоїдної) функції активації

$$P(d) = \sigma(z) = 1/(1 + e^{-z}).$$

Перетворення $\varphi(\text{Age})$ ґрунтується на спостереженні, що судна старші за 15 років демонструють непропорційно високу частоту структурних дефектів [6]. Коефіцієнт β_0 являє собою вільний член, що відображає «базовий» рівень ризику для гіпотетичного ідеального судна.

Пропонується наступна інтерпретація вихідного значення: $P(d) > 0,7$ — судно позначається як «високоризикове» та рекомендується для пріоритетного відбору (Priority Inspection Target); $P(d) \in [0,4; 0,7]$ — стандартний моніторинг; $P(d) < 0,4$ — низький ризик, розширений інтервал між інспекціями.

Критичною перевагою запропонованої архітектури є автоматизований механізм донавчання моделі при виході нових щорічних звітів MoU. NLP-конвеєр здійснює: синтаксичний розбір нового звіту; оновлення відповідних записів у базі даних ознак; перерахунок коефіцієнтів β через процедуру інкрементального навчання. Це забезпечує актуальність моделі без необхідності повного перенавчання з нуля [11].

Дані табл. 3 підтверджують гіпотезу про типоспецифічні профілі ризику: для кожної категорії флоту існує домінуюча область невідповідностей. Практичний висновок полягає в тому, що в архітектурі моделі тип судна має виступати не просто додатковою ознакою, а перемикачем підмоделей (model switcher): для кожного типу флоту формується окремий профіль ваг β , що акцентує найбільш значущі для нього предиктори. Такий підхід реалізується через ієрархічну класифікацію (Hierarchical Classification Framework) [12].

Загалом з дослідження зроблено **висновки**:

1. Виявлено значну регіональну гетерогенність: діапазон ставок затримання становить 0,62 – 5,0 % залежно від меморандуму, що обумовлює необхідність включення регіонального коефіцієнта f_4 до вектора ознак.

2. Формалізовано математичний апарат моделі через функцію логістичної регресії $P(d) = \sigma(\beta_0 + \sum \beta_i f_i)$ з нелінійним перетворенням $\varphi(Age)$ для ознаки віку судна.

3. Встановлено, що найбільш значущими предикторами затримання є ризик прапора ($\beta_1 = 0,28$) та рейтинг визнаної організації ($\beta_2 = 0,22$).

4. Виявлено типоспецифічні профілі дефектів: домінянти пожежної безпеки для генерального вантажу, структурних дефектів для балкерів тощо.

ЛІТЕРАТУРА

REFERENCES

1. Paris MoU on Port State Control. Annual Report 2023: Targeting and Inspections. – Paris: Paris MoU Secretariat, 2024. – 112 p.

2. Tokyo MoU on Port State Control. Annual Report 2023/2024: Port State Control in the Asia-Pacific Region. – Tokyo: Tokyo MoU Secretariat, 2024. — 98 p.

3. Black Sea MoU on Port State Control. Annual Report 2023. — Istanbul: Black Sea MoU Secretariat, 2024. – 76 p.

4. European Maritime Safety Agency (EMSA). Annual Overview of Marine Casualties and Incidents 2024 (EMSAFE). – Lisbon: EMSA, 2025. – 134 p.

5. IMO. International Safety Management (ISM) Code and Guidelines on Implementation of the ISM Code [Electronic resource]. – London: IMO, 2018. – Access mode:

<https://www.imo.org/en/OurWork/HumanElement/Pages/ISMCode.aspx>

6. Heij C., Bijwaard G. E., Knapp S. Ship Inspection Strategies: Effects on Maritime Safety and Environmental Protection // Transportation Research Part D: Transport and Environment. – 2011. – Vol. 16, No. 1. – P. 42 – 48. DOI: 10.1016/j.trd.2010.07.006.

7. Yan R., Wang S. Predicting ship detention in port state control inspection through ensemble learning // Ocean & Coastal Management. – 2018. – Vol. 167. – P. 167 – 175. DOI: 10.1016/j.ocecoaman.2018.09.012.

8. Tsou M.-C. Big data analysis of port state control ship detention database // Journal of Marine Engineering & Technology. – 2019. – Vol. 18, No. 3. – P. 113 – 121. DOI: 10.1080/20464177.2017.1414131.

9. Yang Z., Yang Z., Yin J. Realising advanced risk-based port state control inspection using data-driven Bayesian networks // Transportation Research Part A: Policy and Practice. – 2018. – Vol. 110. – P. 38 – 56. DOI: 10.1016/j.tra.2018.02.030.

10. EMSA. RO Monitoring Under Directive 2009/15/EC: Annual Assessment 2023. – Lisbon: EMSA, 2024. – 20p.

11. Xiao F., Wang S., Shi J., Yin J., Qi J. Ship detention prediction via feature selection scheme and support vector machine (SVM) // Transportation Research Part C: Emerging Technologies. – 2020. – Vol. 114. – P. 444 – 463. DOI: 10.1016/j.trc.2020.02.020.

12. Zhu J.-H., Yang Q., Jiang J. Identifying crucial deficiency categories influencing ship detention: a method of combining cloud model and prospect theory // Reliability Engineering & System Safety. – 2023. – Vol. 230. – Art. 108949. – 15 p. DOI: 10.1016/j.res.2022.108949.

13. Resolution A.1187(33) adopted 06.12.2023. Non-Exhaustive List of Obligations Under Instruments Which Are Relevant to the IMO Instruments Implementation Code (III Code) 2023.

14. Measures to Harmonize Port State Control (PSC) Activities and Procedures Worldwide: Analysis of 2023 PSC Inspection Data. – IMO. Sub-Committee on Implementation of IMO Instruments (III), 11th session, Agenda item 5, III 11/INF.13 – 12.05.2025.

15. Measures to Harmonize Port State Control (PSC) Activities and Procedures Worldwide: Updated Information on PSC Regimes. – IMO. Sub-Committee on Implementation of IMO Instruments (III), 11th session, Agenda item 5, III 11/INF.14. – 12.05.2025.

16. EMSA. THETIS — the European Union Port State Control Inspection Management System [Electronic resource]. — Lisbon: EMSA. — Access mode: <https://www.emsa.europa.eu/thetis.html>

Abstract. The continuous growth in the volume of international maritime regulatory requirements – IMO Assembly Resolution A.1187(33) lists nearly 1,000 mandatory obligations – makes ship deficiencies practically inevitable, which in turn leads to vessel detention by Port State Control (PSC) authorities. At the same time, the PSC inspection database – covering

large amount of inspections annually across regional memoranda – constitutes a unique dataset that enables the application of artificial intelligence tools for proactive detention risk management. The article presents a methodology for applying AI tools – specifically NLP models (spaCy, pdfminer) and ensemble machine learning methods (Gradient Boosting/XGBoost) – for synthesizing structured information from the annual reports of eight regional MoU: Paris, Tokyo, Black Sea, Indian Ocean, Mediterranean, Abuja, Caribbean, and the Viña del Mar Agreement. A review of existing studies shows that such methods achieve detention prediction accuracy of 71 – 78 %, significantly outperforming manual inspector selection (~42 %). However, most prior work focuses on a single memorandum and does not address cross-regional data synthesis or dynamic model updating. A four-stage processing pipeline is described: PDF extraction, normalization against THETIS deficiency codes and ISO 3166-1 flags, data enrichment with Equasis attributes, and temporal stratification. A comparative analysis reveals significant heterogeneity in detention rates from 0.62 % (Abuja MoU) to 5.0 % (Tokyo MoU). The predictive model is formalized as a logistic regression function $P(d)$ over an ensemble output, using a five-dimensional feature vector with prior weights justified by domain logic: flag risk ($\beta_1=0.28$), RO rating ($\beta_2=0.22$), ship age with nonlinear transformation $\phi(\text{Age})$ ($\beta_3=0.18$), regional coefficient ($\beta_4=0.17$), and inspection history ($\beta_5=0.15$). Ship-type-specific defect profiles and a hierarchical model-switching architecture are proposed. Integration of the model into company safety management systems and maritime education programs is substantiated.

УДК 681.518.5

DOI: 10.31653/1819-3293-2026-1-31-66-85

ARTICLE HISTORY

Received 02.03.2025

Accepted 30.03.2025

Михайленко Владислав Сергійович¹, Глазева Оксана
Володимирівна², Грама Геннадій Петрович³, Лещенко Валерій
Владиславович⁴

Національний університет «Одеська морська академія»
vladmi hailen@gmail.com¹, o.glazeva@gmail.com²,
gennadiy_g@ukr.net³, lvvlvv@ukr.net⁴

ІНТЕЛЕКТУАЛЬНА СИСТЕМА УПРАВЛІННЯ ВЕНТИЛЯЦІЄЮ НА МАЛОМІРНИХ І АВТОНОМНИХ СУДНАХ

Mychailenko Vladyslav¹, Glazeva Oksana², Grama Gennadiy³, Leshchenko
Valery⁴

National University "Odessa Maritime Academy", Odessa, Ukraine
vladmi hailen@gmail.com¹, o.glazeva@gmail.com²,
gennadiy_g@ukr.net³, lvvlvv@ukr.net⁴

INTELLIGENT VENTILATION CONTROL SYSTEM FOR SMALL AND AUTONOMOUS VESSELS

Резюме. Представлена інтелектуальна система управління вентиляцією приміщень типових маломірних та автономних суден. Актуальність дослідження обумовлена необхідністю підвищення надійності та адаптивності роботи суднових вентиляційних систем в умовах змінних експлуатаційних навантажень та обмежених енергетичних ресурсів. Запропоновано методика «наслідуючого нейроуправління», де нейромережевий контролер (НМК) навчається на базі роботи адаптивного ПД-регулятора. Моделювання системи в пакеті MATLAB підтвердило, що використання алгоритму навчання Левенберга-Марквардта забезпечує високу точність та швидкість регулювання. Також, для підвищення надійності системи управління запропоновано експертну систему, яка дозволяє оператору ефективно

управляти в режимі дистанційного керування параметрами вентиляції з берегового або судового ЦПУ.

Summary. *An intelligent ventilation control system for typical small and autonomous vessels is presented. The relevance of the study is driven by the need to increase the reliability and adaptability of marine ventilation systems under varying operational loads and limited energy resources. A "mimic neurocontrol" methodology is proposed, where a neural network controller (NNC) is trained based on the operation of an adaptive PID controller. System modeling in the MATLAB package confirmed that the use of the Levenberg–Marquardt learning algorithm ensures high accuracy and regulation speed. Furthermore, to enhance the reliability of the control system, an expert system is proposed, allowing the operator to effectively manage ventilation parameters in remote control mode from a shore-based or shipboard central control station.*

Відомо, що маломірні судна - це невеликі судна (катери, яхти і т.д. довжиною до 24 м), які, як правило, оснащені автоматизованими або автоматичними системами управління, навігації та моніторингу. В даний час розвиток маломірних суден пов'язаний з активним впровадженням технологій штучного інтелекту: сенсорних систем, Інтернету речей (IoT), цифрових платформ моніторингу, які формують концепцію "смарт-суден" - інтелектуальних суден з адаптивними та енергоефективними системами життєзабезпечення, навігації та управління [1 - 3]. Натомість, незважаючи на високий потенціал штучного інтелекту в судноплаванні, його впровадження залежить від вирішення цілого ряду технічних та правових проблем.

Зокрема, для навчання нейромережевого контролера (НМК) потрібна наявність великого обсягу вимірювальних даних (Dataset) контрольованих параметрів судового обладнання при експлуатації на різних режимах навантаження, умовах плавання, маневрування тощо. Разом з тим, реальні морські дані часто неповні або різномірні, містять помилки вимірів та погано відбивають рідкісні, але критичні аварійні ситуації. Ще однією важливою проблемою є відсутність достатньої кількості міжнародних стандартів та нормативів, що регулюють використання нейромережевих (НМ) та інших інтелектуальних систем на автономних та традиційних суднах.

Для їх впровадження, на думку авторів, може знадобитися:

- розробка методів перевірки та валідації математичних моделей та алгоритмів управління працюючих на основі методів машинного навчання;
- підтвердження надійності інтелектуальних систем керування;

- створення загальноприйнятих методик розробки, навчання та випробування на судні нейронних мереж та інших інтелектуальних систем автоматичного управління (САУ).

Апробація запропонованих підходів до збору навчальних даних щодо вимірювальних параметрів для навчання інтелектуальних (нейромережових) систем управління, моделювання та оцінки показників якості перехідних процесів може бути корисною для подальшого впровадження в САУ як традиційних, так і автономних суден і є актуальною науковою задачею.

Таким чином, метою дослідження є рішення прикладного завдання розробки інтелектуальної САУ підтримання заданої температури повітря в приміщеннях маломірного типового або автономного судна (ЦПУ, машинне відділення, каюти, тощо) і аналіз ефективності запропонованих підходів.

Для аналізу можливих шляхів вирішення завдання збору даних контрольованих параметрів та подальшої розробки інтелектуальної САУ пропонується використання методики «наслідування» (через широке використання на судах типових ПІД-регуляторів).

Методика «наслідує нейроуправління» (Neurocontrol learning based on mimic, Controller Modeling, Supervised Learning Using an Existing Controller) [4] охоплює системи нейроуправління, в яких НМК навчається на успішних прикладах роботи типового адаптивного ПІ або ПІД-контролера по зворотному зв'язку (рис. 1). При цьому адаптація типових регуляторів зазвичай виконується висококваліфікованими експертами-операторами, а НМ система моніторингу запам'ятовує залежність між вхідними та вихідними параметрами САУ.

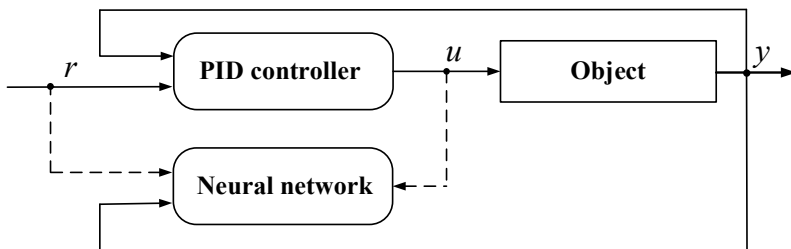


Рис. 1. Схема системи управління на основі методики «наслідуючого управління»: r - завдання, u - керування; y - регульований параметр

Для апробації запропонованого підходу пропонується аналіз системи управління судною вентиляцією. Управління вентиляцією на судах здійснюється через автоматизовані або ручні системи, що забезпечують приплив та витяжку повітря для підтримки мікроклімату, видалення шкідливих газів та пожежної безпеки. Система включає вентилятори, повітропроводи, заслінки та датчики, що працюють у режимах постійної циркуляції або на вимогу (наприклад, у машинному відділенні або житлових блоках). Відомо, що сучасні судна використовують системи централізованого контролю, які автоматично регулюють швидкість вентиляторів та положення заслінок на основі даних датчиків температури, вологості та вмісту газів.

Можна відзначити, що, наприклад, у завданнях управління електроприводами вентиляторів суднових приміщень НМ вчиться повторювати оптимальні режими регулювання на основі зібраних даних (див. рис. 1). Перевагою обраного методу збору даних є його простота – можливість зняття даних із працюючої системи управління без зміни архітектури об'єкта та підвищення адаптивності САУ, оскільки НМ здатна апроксимувати складні нелінійні залежності, які важко промодельовувати для оптимізації традиційних регуляторів.

Для збору даних та навчання НМК проведено моделювання типової САУ частоти обертання електродвигуна суднового вентилятора.

Регулювання швидкості обертання двигуна постійного струму вентилятора здійснюється шляхом зміни напруги живлення при незмінному магнітному потоці двигуна. У цьому режимі до обмотки збудження підводиться постійна напруга, тоді як якорь двигуна підключається до джерела регульованої напруги. Таким чином, фактично використовується двигун з незалежним збудженням. Застосування методу регулювання швидкості шляхом зміни напруги є енергетично доцільним, оскільки воно не супроводжується додатковими втратами потужності в двигуні.

Математична модель двигуна постійного струму суднового вентилятора реалізована в бібліотеці *SimPowerSystems* пакета *MatLab* у розділі *Machines* [5]. Контакти **F+** та **F-** призначені для підключення напруги збудження, що забезпечує формування магнітного потоку. Контакти **A+** та **A-** використовуються для підключення обмотки якоря до силового джерела живлення (рис. 2).

Активне навантаження двигуна вводиться через віртуальний вхід **TL** (див. рис. 2).

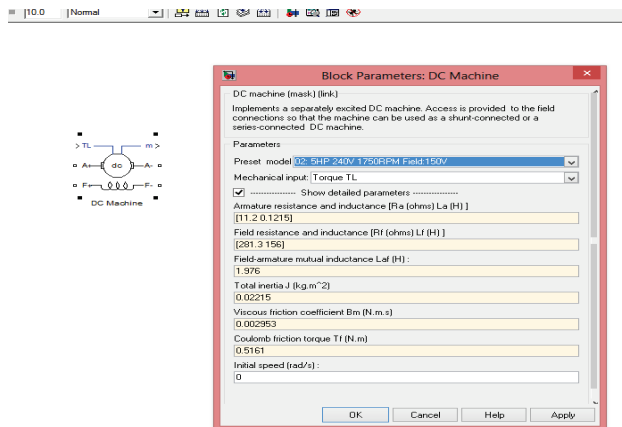


Рис. 2. Вікно параметрів двигуна вентилятора

Вихідні параметри моделі – частота обертання, струм обмотки якоря (I_a), струм збудження (I_f) та електромагнітний момент (T_e) – формуються на мультиплексорній шині m (рис. 3). Такий підхід дозволяє здійснювати комплексний аналіз динамічних характеристик двигуна та оцінювати ефективність системи автоматичного регулювання.

На першому (верхньому) виході діє частота обертання (швидкість), на іншому – струм обмотки якоря, на третьому – струм збудження та на четвертому – електромагнітний момент двигуна (див. рис. 3).

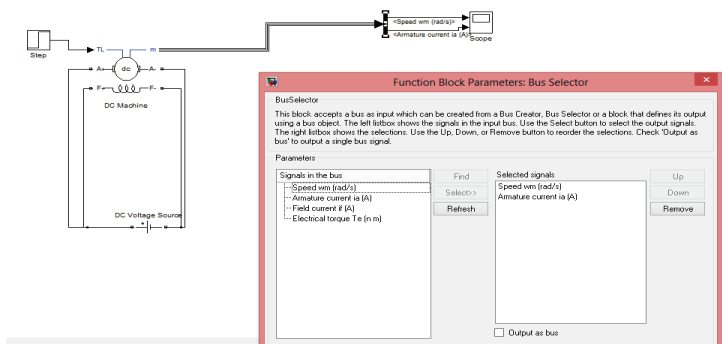


Рис. 3. Схема підключення двигуна до джерела живлення та вибір параметрів контролю роботи двигуна суднового вентилятора

Для формування початкових даних була побудована САУ з типовим ПІД-регулятором, який застосовується в традиційних суднових системах (рис. 4).

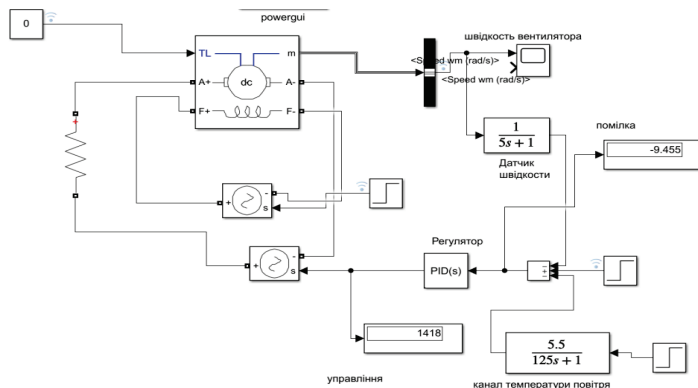


Рис. 4. Модель САУ двигуна вентилятора при впливі зовнішнього збурення – зміни температури повітря

У процесі моделювання на об'єкт управління накладалося зовнішнє збурення – зміна температури повітря у приміщеннях судна. Динамічна модель, що описує збурення, реалізована у вигляді інерційної ланки.

Відомо, що температура повітря в приміщенні змінюється не миттєво, а з певною тепловою інерцією. Це пояснюється тим, що повітря має теплоємність, огорожувальні конструкції (стіни, перегородки, стеля) акумулюють тепло, а також відбувається теплообмін із зовнішнім середовищем [6].

Динамічна модель каналу збурення:

$$T \cdot \frac{d\theta(t)}{dt} + \theta(t) = K \cdot u(t),$$

де $\theta(t)$ – відхилення температури повітря від початкового значення;

$u(t)$ – керуючий вплив (потужність нагрівання/охолодження або витрата повітря);

T – постійна часу об'єкта, що характеризує теплову інерцію;

K – коефіцієнт передачі об'єкта управління.

Для системи управління вентилятором датчик швидкості обертання (тахогенератор, датчик Холла з фільтрацією тощо) також представлено інерційною ланкою першого порядку, оскільки вимірний тракт

має власну динаміку та фільтрацію. Діапазон зміни температури повітря в програмі імітується в межах від 5 до 22 °С.

Динамічна модель датчика швидкості:

$$T_d \cdot \frac{dy(t)}{dt} + y(t) = K_d \cdot \omega(t),$$

де $\omega(t)$ – фактична кутова швидкість обертання двигуна;

$y(t)$ – вихідний сигнал датчика (напруга або цифровий еквівалент);

T_d – постійна часу датчика;

K_d – коефіцієнт передачі (чутливість) датчика.

Процес адаптації ПІД-регулятора до різних збурювальних впливів виконувався за допомогою вбудованого в MATLAB методу адаптивного управління (рис. 5).

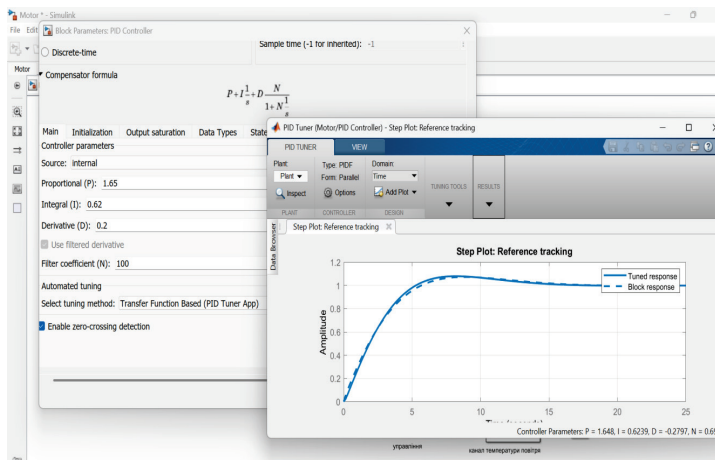


Рис. 5. Автоналаштування ПІД - регулятора за допомогою програмного методу Зіглера – Нікольса

На рис. 5 вказані оптимальні параметри налаштування $P = 1.65$ (K_p), $I(T_i) = 0.62$, $K_d(D) = 0.2$.

Також у процесі моделювання традиційної САУ здійснювалася зміна завдання регулятора частоти обертання двигуна залежно від температури повітря (рис. 6). При підвищенні температури повітря у приміщеннях судна вентилятор повинен працювати швидше, тобто

швидкість його обертання безпосередньо впливає на інтенсивність теплообміну.

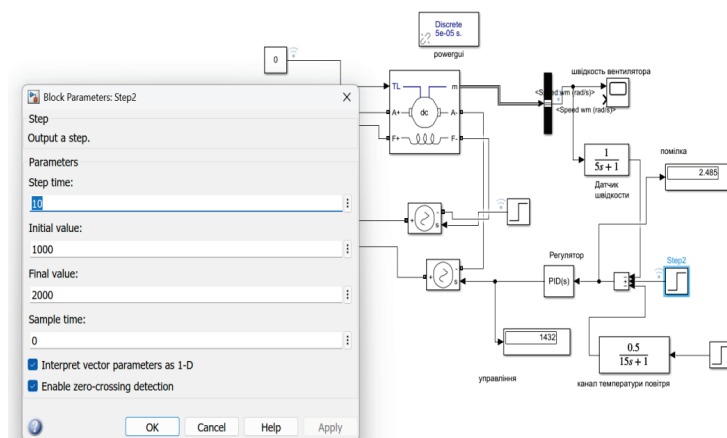


Рис. 6. Зміна завдання контролера шляхом коригування параметрів температури у приміщеннях судна

Перехідні процеси САУ показані на рис. 7.

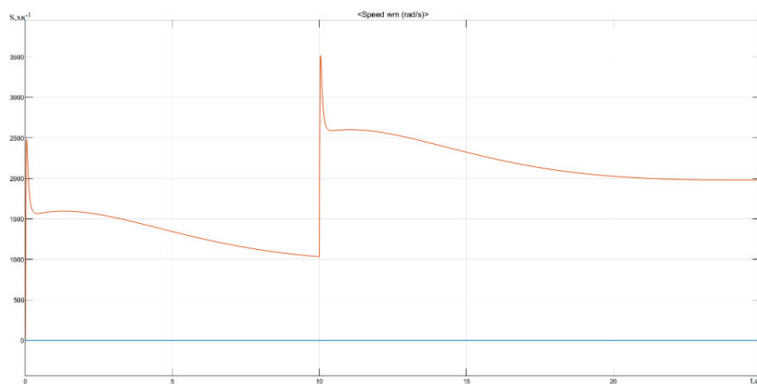


Рис. 7. Перехідні процеси адаптивної САУ частоти обертання двигуна вентилятора при дії збурення (зміни температури повітря)

Час перехідного процесу САУ трохи більше 10 с, тобто регулятор швидко відпрацьовує зміну завдання та компенсацію збурення (див. рис. 7).

У процесі збору даних для подальшого навчання НМК увага зосереджувалася на залежності між керуючим впливом та помилкою управління, отриманих за допомогою віртуальних осцилографів (рис. 8).

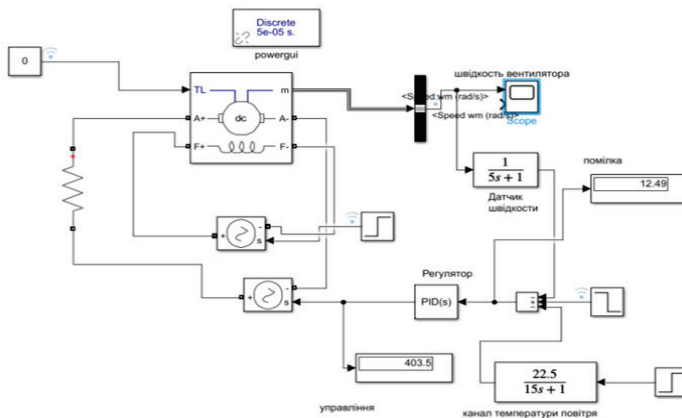


Рис. 8. Модель САУ для збору даних при зміні температури повітря та завдання для вентилятора (швидкості обертання двигуна постійного струму)

Для навчання НМ регулятора була сформована база експериментальних даних, що відображає динаміку об'єкта управління.

У процесі моделювання реєструвалися такі сигнали:

- температура повітря (K);
- задана швидкість обертання двигуна вентилятора (Z);
- керуючий вплив (U);
- помилка (E).

Для отримання коректної навчальної вибірки система управління повинна функціонувати в різних режимах:

1. Пусковий режим.
2. Перехідні процеси (різке змінення завдання температури).
3. Усталений режим.

4. Робота при зміні зовнішньої температури та впливу інших збурень.

Фрагмент навчальної вибірки для НМК наведено на рис. 9.

	A	B	C	D
1	K	E	Z	U
2	0,50	-16,80	2000	2024
3	2,50	-13,10	1800	1822
4	8,10	-9,60	1600	1670
5	10,40	-7,40	1500	1525
6	12,50	-5,80	1400	1413
7	22,40	12,60	400	405
8	30,23	18,50	100	50
9	34			

Рис. 9. Фрагмент вибірки (Dataset) для навчання НМ

У машинному навчанні використовують емпіричне правило визначення розміру навчальної вибірки:

$$N \geq 10 \cdot W,$$

де N – розмір навчальної вибірки; W – кількість ваг НМ, що настраюються.

Наприклад, НМ має у своїй архітектурі: 3 входи, 10 нейронів у прихованому шарі і 1 вихід (U), приблизно 50 ... 70 вагових коефіцієнтів. Тоді мінімальний обсяг навчальної вибірки: $N = 500 \dots 700$ значень.

Для побудови системи управління обрано двошарову архітектуру прямого поширення.

Системи вентиляції допускають невелику похибку регулювання температури, тому вимоги до обсягу навчальних даних нижчі, ніж для критичних систем управління судном.

Етап розробки НМ системи управління виконано у програмі Neural Network Toolbox пакету Matlab (рис. 10).

- передача вхідних даних на вхідний шар;
- зважування сигналів з використанням вагових коефіцієнтів;
- застосування функції активації;
- передача результату на наступний шар;
- отримання вихідного сигналу системи управління.

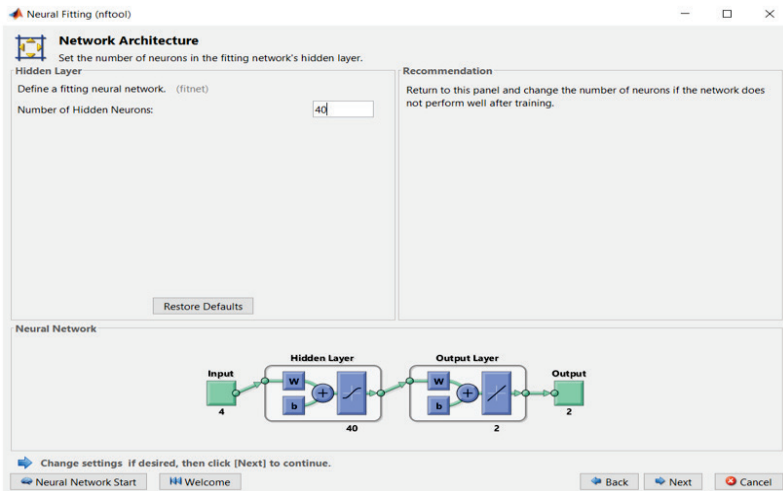


Рис. 10. Вибір кількості шарів НМ прямого розповсюдження (Feed Forward)

Алгоритм роботи НМ включає кілька етапів:

Переваги обраної архітектури НМ:

висока швидкість обчислень. Після навчання НМ працює дуже швидко, що важливо для систем реального часу;
стійкість до шумів даних.

На думку ряду вчених [7, 8] НМ обраної архітектури добре працюють навіть за наявності похибок датчиків та шумів вимірів. Для навчання нейронної мережі (НМ) обрано алгоритм Левенберга-Марквардта (рис. 11).

Алгоритм Левенберга-Марквардта (**Levenberg-Marquardt, LM**) є ефективним методом оптимізації, що поєднує властивості методу найшвидшого спуску та методу Ньютона. Він застосовується для мінімізації середньоквадратичної функції помилки [7]

$$E(\omega) = \frac{1}{2} \sum (y_i - \hat{y}_i)^2,$$

де y_i – цільове значення, $\hat{y}_i$ – вихід нейронної мережі.

Перевагою обраного алгоритму навчання є висока швидкість збіжності та ефективність для нейронних мереж малого й середнього розміру.

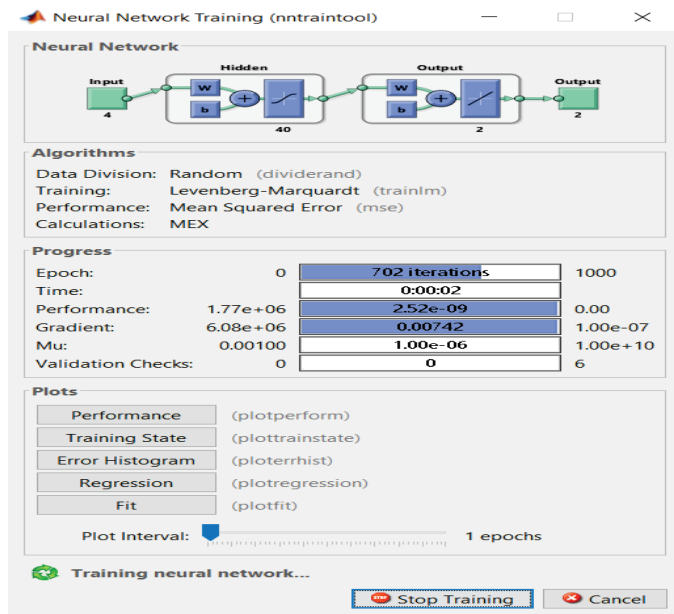


Рис. 11. Процес навчання нейронної мережі за алгоритмом Левенберга-Марквардта

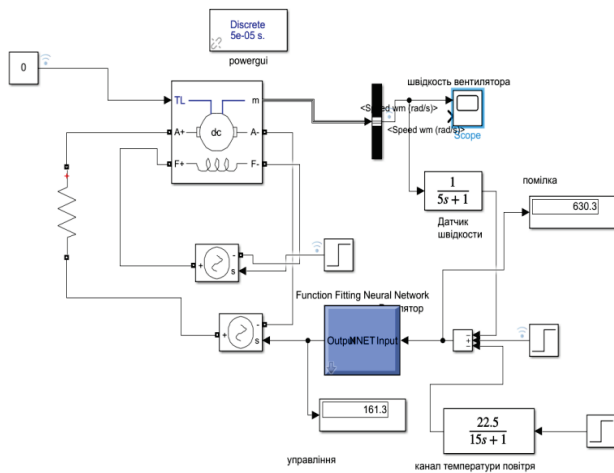


Рис. 12. Моделювання НМ САУ (усталений режим)

Етапи моделювання НМ САУ в різних режимах роботи при зміні завдання та температури повітря (зміна параметрів передавальної функції) наведено на рис. 12 – 15.

Аналіз часу регулювання перехідних процесів (див. рис. 13, 15) показав покращення швидкодії НМ САУ в 2 рази порівняно з типовою САУ з ПД-регулятором. Також процеси мають більш плавний характер без закидів, що позитивно впливає на роботу вентилятора.

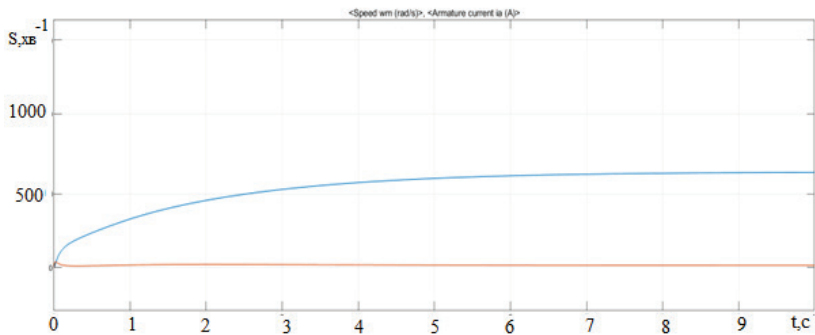


Рис. 13. Перехідний процес НМ САУ

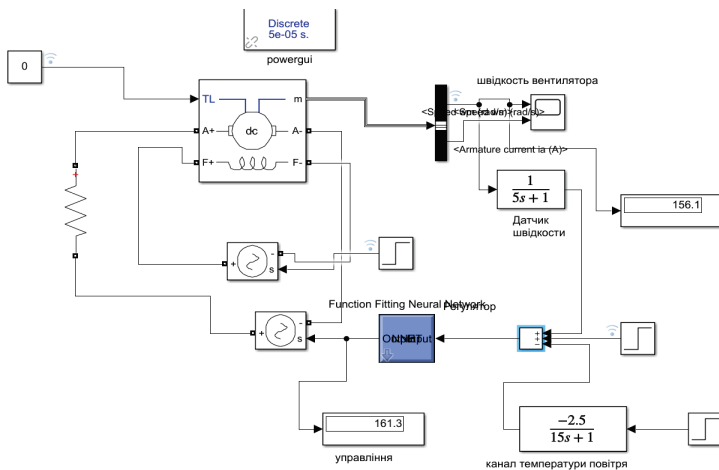


Рис. 14. Моделювання НМ САУ при зміні температури повітря.

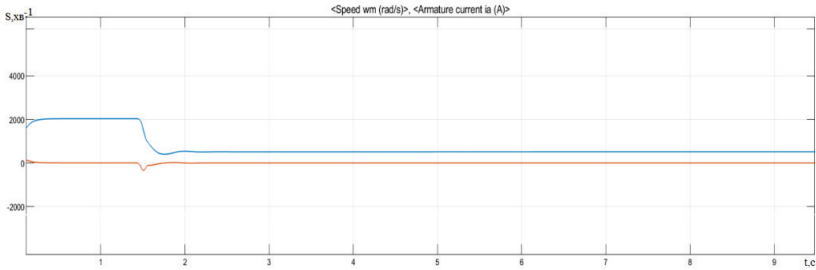


Рис. 15. Перехідний процес НМ САУ

При регулюванні без різких стрибків (закидів) параметрів вентилятор не зазнає різких змін швидкості обертання. Це призводить до: меншого зносу підшипників, зниження вібрацій, збільшення терміну служби вентилятора. Також електродвигун вентилятора не піддається частим навантаженням. Без перерегулювання система не робить зайвих корекцій, вентилятор працює ближче до оптимальної робочої точки та зменшується споживання електроенергії.

Разом з тим до загроз використання НМ у САУ можна віднести те, що НМ навчається лише на поведінці, яку демонструє адаптивний ПД-регулятор. Також під час звичайної експлуатації рідко виникають різкі теплові навантаження, відмови вентиляції та інші аварійні ситуації. Тому навчальна вибірка не завжди містить описи аварійних ситуацій, що під час експлуатації на судні може призвести до непередбачених наслідків.

Для підвищення надійності САУ пропонується використовувати гібридну технологію, що включає участь оператора за допомогою системи дистанційного керування та системи підтримки прийняття рішень (нечіткої експертної системи).

Запропонована нечітка експертна система реалізована мовою машинного навчання Python у програмному середовищі виконання Google Colab (рис. 16), код програми відредаговано за допомогою ChatGPT.

**ЕКСПЕРТНА СИСТЕМА КЕРУВАННЯ ВЕНТИЛЯЦІЄЮ
СУДНОВОГО ПРИМІЩЕННЯ з контролем енергоспоживання
електродвигуна вентилятора**

Потужність двигуна постійного струму – 5 кВт

Для Google Colab потрібно встановити бібліотеку

```
!pip install scikit-fuzzy
import numpy as np
import skfuzzy as fuzz
from skfuzzy import control as ctrl
import matplotlib.pyplot as plt
```

1. Вхідна змінна – температура повітря

```
temperature = ctrl.Antecedent(np.arange(0, 51, 1), 'temperature')
```

2. Вихідна змінна – швидкість вентилятора

```
fan_speed = ctrl.Consequent(np.arange(0, 101, 1), 'fan_speed')
```

3. Функції належності температури

```
temperature['cold'] = fuzz.trimf(temperature.universe, [0, 0, 15])
temperature['normal'] = fuzz.trimf(temperature.universe, [15, 23, 30])
temperature['hot'] = fuzz.trimf(temperature.universe, [25, 40, 50])
```

4. Функції належності швидкості вентилятора

```
fan_speed['low'] = fuzz.trimf(fan_speed.universe, [0, 0, 40])
fan_speed['medium'] = fuzz.trimf(fan_speed.universe, [20, 50, 80])
fan_speed['high'] = fuzz.trimf(fan_speed.universe, [60, 100, 100])
```

5. Правила експертної системи

```
rule1 = ctrl.Rule(temperature['cold'], fan_speed['low'])
rule2 = ctrl.Rule(temperature['normal'], fan_speed['medium'])
rule3 = ctrl.Rule(temperature['hot'], fan_speed['high'])
```

6. Створення системи керування

```
fan_control = ctrl.ControlSystem([rule1, rule2, rule3])
fan_simulation = ctrl.ControlSystemSimulation(fan_control)
```

7. Введення температури оператором

```
temp_input = float(input("Введіть температуру повітря у приміщенні  
(°C): "))
```

```
fan_simulation.input['temperature'] = temp_input
fan_simulation.compute()
```

8. Розрахунок швидкості вентилятора

```
speed = fan_simulation.output['fan_speed']
print("Рекомендована швидкість вентилятора:", round(speed,2), "%")
```

9. Розрахунок споживаної потужності двигуна

```
motor_power_max = 5 # максимальна потужність двигуна (кВт)
power_consumption = motor_power_max * (speed / 100)
print("Споживана потужність двигуна:", round(power_consumption,2),
      "кВт")
```

10. Експертна порада щодо економії електроенергії

```
print("\nРекомендація експертної системи:")
if power_consumption > 4:
    print("Високе енергоспоживання.")
    print("Можлива економія електроенергії шляхом зменшення
швидкості вентилятора.")
    print("Рекомендується перевірити:")
    print("- можливість зниження швидкості на 10–20 %")
    print("- стан вентиляційних каналів")
    print("- ефективність природної вентиляції")
elif power_consumption > 2:
    print("Середній рівень енергоспоживання.")
    print("Для економії електроенергії можна:")
    print("- зменшити швидкість вентилятора при стабільній
температурі")
    print("- використовувати періодичний режим вентиляції")
else:
    print("Низьке енергоспоживання.")
    print("Режим вентиляції є енергоефективним.")
```

11. Візуалізація результату

```
fan_speed.view(sim=fan_simulation)
plt.show()
```

```

12. Графік залежності споживаної потужності від температури
temps = np.arange(10, 45, 1)
powers = []
for t in temps:
    fan_simulation.input['temperature'] = t
    fan_simulation.compute()
    speed = fan_simulation.output['fan_speed']
    power = motor_power_max * (speed / 100)
    powers.append(power)
plt.plot(temps, powers)
plt.xlabel("Температура повітря (°C)")
plt.ylabel("Споживана потужність (кВт)")
plt.title("Енергоспоживання вентилятора залежно від температури")
plt.grid()
plt.show()
Кінець програми

```

Програма дозволяє оператору вказати поточну температуру повітря в приміщенні та видає відповідні рекомендації щодо плавного керування швидкістю вентилятора та потужністю двигуна за допомогою широтно-імпульсної модуляції, вбудованої в НМК.

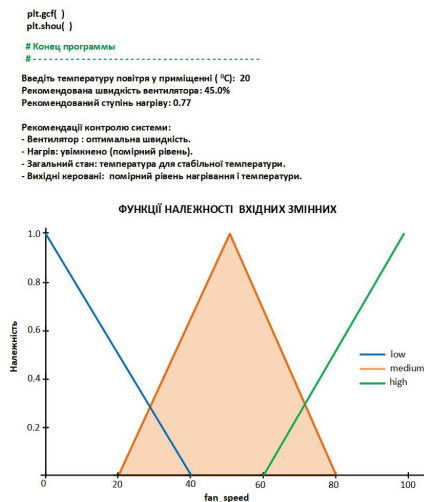


Рис. 16. Вікно нечіткої експертної системи у хмарному сервісі Google Colab

Таким чином, на основі аналізу перехідних процесів було встановлено, що застосування НМ у системах управління вентиляцією на судах демонструє суттєві переваги порівняно з класичними підходами. Модель навчена на основі роботи адаптивного ПІД-регулятора, успадковує його стабільність, але водночас набуває значно ширшу здатність до адаптації. Це дозволяє ефективніше керувати частотою обертання вентилятора, забезпечуючи плавніше перехідні процеси та швидшу реакцію на зміну умов. Завдяки цьому НМ система створює більш комфортний мікроклімат у приміщеннях судна та підвищує енергоефективність роботи електродвигунів.

До переваг представленої методики навчання НМ САУ за параметрами адаптивного ПІД-регулятора можна віднести відсутність необхідності збору великого набору даних на березі. Дані для навчання можна отримувати безпосередньо в процесі експлуатації судна. Поки НМ навчається, керування виконує типовий ПІД-регулятор, який добре вивчений і широко застосовується на судах. Це знижує ризик нестабільності системи.

Також, після навчання на додаткових даних, НМК зможе: зменшити енергоспоживання вентилятора, швидше реагувати на зміни температури, враховувати додаткові параметри (вологість, CO₂, та ін.). Впровадження запропонованої системи управління може суттєво підвищити надійність обладнання, знизити енергоспоживання та оперативно стабілізувати контрольовані параметри суднової вентиляції як традиційних, так і автономних суден.

ЛІТЕРАТУРА REFERENCES

1. Vivone, G., Millefiori, L.M., Braca, P.; Willett, P. Performance assessment of vessel dynamic models for long-term prediction using heterogeneous data. //IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. – 2017. – № 55. – P. 6533 – 6546.
2. Kashav, V., Garg, C.P., Kumar, R. Ranking the strategies to overcome the barriers of the Maritime Supply Chain (MSC) of containerized freight under fuzzy environment. //Ann. Oper. Res. – 2023. – Vol. 324. – P. 1223 – 1268.
3. Mykhailenko, V.S., Kharchenko, R.Yu., Shcherbinin, V.A., Leshchenko, V.V. Using Neural Network Technologies to Simulate the Working Processes of Ship Steam Boilers // Conference Paper CEUR Workshop Proceedings this link is disabled. – 2021. – 3126. – P. 367 – 373.

4. MathWorks, Inc. SimPowerSystems™ User's Guide (SimPowerSystems Toolbox Users' Manual), Version 5.2. MathWorks Corp., Natick, MA, 2010. – 522 p.

5. Кіосак, В. А., Ісаєв, В. Ф., Федоренко, В. В., Грідасов, А. Ю. Зміна стану повітря в приміщенні під впливом тепла, водяної пари та CO₂, що виділяються моделлю людини та припливно-витяжною вентиляційною установкою. //Прикладні питання математичного моделювання. – 2024. – Т. 7. – № 2. – С. 8 – 16.

6. Bilski, J., Smoląg, J., Kowalczyk, B., Grzanek, K., & Izonin, I. Fast Computational Approach to the Levenberg–Marquardt Algorithm for Training Feedforward Neural Networks. //Journal of Artificial Intelligence and Soft Computing Research. – 2023. – 13(2). – P. 45 – 61.

7. Annema A. J. Feed-Forward Neural Networks: Vector Decomposition Analysis, Modelling and Analog Implementation. — New York: Springer, 1995. – 256 p.

8. Multilayer Feedforward Neural Network for Internet Traffic Classification // International Journal of Interactive Multimedia and Artificial Intelligence. –2020. – Vol. 6. – No. 1. – P. 117 – 122.

Abstract - The article considers the current problem of creating an intelligent ventilation control system on small and autonomous vessels, where ensuring a stable microclimate in conditions of limited energy resources is of particular importance. The main attention is paid to the application of neural network algorithms in automatic control systems for fan electric motors, which allows to increase the energy efficiency and adaptability of the equipment. A method of training a neural network controller based on an adaptive PID controller is proposed, which provides optimization of transient processes and reduces the system response time by approximately half without the occurrence of overregulation. The choice of the structure of the direct propagation neural network and the use of the Levenberg–Marquardt algorithm for effective parameter adjustment are justified.

Additionally, a fuzzy expert system has been developed that provides the possibility of remote ventilation control both from the central station of the vessel and from a shore station, which creates conditions for intelligent decision-making support. This approach increases the reliability and flexibility of control in conditions of variable external factors, in particular temperature fluctuations and various operating modes. The system modeling was performed in the Matlab Simulink environment using the Neural Network Toolbox package, which allowed us to study the dynamic characteristics and confirm the effectiveness of the proposed methods.

The results of the work show that the use of a neural network controller in combination with a fuzzy expert system provides increased performance, stability and energy efficiency of ventilation equipment of small vessels, creating the prerequisites for the implementation of modern intelligent technologies in maritime transport.

The proposed system can be integrated with existing ship information and control systems without significant hardware changes. The conducted studies confirm the feasibility of using intelligent control methods in specific operating conditions and variable loads. The results obtained open up prospects for further improvement of the adaptation algorithms and self-learning of the system. The practical implementation of the development can allow increasing the efficiency of operation of autonomous and typical vessels and reducing energy resource consumption.

Keywords: intelligent control system, marine ventilation, small and autonomous vessels, mimic neurocontrol, neural network controller, adaptive PID controller, Levenberg-Marquardt algorithm, expert system, remote control.

УДК 629.5.024

DOI: 10.31653/1819-3293-2026-1-31-86-100

ARTICLE HISTORY

Received 02.03.2026

Accepted 30.03.2026

Михайленко Владислав Сергійович¹, Шевченко Тетяна Іванівна²,
Глазева Оксана Володимирівна³
Національний університет «Одеська морська академія», Одеса,
Україна^{1,3}
Одеська державна академія будівництва та архітектури, Одеса,
Україна²
vladmihailen@gmail.com¹, student.tish@gmail.com²,
o.glazeva@gmail.com³

ПЕРСПЕКТИВИ ВИКОРИСТАННЯ ІОТ-ПЛАТФОРМИ BLYNK ДЛЯ СУДНОВИХ СИСТЕМ МОНІТОРИНГУ

Mychailenko Vladyslav¹, Shevchenko Tetyana², Glazeva Oksana²,
National University "Odessa Maritime Academy", Odessa, Ukraine^{1,3}
Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture, Odessa,
Ukraine²
vladmihailen@gmail.com¹, student.tish@gmail.com²,
o.glazeva@gmail.com³

PROSPECTS OF USING THE BLYNK IOT PLATFORM FOR MARINE MONITORING SYSTEMS

Резюме. Стаття присвячена аналізу технічного потенціалу платформи Blynk у специфічних умовах морської експлуатації, а також оцінці перспектив її інтеграції в існуючі системи суднового моніторингу. Для перевірки можливості ефективного використання платформи Інтернету речей застосовувалося моделювання нейромережевої системи адаптивного керування двигуном вентилятора. Нейромережу реалізовано мовою програмування C++ та інтегровано в контролер Arduino Uno. Моделювання нейромережевої САУ з контролером, датчиком температури та контуром керування швидкістю обертання двигуна здійснювалося в онлайн-платформі Tinkercad. Результати моделювання продемонстрували простоту та

адаптивність запропонованих програмних і технічних рішень для суднових систем моніторингу та керування технічними параметрами.

Summary. *This article is devoted to the analysis of the technical potential of the Blynk platform in specific conditions of marine operation, as well as the assessment of prospects for its integration into existing ship monitoring systems. To verify the feasibility of the effective use of the Internet of Things platform, 3D modeling of a neural network system for adaptive fan motor control was applied. The neural network is implemented in the C++ programming language and integrated into the Arduino Uno controller. Modeling of the neural network ACS (Automatic Control System) with a controller, temperature sensor, and motor speed control loop was carried out using the Tinkercad online platform. The simulation results demonstrated the simplicity and adaptability of the proposed software and hardware solutions for marine monitoring systems and technical parameter control.*

В умовах сучасної цифровізації морської галузі та розвитку концепції Smart Shipping одним із основних напрямів є технологія промислового Інтернету речей (IIoT), яка дозволяє об'єднати контролери та датчики суднового обладнання в єдину інформаційну мережу. Таке об'єднання сприяє підвищенню рівня контролю та керування технологічними параметрами як традиційного, так і автономного судна [1 - 3].

Традиційні системи суднового моніторингу та керування часто відрізняються високою вартістю впровадження, закритою архітектурою та складністю масштабування. У цьому контексті актуальним стає пошук гнучких кросплатформових рішень, здатних забезпечити оперативний збір та візуалізацію даних у режимі реального часу з можливістю контролю з будь-якого мобільного пристрою на судні або у разі автономного судна із ЦПУ офісу на березі [4].

Однією з найбільш перспективних платформ для вирішення завдань дистанційного керування та моніторингу є середовище Blynk [5], що дозволяє створювати інтуїтивно зрозумілі інтерфейси. Завдяки підтримці широкого спектра апаратних засобів (від Arduino та ESP32 до промислових контролерів) та хмарній інфраструктурі, Blynk відкриває широкі можливості для систем дистанційного моніторингу. Також видається актуальним вивчення потенціалу платформ IP (Інтернету речей) для систем керування, що працюють на основі нейромереж, з огляду на перспективність даного напрямку в суднобудівній індустрії. Метою статті є розробка прикладу

технічного прототипу інтелектуальної системи моніторингу та керування двигуном вентилятора за допомогою онлайн – платформи Blynk.

Blynk – це універсальне середовище для розробки мобільних інтерфейсів у системах Інтернету речей (IoT). За допомогою цього сервісу можна оперативне створити прототип, розгорнути мережу та дистанційно керувати судновим обладнанням. Дане рішення є повністю інтегрованим і не залежить від апаратної бази, поєднуючи в собі хмарні сервіси, інструменти аналітики та можливості машинного навчання. Воно пропонує повний набір програмного забезпечення, необхідного для проєктування, впровадження та віддаленого адміністрування підключених вузлів будь-якого масштабу.

Список обладнання та компонентів проєкту:

Wi-Fi модуль ESP8266 та контролер Arduino;

смартфон (Android/iOS) із встановленим застосунком Blynk;

Wi-Fi мережа з доступом до інтернету;

виконавчі пристрої: реле, датчики, контролери, електродвигуни тощо;

блок живлення для контролера та модулів (або живлення через USB-порт від комп'ютера).

Центральним елементом системи є модуль Wi-Fi NodeMCU ESP8266, до якого підключаються датчики та виконавчі механізми. Модуль взаємодіє з хмарним сервером Blynk через бездротову мережу. Оператор за допомогою мобільного застосунку в реальному часі керує пристроями та отримує дані від сенсорів. Схему роботи системи показано на рис. 1.

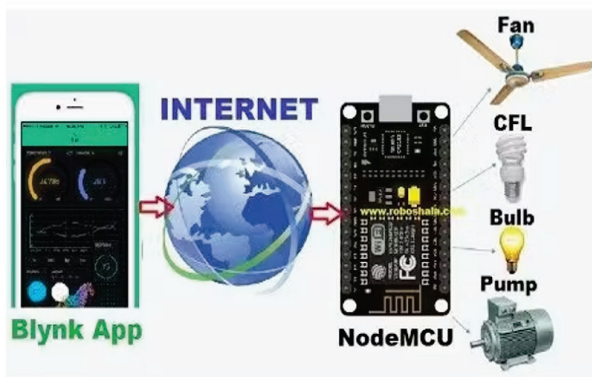


Рис. 1. Схема передачі інформації та управління обладнанням [5]

Для реалізації проєкту було виконано такі етапи: на першому етапі здійснено підключення модуля ESP8266 до платформи Blynk (рис. 2), а також налаштовано назву мережі та пароль (рис. 3).

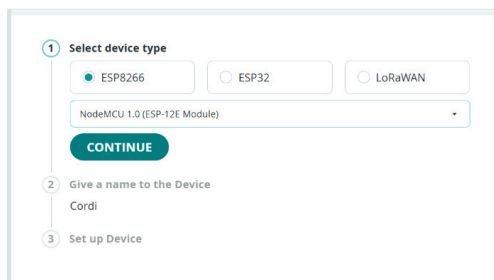


Рис. 2. Підключення модуля у програмі Blynk

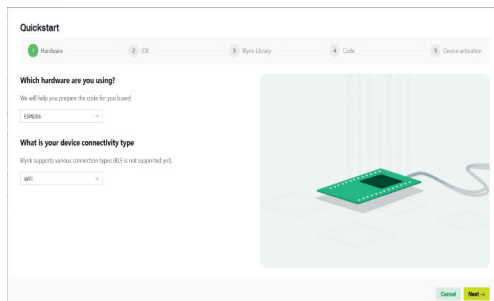


Рис. 3. Підключення до мережі Wi-Fi

На наступному етапі було обрано середовище розробки Arduino IDE [6] для написання програми дистанційного керування обладнанням модуля (рис. 4).

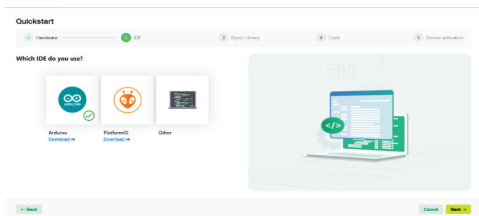


Рис. 4. Вибір середовища Arduino IDE для дистанційного керування обладнанням

Після встановлення бібліотек для підтримки платформи Blynk та модуля ESP8266 у програмі Arduino IDE було використано код для керування світлодіодом модуля з метою перевірки підключення та віддаленого управління за допомогою смартфона (рис. 5).

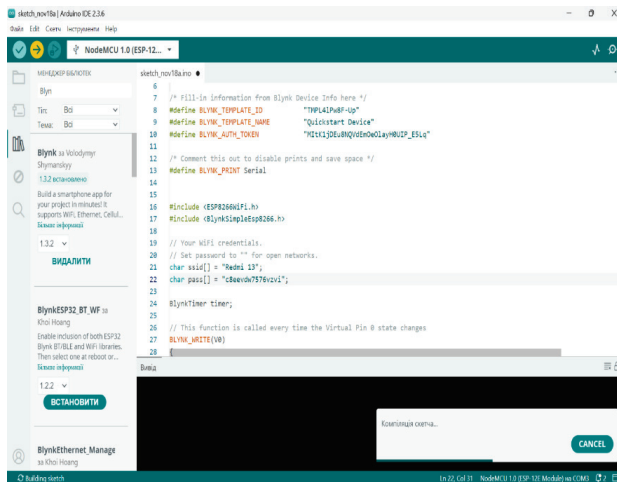


Рис. 5. Код програми

Далі було виконано підключення до застосунку Blynk (рис. 6) та перехід до редактора кнопок керування.

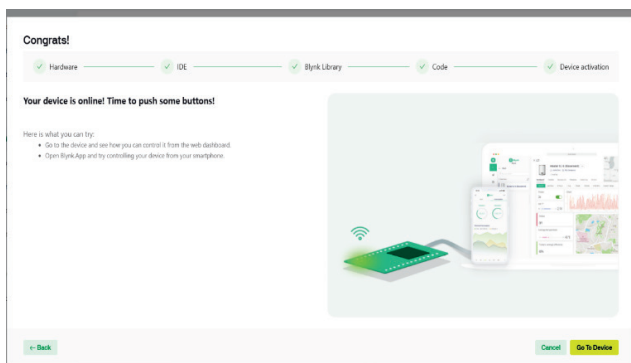


Рис. 6. Підключення до меню керування пристроєм

Після підключення модуля до смартфона з платформою Blynk у меню застосунку було розроблено мнемосхему з кнопками для дистанційного керування обладнанням (світлодіодом на модулі) за допомогою мобільного пристрою та комп'ютера (рис. 7 – 10).

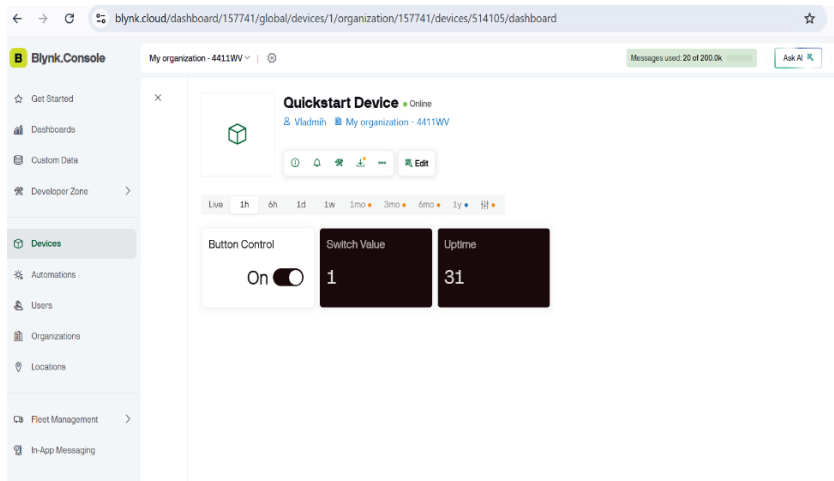


Рис. 7. Інтерфейс розробки мнемосхеми в застосунку Blynk

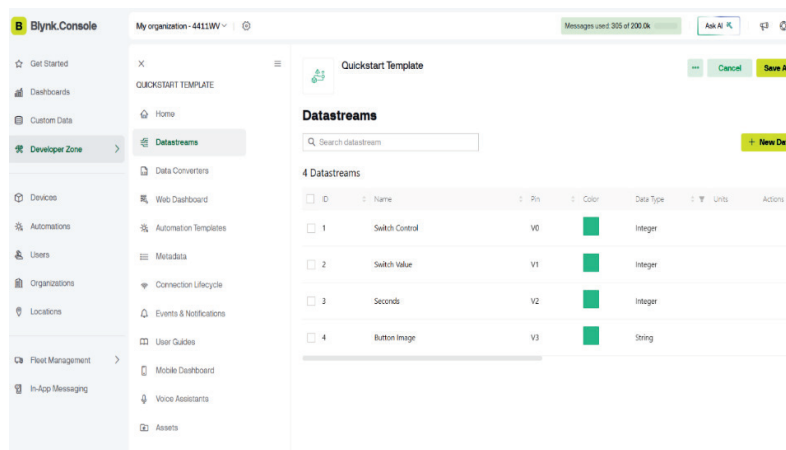


Рис. 8. Конфігурація елемента дистанційного керування (кнопки)

The screenshot shows the 'Digital Pin Datastream' configuration interface. It includes input fields for 'NAME' (containing 'Digital Pin 0'), 'ALIAS' (containing 'Digital Pin 0'), and 'PIN' (containing '0'). There is a 'PIN MODE' dropdown menu set to 'Output'. A toggle switch for 'Enable history data' is currently turned off. Below these fields is a link for 'ADVANCED SETTINGS'. At the bottom right are 'Cancel' and 'Create' buttons.

Рис. 9. Встановлення режиму роботи кнопки керування

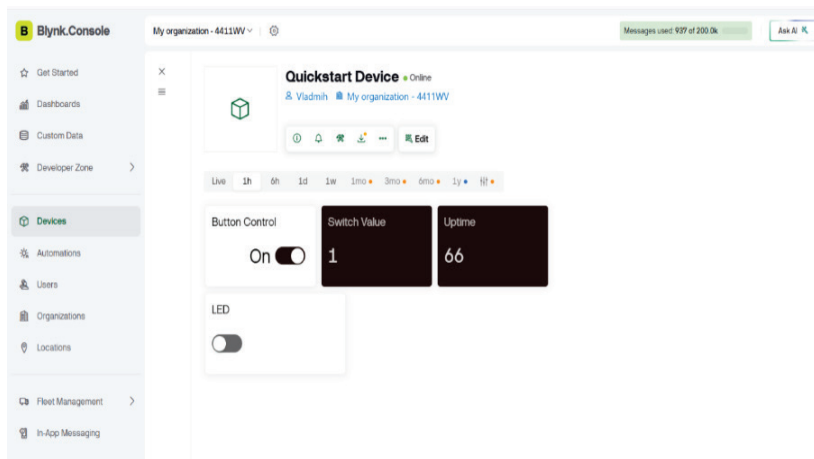


Рис. 10. Візуалізація дистанційного керування світлодіодом за допомогою віджета кнопки

Роботу програми з керування світлодіодом зі смартфона та персонального комп'ютера показано на рис. 11.

Для подальшого використання системи дистанційного контролю передбачається підключення модуля ESP8266 до контролера Arduino Uno (рис. 12) та завантаження програмного коду для моніторингу

температури повітря у суднових приміщеннях і адаптивного керування вентилятором залежно від показників температури.

а)



б)

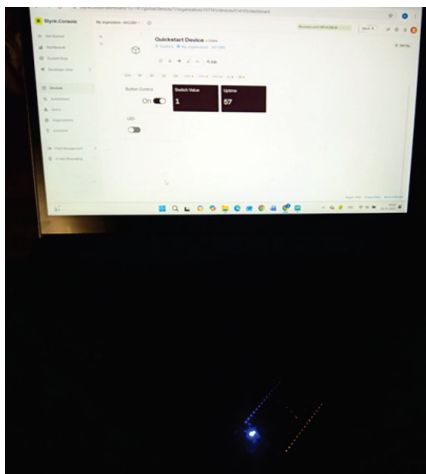


Рис. 11. Керування світлодіодом модуля ESP8266 зі смартфона у застосунку Blynk (а) та з комп'ютера (перевірка зв'язку) (б)

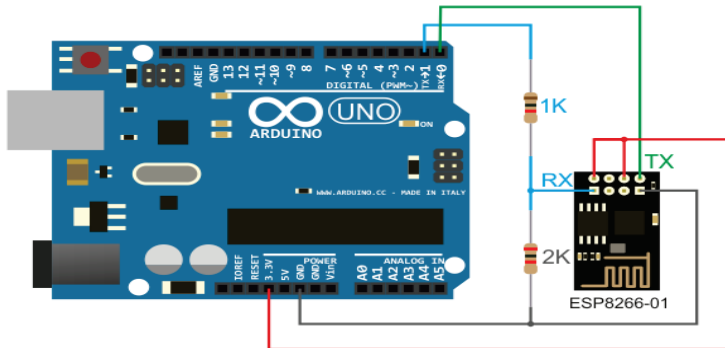


Рис. 12. Схема підключення модуля ESP8266 до контролера Arduino Uno

Програма для контролера Arduino використовує датчик для вимірювання температури повітря у приміщеннях та адаптивно керує двигуном вентилятора залежно від отриманих показників. Емуляція технічного та програмного рішення роботи інтелектуальної САУ виконувалася у програмному середовищі Tinkercad [7].

У проєкті використовувалися такі компоненти:

датчик температури TMP36 – аналоговий сенсор, який вимірює температуру навколишнього середовища і видає відповідну напругу на виході;

макетна плата (breadboard) – пристрій для швидкого збирання електронних схем без паяння (має ряди отворів із внутрішніми металевими контактами для з'єднання виводів компонентів, що дозволяє легко змінювати конфігурацію схеми).

Основні характеристики датчика TMP36:

тип сигналу: аналоговий (вихідна напруга змінюється відповідно до температури);

діапазон температур: від -40°C до $+125^{\circ}\text{C}$;

точність: приблизно $\pm 1^{\circ}\text{C}$ у діапазоні кімнатних температур;

вихідна напруга при 25°C : приблизно 0,75 В;

калібрування: 10 мВ на кожен градус Цельсія ($0,01\text{ В}/^{\circ}\text{C}$);

живлення: 2,7 В – 5,5 В (можливе пряме підключення до Arduino);

Формула для обчислення температури (у градусах Цельсія):

$$T(^{\circ}\text{C}) = (V_{out} - 0.5) \cdot 100,$$

де V_{out} – напруга на виході датчика TMP36 (В).

Макетна плата використовується для полегшення під'єднання елементів до Arduino UNO. Датчик має вбудований термістор, тому додатковий резистор не потрібен. Лівий дріт датчика відповідає за живлення, середній видає значення V_{out} , а крайній правий – за заземлення.

Виконання роботи у віртуальному середовищі Tinkercad дозволило протестувати схему без фізичних компонентів. Датчик TMP36 продемонстрував стабільну роботу та високу точність вимірювань; його можна успішно застосовувати в системах клімат-контролю приміщень та провізійних установках судна.

Контролер Arduino дозволяє зчитувати сигнали з датчиків і керувати іншими пристроями (світлодіодами, моторами чи дисплеями) за допомогою програмування мовою C/C++ у середовищі розробки Arduino IDE.

Слід врахувати, що для реалізації технічного проєкту на судні з потужними електродвигунами передбачається силове розв'язання.

Arduino реалізує нейромережевий алгоритм управління, а силову частину (220 В, 5 кВт — потужність вентилятора) комутує електромагнітний контактор. Схема підключення у віртуальному середовищі моделювання САУ показана на рис. 13.

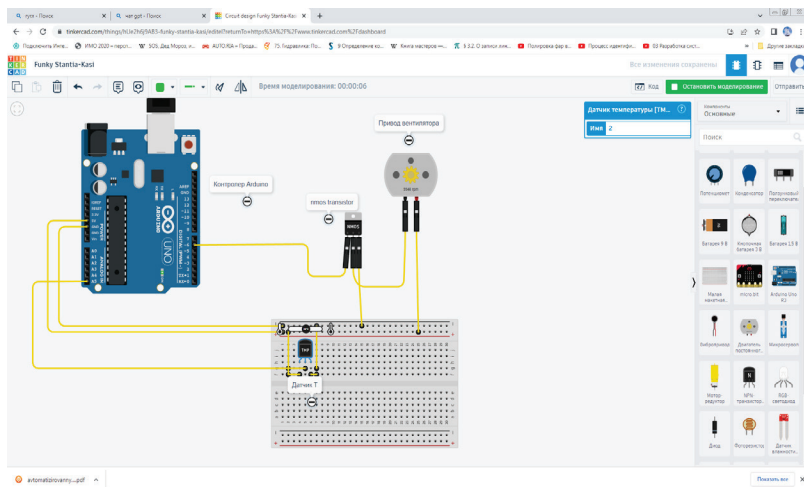


Рис. 13. Схема підключення контролера до датчика та двигуна вентилятора

На відміну від класичного ПД-регулятора, де такі параметри, як коефіцієнти посилення, налаштовуються заздалегідь і залишаються незмінними, нейромережа може навчатися в процесі експлуатації та підбирати вагові коефіцієнти для оптимізації роботи приводу вентилятора. Це особливо важливо для суднових систем вентиляції, де умови роботи постійно змінюються: температура навколишнього середовища, завантаження судна, кількість людей у приміщеннях, тепловиділення обладнання тощо.

Нейромережеві алгоритми ефективно працюють із нелінійними та складними об'єктами управління. Суднова вентиляційна система є багатозв'язною та нелінійною, а її точна математична модель часто невідома або занадто складна. На відміну від ПД-регулятора, який добре працює лише для відносно простих лінійних систем, нейромережа здатна апроксимувати складні залежності без явного задання моделі.

Для реалізації нейромережевого управління з плавною зміною швидкості обертання вентилятора залежно від температури повітря в приміщеннях судна було написано програмний код.

```
// ==== ПІДКЛЮЧЕННЯ ====  
// TMP36 -> A5  
// MOSFET / вентилятор -> D6 (PWM)  
const int tempPin = A5;  
const int fanPin = 6;  
// Межі температури  
const float minTemp = 20.0;  
const float maxTemp = 50.0;  
// Межі PWM  
const int minPWM = 100;  
const int maxPWM = 255;  
// Параметри навчання  
float learningRate = 0.05;  
// Ваги нейромережі (тепер HE const)  
float w1 = 2.5, b1 = -1.2;  
float w2 = -2.0, b2 = 1.0;  
float v1 = 0.7, v2 = 0.3;  
float b_out = 0.0;  
// Змінна плавності  
float smoothPWM = 0;  
// tanh похідна  
float dtanh(float x) {
```

```
    return 1.0 - x * x;
}
void setup() {
    Serial.begin(9600);
    pinMode(fanPin, OUTPUT);
}
void loop() {
    // ===== ЗЧИТУВАННЯ TMP36 =====
    int rawValue = analogRead(tempPin);
    float voltage = rawValue * (5.0 / 1023.0);
    float temperature = (voltage - 0.5) * 100.0;
    // ===== НОРМАЛІЗАЦІЯ =====
    float normTemp = (temperature - minTemp) / (maxTemp - minTemp);
    normTemp = constrain(normTemp, 0.0, 1.0);
    // ===== ПРЯМИЙ ПРОХІД =====
    // =====
    float h1 = tanh(w1 * normTemp + b1);
    float h2 = tanh(w2 * normTemp + b2);
    float output = v1 * h1 + v2 * h2 + b_out;
    float nnValue = (output + 1.0) / 2.0;
    nnValue = constrain(nnValue, 0.0, 1.0);
    // ===== ЦІЛЬ (що хочемо) =====
    // Чим вища температура → тим більший PWM
    float target = normTemp;
    // ===== ПОМИЛКА =====
    float error = target - nnValue;
    // =====
    // ===== BACKPROP =====
    // =====
    // Градієнт виходу
    float dOut = error;
    // Оновлення вихідних ваг
    v1 += learningRate * dOut * h1;
    v2 += learningRate * dOut * h2;
    b_out += learningRate * dOut;
    // Помилка для прихованого шару
    float dH1 = dOut * v1 * dtanh(h1);
    float dH2 = dOut * v2 * dtanh(h2);
    // Оновлення ваг прихованого шару
    w1 += learningRate * dH1 * normTemp;
```

```

b1 += learningRate * dH1;
w2 += learningRate * dH2 * normTemp;
b2 += learningRate * dH2;
// =====
// ===== PWM =====
// =====
float targetPWM = minPWM + nnValue * (maxPWM - minPWM);
smoothPWM = smoothPWM + 0.1 * (targetPWM - smoothPWM);
analogWrite(fanPin, (int)smoothPWM);
// ===== ВИБІД =====
Serial.print("Temp: ");
Serial.print(temperature);
Serial.print(" | PWM: ");
Serial.print((int)smoothPWM);
Serial.print(" | Error: ");
Serial.println(error);
delay(200);
}

```

Робота нейромережевої САУ показана на рис. 14.

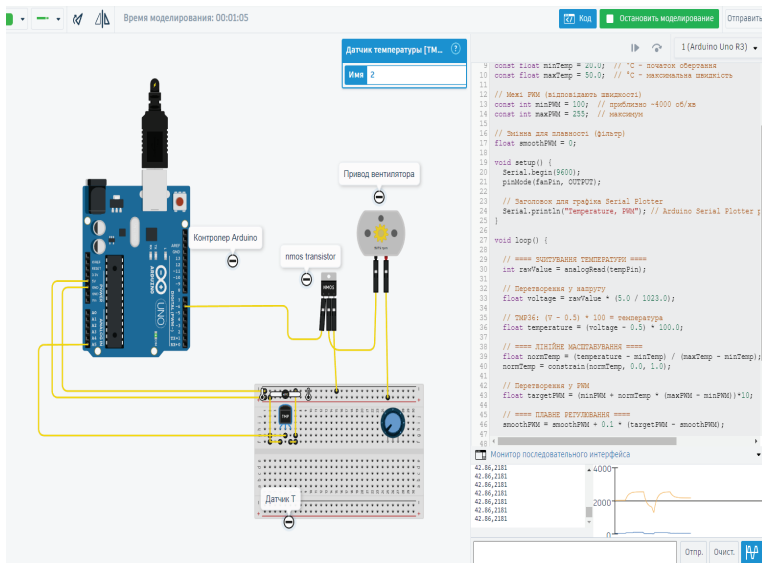


Рис. 14. Нейромережева САУ двигуном вентилятора та перехідні процеси

При моделюванні зміни температури повітря спостерігається плавне та динамічне регулювання частоти обертання двигуна. Зі зростанням температури пропорційно збільшується швидкість обертання з наступним аналогічним зниженням при охолодженні. Отримані результати підтверджують ефективність функціонування запропонованої системи.

У ході виконання проекту було реалізовано успішне підключення модуля ESP8266 до хмарної IoT-платформи Blynk, що дозволило організувати дистанційний моніторинг та керування пристроєм через мобільний застосунок. Проведені налаштування продемонстрували простоту інтеграції ESP8266 з інфраструктурою Blynk та високу ефективність такої взаємодії.

Завдяки використанню готових бібліотек та інструментів Blynk забезпечено стабільний обмін даними між мікроконтролером та сервером у режимі реального часу. Це дало можливість оперативно передавати показники сенсорів, керувати виконавчими пристроями, а також отримувати зворотний зв'язок у мобільному застосунку».

Також використання нейромережевого алгоритму управління дозволяє враховувати не лише поточне значення температури, а й її зміну в часі, прогножуючи подальшу поведінку системи. Це дає можливість заздалегідь коригувати швидкість вентилятора, запобігаючи перегріву або переохолодженню. Таким чином, впровадження у судові системи моніторингу запропонованих технічних і програмних рішень дозволяє вирішити низку науково-прикладних завдань з дистанційного та адаптивного управління судовими агрегатами.

ЛІТЕРАТУРА REFERENCES

1. Furfaro R., Konovalenko I., Kim Y. A survey on maritime perception datasets and technologies for autonomous surface vessels // *Autonomous Robots*. – 2026. – Т. 50. – № 2. – С. 1 – 28.
2. Scarlat C., Andrei N. Trends and Challenges in Autonomous Maritime Transport Systems // *Journal of Marine Science and Engineering*. – 2023. – Vol. 11. – No. 4. – P. 746 – 760.
3. Михайленко, В.С., Коренкова, Г.В., Лещенко, В.В., Мартинович, Л.Я. Методика синтезу нейро - нечітких систем адаптивного управління з функцією параметричної ідентифікації. // *Системні технології*. – 2024. – Т.6. – № 155. – С.1014 – 1018.

4. S. Ahvenjärvi. Platform for Development of the Autonomous Ship Technology. – CRC Press, 2017. – С. 359 – 363.
5. Saputri F.R., Linelson R., Salehuddin M., Nor D.M., Ahmad M.I. Design and development of an irrigation monitoring and control system based on Blynk Internet of Things and ThingSpeak // PLOS ONE. – 2025. – Vol. 20. – No. 4. – P. 32 – 50.
6. Banzi M., Shiloh M. Getting Started with Arduino: The Open Source Electronics Prototyping Platform. – 4th ed. – Sebastopol: O'Reilly Media, 2022. – 264 p.
7. Kurniawan A. Learning Arduino Simulation Using Tinkercad Circuits // International Journal of Advanced Computer Science and Applications. – 2023. – Vol. 14. – No. 6. – P. 512 – 518.

Abstract. This article is devoted to researching the possibilities of integrating modern Industrial Internet of Things (IIoT) tools into the maritime industry within the Smart Shipping concept. The authors analyze the technical potential of the universal Blynk IoT platform as a flexible and cost-effective alternative to traditional marine monitoring systems, which are often characterized by closed architecture and high implementation costs.

The main focus is on the development and testing of a technical prototype for an intelligent remote control system for marine equipment. As part of the research, an adaptive fan motor control system was designed based on the Arduino Uno microcontroller, the ESP8266 Wi-Fi module, and the TMP36 precision analog temperature sensor.

The scientific novelty of the work lies in the implementation of a neural network control algorithm developed in C++ instead of classical PID controllers. The authors substantiate the advantages of the neural network, particularly its ability to self-learn during operation and adapt to non-linear environmental changes, such as fluctuations in ambient temperature, equipment heat dissipation, and ship room occupancy.

The practical part of the study was implemented through 3D modeling and emulation on the Tinkercad online platform. The developed model allowed testing the stability of data transfer between the controller and the Blynk cloud server in real-time. The graphical user interface (mimic diagram) created in the Blynk application provides the operator with the ability to visualize sensor readings and remotely adjust technical parameters from a smartphone or PC.

The simulation results confirmed the high accuracy of the neural network system, smooth motor speed regulation, and a reduction in mechanical loads on the equipment. The proposed solution demonstrates ease of scalability and high adaptability, enabling the resolution of relevant scientific and applied tasks regarding the intellectualization of remote control for ship units.

УДК 629.5

DOI: 10.31653/1819-3293-2026-1-31-101-111

ARTICLE HISTORY

Received 04.04.2026

Accepted 30.04.2026

Системне оцінювання технологій декарбонізації морського транспорту

Сагін Арсеній Сергійович

Національний університет «Одеська морська академія», Одеса,

Україна

arseniysagin@gmail.com

System Assessment of Maritime Transport Decarbonization Technologies

Sagin Arseniy

NU "Odessa Maritime Academy", Odessa, Ukraine

arseniysagin@gmail.com³

Резюме. У статті розглянуто системне багатокритеріальне оцінювання технологій декарбонізації морського транспорту з урахуванням технічних, економічних, експлуатаційних та інфраструктурних факторів. Дослідження показало, що у короткостроковій перспективі найбільш раціональними є технології поступової декарбонізації, тоді як у довгостроковому часовому горизонті суттєво зростає придатність безвуглецевих енергетичних систем. Отримані результати підтверджують необхідність використання багатотехнологічного та сегментно-орієнтованого підходу до декарбонізації морського транспорту.

Abstract. The article considers a systemic multi-criteria assessment of maritime transport decarbonization technologies considering technical, economic, operational, and infrastructure factors. The study demonstrates that gradual decarbonization technologies remain the most rational in the short-term perspective, while the suitability of zero-carbon energy systems significantly increases in the long-term horizon. The obtained results confirm the necessity of a multi-technology and segment-oriented approach to maritime transport decarbonization.

Декарбонізація морського транспорту є одним із ключових напрямів сучасного енергетичного переходу та скорочення викидів парникових газів у глобальній транспортній системі. Посилення міжнародних екологічних вимог, реалізація ІМО 2023 GHG (Greenhouse Gas) Strategy, зростання вартості традиційних палив і необхідність переходу до низьковуглецевої економіки формують нові технічні та економічні умови функціонування світового судноплавства. Відповідно до сучасних міжнародних цілей морський транспорт повинен забезпечити суттєве зменшення викидів до 2050 року, що стимулює розвиток альтернативних палив, енергоефективних технологій та нових підходів до формування суднових енергетичних систем [1, 2].

Морський транспорт характеризується значною різноманітністю експлуатаційних профілів, рівнів енергоспоживання, автономності та інфраструктурних обмежень. Контейнеровози, балкери, танкери, пасажирські, офшорні та спеціалізовані судна мають різні режими експлуатації й потребують різних енергетичних рішень. У результаті технологія, яка є ефективною для одного сегмента флоту, може бути технічно складною або економічно нераціональною для іншого. Це свідчить про неможливість використання єдиного універсального підходу до декарбонізації морського транспорту. У більшості досліджень морське судно розглядається як інтегрована енергетична та експлуатаційна система, у межах якої взаємодіють корпус судна, рушійна установка, допоміжні механізми, системи енергоспоживання, паливна система та експлуатаційне середовище [3, 4]. Ефективність технологій декарбонізації визначається не лише рівнем скорочення викидів, а й можливістю інтеграції технології у конкретний експлуатаційний профіль судна з урахуванням безпеки, інфраструктурної готовності та економічної доцільності [5, 6].

Для оцінювання технологій декарбонізації доцільно використовувати багатокритеріальний аналіз прийняття рішень (Multi-Criteria Decision Analysis – MCDA) із застосуванням методу рангового оцінювання критеріїв (Rank Order Centroid – ROC) та методу зваженої суми (Simple Additive Weighting – SAW). Запропонований підхід дозволяє інтегрувати технічні, економічні, експлуатаційні та інфраструктурні фактори у єдину систему оцінювання. На відміну від методів, орієнтованих виключно на рівень скорочення викидів, дана структура забезпечує можливість комплексного оцінювання практичної придатності технологій для сучасного морського транспорту [7 - 9]. Концептуальна структура взаємодії суднових систем та факторів декарбонізації морських суден надана на рис. 1.

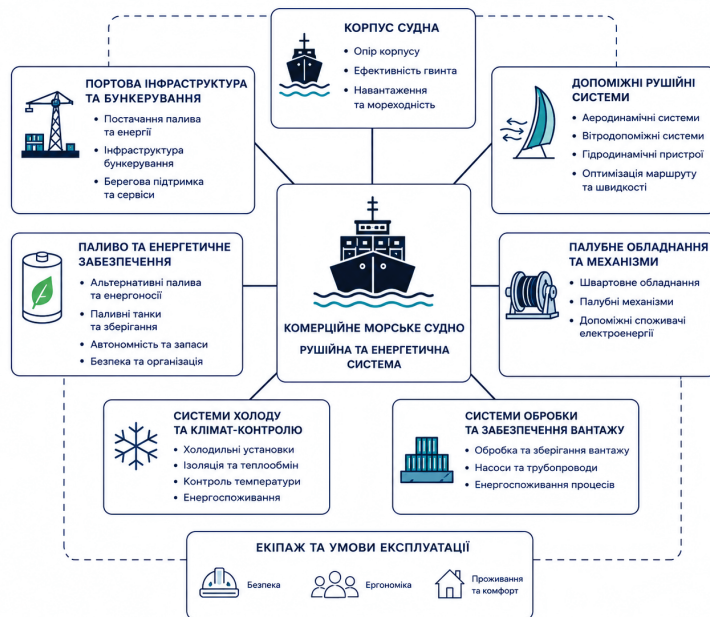


Рис. 1. Концептуальна структура взаємодії суднових систем та факторів декарбонізації морських суден

У межах дослідження проаналізовано десять технологічних альтернатив, що охоплюють як альтернативні паливні рішення, так і заходи підвищення енергоефективності.

До основних альтернативних палив віднесено біопалива, яке складають гідровані рослинні мастила (Hydrotreated Vegetable Oil – HVO), скраплений природний газ (Liquefied Natural Gas – LNG), скраплений природний газ біологічного походження – BioLNG, скраплений біогаз (Liquefied Biogas – LBG), метанол, водень та аміак [10 - 12]. Додатково розглянуто гібридні енергетичні системи, експлуатаційні заходи, гідродинамічні модифікації, утилізацію відпрацьованого тепла та вітропоміжні рушійні системи.

Оцінювання виконувалося за критеріями потенціалу скорочення викидів, технічної придатності, експлуатаційної сумісності, економічної доцільності, доступності інфраструктури, безпеки та технологічної зрілості. Для забезпечення порівнюваності технологій використовувалася єдина п'ятибальна система оцінювання [13, 14].

Динаміка інтегральної придатності основних технологій декарбонізації морських суден відповідно до цієї технології надана на рис. 2.

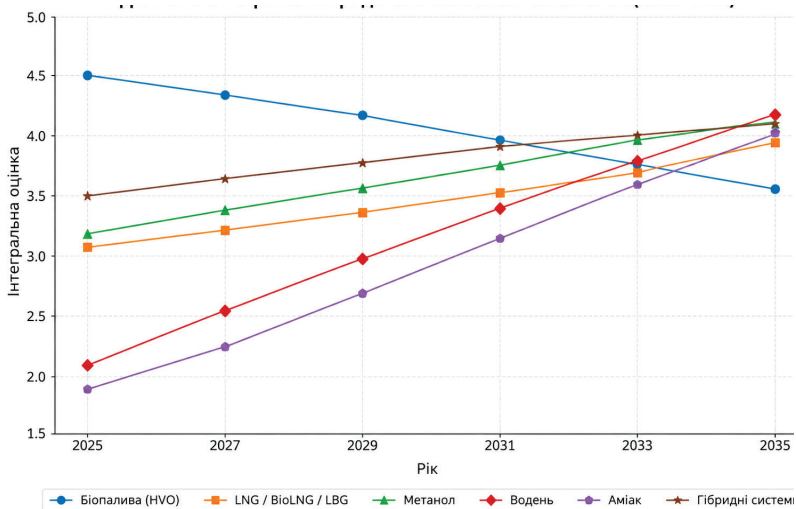


Рис.2. Динаміка інтегральної придатності основних технологій декарбонізації морських суден

Допоміжні технології підвищення енергоефективності також відіграють важливу роль у процесі декарбонізації морського транспорту. Гідродинамічні модифікації корпусу, оптимізація швидкісних режимів, системи утилізації відпрацьованого тепла та вітропоміжні рушійні системи здатні забезпечувати скорочення енергоспоживання у межах 5 ... 25 % залежно від типу судна та умов експлуатації. Хоча такі рішення не забезпечують повної декарбонізації, вони дозволяють суттєво зменшити споживання палива та покращити загальну енергетичну ефективність суден [15 - 17].

Важливою особливістю сучасного енергетичного переходу є поступове формування комбінованих суднових енергетичних систем. Результати дослідження показують, що найбільш ефективними у перспективі можуть стати інтегровані рішення, які поєднуюватимуть альтернативні палива, системи накопичення енергії, цифрові системи оптимізації енергоспоживання та допоміжні енергоефективні технології. Такий підхід дозволяє зменшити технічні ризики та забезпечити більш гнучку адаптацію морського транспорту до змін міжнародних екологічних вимог.

Окрему роль у процесі декарбонізації відіграють інфраструктурні фактори. Рівень розвитку паливної інфраструктури значною мірою визначає швидкість впровадження альтернативних енергетичних рішень.

Для LNG та метанолу вже формується міжнародна мережа бункерування, тоді як для водню та аміаку інфраструктурні обмеження залишаються одним із головних стримувальних факторів. У результаті навіть технології з високим потенціалом скорочення викидів можуть мати обмежене практичне застосування на сучасному етапі розвитку морського транспорту [18 - 20].

Крім інфраструктурних аспектів, суттєвий вплив мають економічні фактори. Вартість модернізації суден, необхідність встановлення нових паливних систем, зміна конструкції паливних танків та впровадження додаткових систем безпеки значно впливають на раціональність використання окремих технологій. Для більшості судновласників короткострокова економічна ефективність залишається одним із ключових критеріїв прийняття рішень, що пояснює збереження високої актуальності технологій поступової декарбонізації [21 - 23].

Важливим результатом дослідження є також підтвердження того, що ефективність технологій декарбонізації суттєво залежить від часового горизонту оцінювання.

Технології, які демонструють високий рівень практичної придатності у короткостроковій перспективі, не обов'язково залишатимуться домінуючими у довгостроковому періоді. Наприклад, біопалива типу HVO та експлуатаційні заходи мають найвищі інтегральні оцінки на початкових етапах декарбонізації завдяки можливості швидкого впровадження без суттєвої модернізації суден. Проте у перспективі до 2035 року їхній потенціал поступово обмежується необхідністю досягнення більш глибокого рівня скорочення викидів.

Водночас водень та аміак, які на сучасному етапі характеризуються високими технічними та інфраструктурними ризиками, у довгостроковому часовому горизонті демонструють значне зростання інтегральної придатності [24, 25]. Це пояснюється очікуваним розвитком технологій зберігання та транспортування палива, удосконаленням паливних елементів, зниженням вартості виробництва «зеленого» водню та поступовим формуванням міжнародної паливної інфраструктури.

Результати оцінювання надані у таблиці 1, у який використана шкала вимірювання від 1 до 5, де 1 – найменша, 5 – найвища оцінка ефективності використання методу чи технології.

Таблиця 1

Узагальнені інтегральні оцінки раціональності технологій

Технологія	2025	2030	2033	2035
Drop-in біопалива / HVO	4,5	4,4	4,1	3,8
LNG / BioLNG / LBG	3,1	3,4	3,9	4,0
Метанол	3,2	3,6	4,0	4,1
Водень	2,1	2,6	3,5	4,2
Аміак	1,9	2,4	3,6	4,3
Гібридні системи	3,5	3,8	4,0	4,0
Експлуатаційні заходи	4,7	4,5	4,2	4,1
Гідродинамічні модифікації	3,0	3,2	3,3	3,8
Утилізація відпрацьованого тепла	2,8	3,0	3,1	3,6
Вітропоміжний рух	2,9	3,1	3,4	3,7

Не менш важливим фактором залишається міжнародне регулювання. Впровадження показнику вуглецевої інтенсивності судна (Carbon Intensity Indicator – CII) та індексу енергоефективності (Energy Efficiency Existing Ship Index – EEXI) та інших екологічних механізмів поступово формує нові вимоги до енергоефективності та вуглецевої інтенсивності морських перевезень. У результаті екологічні критерії стають не лише технічним, а й економічним фактором конкурентоспроможності морського транспорту. Це стимулює судновласників до впровадження технологій декарбонізації навіть у випадках, коли короткострокова економічна ефективність таких рішень залишається обмеженою [26 - 28].

Перспективним напрямом подальших досліджень є також інтеграція життєвого циклу палива та енергетичних систем у структуру багатокритеріального оцінювання. У сучасних умовах ефективність технології визначається не лише експлуатаційними викидами на борту судна, але й повним життєвим циклом виробництва, транспортування та зберігання енергоносіїв. Саме тому дедалі більшого значення набувають підходи Well-to-Wake (підхід комплексного оцінювання викидів парникових газів протягом усього паливного циклу – від виробництва палива до його використання на борту судна) та Life Cycle Assessment (оцінювання життєвого циклу технології або продукту з урахуванням екологічного впливу на всіх етапах виробництва,

експлуатації та утилізації.), які дозволяють оцінювати реальний екологічний ефект альтернативних палив[29, 30].

Для окремих технологій різниця між локальним скороченням викидів та повним життєвим циклом може бути суттєвою. Наприклад, ефективність водню або аміаку значною мірою залежить від джерела виробництва енергії. Використання «зеленого» водню, виробленого за рахунок відновлюваних джерел енергії, забезпечує значно вищий екологічний ефект порівняно з технологіями, що базуються на викопному паливі.

Крім екологічних аспектів, подальший розвиток морського транспорту буде залежати від швидкості технологічної модернізації світового флоту. Значна частина існуючих суден була спроектована для використання традиційних паливних систем, тому повний перехід до безвуглецевих технологій потребуватиме тривалого періоду адаптації. У багатьох випадках модернізація існуючих суден є технічно складною або економічно обмеженою, що додатково підсилює актуальність перехідних технологій декарбонізації [31 - 33].

Важливим фактором залишається і нерівномірність розвитку міжнародної портової інфраструктури. Навіть за умови активного розвитку альтернативних енергетичних систем окремі регіони можуть суттєво відрізнятися за рівнем готовності до використання нових палив. Це створює додаткові експлуатаційні ризики для суден, які працюють на глобальних маршрутах, та обмежує швидкість переходу до окремих безвуглецевих рішень.

У результаті найбільш реалістичним сценарієм розвитку морського транспорту у найближчі десятиліття є поєднання кількох напрямів декарбонізації одночасно. До таких напрямів належать підвищення енергоефективності, використання перехідних альтернативних палив, розвиток гібридних енергетичних систем та поступове впровадження безвуглецевих технологій.

Запропонований у дослідженні багатокритеріальний підхід дозволяє враховувати складний взаємозв'язок між технічними характеристиками суден, економічними факторами, інфраструктурними обмеженнями та міжнародними екологічними вимогами. Це забезпечує можливість формування більш обґрунтованих стратегій декарбонізації як для окремих суден, так і для морського транспорту в цілому [34 - 36].

Результати дослідження підтверджують необхідність переходу від універсальних моделей декарбонізації до сегментно-орієнтованих підходів, які враховують специфіку експлуатації різних типів морських суден та особливості їх енергетичних систем. Використання

багатокритеріального аналізу створює основу для комплексного оцінювання технологій декарбонізації та може бути використане під час формування довгострокової політики розвитку морського транспорту в умовах глобального енергетичного переходу.

ЛІТЕРАТУРА REFERENCES

1. Sagin S, Haichenia O., Karianskyi S., Kuropyatnyk O., Razinkin R., Sagin A., Volkov O. Improving Green Shipping by Using Alternative Fuels in Ship Diesel Engines // *Journal of Marine Science and Engineering*. – 2025. – Vol. 13(3). – P. 589.
2. Сагін С.В., Мадей В.В., Сагін А.С. Робота суднового дизеля на біодизельному паливі // *Автоматизація суднових технічних засобів : наук.-техн. зб.* – 2021. – Вип. 27. – С. 93 - 107.
3. Сагін С.В., Куропятник О.А. Визначення оптимальних режимів експлуатації суднових двигунів внутрішнього згоряння під час використання біодизельного палива // *Суднові енергетичні установки: наук.-техн. зб.* – 2024. – Вип. 48. – С. 100 - 113.
4. Заблоцький Ю.В. Підвищення економічності роботи суднових дизелів // *Суднові енергетичні установки : наук.-техн. зб.* . – 2020. – Вип. 40. – С. 12 - 16.
5. Мадей В.В., Сагін С.В., Волков О.М. Управління процесом впорскування під час використання в суднових дизелях паливних сумішей до складу яких входить паливо біологічного походження // *Водний транспорт. Збірник наукових праць.* – 2024. – Вип. 1(39). – С. 193 - 205.
6. Zablotsky Yu.V., Sagin S.V. Maintaining Boundary and Hydrodynamic Lubrication Modes in Operating High-pressure Fuel Injection Pumps of Marine Diesel Engines // *Indian Journal of Science and Technology*. – 2016. – Vol. 9. – Iss. 20. – P. 208 - 216.
7. Zablotsky Yu.V., Sagin S.V. Enhancing Fuel Efficiency and Environmental Specifications of a Marine Diesel When using Fuel Additives // *Indian Journal of Science and Technology*. – 2016. – Vol. 9. – Iss. 46. – P. 353 - 362.
8. Сагін С.В., Заблоцький Ю.В. Діагностування технічного стану суднових енергетичних установок засобів водного транспорту // *Водний транспорт.* – 2023. – № 2(38). – С. 164 - 175.
9. Мадей В.В., Заблоцький Ю.В., Сагін А.С. Оцінка ефективності використання палива біологічного походження в суднових дизелях // *Розвиток транспорту.* – 2025. – № 2. – С. 71 - 85.

10. Сагін С.В., Заблоцький Ю.В., Сагін А.С. Підвищення економічності роботи суднових середньообертових дизелів // Водний транспорт: збірник наукових праць. – 2025. – Вип. 1(42). – С. 166 - 179.

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

12. Марченко О.О., Сагін С.В. Вдосконалення процесу очищення суднових важких палив // Суднові енергетичні установки: наук.-техн. зб. – 2020. – Вип. 41. – С. 10 - 14.

13. Malukas A., Lebedevas S. Decarbonization and Improvement of Energy Efficiency of FSRU by Cryogenic CO₂ Capture // Journal of Marine Science and Engineering. – 2025. – Vol. 13. – P. 770.

14. Drazdauskas M., Lebedevas S. Optimization of Combustion Cycle Energy Efficiency and Exhaust Gas Emissions of Marine Dual-Fuel Engine by Intensifying Ammonia Injection // Journal of Marine Science and Engineering. – 2024. – Vol. 12. – P. 309.

15. Drazdauskas M., Lebedevas S. Numerical Study on Optimization of Combustion Cycle Parameters and Exhaust Gas Emissions in Marine Dual-Fuel Engines by Adjusting Ammonia Injection Phases // Journal of Marine Science and Engineering. – 2024. – Vol. 12. – P. 1340.

16. Сагін С.В., Куропятник О.А., Руснак Д.Ю., Парменова Д.Г. Зниження емісії оксидів сірки з випускними газами суднових дизелів шляхом ультразвукової обробки палива // Автоматизація суднових технічних засобів: наук.-техн. зб. – 2025. – Вип. 30. – С. 121 - 138.

17. Сагін С.В., Куропятник А.А. Оптимизация режимов работы системы перепуска выпускных газов судовых среднеоборотных дизелей // Автоматизация судовых технических средств: науч. -техн. сб. – 2019. – Вып. 25. – С. 79-89.

18. Сагін С.В., Куропятник О.А. Аналіз впливу біодизельного палива на екологічні та економічні показники роботи суднових дизелів // Водний транспорт. Збірник наукових праць. – 2025. – Вип. 1(42). – С. 180 - 194.

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

20. Сагін А.С., Сагін С.В. Експериментальне визначення оптимальних фаз подачі палива в циліндр суднових дизелів // Водний транспорт. Збірник наукових праць. – 2024. – Вип. 1(39). – С. 206 - 215.

21. Горб С.И., Горб А.С. Програмное обеспечение для управления активами на судах // Автоматизация судовых технических средств: науч.-техн. сборник. – 2018. – Вип. 24. – Одесса : ОНМА. – С. 34 - 48.

22. Сагін С.В., Бондар С.А., Столярик Т.О. Оцінка безвідмовності суднових дизелів за технічним станом моторного мастила циркуляційних систем мащення // Водний транспорт. – 2023. – № 1(37). – С. 59 - 70.
23. Сагін С.В., Сагін А.С. Контроль та діагностування надійності та економічності дизелів морських та річкових засобів транспорту // Суднові енергетичні установки : наук.-техн. зб. – 2023. – Вип. 46. – С. 118 - 131.
24. Горб С.И., Каменева А.В., Запороженко Н.В. Модернизация структуры упрощённой системы технического менеджмента судов // Автоматизация судовых технических средств: науч.-техн. сб. – 2016. – Вип. 22. – Одесса: ОНМА. – С. 33 - 38.
25. Сагін С.С., Сагін С.В. Використання штучного інтелекту в ситуаціях надмірного зближення суден // Водний транспорт. Збірник наукових праць. – 2024. – Вип. 1(39). – С. 215 - 225.
26. Сандлер, А. К., Опрышко, М. О. Волоконно-оптический датчик контроля состояния технических жидкостей и газов // X міжнародна науково-методична конференція "Суднова електроінженерія, електроніка і автоматика", 24.11.2020 - 25.11.2020 р.: матеріали конференції. – Одеса: НУ "ОМА". – 2020. – С. 63 - 68. DOI:10.31653/2706-7874.SEEEA-2020.11.1-245.
27. Сандлер, А. К., Данчук, Д. П. Засіб підвищення ефективності моніторингу стану вантажу на судах-газовозах на основі волоконно-оптичних технологій // Автоматизація технологічних і бізнес-процесів. – 2021. – Т. 13. – №. 4. – Одеса: ОНАХТ. – С. 18 - 26. DOI: 10.15673/atbp.v13i4.2202.
28. Горб С.И. Повышение точности численного моделирования рабочих процессов дизелей // Автоматизация судовых технических средств: науч.-техн. сб. – 2020. – Вип. 26. – Одесса: НУ «ОМА». – С. 3 - 26.
29. Поповский А.Ю., Сагин С.В. Оценка эксплуатационных свойств смазочно-охлаждающих жидкостей судовых технических средств // Автоматизация судовых технических средств: науч.-техн. сб. – 2016. – Вип. 22. – С. 66 - 74.
30. Заблоцький Ю.В. Аналіз особливостей процесу мащення циліндрової групи суднових дизелів // Суднові енергетичні установки : науково-технічний збірник. – 2023. – Вип. 46. – Одеса: НУ «ОМА». – С. 67-78. doi: 10.31653/10.31653/smf46.2023.67-78.
31. Сагин С.В. Повышение надежности работы прецизионных пар топливной аппаратуры судовых дизелей за счет использования органических покрытий // Вісник Одеськ. нац. мор. ун-ту. – 2018. – Вип. 4(57). – С. 109 - 120.

32. Горб С.И. Оптимизация главного двигателя на режиме экономического хода судна // Автоматизация судовых технических средств: науч.-техн. сб. – 2019. – Вып. 25. – Одесса: НУ «ОМА». – С. 17 - 34.

33. Сандлер, А. К., Карпілов, О. Ю., Удолатій, В. Б. Волоконно-оптичний пристрій для систем автоматизованого екологічного моніторингу // Automation of Technological and Business Processes. – 2024. – № 16 (3). – Р. 95 - 99. <https://doi.org/10.15673/atbp.v16i3.2880>.

34. Сандлер, А. К., Цюпко, Ю. М., Сандлер, О. А., Цюпко, К. Ю. Схемотехнічне рішення комбінованого датчика клімат-контролю // Автоматизация судовых технических средств. – 2014. – Вып. 19. – Одесса: ОНМА. – С. 69 - 73.

35. Заблочкий Ю.В. Исследование влияния органических покрытий на работу элементов топливной аппаратуры высокого давления судовых дизелей // Судовые энергетические установки: науч.-техн. сб. – 2015. – № 35. – Одесса: НУ ОМА. – С. 83-92.

36. Sagin S., Sagin A., Zablotskyi Y., Fomin O., Pišt'ek V., Kučera P. Method for Maintaining Technical Condition of Marine Diesel Engine Bearings // Lubricants. – 2025. – Vol. 13(4). – P. 146. <https://doi.org/10.3390/lubricants13040146>.

Abstract. The article considers modern approaches to maritime transport decarbonization under the conditions of the global energy transition, strengthening international environmental regulations, and the necessity to reduce greenhouse gas emissions in shipping. The study analyzes the implementation of alternative fuels and energy-efficiency technologies for different segments of the maritime fleet considering technical, economic, operational, and infrastructure factors. A marine vessel is considered as an integrated energy and operational system whose efficiency depends on the interaction of energy, technological, and operational parameters. A multi-criteria decision-making approach (MCDA) combined with ROC weighting and the SAW method was applied for the assessment of decarbonization technologies. The study includes the analysis of alternative fuel solutions such as drop-in/HVO biofuels, LNG/BioLNG/LBG, methanol, hydrogen, and ammonia, as well as supporting energy-efficiency technologies. Dynamic assessment of the technologies was performed within the time horizon up to 2050. The results demonstrate that gradual decarbonization technologies remain the most rational solutions in the short-term perspective, while the suitability of zero-carbon energy systems significantly increases in the long-term horizon. The obtained results confirm the necessity of a segment-oriented and multi-technology approach to maritime transport decarbonization.

УДК 629.5

DOI: 10.31653/1819-3293-2026-1-31-112-125

ARTICLE HISTORY

Received 04.04.2026

Accepted 30.04.2026

Управління екологічними показниками суднових дизелів під час використання палива біологічного походження

Сагін Сергій Вікторович¹, Парменова Дана Георгіївна²,
Власюк Петро Петрович³

Національний університет «Одеська морська академія», Одеса,
Україна

saginsergii@gmail.com¹, parmenovadana12@gmail.com²,
vlasyk@gmail.com³

Regulation of environmental performance of marine diesel engines when using fuel of biological origin

Sagin Sergii, Dana Parmenova, Vlasyk Petro

NU "Odessa Maritime Academy", Odessa, Ukraine

saginsergii@gmail.com¹, parmenovadana12@gmail.com²,
vlasyk@gmail.com³

Резюме. Розглянуто технологію контролю екологічних показників суднових дизельних двигунів під час використання палива біологічного походження. Для суднового дизеля 9S50ME MAN-B&W встановлено, що під час використання паливних сумішей, до складу яких входить паливо нафтового походження RMG380 та паливо біологічного походження FAME B100, можливо експериментальне визначення кутів випередження подачі палива за якими забезпечується мінімальне збільшення емісії оксидів азоту з одночасним близьким до максимального зниження емісії діоксидів вуглецю.

Summary. The technology of controlling the environmental performance of marine diesel engines when using fuel of biological origin is considered. For the 9S50ME MAN-B&W marine diesel engine, it was found that when using fuel mixtures that include RMG380 petroleum fuel and FAME B100 biological fuel, it is possible to experimentally determine the fuel advance

angles that ensure a minimal increase in nitrogen oxide emissions with a simultaneous close to maximum reduction in carbon dioxide emissions.

Дизелі відносяться до найбільш розповсюджених теплових двигунів, що використовуються на судах морського та внутрішнього водного транспорту [1-3]. Перш за все це пов'язане з найменшою у порівнянні з іншими типами теплових двигунів (парових котлів та газових турбін) питомою витратою палива та найбільшим у порівнянні з цими же тепловими двигунами коефіцієнтом корисної дії. До безумовних переваг судових дизелів також відноситься можливість збільшення їхньої потужності шляхом збільшення кількості циліндрів за умовою таких ж самих їхніх геометричних розмірів – методу, що неможливий для парових котлів та газових турбін [4 - 6].

Отримання корисної роботи у судових дизелях неможливо без використання рідкого палива – джерела енергії, що використовується у 95 ... 98 % зі всієї кількості дизелів, що на теперішній час знаходяться у експлуатації [7 - 9]. У останні роки на судах морського транспорту встановлюються дизелі класу Dual Fuel, що працюють як на рідкому паливі нафтового походження, також і на нафтовому або природному газі. При цьому у більшості випадків ці дизелі встановлюються на судах, як перевозять нафтовий чи природний газ як вантаж, частина якого використовується як паливо для дизелів. Одночасно з цим ці судна виконують баластні навігаційні переходи, протягом яких експлуатація дизелів виконується на рідкому паливі нафтового походження. Ще менша кількість морських суден обладнана дизелями, під час експлуатації яких використовуються метилові спирти або ефіри. За різними оцінками, рідке паливо нафтового походження буде займати домінуючий стан порівняно з іншими видами палива на протязі найближчих 15 ... 20 років.

Згоряння палива нафтового походження у судових дизелях супроводжується утворенням випускних газів та їхнім потраплянням у атмосферу. Випускні гази судових дизелів є багатокomпонентною сумішшю до складу якої у тому числі входять токсичні речовини (насамперед оксиди азоту NO_x) та речовини, що призводять до збільшення парникового ефекту (насамперед діоксид вуглецю CO_2). За цими показниками виконується оцінка екологічності роботи судових дизелів. Через це експлуатація судових дизелів виконується з забезпеченням мінімально можливого рівню емісії вказаних речовин. Вміст оксидів азоту у випускних газах судових дизелів регламентується вимогами Додатку VI МАРПОЛ та залежить від року побудови судна та частоти обертання валу дизеля. Рівень емісії діоксиду вуглецю не регламентується міжнародними вимогами, але є

основною складовою, за якою оцінюється декарбонізація та зелене судноплавство [10 - 12].

Водночас з цим, потреби в рідкому паливі постійно зростають. Його використання як і раніше поширюється на всі види транспорту – автомобільного, авіаційного, залізничного, водного (як для морських суден, також і для суден внутрішнього водного транспорту). Природні запаси нафти (як основного джерела рідкого палива) щорічно знижуються, відкриття нових родовищ перестає бути реальністю, обсяги видобутку регламентуються країнами-виробниками та залежать від політичних ризиків [13, 14].

Зазначено є однією з причин використання в дизелях морських суден альтернативних видів палива, ненафтового походження. Інтенсивні дослідження можливості його застосування проводять у даний час у різних країнах [15 - 17]. Основними видами альтернативного палива є: зріджені горючі гази, водень, спирти та їх суміші з нафтовим паливом, рослинні олії, штучне газове та рідке паливо (біогаз та біопаливо). Одним з найбільш розповсюджений видів альтернативного палива є біодизельне [18 - 20]. Головною перевагою цього палива над іншими є збіг його основних характеристик (насамперед густини на в'язкості) з нафтовим паливом [21 - 23]. Це дає змогу використовувати для подачі впорскування біодизельного палива в циліндр дизеля ту ж саму паливну апаратуру, яка використовується для впорскування нафтового палива [24 - 26]. Також відпадає необхідність додаткового встановлення окремої паливної системи. Перекачування та подача біодизельного палива до паливної апаратури високого тиску може здійснюватися за допомогою того ж самого обладнання, що використовується для перекачування та подачі нафтового палива [27 - 29]. Виникає лише необхідність у встановленні додаткових витратних цистерн біодизельного палива та змішувальної або дозуючої установки за допомогою якої біодизельне паливо додається до об'єму нафтового палива.

Через відмінний від нафтового палива структурний, елементний та фракційний склад, згоряння біодизельного палива відбувається з іншою ефективністю. Це призводить до зміни екологічних показників роботи суднових дизелів та спонукає до пошуків найбільш раціональних режимів їх експлуатації під час використання палива біологічного походження [31, 32].

Дослідження, що були спрямовані на регулювання екологічних показників суднових дизелів під час використання палива біологічного походження, виконувались на судні класу Ro-Ro. Основні характеристики судна наведені у табл. 1. Як головний двигун на судне встановлено судновий дизель 9S50ME MAN-B&W, основні характеристики якого наведені у табл. 2.

Таблиця 1

Основні характеристики судна

Параметр	Значення
Довжина максимальна, м	183,3
Довжина між перпендикулярами, м	172,8
Ширина за мідельшпангоутом, м	32,1
Осадка у повному вантажу, м	9,15
Висота, м	45,8
Водотоннажність, тонн	27994
Дедвейт, тонн	13523
Вантажомісткість, автомобілів	4910
Рік побудови	2014

Таблиця 2

Основні характеристики дизеля 9S50ME MAN-B&W

Тип	Двотактний
Діаметр циліндра, м	0,5
Хід поршня, м	2,0
Частота обертання, хв ⁻¹	127
Кількість циліндрів	9
Ефективна потужність, кВт	14220

Під час знаходження судна у зонах спеціального екологічного контролю SECAs експлуатація дизеля виконувалась з використанням палива DMA10. Під час знаходження судна поза SECAs експлуатація дизеля виконувалась з використанням палива RMG380. Також для дизеля було передбачено використання біопалива FAME B100. Основні характеристики палив надані у таблиці 3.

Через меншу у порівнянні з паливом нафтового походження нижчу теплотворну здатність, паливо біологічного походження у більшості випадків не використовується як окреме джерело енергії. Найбільшого поширення вона набуло у складі сумішей з нафтовим паливом. Збіг

значень густина палива біологічного походження та нафтового палива дозволяє виготовлювати їхні суміші безпосередньо у паливній системі дизелів, шляхом використання дозерних установок [33 - 35].

Таблиця 3

Основні характеристики палив

Параметр	DMA10	RMG380	FAME B100
Вміст в паливі:			
вуглецю С	87,3	85,2	77,2
водню Н	11,8	10,1	12,2
сірки S	0,08	0,5	0,003
кисню О	0,31	1,47	10,38
вологи W	0,07	0,1	0,062
золи А	0,44	2,63	0,155
Параметр	DMA10	RMG380	FAME B100
В'язкість за 15° С, мм ² /с	6,3	363	83
Густина за 15° С, кг/м ³	868	916	894
Нижча теплотворна здатність, Q _н , кДж/кг	42220	39630	37250

Дослідження з визначення впливу палива біологічного походження на екологічні показники суднового дизеля 9S50ME MAN-B&W виконувалось для паливних сумішей, які складали 95 % палива RMG380 та 5 % палива FAME B100, а також 90 % RMG380 та 10 % FAME B100, 85 % RMG380 та 15 % FAME B100. Навантаження на дизель 9S50ME MAN-B&W змінювалось у діапазоні 60 ... 90 % від номінальної потужності. Основними екологічними показниками, що вимірювались під час досліджень, були емісія оксидів азоту NO_x та емісія діоксиду вуглецю CO₂. Результати досліджень наведені у табл. 4, 5.

Таблиця 4

Емісія оксидів азоту NO_x, г/(кВт·год), під час різних умов експлуатації суднового дизеля 9S50ME MAN-B&W

Навантаження	RMG380	95 % RMG380 + 5 % B100	90 % RMG380 + 10 % B100	85 % RMG380 + 15 % B100
60	9,56	10,64	10,86	11,07
70	10,65	11,86	12,24	12,49
80	11,14	12,58	12,89	13,07
90	11,48	13,09	13,37	13,56

Таблиця 5

Емісія діоксиду вуглецю CO₂, %, під час різних умов експлуатації
суднового дизеля 9S50ME MAN-B&W

Наван- таження	RMG380	95 % RMG380 + 5 % B100	90 % RMG380 + 10 % B100	85 % RMG380 + 15 % B100
60	5,93	5,39	5,27	5,17
70	6,16	5,46	5,38	5,29
80	6,36	5,53	5,47	5,36
90	6,56	5,65	5,55	5,42

Для кращої візуалізації результати, що наведені у табл. 4,5, подані у вигляді діаграм (рис. 1).

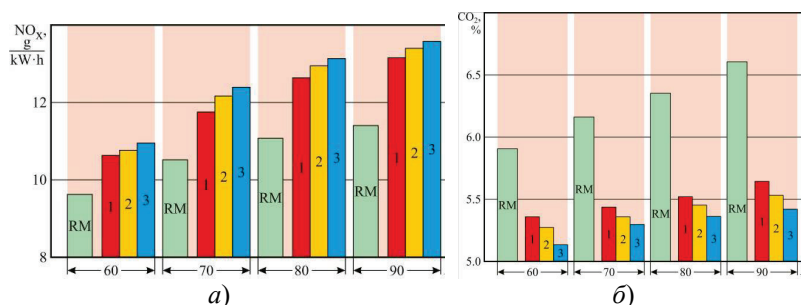


Рис. 1. Емісія оксидів азоту NO_x (а) та діоксиду вуглецю CO₂ (б) під час різних умов експлуатації суднового дизеля 9S50ME MAN-B&W: RM – паливо RMG380; 1, 2, 3 – суміші 95 % RMG380 + 5 % B100, 90 % RMG380 + 10 % B100, 85 % RMG380 + 15 % B100 відповідно

Результати, що наведені у табл. 4, 5 та на рис. 1, свідчать, про різноспрямованість дії палива біологічного походження на екологічні показники роботи суднових дизелів, а саме призводять до збільшення емісії оксидів азоту та зменшення діоксиду вуглецю. Це пояснюється більшим вмістом кисню у складі палива біологічного походження. Під час згоряння подібного палива збільшується температура в циліндрі дизеля, саме це стає причиною складу випускних газів.

Управління екологічними показниками суднових дизелів під час використання палива біологічного походження можливо за рахунок зміни фаз паливopодачі – збільшення, або зменшення кута випередження подачі палива. З метою підтвердження цієї гіпотези виконувалось вимірювання емісії NO_x та CO₂ з випускними газами суднового дизеля 9S50ME MAN-B&W за різних кутів випередження

подачі палива в циліндр дизеля Θ . Діапазон зміни цих кутів був обрано з рекомендованого фірмою-виробником та складав $-6 \dots -2$ град. ПКВ (де ПКВ – поворот колінчатого валу дизеля).

Дослідження з визначення екологічних показників дизеля 9S50ME MAN-B&W виконувались у зазначеному діапазоні з кроком зміни кута випередження подачі палива $0,5$ ПКВ. На кожному з досліджених режимів дизель експлуатувався 4 години, при цьому підтримувались стали показники у системах мащення та охолодження.

Скорочені результати цих досліджень (що відповідали випадку використання паливної суміші $85\% \text{ RMG380} + 15\% \text{ B100}$ – як такої, за якою спостерігається максимальне відхилення емісії NO_x та CO_2 , та 60% -му та 90% -му навантаженню) наведені у табл. 6, 7.

Таблиця 6

Емісія оксидів азоту NO_x , г/(кВт·год), за різних кутів випередження подачі палива суднового дизеля 9S50ME MAN-B&W

Навантаження	Кут випередження подачі палива, θ , град ПКВ								
	-6	-5,5	-5	-4,5	-4	-3,5	-3	-2,5	-2
60	11,68	11,32	11,06	10,86	10,65	10,43	10,24	10,06	9,86
90	14,22	13,83	13,55	13,33	13,14	12,93	12,62	12,38	12,08

Таблиця 7

Емісія діоксиду вуглецю CO_2 , %, за різних кутів випередження подачі палива суднового дизеля 9S50ME MAN-B&W

Навантаження	Кут випередження подачі палива, θ , град ПКВ								
	-6	-5,5	-5	-4,5	-4	-3,5	-3	-2,5	-2
60	5,02	5,09	5,16	5,21	5,26	5,3	5,33	5,35	5,36
90	5,26	5,33	5,41	5,47	5,52	5,57	5,61	5,64	5,67

Відносна зміна значень емісії оксидів азоту ΔNO_x та діоксиду вуглецю ΔCO_2 розраховувалась за виразами:

$$\Delta\text{NO}_x = \frac{\text{NO}_x^{\text{B100}} - \text{NO}_x^{\text{RME}}}{\text{NO}_x^{\text{RME}}} \cdot 100\%; \quad (1)$$

$$\Delta\text{CO}_2 = \frac{\text{CO}_2^{\text{RME}} - \text{CO}_2^{\text{B100}}}{\text{CO}_2^{\text{RME}}} \cdot 100\%; \quad (2)$$

де NO_x^{RME} , $\text{NO}_x^{\text{B100}}$ – емісія оксидів азоту під час використання палива нафтового походження RME380, а також його суміші з паливом біологічного походження FAME B100, г/(кВт·год);

CO_2^{RME} , $\text{CO}_2^{\text{B100}}$ – емісія діоксидів вуглецю під час використання палива нафтового походження RME380, а також його суміші з паливом біологічного походження FAME B100, %.

Результати, що отримані за виразами (1), (2) наведені у табл. 8, 9.

Таблиця 8

Відносна зміна емісії оксидів азоту ΔNO_x , %, за різних кутів випередження подачі палива Θ дизеля 9S50ME MAN-B&W

Навантаження	Кут випередження подачі палива, Θ , град ПКВ								
	-6	-5,5	-5	-4,5	-4	-3,5	-3	-2,5	-2
60	15,20	14,02	12,84	11,99	11,15	10,47	9,97	9,62	9,46
90	19,82	18,75	17,53	16,62	15,85	15,09	14,48	14,02	13,57

Таблиця 9

Відносна зміна емісії діоксиду вуглецю CO_2 , %, за різних кутів випередження подачі палива Θ дизеля 9S50ME MAN-B&W

Навантаження	Кут випередження подачі палива, Θ , град ПКВ								
	-6	-5,5	-5	-4,5	-4	-3,5	-3	-2,5	-2
60	15,20	14,02	12,84	11,99	11,15	10,47	9,97	9,62	9,46
90	19,82	18,75	17,53	16,62	15,85	15,09	14,48	14,02	13,57

За результатами табл. 6 - 9 побудовані відповідні діаграми на рис. 2.

Зазначимо, що для всіх режимів експлуатації дизеля значення емісії оксидів азоту NO_x не перебільшувало максимально можливого, яке регламентується Додатком VI МАРПОЛ та для дизеля 9S50ME MAN-B&W, що встановлений на розглянутому судні дорівнює 14,4 г/(кВт·год).

Результати наведених досліджень дозволяють зробити наступні висновки.

1. Поступове зменшення запасів палива нафтового походження та змінна динаміка його вартості призводить до використання у енергетичних установках суден морського та внутрішнього водного транспорту палив не біологічного походження, одним з таких палив є біодизельне паливо FAME B100. Збігли характеристики густини палива нафтового та палива біологічного походження дозволяє

утворювати їхні суміші. Через більш низку теплотворну здатність палива біологічного походження у порівнянні з нафтовим паливом раціональний вміст біодизельного палива в таких сумішах не перевищує 15 % за масою.

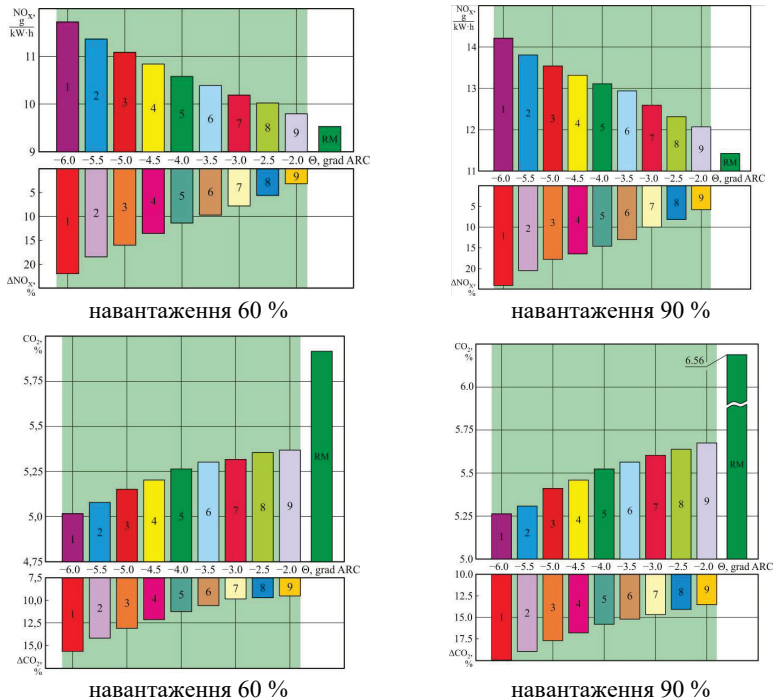


Рис. 2. Зміна екологічних показників роботи суднового дизеля 9S50ME MAN-B&W під час різних умов його експлуатації:

RM – паливо RMG380; 1 ...9 – суміші 85 % RMG380 + 15 % B100;

Θ , grad ARC – angle rotation of crankshaft / поворот колінчатого валу

2. Через відмінний від нафтового палива елементний склад біодизельного палива (насамперед меншу кількість вуглецю та більшу кількість кисню) під час згоряння суміші цих палив відбувається зміна екологічних показників роботи дизеля. Для суднового дизеля 9S50ME MAN-B&W в діапазоні його експлуатаційних навантажень 60 ... 90 % та 5 ... 15 % вмісту біодизельного палива FAME B100 у складі його суміші з паливом RMG380 експериментально встановлено збільшення

на 11,72 ... 18,1 % емісії оксидів азоту NO_x з одночасним зменшення на 9,1...17,5 % емісії діоксидів вуглецю CO_2 .

3. Експериментально доведена можливість управління екологічними показниками суднових дизелів під час використання палива біологічного походження шляхом регулювання фаз подачі палива в циліндр дизеля. З рекомендованого фірмою-виробником діапазону кута випередження подачі палива можливе визначення таких, за якими забезпечується мінімальне збільшення емісії оксидів азоту NO_x з одночасним близьким до максимального зниженням емісії діоксидів вуглецю CO_2 . У всіх розглянутих випадках емісія оксидів азоту не перебільшувала значення, що обмежується вимогами Додатку VI МАРПОЛ.

4. Зниження емісії діоксиду вуглецю під час використання палива біологічного походження (яке під час проведення досліджень досягало 15,2 ... 19,8 % сприяє зменшенню парникового ефекту та забезпеченню зеленого судноплавства.

ЛІТЕРАТУРА REFERENCES

1. Sagin S, Haichenia O., Karianskyi S., Kuropyatnyk O., Razinkin R., Sagin A., Volkov O. Improving Green Shipping by Using Alternative Fuels in Ship Diesel Engines // Journal of Marine Science and Engineering. – 2025. – Vol. 13(3). – P. 589.

2. Сагін С.В., Сагін А.С. Контроль та діагностування надійності та економічності дизелів морських та річкових засобів транспорту // Суднові енергетичні установки : наук.-техн. зб. – 2023. – Вип. 46. – С. 118 - 131.

3. Сагін С.В., Мадей В.В., Сагін А.С. Робота суднового дизеля на біодизельному паливі // Автоматизація суднових технічних засобів : наук.-техн. зб. – 2021. – Вип. 27. – С. 93 - 107.

4. Сагін С.В., Куропятник О.А. Визначення оптимальних режимів експлуатації суднових двигунів внутрішнього згоряння під час використання біодизельного палива // Суднові енергетичні установки: наук.-техн. зб. – 2024. – Вип. 48. – С. 100 - 113.

5. Сагін С.В., Заблоцький Ю.В. Діагностування технічного стану суднових енергетичних установок засобів водного транспорту // Водний транспорт. – 2023. – № 2(38). – С. 164 - 175.

6. Мадей В.В., Заблоцький Ю.В., Сагін А.С. Оцінка ефективності використання палива біологічного походження в суднових дизелях // Розвиток транспорту. – 2025. – № 2. – С. 71 - 85.

7. Сагін С.В., Заблоцький Ю.В., Сагін А.С. Підвищення економічності роботи суднових середньообертових дизелів // Водний транспорт. Збірник наукових праць. – 2025. – Вип. 1(42). – С. 166 - 179.

8. Заблоцький Ю.В. Підвищення економічності роботи суднових дизелів // Суднові енергетичні установки : наук.-техн. зб. . – 2020. – Вип. 40. – С. 12 - 16.

9. Budashko V., Hvozdeva I., Myrhorod V., Shevchenko V., Sandler A., Glazeva O. Diagnosis of the technical condition of high-tech complexes by probabilistic methods // IEEE TCSET 2022: 16 Міжнародна конференція передових тенденцій в галузі радіоелектроніки, телекомунікацій та обчислювальної техніки 22-26 лютого 2022: – С. 7 - 13.

10. Сагін С.В., Куропятник О.А., Руснак Д.Ю., Парменова Д.Г. Зниження емісії оксидів сірки з випускними газами суднових дизелів шляхом ультразвукової обробки палива // Автоматизація суднових технічних засобів: наук.-техн. зб. – 2025. – Вип. 30. – С. 121 - 138.

11. Сагін С.С., Сагін С.В. Використання штучного інтелекту в ситуаціях надмірного зближення суден // Водний транспорт: збірник наукових праць. – 2024. – Вип. 1(39). – С. 215 - 225.

12. Сагін С.В., Бондар С.А., Столярик Т.О. Оцінка безвідмовності суднових дизелів за технічним станом моторного мастила циркуляційних систем мащення // Водний транспорт. – 2023. – № 1(37). – С. 59 - 70.

13. Zablotsky Yu.V., Sagin S.V. Maintaining Boundary and Hydrodynamic Lubrication Modes in Operating High-pressure Fuel Injection Pumps of Marine Diesel Engines // Indian Journal of Science and Technology. – 2016. – Vol. 9. – Iss. 20. – P. 208 - 216.

14. Сандлер, А. К. Модифікатор важких паливних сумішей // Автоматизація технологічних і бізнес-процесів. – 2019. – Т. 11. – №. 1. – Одеса: ОНАХТ. – С. 27 - 31. DOI: [https://doi.org/ 10.15673/atbp.v11i1.1329](https://doi.org/10.15673/atbp.v11i1.1329).

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

16. Марченко О.О., Сагін С.В. Вдосконалення процесу очищення суднових важких палив // Суднові енергетичні установки: наук.-техн. зб. – 2020. – Вип. 41. – С. 10 - 14.

17. Сагин С.В., Куропятник А.А. Оптимизация режимов работы системы перепуска выпускных газов судовых среднеоборотных дизелей // Автоматизация судовых технических средств: науч. -техн. сб. – 2019. – Вип. 25. – С. 79 - 89.

18. Поповский А.Ю., Сагин С.В. Оценка эксплуатационных свойств смазочно-охлаждающих жидкостей судовых технических средств // Автоматизация судовых технических средств: науч.-техн. сб. – 2016. – Вып. 22. – С. 66 - 74.

19. Сагін С.В., Столярик Т.О. Динаміка суднових дизелів під час використання моторних мастил з різними структурними характеристиками // Автоматизація суднових технічних засобів : наук. - техн. зб. – 2021. – Вип. 27. – С. 108 - 119.

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

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

22. Сагін А.С., Сагін С.В. Експериментальне визначення оптимальних фаз подачі палива в циліндр суднових дизелів // Водний транспорт. Збірник наукових праць. – 2024. – Вип. 1(39). – С. 206 - 215.

23. Сагін С.В., Куропятник О.А. Аналіз впливу біодизельного палива на екологічні та економічні показники роботи суднових дизелів // Водний транспорт. Збірник наукових праць. – 2025. – Вип. 1(42). – С. 180 - 194.

24. Zablotsky Yu.V., Sagin S.V. Enhancing Fuel Efficiency and Environmental Specifications of a Marine Diesel When using Fuel Additives // Indian Journal of Science and Technology. – 2016. – Vol. 9. – Iss. 46. – P. 353-362.

25. Budashko, V., Sandler, A., Khniunin, S., Bogach, V. Design of the predictive management and control system for combined propulsion complex // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. Industry control systems. – 2024. – Vol. 5. – №. 2(131). – P. 90 – 102. DOI: 10.15587/1729-4061.2024.313627.

26. Горб С.И. Повышение точности численного моделирования рабочих процессов дизелей // Автоматизация судовых технических средств: науч.-техн. сб. – 2020. – Вип. 26. – Одесса: НУ «ОМА». – С. 3 - 26.

27. Горб С.И. Оптимизация главного двигателя на режиме экономического хода судна // Автоматизация судовых технических средств: науч.-техн. сб. – 2019. – Вип. 25. – Одесса: НУ «ОМА». – С. 17 - 34.

28. Заблоцкий Ю.В. Анализ особенностей процесса мащения цилиндровой группы судовых дизелей // Судові енергетичні установки : науково-технічний збірник. – 2023. – Вип. 46. – Одеса : НУ «ОМА». – С. 67 - 78. doi: 10.31653/10.31653/smf46.2023.67-78.

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

30. Горб С.И., Горб А.С. Программное обеспечение для управления активами на судах // Автоматизация судовых технических средств: науч.-техн. сборник. – 2018. – Вып. 24. – Одесса : ОНМА. – С. 34 - 48.

31. Горб С.И., Каменева А.В., Запороженко Н.В. Модернизация структуры упрощённой системы технического менеджмента судов // Автоматизация судовых технических средств: науч.-техн. сб. – 2016. – Вып. 22. – Одесса: ОНМА. – С. 33 - 38.

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

33. Заблоцкий Ю.В. Исследование влияния органических покрытий на работу элементов топливной аппаратуры высокого давления судовых дизелей // Судовые энергетические установки: науч.-техн. сб. – 2015. – № 35. – Одесса: НУ ОМА. – С. 83 - 92.

34. Sagin S., Sagin A., Zablotskiy Y., Fomin O., Pišt'ek V., Kučera P. Method for Maintaining Technical Condition of Marine Diesel Engine Bearings // Lubricants. – 2025. – Vol. 13(4). – P. 146.
<https://doi.org/10.3390/lubricants13040146>.

35. Zablotsky Y.V. The use of chemical fuel processing to improve the economic and environmental performance of marine internal combustion engines // Materials of the International Conference “Scientific research of the SCO countries: synergy and integration”. – Part 1. August 31, 2019. – Beijing, PRC. – P. 131 - 138. DOI. 10.34660/INF.2019.15.36257.

Abstract. The technology of controlling the environmental performance of marine diesel engines when using fuel of biological origin is considered, which consists in changing the fuel advance angles into the diesel cylinder. The gradual decrease in oil fuel reserves and the variable dynamics of its cost lead to the use of non-biological fuels in the power plants of sea and inland waterway transport vessels, one of such fuels is biodiesel FAME B100. The coincident density characteristics of oil fuel and fuel of biological

origin allow the formation of their mixtures. Due to the lower calorific value of fuel of biological origin compared to oil fuel, the rational content of biodiesel in such mixtures does not exceed 15 % by weight. For the 9S50ME MAN-B&W marine diesel engine in the range of its operational loads of 60 – 90% and 5 – 15 % of the content of biodiesel FAME B100 in its mixture with RMG380 petroleum fuel, an increase of 11.72 – 18.1 % of the emission of nitrogen oxides NO_x with a simultaneous decrease of 9.1 – 17.5 % of the emission of carbon dioxide CO_2 has been experimentally established. The possibility of controlling the environmental indicators of marine diesel engines when using fuel of biological origin by adjusting the phases of fuel supply to the diesel cylinder has been experimentally proven. From the range of fuel supply advance angles recommended by the manufacturer, it is possible to determine those that ensure a minimum increase in the emission of nitrogen oxides NO_x with a simultaneous close to the maximum reduction in the emission of carbon dioxide CO_2 . In all cases considered, the emission of nitrogen oxides did not exceed the value limited by the requirements of Annex VI of MARPOL. The reduction of carbon dioxide emissions when using fuel of biological origin (which during the research reached 15.2 – 19.8 %) contributes to the reduction of the greenhouse effect and ensuring green shipping.

УДК 621.438

DOI: 10.31653/1819-3293-2026-1-31-126-140

ARTICLE HISTORY

Received 04.04.2026

Accepted 30.04.2026

Сандлер Альберт Кирилович¹, Дончев Іван Іванович²
Національний університет "Одеська морська академія", Одеса,
Україна¹
Державний заклад Південноукраїнський національний
педагогічний університет, Одеса, Україна²
sa@onma.edu.ua¹, idonchev85@gmail.com²

АВТОМАТИЗОВАНИЙ ВОЛОКОННО- ОПТИЧНИЙ ПРИСТРІЙ ДЛЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО КОНТРОЛЮ ЕЛЕМЕНТІВ ГАЗОТУРБІННИХ УСТАНОВОК

Sandler Albert¹, Donchev Ivan²
National University "Odessa Maritime Academy", Odessa, Ukraine¹
The State institution South Ukrainian national pedagogical University,
Odessa, Ukraine²
sa@onma.edu.ua¹, idonchev85@gmail.com²

AUTOMATED FIBER-OPTICAL DEVICE FOR TEMPERATURE CONTROL OF GAS TURBINE ELEMENTS

Резюме. Найбільш ефективними серед сучасних є системи моніторингу технічного стану суднових газотурбінних установок, які застосовують підходи, що базуються на безперервному спостереженні за змінами технічних параметрів протягом тривалого проведення вимірювань. Однак їх розвиток має певні обмеження через недосконалість сучасних вимірювачів надвисоких температур жарової труби турбіни. Метою даної роботи є створення новітніх засобів вимірювання температурних полів жарової труби газових турбін. Об'єкт дослідження – процеси формування й перетворення вимірювального сигналу в пристроях контролю температури. Рішення

проблеми досягається шляхом розробки інноваційного волоконно-оптичного датчика з модифікованою конструкцією чутливого елемента. Відмінність пропонованого датчика полягає в тому, що для виробництва застосовані альтернативні скломатеріали.

Summary. *The most effective modern systems are those for monitoring the technical condition of ship gas turbine units, which employ approaches based on continuous observation of changes in technical parameters over extended measurement periods. However, their development faces certain limitations due to the imperfections of modern ultra-high-temperature sensors for turbine flame tube. The aim of this work is to create state-of-the-art means for measuring temperature fields in gas turbine hot walls. The subject of the study is the processes of forming and converting the measurement signal in temperature control devices. The problem is solved by developing an innovative fiber-optic sensor with a modified design of the sensing element. The proposed sensor differs in that alternative glass materials are used in its manufacture.*

Суттєвий вплив суднових газотурбінних установок (СГТУ) на безпеку судноплавства вимагає створення умов їх безпечної експлуатації. Це досягається впровадженням та застосуванням систем технічного діагностування та прогнозування технічного стану. Ключовою особливістю СГТУ, що визначає підхід до діагностування, є вкрай високе теплове та силове навантаження на елементи конструкції. Ці навантаження фактично досягають верхньої межі міцності, і будь-яке перевищення допустимих значень може призвести до руйнування компонентів, а в результаті – до виходу з ладу всієї установки. Для запобігання таким ситуаціям необхідний ретельний контроль основних термогазодинамічних параметрів двигуна з високим ступенем точності та достовірності. Крім того, обробка даних та прийняття рішень з діагностики часто потребують оперативного підходу в реальному часі, щоб оперативно відреагувати на зміни, доки параметри залишаються у допустимих рамках.

Іншою важливою особливістю СГТУ є відсутність резервованих елементів чи вузлів. Камера згоряння є одним з таких вузлів, деталі якого постійно піддаються потужним динамічним та тепловим навантаженням. Проведення постійного моніторингу протягом значних періодів часу теплового стану жарових труб та виявлення зон перегріву їх внутрішніх стінок дає змогу заздалегідь запобігти аварійним та катастрофічним наслідкам [1, 2].

Основою вимірювальних систем теплового стану жарових труб із застосуванням оптоволоконних датчиків є аналіз спектрів та інтенсивності початкового оптичного випромінювання та зворотного розсіяного світла після його проходження через світловод [3, 4].

Одним із найпоширених рішень для моніторингу розподілу високої температури є розподілені волоконно-оптичні датчики температури (ВОДТ) на основі розсіювання Рамана. У датчиках цього типу інтенсивність стоксової компоненти практично не схильна до впливу температури, в той час як інтенсивність антистоксової компоненти чітко залежить від неї. Шляхом визначення відношення інтенсивностей цих двох компонент можна точно визначити температуру.

Основні недоліки Раманівських ВОДТ пов'язані з обмеженою точністю, високою вартістю обладнання та чутливістю до зовнішніх факторів. Вони відмінно підходять для розподілених вимірювань на десятках кілометрів, але поступаються за стабільністю та простотою традиційним точковим датчикам.

Крім того, Раманівським ВОДТ притаманні такі недоліки, які суттєво обмежують їх використання у задачах моніторингу жарових труб ГТД:

- низька просторова роздільна здатність. Зазвичай становить 0,5 ... 2 м, що обмежує можливість точного локального контролю температури. Для завдань, де важлива висока деталізація (наприклад, контроль окремих вузлів устаткування), це є значним;
- обмежена точність вимірів. Абсолютна похибка може досягати $\pm 1 \dots 2^\circ\text{C}$. Потрібно застосування складних методів компенсації та калібрування;
- висока вартість обладнання. Для роботи необхідні спеціалізовані оптоелектронні аналізатори (лазери, спектрометри, фотодетектори), що робить систему надкоштовною порівняно з класичними датчиками;
- чутливість до зовнішніх факторів: механічні напруги у волокні можуть спотворювати сигнал; забруднення чи пошкодження оболонки знижує надійність; потрібна акуратна прокладка та захист кабелю.
- складність обробки даних. Сигнал Раманівського розсіювання слабкий, потребує складних алгоритмів фільтрації та аналізу. Це збільшує час відгуку та навантаження на обчислювальні системи;
- не є оптимальними для завдань, де потрібна висока точність та локальний вимір [5 - 9].

Брилоєнівські ВОДТ забезпечують розподілений моніторинг на десятках кілометрів, але їхні недоліки пов'язані з:

- високої вартістю обладнання. Для роботи необхідні потужні лазери, спектрометри та аналізатори, що робить систему значно дорожчою за Раманівські DTS і тим більше класичних термопар;
- складністю обробки даних. Бриллюенівське розсіювання слабке і потребує складних алгоритмів інтерпретації. Це збільшує час відгуку та навантаження на обчислювальні системи;
- обмеженою точністю. Абсолютна похибка зазвичай становить $\pm 0,5 \dots 1^\circ\text{C}$, що гірше, ніж у платинових термоопірів (RTD), але краще, ніж у Раманівських DTS.
- низькою просторовою роздільною здатністю;
- чутливістю до механічної напруги. Деформації та розтягування волокна впливають на сигнал, що може призводити до помилкових показань;
- складністю експлуатації. Потрібний кваліфікований персонал для налаштування та обслуговування, що обмежує масове впровадження;
- не оптимальністю для завдань, де потрібна висока точність та локальний вимір [5 - 9].

ВОДТ зазначених типів, створені на основі традиційних світловодів, вже дійшли межі можливості свого вдосконалення [9]. Подальше поліпшення метрологічних характеристик ВОДТ найбільш доцільно здійснювати за рахунок застосування альтернативних скломатеріалів [9 - 12].

Мета дослідження – визначення видів та сполучень скломатеріалів для створення ВОДТ, які працюють протягом значних термінів часу у умовах надвисоких температур.

На основі аналізу потенційних можливостей ВОДТ амплітудної модуляції й методів корекції погіршень волоконних вимірювальних перетворювачів застосовано наступний алгоритм синтезу структурної моделі (рис. 1) [13].

За основу обраний розроблений компанією "LIOS Technology GmbH" температурний датчик, заснований на методі рефлектометрії частотної області (Optical Frequency Domain Reflectometry (OFDR)). Датчик працює не в часовому діапазоні, як техніка, яка працює за методом Optical Time Domain Reflectometer (OTDR), а в частотному. Відповідно до методу OFDR інтенсивність лазера протягом інтервалу часу вимірювання модулюється синусоподібно, а частота у вигляді лінійної частотної модуляції. Відхилення частоти є прямою причиною локального спрацювання рефлектометра. Модульоване світло лазера прямує у світловод. Частина перетвореного випромінювання рухається у зворотному напрямку до блоку формування сигналу. Потім

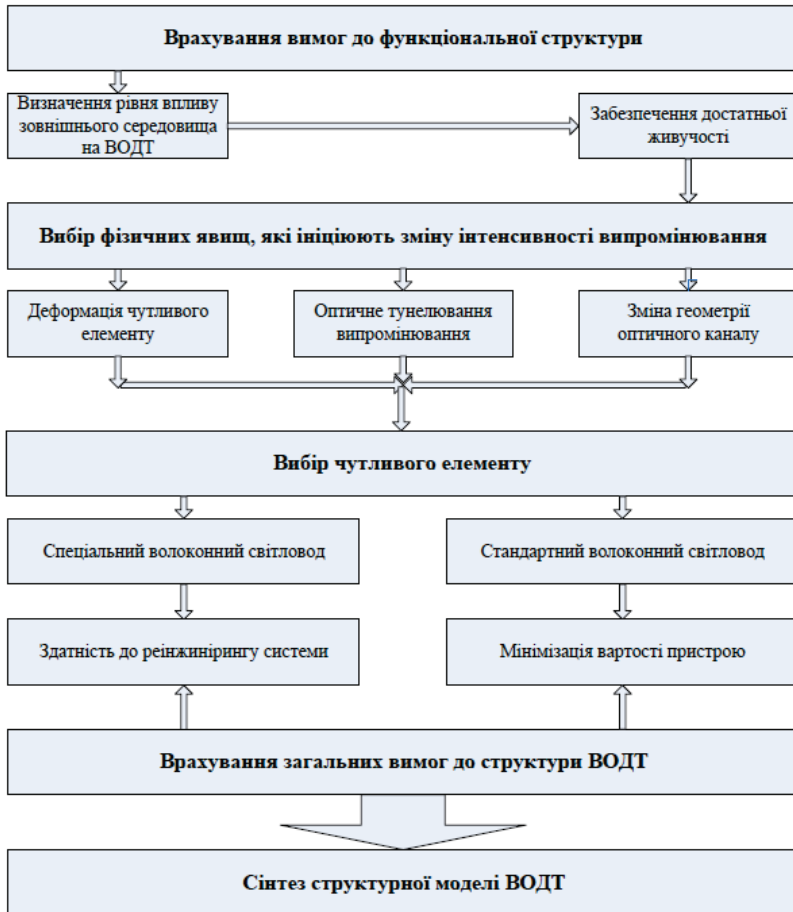


Рис. 1. Алгоритм синтезу ВОДТ для контролю жарових труб газотурбінних двигунів

виконується спектральна фільтрація світла зворотного розсіювання, його перетворення у вимірювальних каналах електричні сигнали, посилення та електронна обробка. Мікропроцесор проводить розрахунок перетворення Фур'є. Амплітуда кривих зворотного розсіювання пропорційна інтенсивності відповідного комбінаційного розсіювання. З відношення кривих зворотного розсіювання одержують температуру волокна вздовж світловодного кабелю.

Оптичні волокна у датчику мають акрилове покриття або покриття, що затверділо в результаті ультрафіолетового випромінювання, придатні для діапазону температур лише до 80 ... 100 °С.

Враховуючи наявні обмеження, досліджена потенційна можливість використання альтернативних видів скломатеріалів для створення чутливих елементів ВОДТ.

Основною вимогою до оптичних матеріалів, що відрізняються комплексом оптичних і механічних характеристик, є їх здатність забезпечувати отримання вірогідної діагностичної інформації в екстремальних умовах експлуатації та високу довговічність.

Найбільшу увагу, як альтернативного скломатеріалу для виготовлення оптичних елементів ВОДТ привернули такі матеріали як скло з рутилу та штучного сафіру.

Рутил (TiO_2) має видатну стійкість до корозії завдяки своїй щільній тетрагональній кристалічній структурі, хімічній інертності та стабільності під впливом зовнішніх факторів. Висока щільність і твердість забезпечують матеріалу опір до стирання і механічного навантаження, а його термостійкість дозволяє використовувати рутил у виробництві вогнетривких матеріалів та захисних покриттів.

Більш стабільна структура рутила, порівняно з анатазом, робить його менш схильним до хімічних реакцій, що дозволяє застосовувати його в агресивних середовищах. Він практично не розчиняється у воді та демонструє високу стійкість до більшості кислот, а також до ультрафіолетового випромінювання та атмосферних впливів. Матеріал зберігає свої властивості при нагріванні до 600 ... 700 °С, що особливо важливо для промислових потреб.

Електрооптичні характеристики рутила залежать від кристалографічної структури, наявності домішок, дефектів ґрат, температури та навколишніх умов. Ключовий вплив мають ізоморфні заміщення та легування перехідними металами, оскільки ці фактори змінюють показник заломлення, діелектричну проникність та ефективність ефекту Керра.

Діелектрична проникність рутила при підвищенні температури помітно зменшується: приблизно від 120 при кімнатній температурі до 80 ... 90 при 300 °С. Показник заломлення також залежить від температури. При нагріванні він знижується внаслідок зменшення поляризуємості кристалічних ґрат і посилення теплових коливань. У діапазоні температур 20 ... 300 °С показник заломлення може знижуватися на 0,01 ... 0,03 одиниці. Це пояснюється посиленням теплових коливань ґрат, що призводить до зниження узгодженості дипольних відгуків. Отже відбувається одночасне зниження

діелектричної проникності, поляризуємості і показника заломлення (рис. 2) [13].

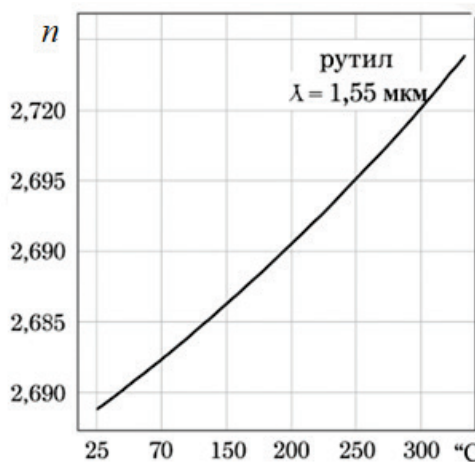


Рис.2. Залежність показника заломлення рутиту від температури за довжини хвилі випромінювання 1,55 мкм [13]

Вартість рутиту сильно залежить від якості, призначення та обсягу закупівлі: технічний діоксид титану в Україні коштує приблизно від 149 ... 238 грн/кг, а імпорتنі преміальні рутильні сорти на міжнародних майданчиках можуть досягати 80000 ... 110000 грн/т.

Сапфірові оптичні волокна відрізняються унікальною термостійкістю (до ~ 2000 °C), високою механічною міцністю (в 5 разів міцніше за скло, стійкі до високих тисків і ударів) і хімічною інертністю (інертні до більшості кислот і лугів, не схильні до корозії). Це робить їх незамінними для датчиків та передачі світла в екстремальних умовах. Їхня ключова перевага – стабільна робота там, де кварцові волокна руйнуються. Оптичний діапазон: прозорість від 170нм до 5,3мкм, що дозволяє використовувати у широкому спектрі.

Однак, сапфірові оптичні волокна коштують у десятки разів дорожче за кварцові: їх ціна може досягати сотень доларів за метр, тоді як кварцові волокна масового виробництва коштують лічені центи за метр. Але сапфірові волокна є єдиною альтернативою високотемпературному діапазоні, де кварцові волокна руйнуються [9, 14 - 17].

Що стосується вибору типу оптичного каналу ВОДТ, то вирішальним аргументом на користь закритого каналу було таке. ВОДТ з відкритим оптичним каналом мають низьку чутливість перетворення, неоптимізовану конструкцію внаслідок труднощів математичного опису моделі, низьку стійкість поверхонь оптичної системи до впливу дестабілізуючих факторів, що суттєво знижує їх метрологічні характеристики [10].

Таким чином науково-технічне завдання, яке створено запитом практики, вирішується тим, що пропонується волоконно-оптичний датчик температури складається з джерела випромінювання, фотоприймача та світловодів. Джерело випромінювання та фотоприймач сполучені з двобічним оптичним розгалужувачем, який зв'язаний з світловодом комутаційним. Схемотехнічне рішення пропонуваного датчика пояснюється рис. 3.

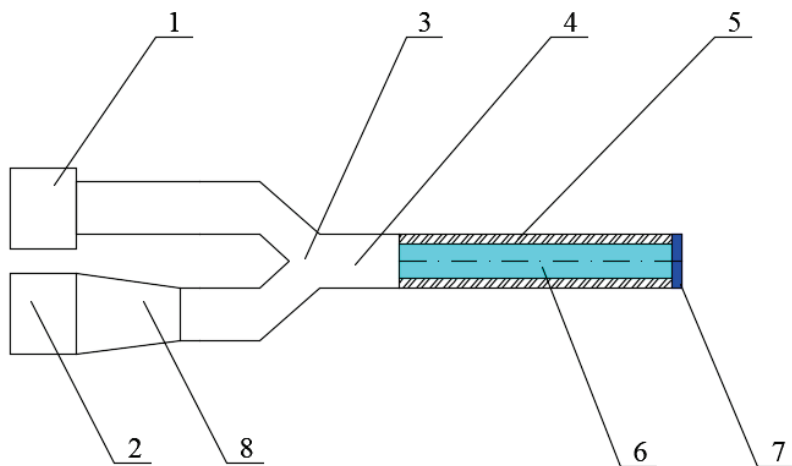


Рис. 3. Волоконно-оптичний датчик температури: 1 – джерело випромінювання; 2 – фотоприймач; 3 – оптичний розгалужувач; 4 – світловод комутаційний; 5 – коаксіальна оболонка з рутилу; 6 – основний світловод з сапфірового скла; 7 – віддзеркалюючий шар; 8 – фокон

Відмінність датчика полягає у тому, що світловод комутаційний сполучений з коаксіальним світловодом, серцевиною якого є основний світловод з сапфірового скла, а навколо нього міститься коаксіальна оболонка з рутилу. Основний світловод з сапфірового скла також

нероз'ємно сполучений з віддзеркалюючим шаром. А між фотоприймачем та розгалужувачем розташований оптичний фокон. Оптичний фокон дозволяє виконати більш точне сполучення гілки розгалужувача та активної ділянки фотоприймача без додаткового юстирування.

У статичному режимі (режим калібровки), тобто при стандартних умов зовнішнього середовища, у джерелі випромінювання генерується випромінювання, яке крізь розгалужувач, надходить до комутаційний та основного світловодів. У основному світловоді з сапфірового скла відбувається зменшення інтенсивності оптичного випромінювання, що проходить скрізь нього, яке обумовлене затуханням у матеріалі світловоду під впливом експлуатаційних факторів. Інтенсивність випромінювання, яке відбивається від віддзеркалюючого шару та повертається до фотоприймача через комутаційний світловод, розгалужувач та фокон, фіксується і запам'ятовується як поправка.

У динамічному режимі (робочий режим ГТУ) відбувається зміна показника заломлення коаксіальної оболонки. В наслідок чого відбувається порушення умов повного внутрішнього відбивання світла, яке виникає як відклик на тунельне перекачування випромінювання з основного світловоду назовні. Порушення умов повного відбивання світла у основному світловоді знаходить своє відображення у зміні величини інтенсивності випромінювання, яке відбивається від віддзеркалюючого шару.

Для початкових умов за консервації оптичної потужності [18 - 23]

$$P_R = \left\{ \cos^2 \left[CL \sqrt{1 + \left(\frac{\beta_R - \beta_T}{2C} \right)^2} \right] + \left(\frac{\beta_R - \beta_T}{2C} \right)^2 \frac{\sin^2 \left[CL \sqrt{1 + \left(\frac{\beta_R - \beta_T}{2C} \right)^2} \right]}{1 + \left[CL \sqrt{1 + \left(\frac{\beta_R - \beta_T}{2C} \right)^2} \right]} \right\} P_0,$$

$$P_T = \left[\frac{\sin^2 \left[CL \sqrt{1 + \left(\frac{\beta_R - \beta_T}{2C} \right)^2} \right]}{1 + \left[CL \sqrt{1 + \left(\frac{\beta_R - \beta_T}{2C} \right)^2} \right]} \right] P_0,$$

$$P_T(z) = \frac{\sin^2 \left[cz \sqrt{1 + \left(\frac{\beta_R - \beta_T}{2c} \right)^2} \right]}{1 + \left(\frac{\beta_R - \beta_T}{2c} \right)^2} P_0.$$

Потужність, що передається з одного хвильоводу до іншого, залежить від координати L . Максимальне значення цієї потужності $P_{\max}$ визначається за умови, що $z = L_0$. У цьому випадку мінімальне значення потужності $P_{\min}$, що залишається в основному світловоді з сапфірового скла, і максимальне значення потужності $P_{\max}$ у коаксимальної оболонці з рутилу дорівнюють відповідно:

$$P_{R\min} = \left[1 - \frac{1}{1 + \left[1 + \left(\frac{\beta_R - \beta_T}{2C} \right)^2 \right]} \right] P_0;$$

$$P_{T\max} = \frac{1}{1 + \left[1 + \left(\frac{\beta_R - \beta_T}{2C} \right)^2 \right]}.$$

Удосконалена модель ВОДТ має низку обмежень у своїй сфері застосування. Одним із ключових обмежень є вартість, яка поки ще перевищує вартість датчиків, які створені на базі кварцових оптичних волокон.

У зв'язку з цим доцільно передбачити механізми вдосконалення технологічного процесу нанесення рутилової оболонки на основний світловод зі штучного сапфіру.

Однією з найважливіших переваг удосконаленої моделі є її адаптивність до вибору локальних робочих точок для кожного каналу дистанційного зондування. Це дає змогу налаштувати конфігурації фазового зсуву відповідно до вимог лінійності або чутливості. Подальший розвиток запропонованого підходу може полягати у використанні віртуальних пристроїв для визначення віртуальних вимірювальних ліній затримки, а також для забезпечення функцій самоідентифікації та автодіагностики ВОДТ та аналогічних датчиків. Це стане важливим кроком у вдосконаленні опитувальної топології для конкретних ГТУ [24 - 29].

Запропоноване схемотехнічне рішення ВОДТ завдяки застосуванню оптичних елементів забезпечить такі складові технічного ефекту:

- більш адекватне перетворення температури у жаровій трубі ГТУ у зміни інформаційного сигналу;
- компенсацію впливу дестабілізуючих факторів на вимірювальний канал датчику;
- можливість створення розгалуженої мережі контролю газового середовища в особливих умовах;
- підвищення якості функціонування за рахунок використання матеріалів з близьким коефіцієнтом теплового поширення та обрання раціональної схеми модуляції опорного випромінювання;
- пожежевибухобезпечність при застосуванні.

На відміну від існуючих, запропоноване схемотехнічне рішення спроможне значним чином збільшити робочий діапазон та інваріантність до експлуатаційних факторів вимірювального засобу [30 - 32].

ЛІТЕРАТУРА REFERENCES

1. Савушкін, В. В. Дослідження температурного стану жарової труби камери згоряння ГТД термоіндикаторними фарбами та термопарами // Збірник наукових праць Національного університету кораблебудування ім. адмірала Макарова. – 2023. – № 4. – С. 40 - 45. DOI [https://doi.org/10.15589/znp2023.4\(493\).6](https://doi.org/10.15589/znp2023.4(493).6).
2. Варламов, Г. Б., Позняков, П. О., Юрашев, Д. М. Комплексні дослідження енергоекологічних показників експлуатації ГТУ у складі газоперекачувального агрегату типу ГТК-10 // Энергосбережение. – 2012. – № 01(95). – С. 15-24.
3. Баранюк, О. В., Воробйов, М. В., Рачинський, А. Ю. CFD-модельовання процесів теплообміну і гідродинаміки засобами програмного комплексу: монографія. КПІ ім. Ігоря Сікорського. – 2023. – С. 15-22.
4. Xiong, Q.-R., Zhu, G.-C., Zhong, M. Experimental investigation of temperature measurement on the wall of flame tube for a triple combustor // Journal of Aerospace Power. – 2016. – № 4. – P. 775-779.
5. Волоконно-оптические датчики температуры URL: https://temperatures.ru/pages/volonkonno_opticheskie_datchiki_temperature. Дата звернення 04.04.2026.

6. D. A. Krohn, T. MacDougall, A. Mendez. Fiber optic sensors: Fundamentals and applications: Fourth edition. – Bellingham: The International Society for Optical Engineering, 2015. – 310 p. DOI: 10.1117/3.100291.

7. Горлов, Н. И., Жахметбеков, Д. З. Распределенные волоконно-оптические датчики на принципе вынужденного бриллюэновского рассеяния. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/raspredelennye-voлоконно-opticheskie-datchiki-na-printsipe-vynuzhdenogo-brillyuenovskogo-rasseyaniya>. Дата звернення 04.04.2026.

8. Горшков, Б. Г., Горшков, Г. Б., Жуков, К. М. Распределенный волоконно-оптический датчик температуры на основе регистрации бозонных компонент рамановского рассеяния света для криогенных применений URL: <https://quantum-electron.lebedev.ru/wp-content/uploads/2020/05/0506.pdf> Дата звернення 04.04.2026.

9. R. Matias, S. Ikezawa, J. Corres. Fiber Optic Sensors. Current Status and Future Possibilities. – Springer International Publishing, 2017. – 381 p.

10. М. Ли. Каковы антикоррозионные свойства покрытий диоксида титана рутила? URL: <https://www.sasa-zirconia.com/blog/what-are-the-anti-corrosion-properties-of-rutile-titanium-dioxide-coatings-13046.html> Дата звернення 04.04.2026.

11. Сандлер, А. К. Чувствительный элемент волоконно-оптического акселерометра на основе сапфирового стекла // IX міжнародна науково-методична конференція "Суднова електроінженерія, електроніка і автоматика", 05-06 листопада 2019 р.: матеріали конференції. – Одеса: НУ "ОМА". – 2019. – С. 27 - 33. [dx.doi.org/10.31653/2706-7874](https://doi.org/10.31653/2706-7874).

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

13. Сандлер, А. К., Логишев, И. В., Сандлер, А. А. Структурная модель инвариантного волоконного акселерометра // Судовые энергетические установки. – 2011. – Вып. 25. – Одесса: ОНМА. – С.87-93.

14. D. Homa. Development of Sapphire Optical Fiber Sensors for High Temperature Applications: Ph.D. in Materials Science and Engineering Institution / Virginia Polytechnic Institute and State University. – Virginia, 2016.

15. Bo Liu, Zhihao Yu, Cary Hill, Yujie Cheng, Daniel Homa, Gary Pickrell, and Anbo Wang. Sapphire-fiber-based distributed high-temperature sensing system // Opt. Lett. – 2016. – № 41. – P. 4405 - 4408.

16. Liu, H. H, Hu, D. J. J, Sun, Q. Z, Wei, L, Li, K. W et al. Specialty optical fibers for advanced sensing applications // Opto Electron Sci. – 2023. – № 2. – h. 3 - 27. <https://doi.org/10.29026/oes.2023.220025>.
17. Snyder, A. W., Love, J. D. Optical Waveguide Theory. – London: Chapman and Hall, 1991. – 734 p.
18. E. Udd, W. B. Spillman, Jr. Fiber Optic Sensors: An Introduction for Engineers and Scientists. – Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 2011. – 520 p.
19. Бусурін, В. І., Носов, Ю. Р. Волоконно-оптичні датчики: фізичні основи, питання розрахунку і застосування. URL: <https://k.twirpx.link/file/4434875>. Дата звернення 04.04.2026.
20. Shizhuo Yin, P. B. Ruffin, Francis T. S. Yu. Fiber Optic Sensors. – London: CRC Press, 2017. – 492 p.
21. Семенов, А. С., Смирнов, В. Л., Шмалько, А. В. Интегральная оптика для систем передачи и обработки информации. URL: bookshare.net/index.php?id1=4&category=physics&author=semenov-as&book=1990. Дата звернення 04.04.2026.
22. Ярив, А., Юх, П. Оптические волны в кристаллах. URL: <https://read.in.ua/book104865>. Дата звернення 04.04.2026.
23. Sandler, A., Budashko, V., Khniunin, S., Bogach, V. Improving the mathematical model of a fiber-optic inclinometer for vibration diagnostics of elements in the propulsion system with sliding bearings // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. Applied physics. – 2023. – Vol. 5. – №. 5(125). – P. 24 – 31. DOI: 10.15587/1729-4061.2023.289773.
24. Budashko, V., Glazeva, O., Sandler, A., Khniunin, S., Leshchenko, V., Budashko, O. Improving the Method of Predictive Control of Multilevel Systems under Uncertainty // 2025 IEEE 8th International Conference on Methods and Systems of Navigation and Motion Control. – Kyiv: Aviation Institute Week on October 21 - 24, 2025. – P. 1 - 6. DOI: 10.1109/MSNMC61130.2025.11399677.
25. Сандлер, А. К., Сандлер, А. А. Волоконно-оптический датчик давления для высокотемпературных систем топливopодготовки // Судовые энергетические установки. – 2009. – Вып. 23. – Одесса: ОНМА. – С. 17 - 22.
26. Сандлер, А. К., Батинський, А. І. Волоконно-оптичний пристрій контролю рівня для високотемпературних систем паливopідготовки // Автоматизація технологічних і бізнес-процесів. – 2020. – Т. 12. – №. 2. – Одеса: ОНАХТ. – С. 9 - 13. DOI: <https://doi.org/10.15673/atbp.v12i2.1802>.

27. Сандлер, А. К., Карпилов, А. Ю. Применение волоконно-оптических датчиков в системах автоматического диагностирования судовых газотурбинных установок // Автоматизація технологічних і бізнес-процесів. – 2019. – Т. 11. – №. 2. – Одесса: ОНАХТ. – С. 46 - 52. DOI: <https://doi.org/10.15673/atbp.v11i2.1374>.

28. Сандлер, А. К., Карпилов, А. Ю. Волоконно-оптическая система контроля тяги газотурбинных двигателей // Автоматизація технологічних і бізнес-процесів. – 2019. – Т. 11. – №. 3. – Одеса: ОНАХТ. – С. 74 - 79. DOI: <https://doi.org/10.15673/atbp.v11i3.1499>.

29. Сандлер, А. К., Цюпко, Ю. М., Сандлер, О. А., Цюпко, К. Ю. Схемотехнічне рішення комбінованого датчика клімат-контролю // Автоматизация судовых технических средств. – 2014. – Вып. 19. – Одесса: ОНМА. – С. 69 - 73.

30. R. Ganguli. Gas Turbine Diagnostics: Signal Processing and Fault Isolation. – Abingdon: Taylor & Francis, 2017. – 251 p.

31. C. Nicol. Monitoring and diagnostics for gas turbines – case studies // The Future of Gas Turbine Technology 5th International Conference 27-28 October 2010, Brussels, Belgium. – P. 1 - 17.

32. Sampath, S., Singh, R. An integrated fault diagnostics model using genetic algorithm and neural networks // Journal of Engineering for Gas Turbines and Power. – 2006. – Vol. 128. – No. 1. – P. 49 - 56.

Abstract. One of the key indicators of the economic efficiency of a gas turbine unit (GTU) is the service life of its individual components, particularly those that need to be replaced during scheduled maintenance, i.e. the so-called ‘consumables’. Extending the service life of these components until they need to be replaced or repaired makes it possible to reduce the frequency of maintenance, cut costs associated with taking the engine out of and putting it back into service, and lower the risk of emergencies. Such components include, for example, turbine blades, combustion chamber components, bearings, parts of the lubrication and cooling systems, and others. One of the main factors affecting the service life of these components is the actual operating conditions, which can be determined both by the specific characteristics of the engine’s operating processes and by the conditions of its use on the test bench. The wear and tear of these components, caused by operational processes, most often manifests itself as physical damage resulting from thermal or mechanical stresses. Consequently, the development or modernization of GTU components and assemblies requires a detailed study of their resistance to high temperatures and mechanical stresses. To address this challenge, a new circuit design for

a temperature sensor for the inner surface of the combustion chamber's heating tube has been proposed. The distinctive feature of this sensor lies in the use of a switching optical fiber combined with a coaxial optical fiber. The main element of the latter is a sapphire glass optical fiber surrounded by a coaxial rutile cladding. In addition, the sapphire optical fiber is integrally connected to a reflective layer. An optical coupler is located between the photodetector and the splitter, ensuring precise alignment of the splitter branch with the active region of the photodetector without the need for additional adjustment.

УДК 681.7.068.4

DOI: 10.31653/1819-3293-2026-1-31-141-152

ARTICLE HISTORY

Received 21.04.2026

Accepted 11.05.2026

Сандлер Альберт Кирилович¹, Парменова Дана Георгіївна²
Національний університет "Одеська морська академія", Одеса,
Україна
sa@onma.edu.ua¹, parmenova-dg@onma.edu.ua²

ВОЛОКОННО-ОПТИЧНИЙ ДАТЧИК ДЛЯ КОНТРОЛЮ ВАЛІВ ГРЕБНИХ ГВИНТІВ

Sandler Albert¹, Parmenova Dana²
National University "Odessa Maritime Academy", Odessa, Ukraine
sa@onma.edu.ua¹, parmenova-dg@onma.edu.ua²

FIBER OPTIC SENSOR FOR CONTROLLING PROPELLER SHAFTS

Резюме. Проаналізовано вимоги щодо метрологічного забезпечення процесу тензометрії гребних валів сучасних суден. Аналітичним дослідженням встановлено, що схемотехнічних рішень в області волоконно-оптичних тензометрів, які повною мірою задовольняють вимогам до якості контролю валопроводів ГВ, до останнього часу не було відомо. Для подолання цієї проблеми запропоновано нове схемотехнічне рішення волоконно-оптичного датчика для контролю величин крутіння гребних валів. Основна відмінність датчика полягає у застосуванні закритого оптичного каналу на основі оптичного тунельного ефекту з одночасною деформацією зсуву та вигину чутливого елементу. Це забезпечить зменшення впливу дестабілізуючих експлуатаційних факторів на точність та вірогідність вимірювань.

Summary. The requirements for metrological support of the process of tensometry of propeller shafts of modern vessels have been analyzed. Analytical research has established that until recently, circuit solutions in the field of fiber-optic strain gauges that fully meet the requirements for the quality control of propeller shafts were not known. To overcome this problem, a new circuit solution of a fiber-optic sensor for controlling the values of propeller shaft rotation has been proposed. The main difference of

the sensor is the use of a closed optical channel based on the optical tunnel effect with simultaneous shear and bending deformation of the sensitive element. This will ensure a reduction in the impact of destabilizing operational factors on the accuracy and reliability of measurements.

У сталому режимі роботи, під час одночасного впливу крутного моменту від суднового двигуна та гребного гвинта, амплітуди крутильних коливань гребного валу (ГВ) можуть виникати як у межах, так і поза резонансним діапазоном. Під час цього процесу стала величина кута закручування може тривалий час суттєво перевищувати припустимі величини [1, 2]. Резонансні явища, що виникають у валопроводах внаслідок розвитку крутильних коливань, є джерелом виникнення техногенних аварій, які можуть мати катастрофічні наслідки [3]. Тому протидія деструктивному процесу виникнення небезпечних крутильних коливань напряму обумовлює стан безпеки життєдіяльності на морі.

Стандарт ISO 3046-5:2001 вимагає врахування внеску усіх гармонійних складових крутильних коливань у всьому діапазоні частот обертання валопроводу [4].

Сучасні засоби та пристрої для тензометрії ГВ працюють у складних умовах, що характеризуються впливом дестабілізуючих факторів (ДФ). Серед них – концентровані електромагнітні та теплові поля, вібрації, а також потужний локальний вплив суднового енергетичного обладнання [5 - 9]. Вплив ДФ на існуючі тензодатчики відбувається у такий спосіб.

Волоконно-оптичний тензодатчик містить випромінюючий відрізок волоконного світловода 1, що грає роль джерела випромінювання, до якого надходить випромінювання від лазера або світлодіода 2, і приймального волоконного світловода 3 (рис. 1) [10].

Приймальний світловод грає роль фотоприймача, з виходу якого випромінювання 4 реєструється приймачем випромінювання. Обидва відрізки волоконного світловода мають світловодну серцевину 5 і оболонку 6. Обидва відрізки світловода закріплюються клеєм 7 або іншим способом на поверхні контрольованого об'єкта. При цьому відстань між кріпленнями світловода становить вимірювальну базу L значення якої вибирається з максимального значення деформації розтягування-стиснення конкретного контрольованого об'єкта. Для того, щоб осі відрізків волоконних світловодів збігалися при зміні відстані між торцями світловодів при зміні деформації, світловоди розміщуються у вільно розташованій на поверхні об'єкта контролю втулці 8, в якій вони можуть переміщатися.

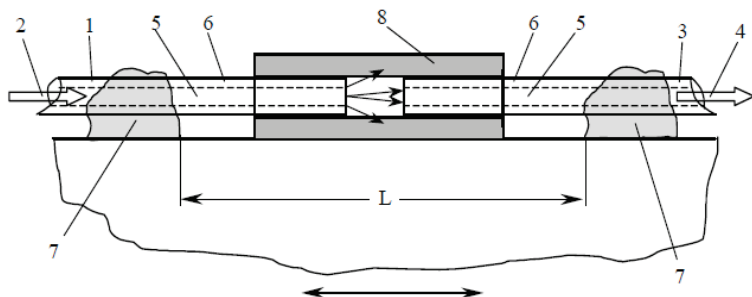


Рис. 1. Схема волоконно-оптичного тензодатчика торцевої схеми: 1 – відрізок випромінюючого світловоду; 2 – випромінювання, що вводиться у світловід; 3 – відрізок приймального світловоду; 4 – випромінювання, що потрапляє на фотоприймач; 5 – сердцевина світловода; 6 – оболонка світловода; 7 – пристрій кріплення світловода на поверхні об'єкта контролю; 8 – втулка, що центрує. Стрілка внизу показує характер деформації об'єкта

Принцип роботи перетворювача заснований на тому, що випромінювання з хвильоводу розходить в апертурному куті i , у міру віддалення від випромінюючого торця світловода, енергетична освітленість буде зменшуватися, і, отже, зменшуватиметься сигнал, що реєструється.

Оскільки абсолютні значення деформації розтягування і стиснення при прийнятних значеннях вимірюваної бази становлять лише одиниці або сотні мікрометрів, для підвищення чутливості тензодатчика простір між вихідним кінцем випромінюючого волокна і вхідним кінцем приймального волокна заповнений рідиною з великим коефіцієнтом поглинання на довжині хвилі випромінювання.

Однак, з рис. 1 також впливає, що відкриті торцеві поверхні піддаються деструктивному впливу в процесі експлуатації. Серед факторів, що сприяють руйнуванню оптичних волокон, слід виокремити вплив вологи, кислотного та лужного середовища, а також механічні дії на їхню поверхню.

Але у [7, 11] зазначено, що ДФ та рідина заповнення значним чином впливають на стан торцевих поверхонь оптичних волокон. Це негативно відбивається на параметри та характеристики випромінювання у оптичній системі датчика. Окрім механічних ушкоджень, які спричиняють виникнення подряпин і шорсткостей, існують й інші причини появи неоднорідностей. Зокрема, це може бути

забруднення поверхні, проникнення і конденсація вологи під час різких температурних перепадів, а також деформації поверхонь під дією механічних впливів.

Руйнування скляних матеріалів під впливом вологи та високих температур обумовлене стимульованим гідролізом. У результаті цього процесу молекула води поетапно інтегрується в напружений зв'язок Si-O-Si, розриваючи його і створюючи нові зв'язки через атоми водню. Весь процес відбувається в поверхневому шарі скла. Для відкритих поверхонь скла порушення місткового зв'язку між іонами кремнію утворює два нестабільні різнозаряджені радикали. Ці радикали вирізняються високою реактивністю до молекул оточуючого середовища, особливо до H_2O . У результаті атом кремнію зв'язується з групою OH, що формує угруповання Si-OH, відоме як силанол. Силанольні групи характеризуються хімічною активністю – іон водню H може легко переміщуватися та замінюватися іншими функціональними сполуками. Таким чином, на поверхні скла можуть утворюватися інші оксиди, а за певних умов навіть формуватися цілі шари. Згодом на поверхні адсорбуються молекули води, що досягають динамічної рівноваги з водяною парою у навколишньому середовищі. Хімічно зв'язаний шар води має товщину близько 10^{-10} см і називається постійним гідратованим поверхневим шаром. Механізми водної (гідролітичної) та кислотної корозії мають схожість: у обох випадках основна дія спрямована на катіони-модифікатори, передусім на реакційно активні лужні іони. Якщо в звичайному склі гідролітична та кислотна корозія є незначними, то лужні розчини викликають значну деградацію більшості видів скла, руйнуючи навіть їх сітчасту структуру. Інтенсивність цього процесу зростає експоненціально зі збільшенням концентрації лугу та температури. Після завершення реакції з лугами на поверхні процес переходить у глибші шари скла, проникаючи через сітчасту структуру силікатів. Таким чином, подальша деградація набуває дифузійного характеру. Цей механізм стає ще більш активним за умов підвищеної температури та збільшеного вмісту лужних компонентів у склі. Утворений у процесі реакції шар поступово потовщується, сприяючи зростанню пористості та площі поверхні скла. Ця пориста поверхня активно адсорбує воду навіть фізичним шляхом завдяки капілярним силам. У результаті вилужений верхній шар скла розбухає, утворюючи гель кремнієвої кислоти товщиною до 100 ... 200 нм. Зі збільшенням товщини і пористості вилуженого шару корозійний процес може поширюватися на нижчі структури скла, що зрештою призводить до його поступового руйнування. В умовах обмеженої вологості хід реакцій змінюється.

Початковий гідроліз із чистою водою переходить у лужну взаємодію, інтенсивність якої зростає при підвищенні температури. Лужний вплив призводить до руйнування кремнеземистого каркаса скла, формуючи на його поверхні пошкоджений шар. Очевидно, що утворення постійних деструктурованих поверхневих шарів сприяє зміні шорсткості крайових оптичних поверхонь. Дослідження цього процесу демонструють, що із підвищенням шорсткості поверхні вхідного торця оптичного волокна змінюється ефективність введення випромінювання та його модовий склад [7].

Крім того у датчиках з відкритим оптичним каналом відсутня можливість компенсації температурних коливань зовнішнього середовища.

Таким чином, як мету дослідження доцільно зазначити забезпечення високої ефективності використання та надійності роботи валів гребних гвинтів через впровадження новітніх засобів діагностування та прогнозування технічного стану, які забезпечують підвищення вірогідності процесів діагностування валів за рахунок використання принципів часткової інваріантності до зовнішніх неконтрольованих впливів на вимірювання

Особливості впливу ДФ на параметри волоконно-оптичного тензодатчикув дозволив конкретизувати відмінності, які мають бути притаманні новому схемотехнічному рішенням вимірювального пристрою. Для вдосконалення експлуатаційних характеристик у розроблюваному тензометрі:

- вимірювальний оптичний канал повинен бути закритим який базується на одномодових світловодах. Це пов'язано з тим, що такі світловоди забезпечують більший діапазон зміни сигналу проти багатомодових при однакових значеннях амплітуди деформації;
- забезпечена інваріантність до ДФ;
- збережено надійність, чутливість та простота схемотехнічних рішень тензометрів відомих типів.

Суть запропонованого конструктивного рішення вдосконаленого датчика полягає у застосуванні закритого оптичного каналу на основі оптичного тунельного ефекту з одночасною деформацією зсуву та вигину чутливого елементу. На рис. 2 представлена схема такого датчика.

Основою запропонованого датчика є комбінований світловод, який складається з первинного стрижневого світловоду 3 та вторинного коаксіального світловоду, що вкриті загальною захисною оболонкою 5.

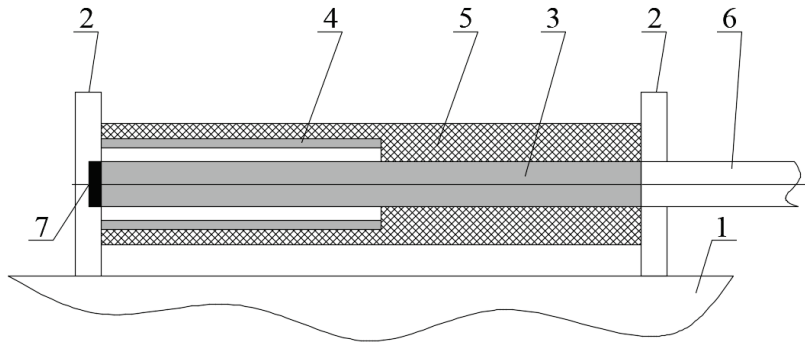


Рис. 2. Волоконно-оптичний датчик на основі оптичного тунельного ефекту: 1 – гребінний вал; 2 – жорсткі опори; 3 – первинний стрижневий світловід; 4 – вторинний коаксіальний світловід; 5 – загальна захисна оболонка; 6 – біскляний термокомпенсуючий світловід; 7 – віддзеркалюючий шар

Первинний світловід жорстко зафіксований у опорах 2, які монтується на ГВ 1. Вторинний світловід жорстко зафіксований одним кінцем лише на одній опорі. Між первинним світловідом та волоконно-оптичною лінією зв'язку вбудовано ділянку біскляного термокомпенсуючого світловоду 6. Зміна величини вигину під впливом температури бути ініціювати зміну величини оптичного випромінювання, що залишає біскляний світловід. Також первинний світловід на одному з торців має віддзеркалюючий шар 7.

При виникненні у ГВ деформацій зсуву опори також зсуваються одна по відношенню до іншої. В наслідок чого у первинному світловіді відбуваються деформації зсуву та вигину за спіральною траєкторією. Процеси, які відбуваються, знаходять своє відбиття у зміні показника заломлення первинного світловоду та процесу тунелювання оптичної потужності з первинного до вторинного світловоду.

Величина зміни показника заломлення при згинанні та крученні ОВ [12, 13]

$$n^* = n_0 + \frac{1}{2n_0} \left(-2\chi\rho\cos\varphi + \chi^2\rho^2\cos^2\varphi + \nu^2\rho^2 \right),$$

де n_0 – показник заломлення ненапруженого оптичного волокна;

χ і ν – параметри кривизни та кручення осі, вигнутого по спіралі ОВ

$$\chi = \frac{R}{R^2 + \left(\frac{p}{2\pi}\right)^2}; \nu = \frac{p}{2\pi} \frac{1}{R^2 + \left(\frac{p}{2\pi}\right)^2},$$

φ – кут, який відрховується від осі $x(\xi)$;

R, p – радіус вигину осі ОВ і крок спіралі відповідно.

Тоді коефіцієнт оптичного тунельного зв'язку між первинним та вторинним світловодами

$$C = \sqrt{\frac{\pi\Delta}{(\beta^2 - k^2 n_2^2) d \rho^2}} \frac{\rho \sqrt{(k^2 n_2^2 - \beta^2)} \exp\left(-\left(\sqrt{\beta^2 - k^2 n_2^2}\right) d\right)}{(k \rho (n_2^2 - n_1^2))^2 K_1^2\left(\rho \sqrt{\beta^2 - k^2 n_2^2}\right) d},$$

де n_2 – показник заломлення вторинного світловода;

k – хвильове число;

K_1 – функція Бесселя;

β – різниця постійних поширення у первинному та вторинному світловодах;

А величина оптичної потужності випромінювання, яке відбивається від віддзеркалюючого шару та повертається до фотоприймача може буде визначена як

$$P_R(z) = \left[1 - \frac{\sin^2 CL \sqrt{1 + \left[\frac{(\beta_R - \beta_T + \beta_E + \beta_H)}{2C} \right]^2}}{1 + \left[\frac{(\beta_R - \beta_T + \beta_E + \beta_H)}{2C} \right]^2} \right] P_0, \quad (1)$$

де P_0 – сумарна потужність, уведена в коаксіальну структуру;

β_R – стала поширення у первинному світловоді;

β_T – постійна поширення у вторинному світловоді;

β_E – збільшення постійної поширення через еліптичність коаксіальної структури;

β_H – збільшення постійної поширення через збурювання, що порушують циркулярну симетрію коаксіальної структури;

L – довжина коаксіальної ділянки комбінованого світловоду.

Функція перетворення, побудована за (1) надана на рис. 3.

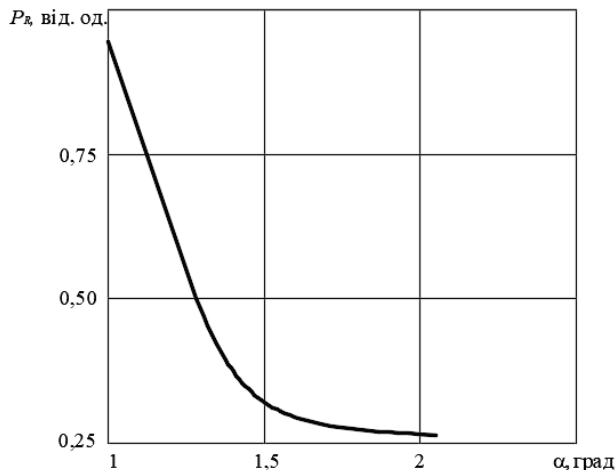


Рис. 3. Залежність оптичної потужності випромінювання, яке відбивається від віддзеркалюючого шару, від величини кута крутіння для світловоду з сапфірового скла

У той самий час результати моделювання показників первинного світловоду, як чутливого елемента тензометра, при впливі зсувних деформацій показують, що з теорії пружності, максимальне значення показника заломлення спостерігається біля зовнішньої межі світловода. Тільки застосування штучного сапфіру як матеріал для виготовлення первинного світловоду дозволяє досягти високих значень власних частот за збереження стандартного розмірного ряду [14, 15]. Для розширення найбільш раціонального одномодового режиму тензометру пропонується використовувати первинний світловід із депресованою серцевиною. Зниження показника заломлення серцевини дозволяє зменшити кількість симетричних хвиль, що поширюються, з чотирьох до двох.

Для інших профілів показника заломлення, на критичних частотах спостерігається витік оболонкових хвиль у зовнішнє середовище, оскільки порушується умова повного внутрішнього відображення на межі "оболонка - навколишнє середовище". Причому витік у довкілля починається раніше, ніж у внутрішню область. У такому випадку то порушення умови повного внутрішнього відображення відбувається спочатку на межі "серцевина - оболонка", а не на кордоні "оболонка - навколишнє середовище". Це призводить до початку "втікання" хвиль у серцевину світловода

Таким чином, запропонований тезодатчик у змозі забезпечити більш вірогідні результати моніторингу стану валів гребних гвинтів за рахунок більшої стійкості до впливу ДФ завдяки застосуванню закритому оптичному каналу. Крім того, застосування біскляного термокомпенсуючого світловода дозволить суттєво нівелювати вплив темних полів суднового обладнання.

До додаткових переваг вдосконаленої моделі тензометра слід віднести адаптивність щодо вибору локальних робочих точок для кожного каналу дистанційного контролю. Це дозволяє розробляти оптимальні конфігурації інтелектуальної інформаційно-вимірювальної системи на основі волоконно-оптичних технологій. Подальший розвиток такого підходу полягає у застосуванні мережі пристроїв для діагностування усього пропульсивного комплексу та самоідентифікації та автодіагностики вимірювальних пристроїв із застосуванням новітніх типів оптичного волокна [16 - 22].

ЛІТЕРАТУРА REFERENCES

1. Кардашев, Д. Л., Аболешкін, С. Є. Оцінка величини усталеного кута закручування гребного вала // Суднові енергетичні установки. — 2025. — № 51. — С. 4 - 9.
2. Сагін, С. В., Парменова, Д. Г. Діагностування технічного стану суднових дизелів // Суднові енергетичні установки. — 2025. — № 51. — С. 66 - 77.
3. Парменова, Д. Г. Анализ аварийных ситуаций с судами морского флота // Судовождение. — 2014. — № 24. — С. 134 -140.
4. ISO 3046-5:2001 Reciprocating internal combustion engines — Performance — Part 5: Torsional vibrations.
5. Кулешов, І. М. Парменова, Д. Г., Мамкічев, М. А. Аналіз аварійності світового морського торговельного флоту у 2020-2021 роках // Матеріали науково-технічної конференції "Морський та річковий флот: експлуатація і ремонт", 24.03.2022 – 25.03.2022. — Одеса: НУ "ОМА". — 2022. — С. 141 – 143.
6. Клюев, В. В. Технические средства диагностирования. — М.: Машиностроение, 1989. — 671 с.
7. Сандлер, А. К. Метод підвищення ефективності діагностування технічного стану суднових газотурбінних установок на основі волоконно-оптичних технологій: автореф. дис. ... канд. техн. наук:

05.22.20 / К., Київський університет інфраструктури та технологій. – 2021. – 20 с.

8. Сандлер, А. К. Інформаційно-вимірювальні пристрої на основі волоконно-оптичних технологій. – Одеса: Видатінформ НУ "ОМА", 2018. – 165 с.

9. Сандлер, А. К., Цюпко, Ю. М., Сандлер, О. А., Цюпко, К. Ю. Засіб діагностування поршневих кілець // Автоматизация судовых технических средств. – 2015. – Вып. 21. – Одесса: ОНМА. – С. 64 - 70.

10. Сандлер, А. К. Моделирование акселерометра маятникового типа // Вісник Черкаського державного технологічного університету. Серія: Технічні науки. – 2019. – №1. – Черкаси: ЧДТУ. – С. 75 - 81.

11. Борисов, В. И., Силутина, Е. М., Шилова, И. В. Волоконно-оптический тензодатчик. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/volokonno-opticheskiy-tenzodatchik>.

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

13. Ovchinkin. A. V., Sinitca. P. I., Malov. A. N. The stress-deformed state of the optical fiber due to buffer gel freezing. // "Proceedings of the First Asia-Pacific Conference on Fundamental Problems of Opto- and Microelectronics – APCOM'2000". –2000. – P. 60 - 67.

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

15. Bo Liu, Zhihao Yu, Cary Hill, Yujie Cheng, Daniel Homa, Gary Pickrell, and Anbo Wang. Sapphire-fiber-based distributed high-temperature sensing system // Opt. Lett. – 2016. – № 41. – P. 4405-4408.

16. Sandler, A., Budashko, V., Khniunin, S., Bogach, V. Improving the mathematical model of a fiber-optic inclinometer for vibration diagnostics of elements in the propulsion system with sliding bearings // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. Applied physics. – 2023. – Vol. 5. – №. 5(125). – P. 24 - 31.

17. Адамс М. Введение в теорию оптических волноводов. – М.: Мир, 1984. – 512 с.

18. E. Udd, W. B. Spillman Jr. Fiber Optic Sensors: An Introduction for Engineers and Scientists. London: John Wiley & Sons, Inc., 2011. – 520 p.

19. Shizhuo Yin, Paul B. Ruffin, Francis T.S. Yu. Fiber Optic Sensors. – London: CRC Press, 2017. – 492 p.

20. E. D. Palik. Handbook of Optical Constants of Solids. – San Diego: Academic Press, 1997. – 337 p.

21. Сандлер, А. К., Рябцов, О. В. Застосування спеціальних оптичних волокон для вдосконалення навігаційного обладнання // Automation of Technological and Business Processes. – 2025. – № 17 (4). – С. 11 - 17.

22. M. V. Levinskyi, O. O. Petrychenko, S. Goolak, V. Lukosevicius. Prospects of Solar Energy in the Context of Greening Maritime Transport // Sustainability. – 2025. – Vol. 17(5). – P. 2141.

Abstract. Modern tools and devices for tensometry of propeller shafts operate in difficult conditions, characterized by the influence of destabilizing factors. Among them are concentrated electromagnetic and thermal fields, vibrations, as well as the powerful local influence of ship power equipment. These disturbances significantly complicate or even make it impossible to effectively diagnose and predict the technical condition of shaft lines with respect to torsional vibrations. Analysis of modern solutions demonstrates the need for modern means of tensometry that would meet the requirements of modern technical operation and repair. First of all, these are fiber optics devices that are insensitive to most destabilizing factors (DF) inherent in operating conditions. At the same time, an analysis of literary sources showed that until recently, circuit solutions in the field of fiber-optic tensometers that fully meet the requirements for the quality control of shaft lines of ships were not known. Thus, the development and research of a new fiber-optic strain gauge is an urgent scientific and technical task. Analysis of the designs of known strain gauges allowed specifying the requirements for a new circuit design of the measuring device. To improve the operational characteristics in the developed strain gauge:

- the measuring optical channel must be closed;
- there is a possibility of compensating for fluctuations in the external temperature;
- the reliability, sensitivity and simplicity of the circuit designs of strain gauges of known types are preserved.

The essence of the proposed design solution of the improved sensor is to use a closed optical channel based on the optical tunnel effect with simultaneous shear and bending deformation of the sensitive element. Fig. 3 shows a diagram of such a sensor.

To expand the most rational single-mode mode of the strain gauge, it is proposed to use a primary fiber with a depressed core. Reducing the refractive index of the core allows reducing the number of propagating symmetric waves from four to two.

The implementation of more advanced information and measurement systems will significantly affect the restoration and promotion of the competitive development of national maritime enterprises and inland waterway transport enterprises, the development of competitive human resources, and the introduction of digitalization principles in the management of technical operation and repair of vessels

УДК 656.6-042.5/.8:502/504

DOI: 10.31653/1819-3293-2026-1-31-153-166

ARTICLE HISTORY

Received 21.04.2026

Accepted 11.05.2026

Суворов Петро Семенович¹, Тарасенко Тетяна Владиславівна²Секретаріат Дунайської Комісії¹

Дунайський інститут Національного університету «Одеська морська академія»,

pjotr.suvorov@danubecommission.org¹, tarasenko@dinuoma.com.ua²

СЦЕНАРНИЙ ПІДХІД ДО ПРОГНОЗУВАННЯ ПЕРЕХОДУ ДО ЕКОНАВІГАЦІЇ

Petro Suvorov¹, Tetyana Tarasenko²Secretariat of the Danube Commission¹Danube institute of National university «Odessa Maritime Academy»²,pjotr.suvorov@danubecommission.org¹, tarasenko@dinuoma.com.ua

SCENARIO APPROACH TO FORECASTING THE TRANSITION TO ECO-NAVIGATION

Резюме. Нові правила ЄС та ІМО стосовно вимог до викидів парникових газів суттєво вплинуть на судноплавство, зумовлюючи значні фінансові наслідки залежно від обраної стратегії дотримання вимог для конкретного судна, включаючи застосування технології dual-fuel. У дослідженні змодельовано сценарії переходу до еконавігації на прикладі універсального суховантажного середньотоннажного судна без його модернізації з урахуванням додавання сумісних біо-палив (такий підхід може бути застосовано для транспортних суден будь-яких типів). На перших етапах після набуття чинності нових нормативних значень викиди ПГ відповідають встановленим вимогам. Штрафні санкції розпочнуться лише на третьому етапі скорочень нормативів. Для судовласника, який експлуатує декілька однотипних суден такий аналіз дає розуміння шляхів оптимізації витрат та доцільності об'єднання відповідності, що робить застосування сумісних екологічних видів палива економічно виправданим.

Summary. *New EU and IMO greenhouse gas (GHG) regulations will significantly affect shipping, creating substantial financial implications for applying different compliance strategies, including dual-fuel technologies. This study considers a transition scenario to eco-navigation using the case of a medium-sized bulk carrier without retrofitting, but with the integration of compatible biofuels – an approach applicable to vessels of various types. In the initial phases following the introduction of new limits, the vessel's GHG emissions remain compliant, with penalties arising only in the third stage of reductions. For shipowners operating several similar vessels, such analysis provides insights into cost optimization and the economic justification of compliance pooling, thereby supporting the adoption of compatible alternative fuels.*

Сучасне судноплавство традиційно стоїть перед постійними викликами, пов'язаними з підвищенням вимог забезпечення надійності, безпеки перевезень та забезпечення його економічності. Стрімкий технологічний розвиток сприяє впровадженню новітніх засобів контролю, аналізу та моніторингу руху суден для забезпечення найвищого рівня економічної функціональності та попередження можливих неполадок. Серед нових викликів, які мають особливу увагу для розгляду, слід підкреслити також проблему конвенційного забезпечення енергоефективності роботи флоту, яка стає одним з ключових завдань у сфері світового судноплавства.

Введені на початку 2020-х років Директиви та інші акти Європейського Союзу (ЄС) щодо скорочення викидів парникових газів від суден внутрішнього плавання [1], Регламент (ЄС) 2023/1805 від 13 вересня 2023 року щодо використання відновлюваних та низьковуглецевих видів палива в морському секторі та про внесення змін до Директиви (ЄС) 2019/944 і Регламенту (ЄС) 2019/943 (далі за текстом застосовується неформальна коротка назва – *FuelEU Maritime*) для морських суден, а також оновлена Стратегія ІМО щодо скорочення викидів парникових газів від міжнародного судноплавства створюють узгоджену систему регулювання, яка матиме суттєвий вплив на галузь судноплавства, зокрема через посилення моніторингу та запровадження додаткових фінансових зобов'язань для судновласників. За наявними оцінками та прикладними розрахунками сценаріїв експлуатації флоту такі регуляторні заходи призводять до відчутного збільшення сукупних витрат, що зумовлює необхідність завчасного формування стратегій реагування, спрямованих на оптимізацію витрат та врахування комерційного впливу екологічних вимог на економічність перевезень.

Питання оцінювання енергоефективності та екологічності роботи флоту в умовах енергетичного переходу для внутрішнього судноплавства та морських перевезень розглядаються у низці сучасних робіт. У роботі [1] проаналізовано підходи до оцінювання енергоефективності суден та впливу режимів експлуатації на викиди парникових газів у контексті переходу на альтернативні види палива. У зарубіжних дослідженнях значну увагу приділено впливу впровадження регуляторних режимів ЄС, зокрема *FuelEU Maritime* та Європейської системи торгівлі викидами парникових газів (*EU Emissions Trading System, EU ETS*), на структуру витрат судновласників і формування стратегій дотримання вимог. У документі [2] представлено сценарний аналіз різних стратегій відповідності *FuelEU Maritime* для нового балкера, включно з поєднанням заходів з підвищення енергоефективності, використанням альтернативних палив та механізмами об'єднання відповідності. Практичні аспекти формування цін на традиційні та альтернативні палива для морського транспорту наведено в галузевих джерелах, а методичні підходи до розрахунку викидів ПГ у перерахунку на CO₂-еквівалент – у матеріалах Рамкової конвенції ООН про зміну клімату. Регуляторний контекст скорочення викидів від судноплавства в ЄС додатково висвітлено в інформаційних матеріалах Єврокомісії, де окреслено роль морського сектору в досягненні кліматичних цілей Союзу.

Основна мета вимог зводиться до поступового ступінчастого зниження інтенсивності викидів парникових газів в кінцевому підсумку до 80 % з 2050 року. Судновласникам надається кілька гнучких механізмів для досягнення дотримання вимог законодавства (Регламенту), включаючи банківські операції, запозичення та об'єднання, а також штрафні виплати (очікується, що варіант нічого не робити та сплатити штраф буде дорожчим, ніж інші стратегії відповідності).

Викиди парникових газів розраховуються, включаючи викиди, пов'язані з видобутком, культивуванням, виробництвом і транспортуванням палива, на додаток до викидів від спалювання або перетворення енергії на борту судна (концепція *well-to-wake*). Також включено система живлення береговою енергією, що подається на судно. Крім того, існують коефіцієнти винагороди за використання певних відновлюваних видів палива (*RFNBO*) (наприклад, вводяться спеціальні для суден з вітровими силовими установками).

У структурах ЄС системно формується та постійно розвивається складне нормативне регулювання питань скорочення викидів парникових газів від судноплавства: у 2024 році в рамках пакету *Fit for*

55 судноплавство вже включено до Системи торгівлі викидами ЄС (ETS), а з 2025 року набув чинності Морський регламент *FuelEU*. Щоб гарантувати досягнення цілей оновленої Стратегії ІМО щодо скорочення викидів парникових газів від міжнародного судноплавства (2023 *IMO GHG Strategy*), Організація розробляє набір середньострокових заходів, що включатиме, зокрема, глобальний паливний стандарт та економічний механізм ціноутворення на викиди парникових газів. Питання конкретних параметрів і строків запровадження цих заходів перебуває на стадії міждержавних переговорів, на момент підготовки статті остаточні нормативні рішення ще не ухвалено, а регіональні режими, зокрема *FuelEU Maritime* та *EU ETS*, фактично формують основне регуляторне середовище для судноплавства.

Враховуючи тривалий термін служби суден, судовласники повинні підготуватися до запровадження майбутніх правил, що встановлюють витрати, а також обмеження на інтенсивність викидів парникових газів у паливі. Як кожне окреме судно, так й весь склад флоту необхідно підготувати до роботи у майбутньому, в якому викиди будуть мати прогнозовану вартість. Технічні та економічні чинники цієї проблеми тісно взаємопов'язані, а саме – краща підготовка технічних аспектів призведе до відсутності або нівелювання штрафів. У такій ситуації судовласникам буде важливо мати заздалегідь правильні стратегії та інструменти рішення цієї проблеми. Мета дослідження – сценарно оцінити техніко-економічні наслідки переходу існуючих вантажних суден до еконавігації в умовах запровадження вимог *FuelEU Maritime* та ІМО щодо скорочення викидів ПГ.

Задачі дослідження – аналіз чинних вимог ЄС та ІМО щодо скорочення викидів ПГ від судноплавства, розроблення та розрахунок кількох сценаріїв експлуатації суховантажного судна з різними стратегіями судовласника, оцінювання їхніх сукупних витрат на паливо, платежі за викиди й штрафи протягом розрахункового періоду та порівняння отриманих результатів для виявлення економічно доцільних варіантів переходу до еконавігації.

З 1 січня 2025 року набув чинності *FuelEU Maritime*, згідно якого судна понад 5000 GT, які перевозять вантажі або пасажирів у комерційних цілях у Європейському Союзі / Європейській економічній зоні (ЄЕЗ), повинні відповідати щорічним вимогам щодо інтенсивності викидів парникових газів (ПГ) *well-to-wake*, тобто за повний життєвий цикл від видобутку пального до його кінцевого використання. Інтенсивність парникових газів, $\text{gCO}_2/\text{МДж}$:

$$GHG_{intens} = \frac{Total\ GHG\ emissions}{Total\ energy\ from\ fuels + Total\ shore\ power + Rew_{RFNBO}} \times f_{wind},$$

де *Total GHG emissions* – загальні викиди парникових газів, гCO₂; *Total energy from fuels* – загальна кількість використаної енергії палив, МДж; *Total shore power* – загальна кількість використаної енергії від берегового постачання, МДж; *Rew_{RFNBO}* – винагородження за використання певних поновлюваних видів альтернативних палив, МДж; *f_{wind}* – безрозмірний коефіцієнт винагородження за використання вітрових силових установок.

Викиди парникових газів (чисельник у формулі) розраховуються, включаючи викиди, пов'язані з видобутком, культивуванням, виробництвом і транспортуванням палива, на додаток до викидів від спалювання або перетворення енергії на борту судна. До розрахунку кількості енергії (знаменник формули) крім загальної енергії від спалювання пального включено живлення береговою енергією, що подається на судно. Крім того, існують коефіцієнти винагороди за використання певних відновлюваних видів палива (*RFNBO*) і для суден з вітровими силовими установками.

Вимоги починаються зі зниження інтенсивності викидів парникових газів на 2 % протягом 2025 – 2029 років відносно середньої інтенсивності викидів парникових газів у 2020 році. Потім це цільове скорочення збільшується до 6 % протягом 2030 – 2034 років і далі прискорюється: 14,5 % з 2035 року, 31 % з 2040, 62 % з 2045 і, нарешті, 80 % з 2050 року. Судновласникам надається кілька гнучких механізмів для досягнення дотримання вимог законодавства, включаючи банківські операції, запозичення та об'єднання, а також штрафні виплати (очікується, що варіант нічого не робити та сплатити штраф буде дорожчим, ніж інші стратегії відповідності).

Серед усіх зацікавлених сторін найбільший регуляторний та фінансовий тягар припадає на судновласників, чії судна повинні щорічно звітувати перед компетентними органами держав прапора та прибережних держав (адміністраціями, уповноваженими органами контролю за виконанням вимог *FuelEU Maritime*, *EU ETS* та інших екологічних регуляторних режимів). При сталій роботі флоту можна спробувати оцінити вартість подальшої роботи в межах ЄС / ЄЗ існуючих суден. Подібний аналіз був зроблений для гіпотетичного нового балкера *Dw* = 80000 т, якій умовно введений в експлуатацію з початком дій нових вимог *FuelEU Maritime* і працюватиме 20 років, тобто до 2044 року включно [2]. Визначено кілька стратегій, починаючи з «не робити нічого та платити штраф» і далі поступово

збільшуючи заходи з підвищення енергоефективності, додавання, наприклад, *bio-MGO* у звичайні двигуни, використання інших альтернативних видів палива, берегового живлення тощо. Ці стратегії в середньому пропонують, порівняно зі стратегією *bio-MGO*, економію до 16 %, або 21 млн. дол. США. Також у роботі [2] оцінюється можливість об'єднання відповідності, яке має потенціал інструменту для розподілу витрат між суднами, які працюють у повній, частковій відповідності до вимог *FuelEU Maritime*, або зовсім не відповідають таким вимогам. Це допомагає запустити реальний бізнес-кейс для судна, яке повністю використовує свою потужність на екологічному паливі [5].

В той же час, для судновласників, які до 2025 року деякий час вже працювали на ЄС / ЄЕЗ, та мають судна, побудовані раніше введення в дію згаданих вимог, актуально мати розуміння перспектив для існуючих суден. Застосуємо аналогічний підхід для середньотоннажного універсального суховантажного судна $D_w = 57000$ т 2012 року побудови та введення в експлуатацію (табл. 1). Сучасні вимоги до енергоефективності та екологічності на час введення в експлуатацію цього судна ще не застосовувалися. Зазначимо також, що прив'язка до саме такого типу судна умовна, тобто такий підхід може бути використаним для транспортних суден будь-яких типів тоннажем понад 5000 GT.

Таблиця 1
Експлуатаційні характеристики судна

Дедвейт	57 000 т
Рік побудови	2012
Термін експлуатації за чинними вимогами <i>FuelEU Maritime</i>	13 років з 2025 по 2037 включно
Середньорічна витрата палива, еквівалентного MGO, у тому числі:	14700 т (632100 ГДж)
в рейсі	14500 т (623500 ГДж)
у причалу	200 т (8600 ГДж)
Район експлуатації	50 % в межах ЄС / ЄЕЗ

Розглянуті варіанти експлуатації цього судна без суттєвої модернізації (табл. 2), тільки з доданням біопалива, сумісного зі звичайним паливом викопного походження. Складніші варіанти

застосування альтернативних палив (метанол, амоній, *LNG*), також можуть бути розглянуті у подальшому.

Таблиця 2

Варіанти експлуатації судна

Позначення	Опис стратегії судновласника	Паливо або еквівалент палива
1	Без модернізації з оплатою штрафів	MGO
2	Без модернізації, з застосуванням заходів з енергоефективності, з оплатою штрафів	MGO
3	Використання додатково біо-MGO	MGO / біо-MGO
4	Використання додатково біо-MGO, з застосуванням заходів з енергоефективності	MGO / біо-MGO
5	Використання додатково біо-MGO, з підключенням до берегового живлення	MGO / біо-MGO

Також зауважимо, що розглядається експлуатація судна у режимі 50 / 50, тобто тільки 50 % часу рейсів судно перебуває в межах зони ЄС / ЄЕЗ.

Розрахунок вартості використаного за період експлуатації палива не може бути виконаним з урахуванням коливань цін на ринку палив. Але для оцінки стратегій вважається за доцільне прийняти умовно постійні значення вартості *MGO* на рівні 1276,50 долл. США / т; *bio-MGO* (як приклад) 856,50 долл. США / т – відповідно до цін у Роттердамі (*Plattz Rotterdam*) на 24.04.2026 [3]. Для розрахунку кількісних показників викидів ПГ у еквіваленті CO₂ використано калькулятор Секретаріату *UNFCC (United Nations Framework Convention on Climate Change)* [4]. Розміри штрафних виплат відповідають розрахунковій схемі *FuelEU Maritime*. Розміри внесків до фонду Європейської системи торгівлі викидами (*EU Emissions Trading System (ETS)*) відповідають умовній вартості 100 долл. США за 1 т викидів у еквіваленті CO₂ без урахування ринкових коливань.

Результати оцінки представлені у вигляді діаграм на рис. 1 – 5 та у порівняльній табл. 3.

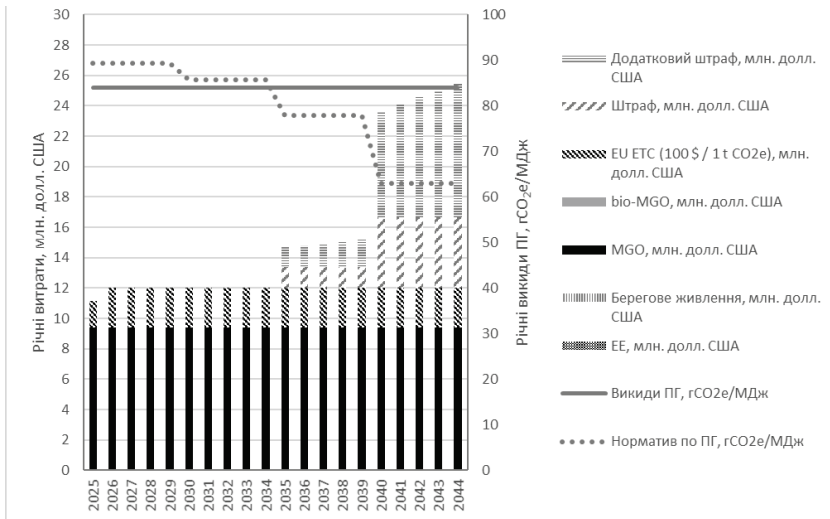


Рис. 1. Стратегія 1 (без модернізації з оплатою штрафів)

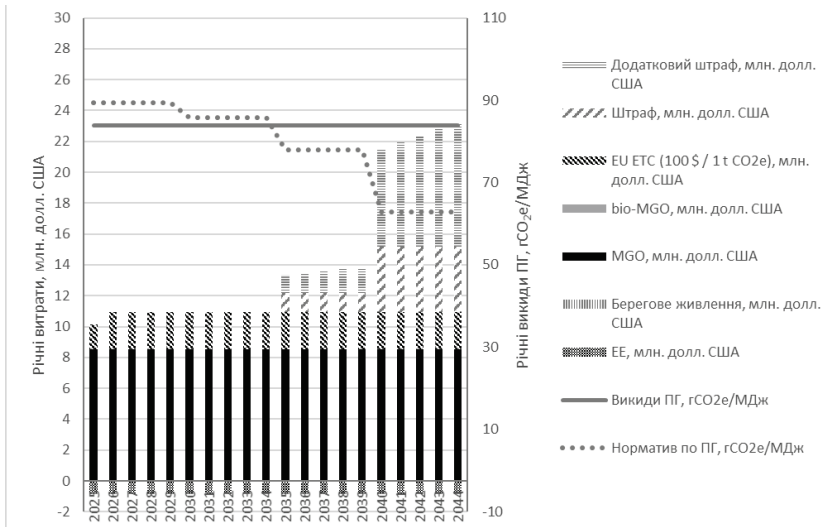


Рис. 2. Стратегія 2 (без модернізації, з застосуванням заходів з енергоефективності, з оплатою штрафів)

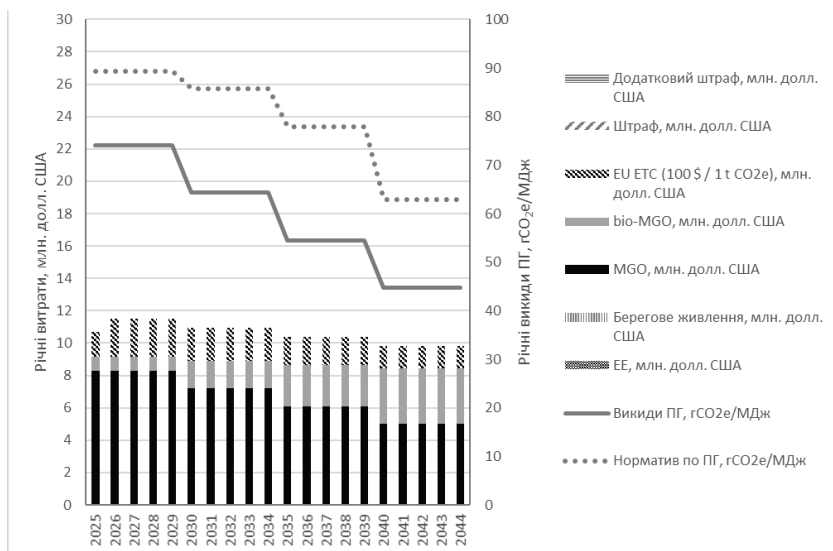


Рис. 3. Стратегія 3 (використання додатково біо-MGO)

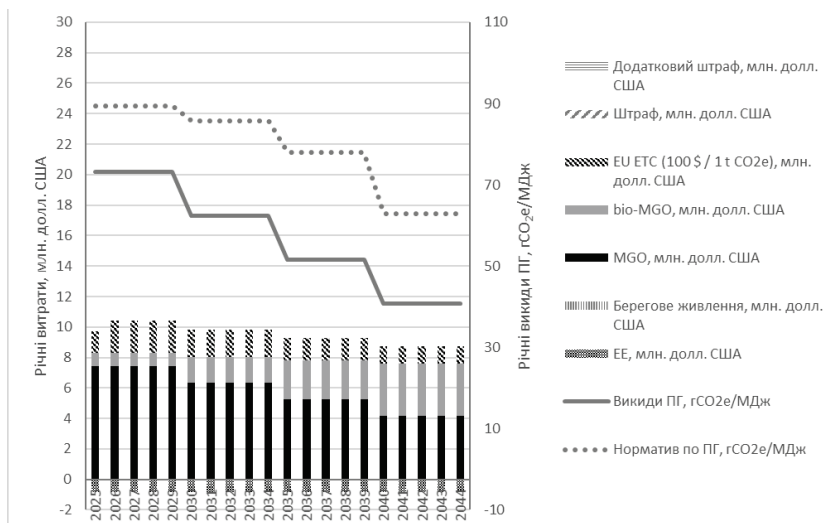


Рис. 4. Стратегія 4 (використання додатково біо-MGO, з застосуванням заходів з енергоефективності)

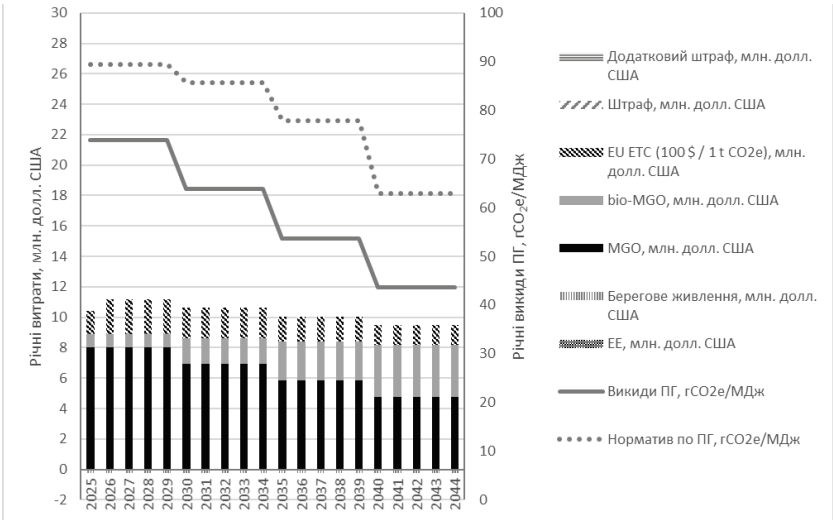


Рис. 5. Стратегія 5 (використання додатково біо-MGO, з підключенням до берегового живлення)

Таблиця 3

Зведена таблиця результатів порівняння можливих стратегій судновласника

Номер стратегії	Найменування показника	Оціночна вартість за 2026 -2044 р., млн. долл. США	Загальна вартість за 2026 - 2044 р., млн. долл. США	Накопичена невідповідність, $\text{тCO}_2\text{e}$
1	Заходи з енергоефективності	0	305,937	-33285
	Берегове живлення	0		
	Витрати на MGO	178,263		
	Витрати на біо-MGO	0		
	Внески до EU ETS	50,420		
	Штрафні витрати	29,841		
	Додатковий штраф	47,413		

Номер стратегії	Найменування показника	Оціночна вартість за 2026 -2044 р., млн. долл. США	Загальна вартість за 2026 - 2044 р., млн. долл. США	Накопичена невідповідність, тCO _{2e}
2	Заходи з енергоефективності	-16,044	262,363	-30290
	Берегове живлення	0		
	Витрачене MGO	162,220		
	Витрачене біо-MGO	0		
	Внески до <i>EU ETS</i>	45,886		
	Штрафні витрати	27,156		
	Додатковий штраф	43,145		
3	Заходи з енергоефективності	0	201,599	82
	Берегове живлення	0		
	Витрачене MGO	124,435		
	Витрачене біо-MGO	41,969		
	Внески до <i>EU ETS</i>	35,195		
	Штрафні витрати	0		
	Додатковий штраф	0		
4	Заходи з енергоефективності	-16,044	164,974	71
	Берегове живлення	0		
	Витрачене MGO	108,391		
	Витрачене біо-MGO	41,969		
	Внески до <i>EU ETS</i>	30,658		
	Штрафні витрати	0		
	Додатковий штраф	0		
5	Заходи з енергоефективності	0	190,525	82
	Берегове живлення	-4,851		
	Витрачене MGO	119,584		
	Витрачене біо-MGO	41,969		
	Внески до <i>EU ETS</i>	33,823		
	Штрафні витрати	0		
	Додатковий штраф	0		

Враховуючи потенційні фінансові наслідки різних технічних рішень, а також враховуючи можливості гнучкого підходу до

застосування тих чи інших технологій, кожній стороні доцільно заздалегідь оцінювати свої потенційні зобов'язання та привілеї, а також те, як вони можуть вплинути на їхні комерційні угоди та угоди щодо відповідності. Якщо такі умови не передбачені у контрактах, усі витрати лягають на судновласника, або оператора судна, або іншої організації, особи, відповідальної за впровадження Міжнародної системи управління безпекою (у контексті дотримання Міжнародного кодексу з управління безпекою, МКУБ, *International Safety Management Code*). Для судновласників і фрахтувальників тип договору фрахтування визначає, крім іншого, вплив кожного учасника на вибір палива та, відповідно, технічний і експлуатаційний контроль балансу відповідності вимогам *FuelEU* до кінця періоду чартеру. Перевірені дані про викиди стають життєво важливим елементом не тільки для відповідності, але й для підтримки операційної та комерційної цілісності в морському ланцюжку створення вартості та взагалі світового судноплавства [5].

IMO також продовжує розробляти нормативні заходи, спрямовані на скорочення викидів парникових газів від міжнародного судноплавства, у розвиток оновленої Стратегії щодо викидів ПГ (2023 *IMO GHG Strategy*). У 2025 році на надзвичайній сесії Комітету з морського середовища (MEPC) було погоджено загальну структуру так званого *IMO Net-Zero Framework* для внесення відповідних поправок до Додатка VI *MARPOL*, однак їхнє остаточне ухвалення відкладено, а переговори продовжуються з орієнтиром на прийняття не раніше кінця 2026 року. У разі запровадження глобального паливного стандарту або ринкового механізму IMO Європейський Союз, згідно з оголошеними намірами та переглядовими положеннями в *EU ETS* і *FuelEU Maritime*, має переглянути власні режими регулювання, щоб мінімізувати дублювання вимог та подвійне навантаження на судновласників.

Висновки. Для обраного судна на перших двох етапах скорочення викидів ПГ в межах ЄС / ЄЕЗ норми викидів виконуються, що не призводить до запровадження штрафних санкцій. Але, вже на третьому етапі зменшити викиди до нормативних значень без впровадження спеціальних технологій неможливо (у даному випадку розглянутий технологічний варіант використання додатково сумісного палива біо-*MGO*, але можливим є додавання будь-якого сумісного екологічного альтернативного палива). Порівняння загальної вартості можливих стратегій судновласника показує різницю в 1,35 ... 1,83 рази на користь стратегій енергоефективності та використання альтернативних джерел енергії проти стратегії «не робити нічого».

Крім того, за результатами опрацювання чинних вимог отримано підтвердження того, що запропонований у даному дослідженні алгоритм прогнозування однаково успішно може бути застосованим для усіх типів транспортних суден, які мають тоннаж понад 5000 GT та працюють з заходами в межі ЄС / ЄЕЗ.

Наявні фінансові можливості та наслідки різних технічних рішень для подальшої розрахункової експлуатації судна, а також можливості гнучкого підходу до застосування тих чи інших спеціальних технологій, зобов'язують судновласника реально оцінювати свої фрахтові зобов'язання, діючи на момент прийняття рішення привілеї, а також те, як вони можуть вплинути у подальшому на можливі комерційні угоди та конвенційні регламентні угоди щодо відповідності. Якщо такі умови не передбачені у контрактах, усі витрати лягають на судновласника, або оператора судна. Для судновласників (операторів судна) попередній фінансово-аналітичний аналіз можливих варіантів застосування спеціальної технології скорочення викидів ПГ визначає вирішальний вплив на технічний та експлуатаційний контроль балансу відповідності вимогам *FuelEU* до кінця періоду чартеру або розрахункового терміну експлуатації. Подібний аналіз стає життєво важливим елементом не тільки для відповідності, але й для підтримки операційної та комерційної цілісності взагалі світового судноплавства.

ЛІТЕРАТУРА REFERENCES

1. Суворов П. С., Тарасенко Т. В., Залож В. І. Деякі питання оцінки енергоефективності суден в умовах енергетичного переходу у внутрішньому судноплавстві // Двигуни внутрішнього згоряння. – 2023. – Вип. 2(2023). – С. 37–45. – DOI: <https://doi.org/10.20998/0419-8719.2023.2.05>.
2. FuelEU Maritime – Requirements, compliance strategies, and commercial impacts [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.dnv.com/maritime/publications/fueleu-maritime-white-paper-download/> (дата звернення: 26.04.2026).
3. Ship&Bunker [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://shipandbunker.com/prices/emea/nwe/nl-rtm-rotterdam#MGO> (дата звернення: 26.04.2026).

4. Greenhouse Gas Emissions Calculator. United Nations Framework Convention on Climate Change [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://unfccc.int/documents/271269> (дата звернення: 26.04.2026).

5. Reducing emissions from the shipping sector [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://climate.ec.europa.eu/eu-action/transport/reducing-emissions-shipping-sector_en (дата звернення: 26.04.2026).

Abstract. New regulations issued by the European Union (EU) and the International Maritime Organization (IMO) concerning greenhouse gas (GHG) emissions are expected to have a profound impact on the shipping industry, resulting in significant financial implications for shipowners seeking to comply with these requirements. These regulations necessitate the consideration of various compliance strategies, including the potential adoption of dual-fuel technologies, to reduce emissions in line with legal standards. This study presents a scenario-based analysis of the transition to eco-navigation using the example of a medium-sized bulk carrier, without undertaking major vessel retrofitting, but incorporating the use of compatible biofuels. Such an approach can be extended to other types of cargo vessels, providing a generalizable framework for evaluating compliance strategies. In the early stages following the implementation of the new regulatory limits, the vessel's GHG emissions remain within the prescribed thresholds, with penalties only anticipated during the third stage of emissions reductions. The analysis demonstrates that for shipowners operating multiple vessels of the same type, scenario-based planning can offer valuable insights into optimizing operational costs and assessing the potential benefits of pooling compliance efforts. This, in turn, enhances the economic feasibility of introducing compatible alternative fuels while ensuring adherence to regulatory requirements.

By providing a structured assessment of emissions trajectories and compliance pathways, this study emphasizes the importance of strategic planning in the context of evolving regulatory frameworks. The findings underscore that careful consideration of vessel-specific operational parameters, fuel choices, and multi-vessel management strategies can mitigate financial risks and facilitate the cost-effective adoption of environmentally friendly technologies, thereby supporting the broader goal of sustainable shipping.

УДК 629.12-8:629.12.037

DOI: 10.31653/1819-3293-2026-1-31-167-181

ARTICLE HISTORY

Received 21.04.2026

Accepted 11.05.2026

Яровенко Володимир Олексійович¹, Іовчев Сергій Іванович²
Єрпельова Анна Вікторівна³
Одеський національний морський університет, Одеса, Україна
yarovenko@3g.ua², iovchev.odessa@gmail.com²,
ann.v.fedorenko@gmail.com³

Оптимальне управління гребними двигунами електроходів при гальмуванні

Yarovenko Volodymyr¹, Iovchev Serhii², Yerpelova Anna³
Odesa National Maritime University, Odessa, Ukraine
yarovenko@3g.ua², iovchev.odessa@gmail.com²,
ann.v.fedorenko@gmail.com³

Optimal control for electric ships' propulsion motors during braking

Резюме. Запропоновано метод розрахунку оптимальних законів управління гребними електродвигунами під час гальмування. Удосконалено процедуру гальмування. Розроблено процедуру пошуку оптимального закону управління напругою живлення гребного електродвигуна під час переходу його в режим динамічного гальмування. Оцінено вплив зовнішніх факторів та конструктивних параметрів суднового пропульсивного комплексу на отримані оптимальні рішення. Виявлено параметри, вплив яких є суттєвим. За результатами оптимізаційних розрахунків побудовано оптимальні закони управління гребними електродвигунами. Вони забезпечують мінімальний час гальмування електродвигунів з допустимими діапазонами змін режимних показників усіх складових електроенергетичної установки електроходу.

Summary. A method for calculating the optimal control laws for propulsion electric motors during braking has been developed. The braking procedure has been improved. A procedure has been developed for determining the optimal control law for the supply voltage of the propulsion

electric motor during its transition to dynamic braking mode. The influence of external factors and design parameters of the ship propulsion system on optimal solutions is assessed. The parameters that have a significant influence have been identified. Based on the results of optimization calculations, optimal control laws for propulsion electric motors were constructed. These laws ensure a minimum braking time of the propulsion electric motors with acceptable ranges of changes in the operating parameters of all components of the electric ship electric power plant.

До основних критеріїв оцінки ефективності роботи гребних електричних установок електроходів (ГЕУ) відносяться показники, що в першу чергу характеризують безпеку виконання судами маневрених операцій. Відповідно до Стандартів маневреності суден, схвалених 04.12.2002 Комітетом безпеки на морі ІМО (Резолюція MSC.137(76)), до основних маневрів, показники яких контролюються, відносяться, у тому числі, випробування активним гальмуванням з контролем дальності шляху судна з моменту, коли дається команда на повний назад до зупинки судна у воді. Стосовно суден з електрорухом, до таких показників відноситься, перш за все, тривалість гальмування гребних електродвигунів (ГЕД). Саме цей показник впливає на тривалість гальмування самого електрохода і на величину гальмівного шляху. Для оцінювання цих показників відповідно до Стандартів, можуть бути використані два методи: випробування масштабної моделі або комп'ютерні прогнози з використанням математичних моделей для прогнозування відповідності показників на етапі проектування гребних електричних установок. Таким чином, тривалість гальмування ГЕД – T_M – можна використовувати як основний критерій оцінки ефективності управління гребними електродвигунами електроходів на гальмівних режимах роботи. Пошук найкращих для забезпечення мінімального часу гальмування T_M законів управління гребними електродвигунами електроходів є метою цієї роботи.

В основі математичного опису роботи гребних електродвигунів у гальмівних режимах покладено основне рівняння динаміки

$$J_M \frac{d\omega_M}{dt} = M_M - M_P,$$

де J_M – приведений до валу гребного двигуна момент інерції двигуна, гребного гвинта і приєднаних до нього мас води;

M_M та ω_M – обертовий момент та кутова швидкість обертання ГЕД;

M_P – момент опору гребного гвинта.

Як гребні електродвигуни в гребних електричних установках найчастіше використовують асинхронні частотно-керовані

електродвигуни. В основі побудови математичного опису процесів в таких двигунах покладено точну класичну схему заміщення АД. Напруга на затискачах статора вважається синусоїдальною, насичення сталі машини не враховується, розподіл потоку по повітряному зазору приймається синусоїдальним, втрати в сталі враховуються приблизно, у роторі не враховуються [1]. З урахуванням таких припущень обертовий момент частото-керованого електродвигуна визначається співвідношенням

$$M_M = k_M I_M \Phi_M \cos \varphi_M,$$

де I_M – струм електродвигуна;

Φ_M – магнітний потік;

$\cos \varphi$ – коефіцієнт потужності електродвигуна;

k_M – коефіцієнт пропорційності.

Система управління перетворювачами частоти (ПЧ), від яких одержують живлення гребні електродвигуни, формує два сигнали – по відносній частоті α та відносній напруги γ .

Момент опору гребного гвинта M_P є складною функцією частоти обертання ω_P ($\omega_P = \omega_M$) та швидкості руху судна v , і визначається реверсивною гідродинамічною характеристикою гвинта [2]:

$$M_P = a_2 (\omega_P / \omega_{P0})^2 + b_2 (\omega_P / \omega_{P0}) (v / v_0) + c_2 (v / v_0)^2,$$

де a_2 , b_2 , c_2 – коефіцієнти універсальної характеристики гвинта (постійні у певних діапазонах зміни ω_P та v ;

індекс «0» відповідає значенням режимних показників (зокрема – ω_P і v) при русі судна з номінальною швидкістю, при номінальній частоті обертання гребного гвинта.

Відмінною особливістю роботи електроходів на маневрах є те, що тривалість перехідних процесів у гребній електричній установці виявляється порівнянною з тривалістю перехідних процесів у русі самого судна. Тому припущення про сталість швидкості руху при аналізі перехідних процесів у ГЕУ (як і навпаки – припущення про сталість ω_P при оцінці швидкості судна) не прийнятні. При маневруванні всі складові пропульсивного комплексу електрохода працюють у нестановлених режимах, перебуваючи в тісному взаємозв'язку. Це означає те, що при аналізі гальмівних режимів роботи гребних електродвигунів їх слід розглядати в єдності з іншими елементами суднового пропульсивного комплексу, що включає в себе і електроенергетичну установку, і гребні гвинти, і корпус судна [3]. Лише в такій постановці можна провести докладний аналіз процесів гальмування гребних електродвигунів і спробувати відшукати найкращі закони управління ГЕД з метою мінімізації тривалості гальмування T_M .

На першому етапі гальмування електроходу гребний електродвигун переводиться в режим динамічного гальмування. Для цього перетворювач частоти переводиться у випрямляючий режим і в статор ГЕД подається постійний струм. При переведенні ПЧ в режим випрямлення в обмотках ГЕД деякий час зберігається змінна напруга, що впливає на процес гальмування ГЕД, тому напруга постійного струму на статор ГЕД повинна подаватися із затримкою в часі та з кінцевою швидкістю наростання [3, 4].

У загальному випадку закон зміни відносної напруги можна представити у вигляді експоненційної залежності:

$$\gamma = \gamma_{st}(1 - \exp(-k_\gamma t)),$$

де γ_{st} – значення відносної напруги, що встановилося;

k_γ – коефіцієнт, що визначає швидкість наростання напруги.

Наявність зворотних зв'язків за швидкістю та моментом ГЕД і безінерційність зміни постійної складової струму на виході перетворювача частоти дають можливість знайти та реалізувати оптимальний режим динамічного гальмування, що забезпечує найкращі значення відповідних показників якості.

Завдання пошуку оптимальних законів управління об'єктів подібного типу відноситься до області нелінійного програмування і полягають у знайденні екстремуму цільової функції $f(\mathbf{k})$ при заданих обмеженнях $g(\mathbf{k})$ у вигляді нерівностей. Необхідно мінімізувати певну цільову функцію $f(\mathbf{k})$, $\mathbf{k} \in E^n$ при p лінійних обмеженнях у вигляді $g_j(\mathbf{k}) \geq 0$, $j = 1, \dots, p$, де E^n – допустима область n -мірного простору. Оптимальне рішення складається з оптимальної точки $\mathbf{k}^* = [\mathbf{k}_1^*, \mathbf{k}_2^*, \dots, \mathbf{k}_n^*]$ та відповідного їй значення цільової функції $f(\mathbf{k}^*)$ [5].

Під $f(\mathbf{k}^*)$ в даному випадку слід розуміти неявно виражені залежності критерію оптимальності T_M від оптимізованих параметрів γ_{st} та k_γ . Обмеження $g(\mathbf{k})$ забезпечують допустимі діапазони зміни режимних показників всіх складових частин електроенергетичної установки електрохода.

Значення T_M знаходяться в результаті розрахунку маневрів, що описуються складною системою алгебраїчних та диференціальних рівнянь. Система визначає перехідні режими роботи всього суднового пропульсивного комплексу, який включає первинні двигуни, синхронні генератори, перетворювачі частоти, гребні електродвигуни, гребні гвинти, корпус електрохода. Математична постановка задач, які вирішуються, процедури та алгоритми розробленого методу оптимізації запропоновані в роботі [3, 6]. Вони показали свою ефективність під час розв'язання задач такого типу. У цій роботі

представлені результати оптимізаційних розрахунків, проведених за допомогою цих методів, стосовно розглянутої задачі.

Оптимізація управління гребною енергетичною установкою в режимі динамічного гальмування зводиться до пошуку оптимального рішення

$$\gamma^* = \gamma_{st}^* (1 - \exp(-k_Y^* T));$$

$$T_{Mmin}^* = T(\gamma^*),$$

де γ_{st}^* та k_Y^* – оптимальні значення параметрів γ_{st} та k_Y ; $T = v_0 t / L$ – безрозмірний відносний час; v_0 – швидкість руху судна; L – довжина судна по КВЛ; t – поточний час; T_{Mmin}^* – значення цільової функції – T_M – в оптимальній точці.

У процесі пошуку оптимального рішення велика увага приділяється обмеженням $g(k)$, що забезпечують допустимі значення основних параметрів електроенергетичної установки [1, 7].

Найважливішим завданням, яке доводиться вирішувати під час пошуку оптимальних законів керування гребними електродвигунами, є дотримання енергетичного балансу режиму динамічного гальмування. Суть його полягає в наступному.

Повна енергія гальмування – енергія, що надійшла в гребну установку при гальмуванні ГЕД від початкової швидкості його обертання до нуля визначається як

$$W_B = \int_0^T dW,$$

де

$$dW = M_M \omega_M dt + J_\Sigma \frac{d\omega_M}{dt} \omega_M dt = M_M \omega_M dt + J_\Sigma \omega_M d\omega_M \quad (1)$$

Перший доданок правої частини рівняння (1) відповідає енергії, отриманої від гвинта, що працює в режимі гідравлічної турбіни, другий – кінетичної енергії, запасеної частинами двигуна, валопроводу і гребного гвинта з приєднаними до нього масами води.

У свою чергу, енергія, що надійшла до ГЕУ, має бути витрачена у вигляді втрат у системі електроруку

$$W_{PEP} = \int_0^T (\Delta P_{PEP}) dt,$$

де

$$\Delta P_{PEP} = \sum P_M \left(\frac{I_{DB}}{I_{DBn}} \right)^2 + A(\omega_M)^2;$$

$\sum P_M$ – сумарні втрати у міді у номінальному режимі з урахуванням опору динамічного гальмування;

I_{DB} – наведений струм двигуна у режимі динамічного гальмування;

A – сумарні втрати тертя в ГЕД.

Сумарні втрати в міді

$$\Sigma P_M = P_{M0} + P_{DB} = P_{M0} + k_{DB} \cdot P_{PEPn},$$

де P_{DB} – потужність втрат у опорах динамічного гальмування;

P_{PEPn} – номінальна потужність на валу ГЕД;

k_{DB} – кратність опору динамічного гальмування,

$$k_{DB} = \frac{P_{DB}}{P_{PEP}}.$$

Якщо виключити можливість передачі енергії рекуперації до первинних двигунів, умовою дотримання енергетичного балансу буде

$$W_B \leq W_{ГЕУ}. \quad (2)$$

Таким чином, коефіцієнт k_{DB} – найважливіший параметр, що впливає на організацію процесу динамічного гальмування. Він оцінює можливість розсіювання потужності рекуперації на активних опорах системи електроруху, тобто оцінює можливість реалізації режиму динамічного гальмування без перегріву основних складових частин електроприводу.

Оцінити вплив цього найважливішого параметра (а разом і призначити допустимі діапазони зміни його значень) можна за результатами додаткових досліджень, результати яких представлені у табл. 1.

Таблиця 1

Вплив кратності k_{DB} на оптимальне рішення

Початкова швидкість v_{in}	Кратність опору динамічного гальмування k_{DB}	Оптимальні рішення		
		γ_{st}^*	k_{γ}^*	T_M^*
0,367	0,15	0,685	3,055	0,55
0,367	0,12	0,685	3,055	0,55
0,367	0,10	0,455	2,99	1,03
0,367	0,09	0,40	2,99	1,67
0,771	0,15	0,68	3,085	1,94
0,771	0,11	0,68	3,085	1,94
0,771	< 0,11	немає рішення: енергія рекуперації не може бути розсіяна на активних опорах ГЕУ		

У табл. 1 наведено результати оптимізації законів управління гребними електродвигунами при різних значеннях k_{DB} на малих та

великих швидкостях v_{in} руху судна. Аналіз їх показує таке. При малих швидкостях руху явно простежується вплив k_{DB} і на оптимальні параметри законів управління, і на T_M^* . При великих швидкостях параметр k_{DB} «працює» у режимі «так-ні» – або дозволяючи реалізувати режим динамічного гальмування, або ні (за умовою (2)), не впливаючи при цьому на оптимальні закони.

Однак слід мати на увазі, що k_{DB} – це конструктивний параметр гребної електричної установки, який підбирається таким чином, щоб полегшити можливість реалізації режиму динамічного гальмування у всьому діапазоні зміни швидкості v_{in} . Виходячи з цього, а також зважаючи на те, що при $k_{DB} < 0,12$ стрімко зростає (див. табл. 1) тривалість гальмування T_M^* , доцільно прийняти величину k_{DB} такою, яка дорівнює мінімально допустимому значенню – $k_{DB} = 0,12$ (за умовою (2) максимального значення швидкості v_{in}).

На пошук оптимальних параметрів законів управління впливає низка зовнішніх факторів, обумовлених умовами виконання маневрів та конструктивними параметрами судна й параметрами його гребної установки. Ступені їхнього впливу виявлено додатковими розрахунками, результати яких наведені нижче.

Найважливішим параметром, який впливає на тривалість процесу, динамічного гальмування є, як було зазначено вище, швидкість судна v_{in} у момент переходу гребної установки в гальмівний режим [8]. Цілком природно слід очікувати істотного впливу цього параметра і на оптимальні рішення, що отримуються в ході оптимізації. Для аналізу характеру та ступеню впливу швидкості v_{in} на оптимальні рішення, проведено серію розрахунків при різних значеннях v_{in} . Результати розрахунків наведено у табл. 2

Таблиця 2
Вплив початкової швидкості v_{in} на оптимальне рішення

Початкова швидкість v_{in}	Оптимальні рішення		
	Оптимальні параметри		Значення T_M^* в оптимальній точці
	γ_{st}^*	k_{γ}^*	T_M^*
0,253	0,710	3,0	0,44
0,336	0,689	3,055	0,55
0,472	0,68	3,045	0,69
0,568	0,685	3,045	0,86
0,729	0,68	3,075	1,46
0,771	0,68	3,085	1,94

Як видно з табл. 2, початкова швидкість судна впливає на оптимальне рішення. Зі зміною v_{in} оптимальні параметри закону управління відносною напругою $\gamma^* = \gamma(\gamma_{st}^*, k_\gamma^*, T)$ змінюються, але незначно, тоді як тривалість гальмування (значення T_M^* у оптимальній точці – $T_M^* = T(\gamma^*)$) дуже суттєво залежить від v_{in} . Це дає підставу віднести v_{in} до суттєвих чинників.

Наступним фактором, вплив якого на закони управління гребними електродвигунами необхідно оцінити, є відносна глибина води

$$h_T = \frac{h}{H},$$

де h – глибина води; H – осадка судна.

Необхідність врахування h_T обумовлена тим, що при маневруванні судна на воді кінцевої глибини суттєво змінюються сили та моменти, що діють як на корпус судна, так і на його рушії [9]. Враховувати вплив глибини води доцільно при докритичних швидкостях

$$F_r = \frac{v_0}{\sqrt{gh}} < 0,6.$$

Врахувати вплив глибини води можна [8, 9]:

– введенням поправочних коефіцієнтів χ_{vh} і χ_{th} , які враховують вплив мілководдя на коефіцієнти попутного потоку та засмокування гідродинамічної характеристики рушіїв –

$$\chi_{\psi_h} = 1 - \psi_h / 1 - \psi_\infty; \chi_{t_h} = 1 - t_h / 1 - t_\infty,$$

де ψ_h , і ψ_∞ – коефіцієнти попутного потоку на мілководді і на глибокій воді; t_h , і t_∞ – коефіцієнти засмокування за тих же умов;

– уточненням сили опору води на рух судна: стосовно використовуваної моделі, це можна зробити за методом П.А. Апхутіна, який дозволяє розраховувати втрату швидкості ходу судна під час руху на мілководді;

– перерахуванням коефіцієнтів гідродинамічних сил та моментів (у загальноприйнятих позначеннях) на відповідну глибину;

– коригуванням величин приєднаних до судна мас води λ_{11} , λ_{22} , λ_{66} , що може бути виконано за методикою, запропонованою в роботі [3].

У якості прикладу, якій ілюструє вплив глибини води на результати пошуку оптимальних законів управління ГЕД, в табл. 3 наведено результати оптимізації при гальмуванні ГЕД на глибокій воді (h_∞) і при $h_T = 2$. Результати, які наведені, відповідають руху електроходу на малих та середніх швидкостях.

Таблиця 3

Вплив глибини води h_T на оптимальне рішення

Початкова швидкість v_{in} судна	Глибина води h_T	Оптимальні рішення		
		γ_{st}^*	k_γ^*	T_M^*
0,771	∞	0,68	3,045	1,94
0,690	2	0,675	3,065	0,91
0,336	∞	0,685	3,02	0,53
0,340	2	0,68	3,03	0,51

Порівняння результатів, наведених у табл. 3, показує наступне.

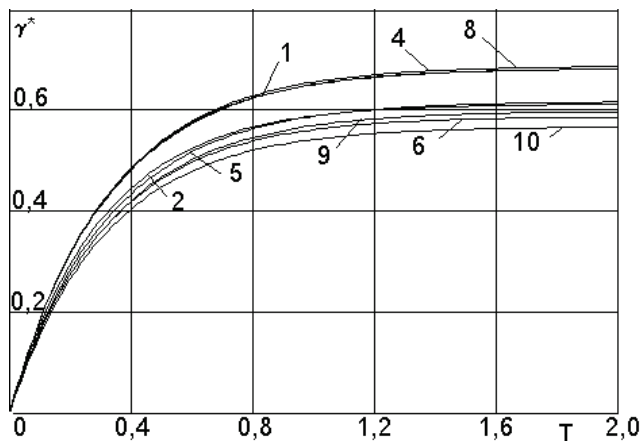
Глибина води h_T незначно впливає на оптимальний закон $\gamma^*(T)$, але суттєво впливає на результат оптимізації – тривалості гальмування T_M^* . При цьому ступінь впливу h_T залежить від швидкості судна, при якій виконується маневр – на середніх швидкостях обмеження в глибині відчутно впливає на оптимальне рішення, а при малій швидкості – практично ні (що цілком узгоджується з теоретичними міркуваннями).

Ще одним важливим критерієм, за яким оцінюється якість гальмування ГЕД, є відносна зміна напруги ΔU_G головних генераторів при гальмуванні гребних електродвигунів. Вагомість цього критерію залежить від того, до якого типу гребної установки відноситься електропривод. Для ГЕУ з єдиною електроенергетичною системою цей параметр регламентований – $\Delta U_G=11-15\%$, що накладає додаткові (і дуже жорсткі за критеріями оцінки показників роботи ГЕУ) обмеження цільової функції. Для ГЕУ з автономною системою електроруху вимоги до величини ΔU_G істотно «м'якше», внаслідок чого з'являється певна свобода у пошуку оптимальних законів управління та підвищення ефективності гальмування (за обраним критерієм оптимальності).

Вплив ΔU_G на оптимальні рішення можна оцінити за результатами, наведеними в табл. 4, на рис. 1 та на рис. 2.

Тут показані результати оптимізації при різних значеннях ΔU_G , для декількох значень швидкості судна v_{in} .

Оптимальні закони управління наведено на рис. 1. Криві на рисунку відповідають номеру варіанта в табл. 4

Рис. 1. Вплив ΔU_G на оптимальні закони управління

Таблиця 4

Вплив ΔU_G на оптимальне рішення

Номер варіанта (крива на рис. 1)	Початкова швидкість v_{in}	ΔU_G	Оптимальні рішення		
			γ_{st}^*	k_γ^*	T_M^*
1	0,771	0,15	0,68	3,075	1,46
2		0,13	0,61	3,235	1,87
3		0,11	Рішення немає		
4	0,568	0,15	0,68	3,045	0,86
5		0,13	0,615	3,03	1,01
6		0,11	0,585	3,11	1,1
7		0,09	Рішення немає		
8	0,336	0,15	0,685	3,055	0,55
9		0,12	0,595	3,03	0,65
10		0,09	0,565	3,105	0,68
11		0,08	Рішення немає		

Вплив ΔU_G на значення цільової функції в оптимальній точці (T_M^*) показано на рис. 2.

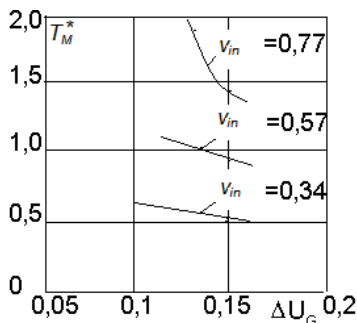


Рис. 2. Вплив ΔU_G на тривалість гальмування T_M^*

З табл. 4 та рис. 1 і 2 випливає, що на відміну від швидкості руху судна v_{in} , глибини води h_T і кратності опору динамічного гальмування k_{DB} , відносна зміна напруги ΔU_G впливає при оптимальному управлінні і на оптимальний закон управління γ^* , і на тривалість гальмування T_M^* . Причому вплив на T_M^* дуже значний і зростає зі збільшенням v_{in} . Виходячи з цього, ΔU_G має бути включений до групи значущих факторів.

Розглянуті вище параметри характеризують вплив на оптимальне управління гребними електродвигунами зовнішніх умов виконання маневру та можливості реалізації режиму динамічного гальмування, виходячи з дотримання енергетичного балансу цього процесу. Однак як показали проведені дослідження [3, 6, 8], крім них, на закони управління ГЕД істотно впливають і узагальнені безрозмірні параметри пропульсивного комплексу C_{G8} , C_{G5} і C_{G10} . Це ті параметри, які кількісно характеризують ступінь:

зниження поздовжньої складової результуючої ЕРС генератора, яке викликане реакцією якоря синхронної машини – C_{G8} ;

падіння напруги на реактивних опорах обмоток генератора під час роботи під навантаженням – C_{G5} ;

вплив навантаження генератора (за величиною та за характером) на кут зсуву фаз між струмом та поздовжньою ЕРС – C_{G10} .

Співвідношення для розрахунку цих параметрів за конструктивними параметрами ГЕУ та можливі діапазони зміни їх значень наведені у [4, 5].

Проведений вище аналіз впливу різних факторів (включаючи конструктивні параметри ГЕУ) на оптимальні рішення дозволяє зробити такі висновки. Усі чинники можна поділити на дві групи. До першої відносяться ті, які практично не позначаються на оптимальних

параметрах законів управління $\gamma^* = \gamma(\gamma_{st}^*, k_\gamma^*, T)$, але впливають на результат виконання маневру – T_M^* . До другої групи відносяться параметри, які впливають і на оптимальні параметри законів управління, і на тривалість гальмування – T_M^* .

З урахуванням завдання пошуку оптимальних законів управління $\gamma^* = \gamma(\gamma_{st}^*, k_\gamma^*, T)$ для різних (у конструктивному виконанні) пропульсивних комплексів, до значущих факторів (при фіксованих значеннях k_{DB} і h_T) слід віднести v_{in} , ΔU_G , C_{G8} , C_{G5} та C_{G10} . Серії оптимізаційних розрахунків дали можливість знайти оптимальні закони управління для різних варіантів сполучення значущих факторів. Як приклад, нижче наведені результати пошуку оптимальних законів управління відносною напругою ГЕД з фіксованими значеннями $k_{DB} = 0,12$ і h_∞ при різних швидкостях v_{in} для різних поєднаннях значущих факторів, ΔU_G , C_{G8} , C_{G5} та C_{G10} . Деякі варіанти поєднань та знайдені оптимальні рішення наведено у табл. 5.

Таблиця 5
Поєднання значимих факторів та знайдені оптимальні рішення

Варіант (крива)	Значення значимих факторів					Оптимальні рішення		
	v_{in}	ΔU_G	C_{G8}	C_{G5}	C_{G10}	γ_{st}^*	k_γ^*	T_M^*
1	0,4	0,25	0,86	0,05	0,572	0,935	3,010	0,39
2	0,4	0,05	0,86	0,05	0,572	0,545	3,020	0,66
3	0,6	0,25	0,86	0,05	0,572	0,745	3,07	0,67
4	0,6	0,07	0,86	0,05	0,572	0,63	3,0	0,84
5	0,8	0,25	0,86	0,05	0,572	0,655	3,27	1,30
6	0,8	0,07	0,86	0,05	0,572	0,63	3,055	1,39
7	0,4	0,25	1,11	0,05	0,572	1,035	3,015	0,39
8	0,4	0,12	1,11	0,05	0,572	0,610	3,06	0,60
9	0,6	0,25	1,11	0,05	0,572	0,895	3,215	0,62
10	0,6	0,13	1,11	0,05	0,572	0,63	3,04	0,93
11	0,8	0,25	1,11	0,05	0,572	0,75	4,925	1,14
12	0,8	0,25	1,11	0,05	0,572	0,63	3,05	1,65
13	0,4	0,25	1,35	0,05	0,572	0,845	3,041	0,47
14	0,4	0,16	1,35	0,05	0,572	0,615	3,09	0,63
15	0,6	0,25	1,35	0,05	0,575	0,845	3,015	0,71
16	0,6	0,16	1,35	0,05	0,572	0,58	3,36	1,18
17	0,8	0,25	1,35	0,05	0,572	0,805	3,535	1,24
18	0,8	0,20	1,35	0,05	0,572	0,68	3,185	1,65

За наслідками розрахунків на рис. 3 побудовані графіки з оптимальними законами управління $\gamma^* = \gamma(\gamma_{st}^*, k_{\gamma}^*, T)$ для перших шести варіантів розрахунків.

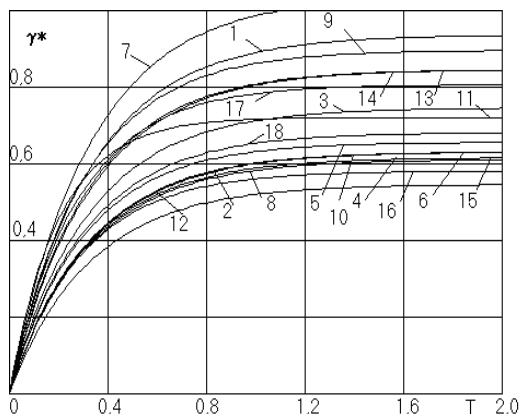


Рис. 3. Оптимальні закони управління при гальмуванні ГЕД

На рис. 4 представлені залежності $T_M^* = T(v_{in})$ для визначення тривалості гальмування гребних двигунів в функції початкової швидкості.

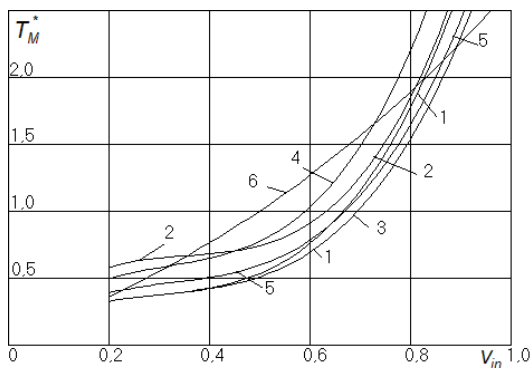


Рис. 4. Залежність T_M^* від швидкості судна v_{in}

Аналіз отриманих результатів показує наступне. Найбільший вплив на оптимальні закони управління та тривалість гальмування надає допустиме значення провалів напруги ΔU_G . З посиленням вимог за

допустимим значенням ΔU_G , як і слід було очікувати, необхідно знижувати інтенсивність гальмування, що відбилося в зменшенні γ_{st}^* і k_{γ}^* . Одночасно із цим, цілком природно, зростає тривалість гальмування ГЕД.

Висновки.

1. Отримані результати ілюструють можливість підвищення ефективності роботи гребних електричних установок електроходів на маневрених режимах роботи. За рахунок оптимізації законів управління гребними електродвигунами можна суттєво скоротити тривалість гальмування ГЕД і, відповідно, тривалість гальмування самого електроходу.

2. Розроблено діаграми з оптимальними законами управління гребними електродвигунами, які забезпечують мінімальну тривалість гальмування.

3. Для будь-якого електроходу (з відповідними безрозмірними параметрами) з розглянутим типом ГЕД рекомендується зафіксувати коефіцієнт k_{γ}^* постійною величиною та закласти його як параметр задатчика інтенсивності наростання сигналу управління. Після цього стає можливим вибір найкращих законів управління при різних значеннях v_{in} і ΔU_G .

ЛІТЕРАТУРА REFERENCES

1. Woud H. K., Stapersma D. Design of Propulsion and Electric Power Generation Systems. London : IMarEST, 2002. – 510 p.
2. Carlton J. Marine Propellers and Propulsion. 4th ed. Kidlington: Butterworth-Heinemann, 2019. – 585 p.
3. Яровенко В.О. Розрахунок та оптимізація перехідних режимів роботи пропульсивних комплексів електроходів. - Одеса: Маяк, 1999. – 188 с.
4. J.M. Apsley; A. Gonzalez Villasenor; M. Barnes; A. C. Smith; S. Williamson; J.D. Schuddebeurs (2007) Propulsion Drive Models for Full Electric Marine Propulsion Systems. //Published by Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) conference paper –2008.–Vol. 1 – P. 118 – 123.
5. Bertsekas D. P. Nonlinear Programming. 3rd ed. Belmont, MA: Athena Scientific, 2016. – 1100 p.
6. Yarovenko, V. A., Chernikov, P. S. (2017). A calculation method of transient modes of electric ships' propelling electric plants. //Electrical Engineering & Electromechanics. – 2017. – № 6. – P. 32 – 41.

7. Inoue S., Hirano M., Kijma K., Takashina J. (1981). A practical calculation method of ship manoeuvring motion. //Int. Shipbuild. Progr. – 1981. – Vol. 28. – N 325. – P. 207 – 222.

8. Шуміло О.М. Вплив геометричний параметрів корпусу електрохода на інерційні характеристики. //Вісник Одеського національного морського університету: зб. наук. праць. – 2023. – №71. – С. 36 - 48.

9. Principles of Naval Architecture: Ship Resistance and Flow / Ed. by L. Larsson, H. C. Raven. Jersey City, NJ : SNAME, 2010. – 224 p.

Abstract. A method for finding optimal control laws for ship propulsion electric motors for braking modes of electric ships has been developed. The propulsion electric motor is considered as an integral part of a single ship propulsion system. The necessity of such an approach is substantiated. The braking procedure has been refined. The duration of the propulsion electric motor braking process was chosen as an optimality criterion. A control law for electric motors during dynamic braking has been formulated. A method for finding optimal parameters of the control law has been developed. An objective function has been formed and constraints have been defined. Based on the results of the braking mode energy balance, a ratio has been found between the power loss in dynamic braking resistances and the propulsion electric motor power. It has been shown that this ratio determines whether dynamic braking can be implemented in practice. Recommendations for the purpose of this ratio have been formulated. The influence of maneuvering conditions, external factors, electric ships' design parameters and their electric power plants on optimal solutions has been assessed. Factors with a significant influence have been identified. The influence of the vessel's initial speed, water depth, acceptable voltage drops in the ship's electrical system, and the design parameters of the propulsion system on the optimal solution were assessed. Factors that significantly influence both the optimal control law parameters and the optimality criterion value at the optimal point were identified. Based on the results of optimization calculations, optimal control laws for propulsion electric motors were found for various combinations of propulsion system design parameters with different initial braking conditions. These laws ensure minimal braking time with acceptable ranges of parameter variation for all components of the ship's electric power plant. Recommendations for implementing these laws are proposed.

УДК 004.03

DOI: 10.31653/1819-3293-2026-1-31-182-207

ARTICLE HISTORY

Received 11.03.2026

Accepted 06.04.2026

Vychuzhanin Volodymyr¹, Vychuzhanin Oleksii²
Odesa Polytechnic National University, Odessa, Ukraine
v.v.vychuzhanin@op.edu.ua¹, vychuzhanin.o.v@op.edu.ua²

Hybrid spatio-temporal neural network for predicting the risk of failures in ship power plant subsystems

Вичужанін Володимир Вікторович¹, Вичужанін Олексій
Володимирович²

Національний університет «Одеська політехніка», Одеса, Україна
v.v.vychuzhanin@op.edu.ua¹, vychuzhanin.o.v@op.edu.ua²

Гібридна просторово-часова нейромережа для прогнозування ризику відмов підсистем суднової енергетичної установки

Abstract. *This presents a hybrid spatio-temporal neural network for predicting failure risks in ship power plant subsystems within a digital twin framework. The proposed convolutional neural network and long short-term memory architecture integrates telemetry data, physics-informed constraints, and fuzzy diagnostic indicators to ensure consistent and reliable predictions. Experimental validation, including Hardware-in-the-Loop testing, confirms improved accuracy and stability under noisy conditions. The model supports real-time deployment and enhances interpretability through subsystem-level analysis and SHapley Additive exPlanations.*

Резюме. *Представлено гібридну просторово-часову нейронну мережу для прогнозування ризику відмов підсистем суднової енергетичної установки в межах цифрового двійника. Запропонована архітектура на основі згорткових нейронних мереж і мереж довгої короткочасної пам'яті інтегрує телеметричні дані, фізично обґрунтовані обмеження та нечіткі діагностичні ознаки. Експериментальна валідація підтверджує підвищену точність і стійкість моделі. Інтерпретованість забезпечується за допомогою методу SHapley Additive exPlanations.*

The increasing complexity of modern ship power plants (SPPs) and the nonlinear nature of their degradation complicate long-term risk prediction [1, 2]. Traditional analytical and fuzzy-based methods, while effective for local diagnostics, are limited in high-dimensional, time-varying environments [3, 4]. Neural network models trained on telemetry and digital twin (DT) data enable identification of latent dependencies between system states and failure probability, forming the basis of intelligent monitoring systems [5, 6]. Recent advances in prognostics and health management (PHM) highlight the effectiveness of deep learning, particularly hybrid CNN (Convolutional Neural Network)–LSTM (Long Short-Term Memory) architectures, in capturing spatial and temporal features [7]. However, purely data-driven approaches often lack physical interpretability and stability. Physics-Informed Neural Networks (PINNs) address this by embedding conservation laws into training, improving robustness and generalization under noisy or limited data [8], though real-time application remains challenging. Integration of DTs with machine learning enhances prediction accuracy by combining simulation and real-time data [9, 10]. Multi-source data fusion improves diagnostics [11], but consistency across heterogeneous domains remains an issue. Fuzzy logic supports uncertainty modeling [12], yet requires integration with deep learning in complex systems. Hybrid CNN–LSTM and multi-branch architectures improve feature extraction and interpretability [13, 14], while combining statistical reliability models with machine learning increases stability, especially for rare failures [15, 16]. Despite these advances, key gaps remain: limited integration of data-driven and physics-based models, lack of unified multi-source representation, and insufficient application in real-time maritime DT systems [17, 18]. The proposed approach addresses these gaps through a hybrid framework for SPP failure prediction, ensuring physical validity and cognitive consistency. It integrates telemetry, CSM (cognitive simulation model)-based indicators, and fuzzy diagnostics into a unified representation, and employs a multi-branch CNN–LSTM architecture for subsystem-specific modeling (fuel, cooling, electrical). A physics-informed loss function enforces conservation laws, improving consistency and generalization, while coordinated integration within a DT aligns neural, simulation, and fuzzy outputs.

The model is validated in a Hardware-in-the-Loop (HIL) environment, confirming robustness under realistic conditions. The study aims to develop an accurate and consistent predictive model, including data integration, architecture design, physics-informed training, and validation with robustness analysis under noise and ablation scenarios.

Within the DT architecture, the neural network subsystem operates at the top analytical layer as an intelligent integrator of prognostic risk estimates

for transmission to the Shore Control Centre (SCC). By fusing heterogeneous data into a unified cognitive model, it supports remote monitoring and informed decision-making. The subsystem interacts with three domains: the CSM (causal failure probabilities $P_i(t)$), the fuzzy module (aggregated risks $R_i(t)$), and the data acquisition layer (sensor and telemetry data). Its role within the control loop and data flows is formalized in the system architecture (Fig. 1), which describes the end-to-end transformation from raw signals to onshore management decisions.

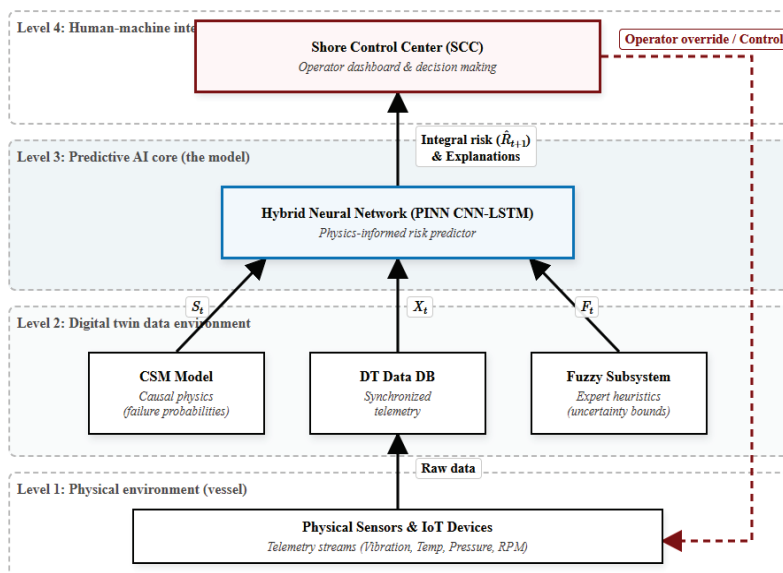


Fig. 1. Global system architecture of the cognitive DT: an echeloned data flow from physical sensors to the SCC

The end-to-end information flow (Fig. 1) is organized into four hierarchical levels: the physical layer (sensors and actuators), where IoT devices generate raw telemetry; the DT level, where data are enriched, while the CSM computes causal probabilities and the fuzzy subsystem formalizes expert knowledge; the artificial intelligence level, where a hybrid CNN-LSTM model integrates these inputs via a physics-informed loss function (L_{PDE}) to estimate the integral risk; and the decision-making level (SCC), where the validated forecast is transmitted via satellite for operational decisions.

The neural network acts as an intelligent bottleneck, filtering large volumes of raw data and delivering only interpretable, physically consistent risk estimates. The model performs one-step-ahead prediction of integral failure risk while accounting for multidimensional SPP dynamics.

$$\hat{R}_{t+1} = f_{\theta}(X_{t-k:t}) \in [0,1],$$

where f_{θ} is a parameterised neural network, $X_{t-k:t}$ is a time window of telemetry data with a depth of k steps, $\hat{R}_{t+1}$ is the predicted value of the integral failure risk at time step $t+1$, θ is a non-linear approximator (neural network) with a set of trainable weight coefficients θ , $(X_{t-k:t}) \in R^{k \times M}$ is the input feature matrix representing a time window of observations with a depth of k steps, k is the length of the observation window (a model hyperparameter), M is the number of input physical and diagnostic parameters.

The integration of the neural network with other DT modules, including the CSM and the fuzzy subsystem, ensures cognitive consistency of the forecast. The technical condition indicator S_t (from the CSM) and diagnostic features F_t (from the fuzzy subsystem) provide expert knowledge, enriching raw sensor data, accelerating convergence, and improving decision-making under uncertainty. The model captures time-varying dependencies, where the observation window k is a key hyperparameter. In this study, a window of $k = 60$ seconds was selected to balance short-term dynamics (e.g., vibration spikes) and computational efficiency. The input feature vector X_t integrates three data sources: OREDA databases (statistical failure parameters, e.g., Weibull, Lognormal), SPP DT data (pressure, temperature, vibration, rotation speed, consumption), and online telemetry from IoT sensors and diagnostic modules. The combined input ensures cognitive consistency and forms the basis for robust prediction. Figure 1 presents the three-level aggregation scheme used to construct X_t , with the overall vector defined for each subsystem accordingly:

$$x_t = [P_t, T_t, V_t, \omega_t, S_t, Q_t, F_t], \quad (1)$$

where: P_t , T_t is the pressure and temperature of working media at critical nodes of fuel, lubrication, and cooling circuits; V_t is the vibroacoustic parameters (RMS accelerations) of bearing units; ω_t is the rotational speed of the main engine shaft or turbocharger; S_t is a scalar indicator of technical condition from the CSM model; Q_t is the instantaneous fuel consumption characterising the current load regime; F_t is a fuzzy indicator of diagnostic uncertainty.

The detailed semantics and frequency characteristics of the vector components are presented in Table 1.

Table 1

Semantic structure of the input feature vector X_t

Component	Physical meaning of parameter	Data domain	Update frequency, Hz
P_t	Pressure of working media (oil, fuel, boost)	Telemetry	High (10–50)
T_t	Temperature gradients in power plant circuits	Telemetry	Medium (1–5)
V_t	Vibroacoustic activity (RMS acceleration)	Telemetry	High (100–1000)
ω_t	Rotational speed of shaft and turbochargers	Telemetry	Medium (10)
Q_t	Fuel / coolant flow rate (load condition)	Telemetry	Medium (1)
S_t	State indicator based on the CSM model ($S \in [0,1]$)	Causal (physics-based)	Low (event-driven)
F_t	Diagnostic feature of the fuzzy subsystem	Expert-based (logic)	Low (on demand)

This multidimensional feature vector structure ensures accurate modeling of complex SPP degradation processes. It correlates low-level stochastic sensor fluctuations with high-level structural health indicators, providing the SCC operator with a comprehensive and interpretable assessment of the asset's technical condition. To preserve the $k \times M$ matrix structure required for the operation of 1D-CNN layers, low-frequency expert features (S_t , F_t) are broadcast to all steps of the current observation window k . This ensures that the neural network takes into account a stable physical context when analysing high-frequency oscillations of pressure or vibration. The overall input vector X_t is a fusion of raw sensor data and synthesized diagnostic metrics, defined by Equation (1). For CNN–LSTM processing, its temporal structure is explicitly represented, with the combined input window $X_{t-k:t}$ forming a $k \times M$ matrix (e.g., 60×7), where $k=60$ s. High-frequency features $P_t, T_t, V_t, \omega_t, Q_t$ are updated at each time step Δt , whereas synthesized features are low-frequency. The technical condition indicator S_t , derived from the CSM, represents the subsystem's aggregated health (e.g., $S_t \in [0,1]$ or a binary state) and is updated at a coarser rate. Diagnostic features F_t , obtained from the fuzzy subsystem, quantify uncertainty and local risk and

are also updated infrequently. To preserve the required matrix structure for the 1D-CNN layer, S_t and F_t are broadcast across the entire observation window $X_{t-k:t}$, remaining constant for all k time steps and taken from the latest available low-frequency update prior to time t .

$$Feature(t') = \begin{cases} Sensor\ Reading(t') & \text{for } PTV, \omega, Q \\ S_{latest} & \text{for } S \text{ where } t - k \leq t' \leq t \\ F_{latest} & \text{for } F \text{ where } t - k \leq t' \leq t \end{cases},$$

where t' is the current step index within the time window; S_{latest} , F_{latest} is the latest available values of causal and fuzzy features up to time t .

This multidimensional structure enables mapping low-level stochastic sensor fluctuations to high-level structural health indicators (Fig. 2). The model's prognostic capability relies on cognitive consistency via integration of multi-domain features. The input vector X unifies process dynamics, causal physical knowledge, and expert uncertainty through a three-level aggregation scheme (Fig. 2).

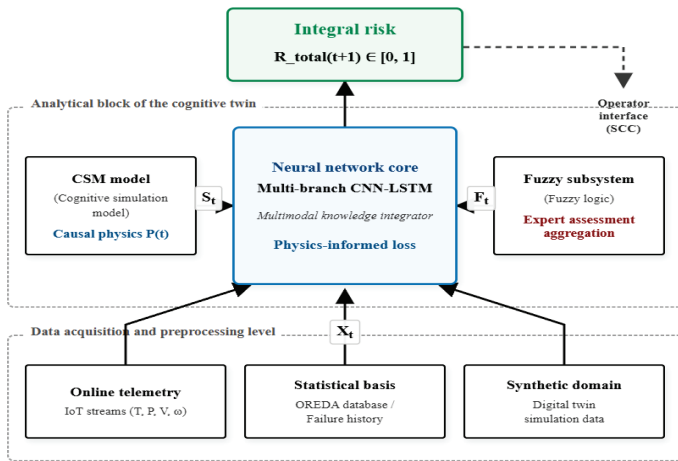


Fig. 2. Multi-level architecture of intelligent monitoring: integration of the neural network core with the functional domains of the DT

Fig. 2 shows that X_t concatenates features from dynamic (time-series telemetry), causal (CSM physics-based indicators), and fuzzy (uncertainty and local risks) domains. This links low-level sensor data with high-level health indicators, providing SCC operators with a comprehensive system view. The approach combines high-frequency temporal dynamics with low-

frequency expert knowledge. Preprocessing includes normalization, spline-based imputation of missing values, and median filtering to remove outliers. For each window of length $k=60$ s, a training tensor $X_{t-k:t}$ and R_t is formed. To capture complex spatio-temporal degradation, a hybrid CNN-LSTM architecture [13] is used, combining 1D-CNN for feature extraction and LSTM for long-term temporal dependencies. To better represent subsystem-specific degradation, the model is implemented as a multi-branch parallel structure (Fig. 3).

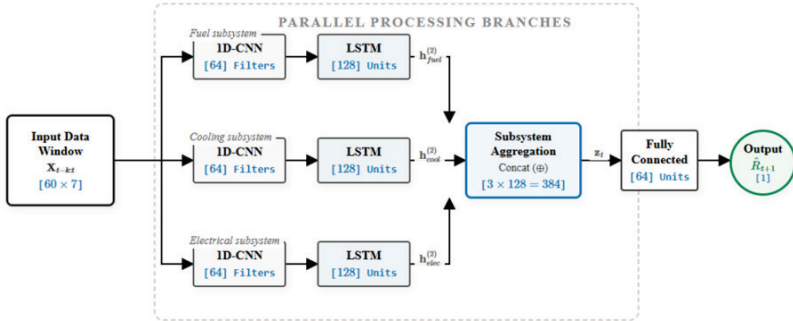


Fig. 3. Multi-branch CNN-LSTM architecture for SPP risk prediction: parallel feature extraction and subsystem aggregation

To prevent statistical interference between heterogeneous physical parameters, the predictive core employs a multi-branch CNN-LSTM topology (Fig. 3). The input telemetry window $X_{t-k:t}$ (60×7 matrix) is directly segmented into three domain-specific sub-matrices $X_{t,fuel}$, $X_{t,cool}$, and $X_{t,elec}$, enabling isolated spatio-temporal feature extraction for each major SPP subsystem.

Segmentation rule: $X_{t,fuel}$: includes parameters directly related to fuel system operation (e.g., fuel pressure P_{fuel} , fuel temperature T_{fuel} , and fuel flow rate Q_t); $X_{t,cool}$: includes parameters related to the cooling circuit (e.g., coolant temperature T_{cool} , coolant pressure P_{cool}); $X_{t,elec}$: includes parameters reflecting mechanical and electrical load/condition (e.g., vibration V_t , rotational speed ω_t , and auxiliary metrics). Each of these segmented sub-matrices is fed into its own independent, yet structurally identical CNN-LSTM branch (as defined by layers 1 and 2). This parallel processing ensures the dedicated extraction of local patterns and the robust modeling of long-term temporal dependencies specific to each physical domain. The resulting hidden state vectors ($h_{t,fuel}^{(2)}$, $h_{t,cool}^{(2)}$, $h_{t,elec}^{(2)}$) from the parallel LSTM blocks are subsequently concatenated in the subsystem aggregation layer to form

the unified system state vector z_t , as formally defined in Equation (2). This integrated approach guarantees the cognitive consistency of the forecast by synthesizing knowledge extracted from disparate physical domains of the complex technical system. The model includes four functional layers:

1. Feature extraction layer (1D-CNN).

The one-dimensional convolutional layer performs the extraction of local spatial patterns from the multi-domain input:

$$h_t^{(1)} = \text{ReLU}(W_c \cdot X_t + b_c),$$

where $h_t^{(1)}$ is the hidden state vector after the convolutional layer; W_c is the matrix of convolutional filters; X_t is the input observation vector; b_c is the bias term; ReLU is the activation function (rectified linear unit).

2. Temporal encoding layer (LSTM).

The recurrent layer based on Long Short-Term Memory (LSTM) blocks models the inertia of processes

$$h_t^{(2)} = \text{LSTM}(h_t^{(1)}, c_{t-1}).$$

where LSTM is the memory cell and forget gate mechanisms to account for the inertial properties of processes in the subsystems of the SPP (e.g., thermal and vibration effects); $h_t^{(2)}$ is the hidden state vector of the recurrent layer; c_{t-1} is the memory cell state at the previous step.

3. Subsystem aggregation layer.

The aggregation layer combines the data from parallel branches into a unified system state vector z_t :

$$z_t = \text{Concat}(h_{t,fuel}^{(2)}, h_{t,cool}^{(2)}, h_{t,elec}^{(2)}), \quad (2)$$

where $h_{t,fuel}^{(2)}, h_{t,cool}^{(2)}, h_{t,elec}^{(2)}$ - hidden state vectors obtained at the second level (LSTM layer) for different subsystems of the SPP: $h_{t,fuel}^{(2)}$ - fuel system; $h_{t,cool}^{(2)}$ - cooling system; $h_{t,elec}^{(2)}$ - power supply system.

This layer reflects the implicit interaction between subsystems by assuming that the concurrently calculated hidden states from each subsystem (fuel, cooling, electric) independently contribute to the overall system risk. This concatenation step is crucial as it ensures a comprehensive, cognitively consistent representation of the multi-domain system state before the final prediction.

4. Fully connected output layer.

Generates the forecast of the integral failure risk:

$$\hat{R}_{t+1} = \sigma(W_o \cdot z_t + b_o),$$

where $\sigma(\cdot)$ is the sigmoid activation function that normalizes the result within the range $[0,1]$; W_o, b_o is the weights and bias of the output fully connected layer.

The resulting value is $\hat{R}_{t+1}$ interpreted as the probability of the system transitioning into a degradation state at the next time step. The summary structure of the architecture is presented in Table 2.

Table 2
Structural specification of the layers of the hybrid neural network (Multi-Branch CNN-LSTM)

Layer type	Parameters / number of neurons	Activation function	Output	Output dimension
Input layer	Sliding window ($k \times M$)	-	X_t	60×7
Convolutional (1D-CNN)	64 filters (3×1)	ReLU	$h_t^{(1)}$	64 (per branch)
LSTM memory cells	128 units	tanh / sigmoid	$h_t^{(2)}$	128 (per branch)
Dropout	rate = 0.2	-	-	128 (per branch)
Subsystem aggregation	Branch concatenation	-	z_t	$3 \times 128 = 384$
Fully connected	64 neurons	ReLU	-	64
Output layer	1 neuron	Sigmoid	$\hat{R}_{t+1}$	1

The architecture (Table 2) is designed for real-time processing of streaming data. The initial 1D convolutional layer (64 filters) acts as a high-frequency spatial filter, extracting short-term mechanical anomalies directly from raw sensor inputs without prior preprocessing. The subsequent LSTM layer (128 units) captures long-term thermodynamic degradation trends. To reduce overfitting to stochastic marine noise, Dropout regularization (rate = 0.2) is applied in each branch. The subsystem aggregation layer then concatenates outputs from the fuel, cooling, and electrical branches into a unified 384-dimensional latent vector, enabling the fully connected network

to perform cross-domain feature fusion and compute the integral risk indicator.

To ensure a high level of confidence of the SCC operator in the generated predictions, model training is implemented within the paradigm of physics-informed learning. The final loss function is minimised iteratively: L_{data} is the standard prediction error based on observed data (for example, mean squared error (MSE) between the predicted and actual risk values); L_{phys} is the penalty for violation of physical dependencies derived from thermodynamic, hydraulic, and vibration models of the digital twin. The final loss function is expressed as [8]:

$$L_{total} = L_{data} + \lambda \cdot L_{phys},$$

where λ is the regularization coefficient that determines the degree of influence of physical constraints on the training process.

The regularization coefficient λ was selected as $\lambda=0.5$ using the L-curve method and further tuned via grid search to balance prediction accuracy (L_{data}) and physical consistency (L_{phys}). Minimizing the total loss L_{total} enforces agreement with physical laws and prevents non-physical predictions. This integration enables training on both empirical data and structural dependencies within the system. The model is trained on a combined dataset including SPP digital twin time series (pressure, temperature, vibration, rotational speed, generator load, etc.), historical failure data (e.g., OREDA), and synthetic CSM data describing probabilistic-causal relationships between subsystems.

Such integration of data sources provides comprehensive model training - both from empirical operational data and from formalized structural dependencies among a complex technical system elements. The main component L_{data} is calculated as the MSE:

$$L_{data} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (R_i - R_i^{true})^2,$$

where N is the number of samples in the batch; R_i^{true} is the reference label of failure risk from the training dataset.

The Physics-Informed Loss (L_{phys}) regularizes training by enforcing SPP conservation laws and penalizing deviations from DT-based thermodynamic, hydraulic, and vibration constraints, including conservation of energy, mass, and momentum (heat balance, flow, pressure, and rotational dynamics).

Formal Definition of the Physical Loss Term

The physical loss term, L_{phys} is defined as the MSE of the residuals, R_i , of the governing physical equations. The residual R_i is the error that results

when the predicted parameters and their derived temporal derivatives (calculated from the neural network's input window) are substituted into the physical conservation equations (where the result should ideally be zero). This loss function quantifies the deviation from the conservation laws formalized within the DT's CSM. The general form of the L_{phys} is:

$$L_{phys} = \frac{1}{N \cdot K_{phys}} \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^{K_{phys}} R_i(X_{t-k:t}, \hat{R}_{t+1}, \theta)^2,$$

where N is the total number of time steps (windows) in the training batch; K_{phys} is the total number of distinct physical equations/constraints applied ($i=1 \dots K_{phys}$); $R_i(\dots)=0$ represents the i -th differential or algebraic conservation equation; $X_{t-k:t}$ is the input observation window; $\hat{R}_{t+1}$ is the predicted risk.

As an academic example, consider the simplified heat balance equation for the cooling circuit (Subsystem j), which is one component of the total L_{phys} :

$$R_{heat} = \frac{dE}{dt} - (\dot{\theta}_{in} - \dot{\theta}_{out}) = 0.$$

where dE/dt is the rate of change of internal energy (approximated from $\nabla_t \cdot T_j$ and P_j); $\dot{\theta}_{in} - \dot{\theta}_{out}$ is the net heat flow (derived from operational parameters θ_t and physical model φ).

The corresponding residual term R_j to be minimized by the neural network weights θ would thus be:

$$R_j \equiv (\nabla_t \cdot T_j) + \frac{1}{c} (f_j^{thermal}(P_j, \theta_t) - T_j) = 0.$$

The neural network is enalized if its prediction leads to an overall system state where the measured temperature change ($\nabla_t \cdot T_j$) significantly deviates from the value predicted by the physical thermal model $f_j^{thermal}(P_j, \theta_t)$ (which accounts for fluid flow, heat exchange, etc., and is derived from the DT's CSM).

Since the input data consists of discrete time series, the temporal derivative (∇_t) of the physical parameters (like pressure P_j or temperature T_j) is approximated numerically using the forward difference scheme between two consecutive time steps (Δ_t):

$$\nabla_t P_j = \frac{P_j(t+\Delta t) - P_j(t)}{\Delta t},$$

where $\nabla_t P_j$ is the estimate of the time derivative of pressure P with respect to time t ; Δt is the telemetry discretisation step.

$$T_j = \frac{T_t(t + \Delta t) - T_t(t)}{\Delta t}.$$

This numerical method provides the empirical dynamic behavior of the system, which is then enforced to align with the theoretical behavior f_j^{energy} during the model's training. The final total loss $L_{\text{total}} = L_{\text{data}} + \lambda \cdot L_{\text{phys}}$ is minimized iteratively to achieve a balance between empirical prediction accuracy (L_{data}) and physical consistency (L_{phys}). The L_{phys} component enforces dynamic consistency between observed physical changes and the modeled term f_j^{energy} , derived from governing equations (e.g., thermal and energy balance). The model's construction and training are formalized as a data flow diagram, with digital twin constraints integrated into the backpropagation loop (Fig. 4).

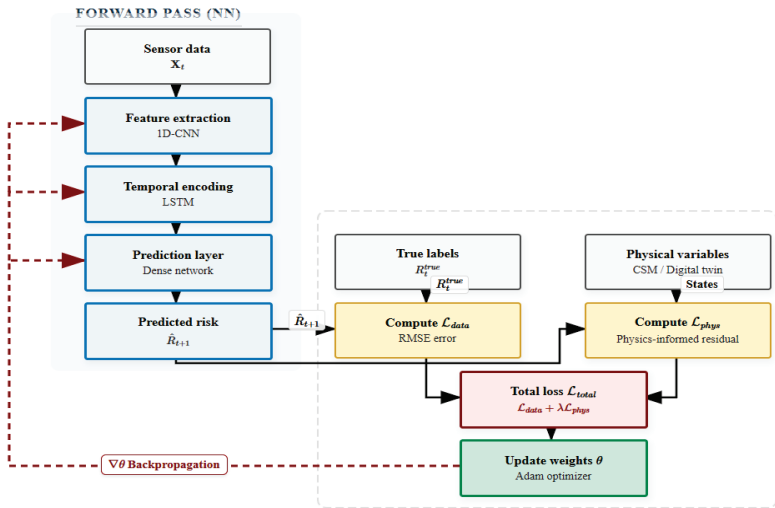


Fig. 4. Data flow diagram and backpropagation mechanism in the process of training the hybrid model

The scheme (Fig. 4) shows two coupled optimisation loops: the main forward flow from sensors to the predictive layer and an auxiliary branch of a priori constraints derived from the digital twin. Training iteratively minimises the total loss L_{total} , where L_{data} fits observations and L_{phys} serves as a strict regulariser. This feedback enforces agreement with noisy data while constraining predictions within engineering limits, preventing physically impossible results — critical for autonomous navigation safety.

Training of the PINN combines data-driven optimisation with physical constraints. Parameters φ and θ are updated adaptively as operating conditions change. The model is trained with mini-batches using Adam ($\alpha \approx 10^{-3}$), and its generalisation is assessed via 5-fold cross-validation. The physics-informed loss ensures consistency with conservation laws, improving reliability under incomplete data and robustness to sensor noise. Thus, the CNN–LSTM model functions as an intelligent predictor within the digital twin, uniting empirical patterns with physical laws. For validation under near-real conditions, a dedicated Hardware-in-the-Loop (HIL) test bench was developed (Fig. 5).

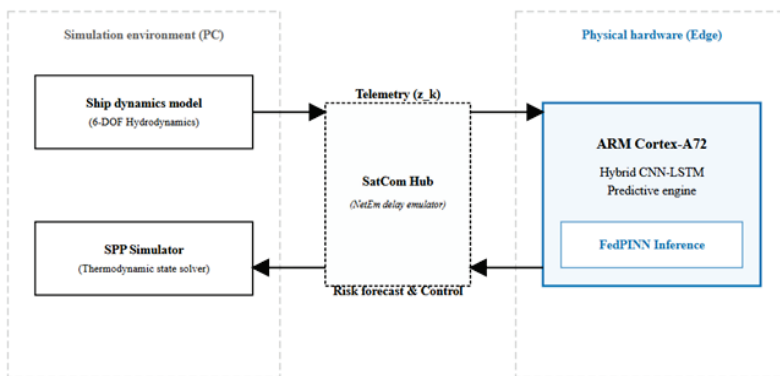


Fig. 5. Semi-physical (HIL) test ben diagram: integration of an ARM Cortex onboard computer with an SPP physical process simulator

Using a real ARM Cortex-A72 (4×1.5 GHz) in the loop enables objective latency assessment. With satellite communications (SatCom) degradation emulation, the model shows robustness to packet loss: inference time is 42 ± 5 ms per prediction, with peak RAM under 128 MB, meeting Hard Real-Time edge constraints. The PINN architecture is highly scalable within the SCC ecosystem: its multi-branch design enables vertical expansion without restructuring, supports cost-efficient horizontal scaling for fleet monitoring, and reduces SatCom traffic by transmitting only the aggregated risk vector (over 98 %).

A fixed observation window of 60 s (Table 3) was selected to balance capturing LSTM temporal dependencies with computational efficiency. The regularisation coefficient λ is a key parameter defining the trade-off between L_{data} and L_{phys} ; its optimal value was determined via grid search over $[0, 1]$ with 5-fold cross-validation.

Table 3

Technical parameters for deployment of the predictive model

Deployment parameter	Value	Comment
Response time (latency)	< 50 ms	Meets hard real-time requirements
Required memory (RAM)	≈ 120 MB	Acceptable for edge computing (ARM/Jetson)
Throughput	10 Hz	Synchronized with main sensors of the power plant
SatCom traffic savings	> 98 %	Due to onboard edge data processing

The hybrid CNN–LSTM model’s efficiency and stability depend on hyperparameters controlling learning, representation, and complexity. For reproducibility, the configuration (Table 4) was obtained using the same procedure; the regularization coefficient remains the most critical parameter and requires further analysis.

Table 4

Hybrid CNN-LSTM model hyperparameter configuration

Parameter	Value	Description
Observation window length (k)	60 s	Length of the time series segment used for prediction.
Input feature count (M)	7	The dimensionality of the input vector X_t per time step.
Batch size	32	Number of samples processed before updating the model weights.
Optimizer	Adam	Adaptive moment estimation algorithm.
Parameter	Value	Description
Learning rate (α)	10^{-3}	Adaptive learning rate for weight updates.
Epochs	100	Total number of full passes over the training dataset (with early stopping).
Regularization coefficient (λ)	0.5 (empirical)	Weighting factor balancing L_{data} and L_{phys}
Cross-validation scheme	5-fold	Scheme used to ensure generalization capability and prevent overfitting.

A deeper analysis is required to validate the critical trade-off parameters: the observation window length (k) and the regularization coefficient (λ). The selection methodology for the regularization coefficient is illustrated in Figure 6. As shown by the L-curve (Fig. 6), increasing λ from 0 to 0.5 sharply reduces L_{phys} while maintaining low RMSE; $\lambda = 0.5$ provides the optimal balance. For $\lambda > 0.5$, RMSE rises, indicating overemphasis on physical constraints at the expense of sensor-driven dynamics. The time window $k = 60$ s reflects SPP inertia and external disturbances: with load oscillations of 8–15 s, it captures 4–7 cycles, allowing the LSTM to separate short-term fluctuations from long-term degradation.

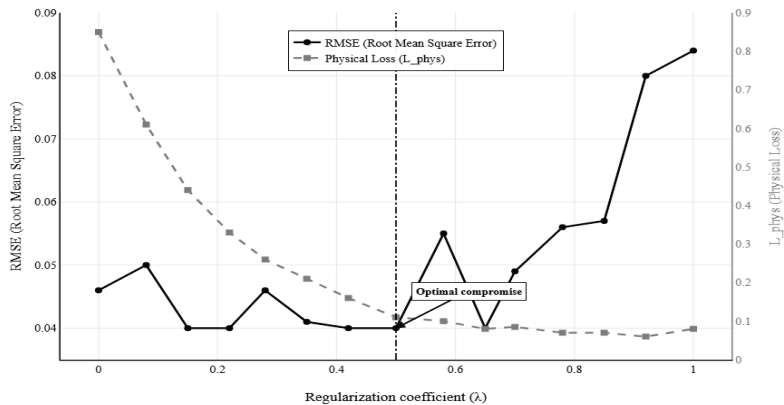


Fig. 6. Trade-off between empirical accuracy (RMSE) and physical consistency (L_{phys}) as a function of the regularization coefficient λ

The optimal regularisation coefficient $\lambda = 0.5$ corresponds to the L-curve “knee”: for $\lambda < 0.3$ the model overfits to sensor noise, whereas for $\lambda > 0.7$ physical constraints dominate, suppressing empirical features and increasing systematic error. To assess the model’s quality, standard regression metrics are applied: MAE; root mean square error (RMSE); coefficient of determination (R^2), as well as the k -fold cross-validation procedure, which guarantees model robustness against overfitting.

The choice $\lambda = 0.5$ follows the L-curve criterion, where gains in physical consistency no longer justify losses in empirical accuracy. Sensitivity of MAE to k and λ was also analysed (Fig. 7).

Analysis of Fig. 7 shows that reducing the window to 30 s increases error by 18 – 22 % due to aliasing of slow thermal dynamics, while extending it to 120 s yields negligible accuracy gains (<1.5 %) but sharply increases

random access memory (RAM) usage and introduces unacceptable real-time delays.

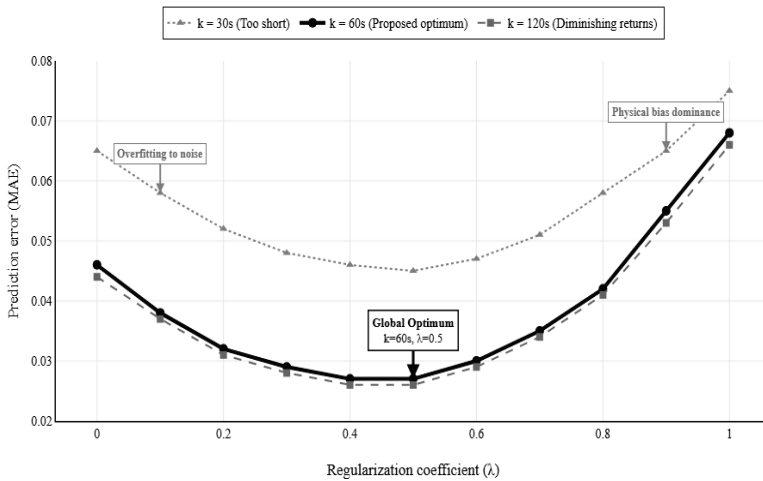


Fig. 7. Sensitivity analysis of the predictive model: the influence of the observation window length (k) and the regularisation coefficient (λ) on prediction accuracy (MAE)

Together, these elements form a trainable neural subsystem of the digital twin, providing adaptive prediction of failure probability and integral risk based on sensor data streams:

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |\hat{R}_i - R_i^{exp}|,$$

$$MRSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\hat{R}_i - R_i^{exp})^2},$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_i (R_i^{exp} - \hat{R}_i)^2}{\sum_i (R_i^{exp} - \bar{R})^2},$$

where R_i^{exp} is the actual (empirical) risk values; $\hat{R}_i$ is the predicted values produced by the model; $\bar{R}$ is the mean value of actual risks.

Before training, a statistical analysis of feature distributions using Kernel Density Estimation (KDE) was performed to verify data representativeness and reduce bias toward dominant classes. As shown in Fig. 8, data density is evaluated across four SPP subsystems: fuel, cooling, electric power, and control.

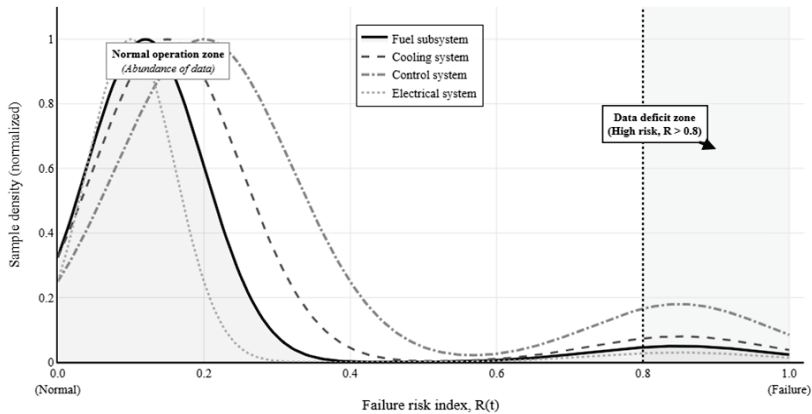


Fig. 8. Density distribution of the training dataset by integral risk levels for various SPP subsystems

Figure 8 shows data density across four subsystems (Fuel, Cool, Elec, Control). Most observations lie in the low-risk zone ($R < 0.5$), reflecting normal operation. Cooling and electrical systems dominate with medium-risk cases ($0.2 < R < 0.6$), while high-risk events ($R > 0.8$) account for only 5–7%, motivating data augmentation via CSM-generated scenarios. High-risk cases are mainly concentrated in the control subsystem, highlighting its critical role despite fewer parameters.

This distribution guides dataset balancing (e.g., oversampling, class weighting) to avoid bias toward dominant classes. Model adequacy was assessed by comparing predicted risks with DT-based reference values on an isolated test set containing rare emergency scenarios (fault detection and isolation attacks, cylinder–piston degradation), with results shown in Fig. 9. Analysis of the scatter diagram (Fig. 9) revealed a slight dispersion in the low-risk zone ($R < 0.2$), caused by hardware sensor noise, and a tendency towards slight overestimation in the ultra-high-risk zone ($R > 0.8$), which is acceptable from the standpoint of a conservative safety strategy (Safety First). Quantitative accuracy results for the key SPP subsystems are presented in Table 5.

Most predicted values lie close to the diagonal $y=x$, indicating strong agreement with reference data ($R^2 = 0.982$). Errors remain low ($MAE \leq 0.03$, $RMSE = 0.04$). Minor dispersion at low risk ($R < 0.2$) is due to sensor noise and weak degradation signals, while slight overestimation at high risk

($R > 0.7$) reflects limited training data for rare failures; this can be mitigated by denoising and data balancing (e.g., synthetic generation).

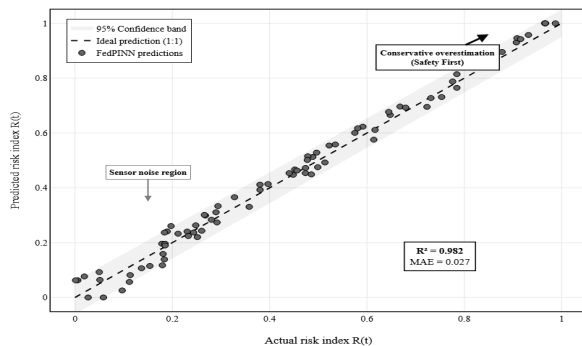


Fig. 9. Comparison of hybrid model predictions with reference DT data

Table 5

Accuracy metrics for failure risk prediction by subsystems

PPS	MAE	RMSE	Pearson correlation coefficient
Fuel system	0.024	0.038	0.985
Cooling circuit	0.031	0.042	0.978
Power unit (Generators)	0.028	0.035	0.981
Integral indicator	0.027	0.039	0.982

Benchmarking against Weibull, LSTM-only, and CNN-only models confirms the superiority of the hybrid PINN CNN–LSTM. Error reduction versus the best baseline (LSTM) is statistically significant ($p < 0.001$). The model matches or exceeds state-of-the-art results, benefiting from physics-informed constraints that improve accuracy under data scarcity. Unlike classical statistical models, it adapts to unit-specific degradation, while physical laws act as a filter that preserves accuracy in high-risk regimes where purely data-driven models degrade. A combined benchmark and ablation study across Weibull, LSTM-only, standard CNN–LSTM, and the proposed PINN CNN–LSTM confirms the contribution of each component. Summary results, including R^2 , are presented in Table 6.

Table 6
Comparative benchmark of predictive models on the test dataset

Predictive model architecture	MAE	RMSE	R ² Score
Weibull Model (Statistical baseline)	0.184	0.215	0.412
CNN-only (Spatial baseline)	0.078	0.092	0.815
LSTM-only (Temporal baseline)	0.062	0.075	0.894
Standard CNN-LSTM (Data-driven / No physics)	0.046	0.058	0.941
PINN CNN-LSTM (Proposed model)	0.027	0.039	0.982

Analysis of Table 6 confirms the theoretical hypotheses on architectural components, showing the hybrid PINN’s predictive reliability ($R^2 = 0.982$). The physics-informed approach is essential for Ship Power Plants (SPPs), which lack sufficient historical data on catastrophic failures. Purely data-driven networks (Standard CNN-LSTM) overfit to sensor noise, while PINN enforces thermodynamic constraints, reducing mean absolute error by 41% and preventing "mathematical hallucinations" under scarce data. Figure 10 illustrates these dynamics, comparing statistical baselines and the effect of the physical regularizer.

The graphical comparison (Fig. 10) shows that the proposed hybrid approach yields the lowest prediction error among all methods. The statistical Weibull model remains less accurate ($RMSE > 0.2$) due to its inability to capture environmental disturbances. Recurrent networks (LSTM) significantly reduce the error ($MAE = 0.062$), but remain sensitive to stochastic noise from SPP sensors. Ablation analysis (Fig. 10) indicates that removing the physical regularizer (i.e., transition from PINN to standard CNN-LSTM increases MAE by 41%. The combination of spatio-temporal filtering and physical inductive bias enables the PINN model to achieve the best performance ($RMSE = 0.039$), making it suitable as a core component of a digital twin.

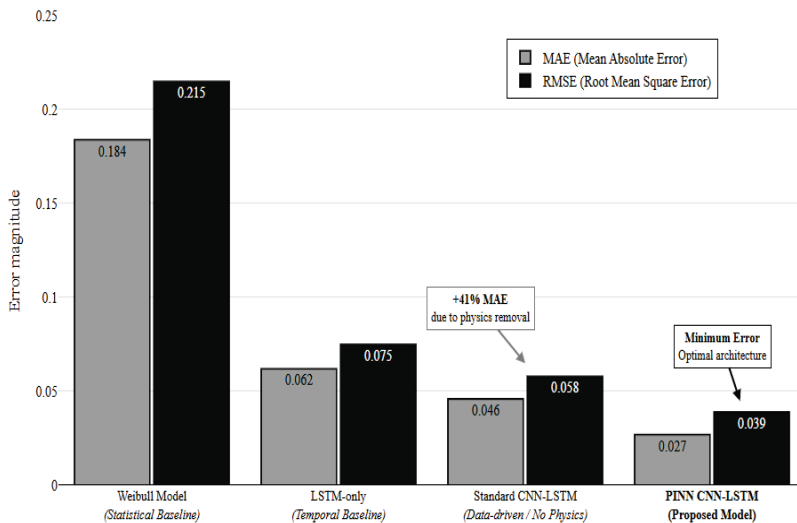


Fig. 10. Comparative benchmark and ablation analysis of predictive models: evaluation of accuracy (MAE and RMSE) and the influence of functional components

Beyond accuracy, the multi-branch architecture provides basic interpretability: separating feature flows allows not only failure probability estimation but also attribution of risk to specific subsystems (fuel, cooling, electrical) via contributions of hidden states. For deeper explainability, shapley additive explanations-based feature attribution can be applied. To illustrate the physics-informed core, convergence of the loss function was analyzed (Fig. 11).

In early training (epochs 0 – 20), the optimizer minimizes empirical loss L_{data} , while high volatility of L_{phys} reveals physically inconsistent intermediate states. This confirms that purely data-driven models may exploit statistical shortcuts without respecting conservation laws. In later stages (Pareto knee, Fig. 11B), competing gradients emerge: the physical regularizer acts as a structural constraint, penalizing infeasible representations and restricting the hypothesis space. Convergence at this point ensures consistency with both noisy sensor data and thermodynamic invariants, preventing statistical artifacts.

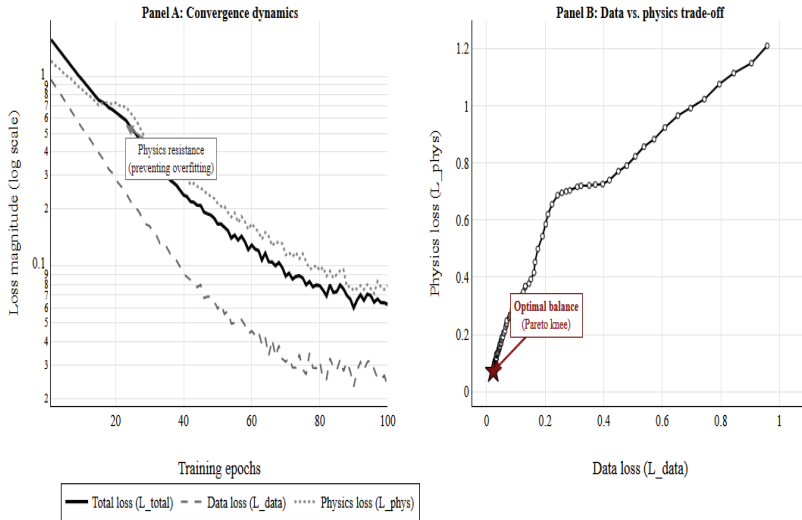


Fig. 11. Interaction of loss function components in the hybrid architecture:
 (A) dynamics of joint convergence; (B) analysis of the trade-off (Pareto trade-off) between data and physics

The study proposes a predictive architecture with several novel elements: a cognitive consistency method that integrates heterogeneous domains (CSM, fuzzy logic, sensor data), enabling the neural core to leverage prior physical knowledge for noise filtering; a multi-branch design for parallel feature extraction across key SPP subsystems (fuel, cooling, electromechanical), improving sensitivity to local faults; a real-time PINN with a modified loss enforcing mass and energy conservation to avoid physically inconsistent predictions; and Hardware-in-the-Loop validation on an ARM Cortex-A72, confirming robustness and real-time performance.

Limitations remain: despite ~ 42 ms inference, longer observation windows ($k > 120$ s) or added nonlinear constraints significantly increase memory use, potentially exceeding maritime programmable logic controller capabilities. The model depends on reliable boundary conditions, handling noise and partial drift but becoming uncertain under complete sensor failure. It is also focused on gradual degradation and cannot capture abrupt failures caused by external impacts.

Discussion

The results indicate that integrating data-driven models with physical constraints and multi-source data improves both accuracy and stability in failure risk prediction for complex systems. Hybrid CNN–LSTM models capture temporal dependencies and degradation trends [14, 21], but their purely data-driven nature limits robustness under changing conditions. The proposed PINN addresses this by embedding physics-informed loss functions, enforcing consistency with physical laws and improving generalization. While PINNs enhance stability and interpretability [22], they are typically used for continuous systems; this work extends them to discrete, multi-component marine power plants via aggregated conservation constraints. Digital twin approaches are widely used for monitoring and decision support [23, 24], yet often rely on either simulation or data alone. The proposed framework unifies telemetry, CSM simulation, and fuzzy inference into a consistent representation, improving accuracy and interpretability. Similarly, although multi-source fusion improves diagnostics [11], many methods remain purely statistical; here, structured fusion aligns heterogeneous inputs in a shared state space, reducing inconsistencies. Model robustness under noise, missing data, and imbalance remains challenging [25], which is mitigated here through physical constraints and multi-domain features as regularization. In maritime applications, machine learning-based diagnostics often overlook subsystem heterogeneity [26]; the multi-branch architecture addresses this via subsystem-specific feature extraction. Federated learning improves scalability and privacy [27], but rarely incorporates domain knowledge; the proposed approach combines distributed learning with physics-informed constraints. Unlike many studies based on simulation, this work includes Hardware-in-the-Loop validation, ensuring realistic performance evaluation [28].

Overall, the proposed method extends CNN–LSTM models with physical constraints, advances digital twin frameworks through coherent multi-source integration, improves robustness to noisy heterogeneous data, introduces subsystem-aware modeling, and is validated under realistic conditions. These results both confirm current research trends and contribute to the development of reliable SPP failure prediction.

Conclusion

This section describes the development and validation of a hybrid spatio-temporal neural network for predicting failure risk in marine power plant subsystems. The approach overcomes limitations of purely data-driven models by incorporating physical constraints within a digital twin framework. A multi-branch CNN–LSTM architecture is proposed for

subsystem-specific feature extraction from heterogeneous sources (sensor data, cognitive simulation, fuzzy diagnostics), capturing both short-term dynamics and long-term degradation. The inclusion of conservation-based constraints in the loss function ensures physically consistent predictions; their removal increases error by up to 41%, confirming their significance. The model achieves stable performance ($R^2 = 0.982$, $RMSE = 0.039$) under noise and incomplete data. Hardware-in-the-Loop validation on an ARM Cortex-A72 demonstrates near real-time applicability, with inference latency of 42 ± 5 ms and moderate resource demands, supporting onboard deployment. The architecture also improves interpretability through subsystem-oriented branches and physics-based regularization, forming a basis for explainable diagnostics. Overall, the proposed PINN CNN–LSTM model provides a consistent and practical solution for failure risk prediction and can be integrated into digital twin systems for advanced monitoring and decision support.

ЛІТЕРАТУРА REFERENCES

1. Вичужанин В. В. Информационное обеспечение мониторинга и диагностирования технического состояния судовых энергоустановок. // Вісник Одеського національного морського університету: зб. наук. праць. – 2012. – № 35. – С. 111 – 124.
2. Вичужанин В. В. Методы информационных технологий в диагностике состояния сложных технических систем : монография / В. В. Вичужанин, Н. Д. Рудниченко. – Одесса : Экология, 2019. – 178 с.
3. Вичужанин В. В., Рудниченко Н. Д. Метод управления рисками судовых сложных технических систем // Проблеми техніки. – 2014. – № 2. – С. 138 – 142.
4. Бойко В. Д., Вичужанин В. В. Модель оценки живучести судовых технических систем // Вестник Миколаївського кораблебудівного університету. – 2012. – № 3. – С. 62 – 67.
5. Vychuzhanin V., Vychuzhanin A. Model for determining similarity between cases in failure diagnosis of ship power plant equipment // Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки. – 2025. – № 50. – С. 9 – 17.
6. Vychuzhanin V., Vychuzhanin A. Integrated modeling of reliability and maintenance of ship's power plant equipment considering degradation and operational conditions // Системи контролю інформації та

інтелектуальні технології. Досягнення та застосування : монографія. - Lviv-Toruń : Liha-Pres, 2025. – С. 335 – 363.

7. Zhu Z., Lei Y., Qi G., Chai Y., Mazur N., An Y., Huang X. A review of the application of deep learning in intelligent fault diagnosis of rotating machinery // *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*. — 2023. — Vol. 206. — P. 112346 – 112346.

8. Raissi M., Perdikaris P., Karniadakis G. E. Physics-informed neural networks: A deep learning framework for solving forward and inverse problems involving nonlinear partial differential equations // *Journal of Computational Physics*. – 2019. – Vol. 378. – P. 686 – 707.

9. Tao F., Qi Q., Liu A., Kusiak A. Data-driven smart manufacturing // *Journal of Manufacturing Systems*. – 2019. – Vol. 48. – P. 157 – 169.

10. Coraddu A., Oneto L., Ghio A., Savio S., Anguita D., Figari M. Machine learning approaches for improving condition-based maintenance of naval propulsion plants // *Ocean Engineering*. – 2020. – Vol. 209. – P. 1 – 24. – Art. 107379.

11. Lei Y., Yang B., Jiang X., Jia F., Li N., Nandi A. K. Applications of machine learning to machine fault diagnosis: A review and roadmap // *Mechanical Systems and Signal Processing*. – 2020. – Vol. 138. – P. 106587 – 106587.

12. Mittal K., Jain A., Vaisla K. S., Castillo O., Kacprzyk J. A comprehensive review on type-2 fuzzy logic applications: Past, present and future // *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. – 2020. – Vol. 95. – P. 103916 – 103916.

13. Yang Y., Tu F., Huang S., Tu Y., Liu T. Research on CNN-LSTM DC power system fault diagnosis // *Frontiers in Energy Research*. – 2023. – Vol. 11. – P. 1258549 – 1258549.

14. Li X., Ding Q., Sun J. Q. Remaining useful life estimation in prognostics using deep convolution neural networks // *Reliability Engineering & System Safety*. – 2022. – Vol. 172. – P. 1 – 11.

15. *Offshore Reliability Data Handbook / OREDA Participants*. - 6th ed. – DNV GL, 2020. – 836 p.

16. Wang T., Yu J., Siegel D., Lee J. A similarity-based prognostics approach for remaining useful life estimation // *IEEE Transactions on Reliability*. – 2021. – Vol. 70, No. 1. – P. 246 – 261.

17. Vychuzhanin V., Vychuzhanin A. Stochastic models and methods for diagnostics, assessment, and prediction of the technical condition of complex critical systems : monograph. – Lviv-Toruń : Liha-Pres, 2025. – 176 p.

18. Vychuzhanin V., Vychuzhanin A. Adequacy and verification of an intelligent diagnostic model for ship power plants // *Informatics and*

Mathematical Methods in Simulation. – 2025. – Vol. 15. – No. 3. – P. 312 – 326.

19. Wang J., Cao H., Cui Z. et al. Intelligent fault diagnosis of marine diesel engines based on efficient channel attention-improved convolutional neural networks // *Processes*. – 2023. – Vol. 11. – No. 12. – P. 3360.

20. Lang X., Wu D., Mao W. Physics-informed machine learning models for ship speed prediction // *Expert Systems with Applications*. – 2024. – Vol. 238. – P. 121877 – 121877.

21. Babu G. S., Zhao P., Li X.-L. Deep convolutional neural network based regression approach for estimation of remaining useful life // *Proceedings of the Annual Conference of the Prognostics and Health Management Society (PHM)*. – 2016. – P. 214 – 228.

22. Karniadakis G. E. et al. Physics-informed machine learning // *Nature Reviews Physics*. – 2021. – Vol. 3. – P. 422 – 440.

23. Tao F., Zhang M., Liu Y., Nee A. Y. C. Digital twin in industry: State-of-the-art // *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. – 2022. – Vol. 18. – No. 4. – P. 2405 – 2415.

24. Jones D., Snider C., Nassehi A., Yon J., Hicks B. Characterising the digital twin // *CIRP Annals*. – 2020. – Vol. 69. – No. 1. – P. 36 – 39.

25. Sambasivan N., Kapania S., Highfill H., Akrong D., Paritosh P., Aroyo L. “Everyone wants to do the model work, not the data work”: Data cascades in high-stakes AI // *Proceedings of the 2021 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. – 2021. – P. 1 – 15.

26. Coraddu A., Oneto L., Ghio A., Savio S., Anguita D., Figari M. Machine learning approaches for improving condition-based maintenance of naval propulsion plants // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M*. – 2016. – Vol. 230. – No. 1. – P. 136 – 153.

27. Nguyen D. C., Ding M., Pathirana P. N., Seneviratne A., Li J., Poor H. V., Niyato D. Federated learning for Internet of Things: A comprehensive survey // *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. – 2021. – Vol. 23. – No. 3. – P. 1622 – 1658.

28. Fuller A. et al. Digital twin: Enabling technologies, challenges and open research // *IEEE Access*. – 2020. – Vol. 8. – P. 108952 – 108971.

Анотація. Розглянуто проблему підвищення точності прогнозування ризику відмов складних технічних систем на прикладі суднових енергетичних установок в умовах високої структурної складності, нелінійності процесів деградації та невизначеності експлуатаційних даних. Обґрунтовано обмеженість традиційних аналітичних, статистичних і нечітко-логічних підходів, які не забезпечують достатньої достовірності довгострокових прогнозів у динамічних

середовищах функціонування. Запропоновано гібридну просторово-часову нейронну модель, побудовану на основі інтеграції згорткових нейронних мереж та мереж довгої короткочасної пам'яті, яка функціонує в межах цифрового двійника. Особливістю підходу є поєднання трьох інформаційних доменів: високочастотних телеметричних даних, фізично обґрунтованих індикаторів стану, отриманих із когнітивної імітаційної моделі, а також діагностичних ознак, сформованих за допомогою нечіткої логіки. Це дозволяє забезпечити когнітивну узгодженість і фізичну валідність результатів прогнозування. У роботі реалізовано механізм фізично інформованого навчання, що передбачає включення законів збереження енергії та маси до функції втрат нейронної мережі. Такий підхід забезпечує обмеження простору гіпотез моделі та запобігає формуванню фізично неможливих прогнозів. Запропонована багатогілкова архітектура дозволяє виконувати незалежну обробку даних для окремих підсистем (паливної, системи охолодження та електротехнічної), що підвищує чутливість до локальних дефектів і деградаційних процесів. Експериментальна перевірка моделі проведена з використанням підходу Hardware-in-the-Loop, що забезпечує наближеність умов тестування до реальної експлуатації. Отримані результати демонструють підвищення точності прогнозування, стійкість до шумів і пропусків у даних, а також придатність моделі до використання в системах реального часу. Додатково реалізовано механізми інтерпретації результатів на основі аналізу внеску підсистем та методу SHapley Additive exPlanations, що підвищує довіру до прийнятих рішень. Отримані результати підтверджують доцільність використання гібридних нейромережеских моделей із фізичною регуляризацією для задач прогнозної діагностики та управління ризиками в складних технічних системах.

РЕФЕРАТИ

УДК 621.431.74

DOI: 10.31653/1819-3293-2026-1-31-03-12

Будуров М. І. Оптимізація налаштування електронного регулятора частоти обертання суднового дизель-генератора // Автоматизація суднових технічних засобів: наук.-техн. зб. – 2026. – Вип. 31. – Одеса: НУОМА. – С. 3 – 12.

Табл. 1. Рис. 5. Список літ.: 6 назв.

Обґрунтовано методику налаштування електронного регулятора частоти обертання контролерного типу суднового дизель-генератора, яка враховує істотність зміни навантаження при найімовірніших ступеневих збуреннях. Виявлено закономірності впливу параметрів налаштування електронного регулятора на показники роботи суднової дизель-генераторної установки в умовах експлуатації. За рахунок оптимізації налаштування покращена стабільність частоти обертання дизель-генератора без порушення регламентованих стандартами вимог до регулювання частоти обертання під час максимально допустимого скидання навантаження.

Ключові слова: судновий дизель-генератор, електронний регулятор частоти обертання, ПІД контролер, оптимізація параметрів налаштування, математичне моделювання.

Tab. 1. Fig. 5. Refer.: 6.

A methodology for tuning a controller-based electronic speed governor of a marine diesel generator has been substantiated, taking into account the significance of load variations under the most probable step disturbances. The relationships between the governor tuning parameters and the performance indicators of the marine diesel generator set under operating conditions have been established. Optimization of the governor settings improves diesel generator speed stability while maintaining compliance with standard requirements for speed control during maximum permissible load shedding.

Key words: marine diesel-generator, electronic speed governor, PID controller, optimization of tuning parameters, mathematical modeling.

УДК 621.431.74

DOI: 10.31653/1819-3293-2026-1-31-13-31

Горб С. І. Ефективність мовних моделей штучного інтелекту для оцінювання операційних ризиків на судах. // Автоматизація суднових технічних засобів: наук.-техн. зб. – 2026. – Вип. 31. – Одеса: НУОМА. – С. 13 – 31.

Табл. 2. Список літ.: 10 назв.

Незважаючи на зростання інтересу до застосування штучного інтелекту в судновій практиці, судноплавні компанії висловлюють сумніви щодо надійності цієї технології під час оцінювання операційних ризиків. У статті наведено порівняльне оцінювання ефективності відомих мовних моделей штучного інтелекту для підтримки оцінювання операційних ризиків на судах.

Запропоновано систему критеріїв, що дає змогу оцінити властивості моделей, які безпосередньо впливають на практичну надійність їх застосування в судовій діяльності, а також визначити моделі, що забезпечують найвищу якість аналізу. Установлено, що найбільш доцільним є використання штучного інтелекту для первинної ідентифікації ризиків, формування переліку запобіжних заходів і прискорення документування результатів. Водночас ефективність такого підходу залежить від правильного вибору моделі та обов'язкової експертної верифікації отриманих висновків.

Ключові слова: ISM Code; операційний ризик; штучний інтелект; суднова операція; безпека судноплавства; критерії оцінки.

Tab. 2. Refer: 10.

Despite the growing interest in applying artificial intelligence in shipboard practice, shipping companies express doubts about the reliability of this technology in operational risk assessment. The article presents a comparative evaluation of the performance of well-known artificial intelligence language models in supporting operational risk assessment on board ships. A system of criteria is proposed to assess the properties of the models that directly affect the practical reliability of their application in ship operations, as well as to identify the models that provide the highest quality of analysis. It was found that the most appropriate use of artificial intelligence is for the initial identification of risks, the development of a list of preventive measures, and the acceleration of result documentation. At the same time, the effectiveness of this approach depends on the correct choice of model and the mandatory expert verification of the conclusions obtained.

Key words: ISM Code; operational risk; artificial intelligence; ship operation; maritime safety; evaluation criteria.

УДК 621.431

DOI: 10.31653/1819-3293-2026-1-31-32-39

Горб С. І., Будуров М. І. Забезпечення регламентованого перевантаження головних дизелів на судах із гвинтами, крок яких регульований // Автоматизація судових технічних засобів: наук.-техн. зб. – 2026. – Вип. 31. – Одеса: НУОМА. – С. 32 – 39.

Табл. 2. Список літ.: 8 назв.

Проаналізовано вимоги щодо забезпечення короткочасного перевантаження головних судових дизелів понад номінальну потужність у критичних навігаційних ситуаціях, а також практична реалізація цих вимог при комбінаторному керуванні частотою обертання двигуна та кроком гребного гвинта. Розрахунковим дослідженням встановлено, що режим регламентованого перевантаження на 10 % від номінальної потужності доцільно здійснювати з пріоритетом у збільшенні частоти обертання, а не збільшення кроку гвинта. Це забезпечить зменшення теплового навантаження деталей циліндро-поршневої групи дизеля за критерієм мінімуму температури газів на лінії розширення та підвищить надійність рушійної установки при регламентованому перевантаженні.

Ключові слова: головний дизель, перевантаження, крок гвинта, частота обертання, комбінаторне керування, обмежувач навантаження, чисельне моделювання.

Tab. 2. Refer.: 8.

The requirements for ensuring short-term overloading of main marine diesel engines beyond their rated power in critical navigational situations have been analyzed, along with the practical implementation of these requirements under combinatorial control of engine rotational speed and propeller pitch. A computational study has established that the regulated overload mode by 10 % of the rated power should preferably be achieved by prioritizing an increase in rotational speed rather than propeller pitch. This approach will reduce the thermal load on the cylinder-piston group components of the diesel engine based on the criterion of minimum gas temperature along the expansion line and improve the reliability of the propulsion plant during overload prescribed by regulations.

Key words: main marine diesel engine, overload, propeller pitch, rotational speed, combinatorial control, load limiter, numerical simulation.

УДК 621.431.74

DOI: 10.31653/1819-3293-2026-1-31-40-54

Горб С. І., Будуров М. І., Поповський О. Ю. Ефективність методів пошуку екстремуму при оптимізації електронного регулятора частоти обертання суднового дизеля. // Автоматизація суднових технічних засобів: наук.-техн. зб. – 2026. – Вип. 31. – Одеса: НУОМА. – С. 40 – 54.

Рис. 6. Табл. 3. Список літ.: 12 назв.

Досліджено ефективність спеціалізованих методів пошуку екстремуму при оптимізації налаштувань електронного регулятора частоти обертання Nabtesco MG-800 у складі головного суднового дизеля MAN B&W 6S60MC-C7 в умовах дії морського хвилювання. Показано, що градієнтний метод забезпечує високу швидкість збіжності, але є чутливим до локальних екстремумів, тоді як симплексний метод надійніше визначає область глобального оптимуму, проте вимагає контролю граничних умов. Безградієнтний метод Гука-Дживса забезпечує найглибше мінімізування критерію за рахунок більшої кількості ітерацій і підвищених обчислювальних витрат. Визначено вплив вибору кроку пошуку та діапазонів зміни параметрів на ймовірність збіжності до локальних екстремумів..

Ключові слова: судновий дизель, електронний регулятор частоти обертання, алгоритми оптимізації, пошукові методи екстремуму, точність, математичне моделювання.

Fig. 6. Tab. 3. Refer.: 12.

The effectiveness of specialized extremum-search methods for optimizing the tuning parameters of the Nabtesco MG-800 electronic speed governor as part of the main marine diesel engine MAN B&W 6S60MC-C7 under sea-wave operating conditions has been investigated. It is shown that the gradient method provides a high convergence rate but is sensitive to local extrema, whereas the simplex method more

reliably identifies the region of the global optimum, although it requires control of boundary constraints. The derivative-free Hooke–Jeeves method ensures the deepest minimization of the criterion at the cost of a larger number of iterations and increased computational effort. The influence of the choice of search step and the ranges of parameter variation on the probability of convergence to local extrema has been determined.

Key words: marine diesel engine, electronic speed governor, optimization algorithms, extremum search methods, accuracy, mathematical modeling.

УДК 629.5.083.4:004.8

DOI: 10.31653/1819-3293-2026-1-31-55-65

Левінський М.В., Левінський В.М. Предиктивна модель оцінювання ризиків затримання суден із застосуванням штучного інтелекту та ансамблевих методів машинного навчання // Автоматизація суднових технічних засобів: наук.-техн. зб. — 2026. — Вип. 32. — Одеса: НУОМА. — С. 55 - 65

Табл. 4. Список літ.: 16 назв.

У статті розглядається підхід до автоматизації оцінювання ризиків державного портового контролю (PSC) на основі аналізу даних щорічних звітів восьми регіональних меморандумів (MoU). Запропоновано методiku застосування інструментів штучного інтелекту — зокрема, NLP-моделей та ансамблевих методів машинного навчання — для синтезу даних із гетерогенних джерел (Paris MoU, Tokyo MoU, Black Sea MoU, EMSA та ін.). Результатом роботи є концепція предиктивної моделі на основі логістичної регресії, що дозволяє прогнозувати ймовірність затримання судна $P(d)$ на основі п'яти ключових ознак: юрисдикції прапора, рейтингу визнаної організації (RO), віку судна, регіонального коефіцієнта та історії попередніх інспекцій. Встановлено, що Tokyo MoU демонструє найвищий середній рівень затримань та має найбільш репрезентативну вибірку для навчання.

Ключові слова: PSC; предиктивна модель; штучний інтелект; машинне навчання; затримання судна; MoU; логістична регресія; ризик прапора; визнані організації.

Tab. 4. Refer: 16.

The article presents an approach to automating Port State Control (PSC) risk assessment based on the analysis of annual reports from eight regional memoranda of understanding (MoU). A methodology is proposed for applying artificial intelligence tools — namely NLP models and ensemble machine learning methods — for synthesizing data from heterogeneous sources (Paris MoU, Tokyo MoU, Black Sea MoU, EMSA, etc.). The result is a conceptual predictive model based on logistic regression for estimating ship detention probability $P(d)$ using five key features: flag jurisdiction, recognized organization (RO) rating, ship age, regional coefficient, and previous inspection history. It is established that the Tokyo MoU demonstrates the highest average detention rate and its dataset is the most representative for model training.

Key words: PSC; predictive model; artificial intelligence; machine learning; ship detention; MoU; logistic regression; flag risk; recognized organizations.

УДК 681.518.

DOI: 10.31653/1819-3293-2026-1-31-66-85

Михайленко, В. С., Глазєва, О. В., Грама, Г. П., Лещенко, В. В. Інтелектуальна система управління вентиляцією на маломірних і автономних судах // Автоматизація суднових технічних засобів: наук. -техн. зб. – 2026. – Вип. 31. – Одеса: НУОМА. – С. 66 – 85.

Рис. 15. Список літ.: 7 назв.

Представлена інтелектуальна система управління вентиляцією приміщень типових маломірних та автономних суден. Актуальність дослідження обумовлена необхідністю підвищення надійності та адаптивності роботи суднових вентиляційних систем в умовах змінних експлуатаційних навантажень та обмежених енергетичних ресурсів. Запропоновано методику «наслідуючого нейроуправління», де нейромережевий контролер (НМК) навчається на базі роботи адаптивного ПІД-регулятора. Моделювання системи в пакеті MATLAB підтвердило, що використання алгоритму навчання Левенберга-Марквардта забезпечує високу точність та швидкість регулювання. Також, для підвищення надійності системи управління запропоновано експертну систему, яка дозволяє оператору ефективно управляти в режимі дистанційного керування параметрами вентиляції з берегового або суднового ЦПУ.

Ключові слова: Інтелектуальна система управління, суднова вентиляція, маломірні та автономні судна, нейромережевий контролер, наслідуюче нейроуправління, адаптивний ПІД-регулятор, алгоритм Левенберга-Марквардта, експертна система, дистанційне керування

Fig. 15. Refer: 7

An intelligent ventilation control system for typical small and autonomous vessels is presented. The relevance of the study is driven by the need to increase the reliability and adaptability of marine ventilation systems under varying operational loads and limited energy resources. A "mimic neurocontrol" methodology is proposed, where a neural network controller (NNC) is trained based on the operation of an adaptive PID controller. System modeling in the MATLAB package confirmed that the use of the Levenberg-Marquardt learning algorithm ensures high accuracy and regulation speed. Furthermore, to enhance the reliability of the control system, an expert system is proposed, allowing the operator to effectively manage ventilation parameters in remote control mode from a shore-based or shipboard central control station.

Key words: intelligent control system, marine ventilation, small and autonomous vessels, mimic neurocontrol, neural network controller, adaptive PID controller, Levenberg-Marquardt algorithm, expert system, remote control.

УДК 629.5.024

DOI: 10.31653/1819-3293-2026-1-31-86-100

Михайленко В. С., Шевченко Т. І., Глазєва, О. В. Перспективи використання IoT-платформи Blynk для суднових систем моніторингу //Автоматизація

суднових технічних засобів: наук. -техн. зб. – 2026. – Вип. 31. – Одеса: НУОМА. – С. 86 – 100.

Рис. 14. Список літ.: 7

Стаття присвячена аналізу технічного потенціалу платформи Blynk у специфічних умовах морської експлуатації, а також оцінці перспектив її інтеграції в існуючі системи суднового моніторингу. Для перевірки можливості ефективного використання платформи Інтернету речей застосовувалося 3D-моделювання нейромережевої системи адаптивного керування двигуном вентилятора. Нейромережу реалізовано мовою програмування C++ та інтегровано в контролер Arduino Uno. Моделювання нейромережевої САУ з контролером, датчиком температури та контуром керування швидкістю обертання двигуна здійснювалося в онлайн-платформі Tinkercad. Результати моделювання продемонстрували простоту та адаптивність запропонованих програмних і технічних рішень для суднових систем моніторингу та керування технічними параметрами.

Ключові слова: IoT-платформа Blynk, суднові системи моніторингу, Інтернет речей (IoT), нейронна мережа, адаптивне керування, Arduino Uno, Tinkercad, 3D-моделювання, суднові системи.

Fig. 14. Refer: 7

This article is devoted to the analysis of the technical potential of the Blynk platform in specific conditions of marine operation, as well as the assessment of prospects for its integration into existing ship monitoring systems. To verify the feasibility of the effective use of the Internet of Things platform, 3D modeling of a neural network system for adaptive fan motor control was applied. The neural network is implemented in the C++ programming language and integrated into the Arduino Uno controller. Modeling of the neural network ACS (Automatic Control System) with a controller, temperature sensor, and motor speed control loop was carried out using the Tinkercad online platform. The simulation results demonstrated the simplicity and adaptability of the proposed software and hardware solutions for marine monitoring systems and technical parameter control.

Keywords: Blynk IoT platform, marine monitoring systems, Internet of Things (IoT), neural network, adaptive control, Arduino Uno, Tinkercad, 3D modeling, ship systems.

УДК 629.5

DOI: 10.31653/1819-3293-2026-1-31-101-111

Сарін А.С. Системне оцінювання технологій декарбонізації морського транспорту // Автоматизація суднових технічних засобів : наук. -техн. зб. – 2022. – Вип. 31. – Одеса : НУОМА. – С. 101 - 111.

Табл. 1. Іл. 2. Список літ.: 36 назв.

Результати дослідження показали, що найбільш раціональними у короткостроковій перспективі є технології поступової декарбонізації, зокрема експлуатаційні заходи та біопалива типу drop-in/HVO, які характеризуються високою сумісністю з існуючим флотом та мінімальними вимогами до модернізації. Водночас у довгостроковому часовому горизонті суттєво зростає

придатність безвуглецевих енергетичних систем, насамперед водню та аміаку. Отримані результати підтверджують доцільність використання сегментно-орієнтованого багатокритеріального підходу для формування стратегій декарбонізації морського транспорту.

Ключові слова: декарбонізація морського транспорту; альтернативні палива; суднові енергетичні системи; енергоефективність; багатокритеріальне оцінювання; MCDA; водень; аміак; метанол; LNG; енергетичний перехід.

Tabl. 3. Fig. 2. Refer.: 36.

The obtained results demonstrate that gradual decarbonization technologies, particularly operational measures and drop-in/HVO biofuels, remain the most rational solutions in the short-term perspective due to their high compatibility with the existing fleet and minimal modernization requirements. At the same time, the suitability of zero-carbon energy systems, especially hydrogen and ammonia, significantly increases in the long-term horizon. The results confirm the effectiveness of a segment-oriented multi-criteria approach for developing maritime transport decarbonization strategies.

Key words: maritime transport decarbonization; alternative fuels; ship energy systems; energy efficiency; multi-criteria assessment; MCDA; hydrogen; ammonia; methanol; LNG; energy transition.

УДК 629.5

DOI: 10.31653/1819-3293-2026-1-31-112-125

Сагін С. В., Парменова Д. Г., Власюк П. П. Управління екологічними показниками суднових дизелів під час використання палива біологічного походження // Автоматизація суднових технічних засобів: наук.-техн. зб. – 2026. – Вип. 31. – Одеса: НУОМА. – С. 112 – 125.

Табл. 9. Іл. 2 Список літ.: 35 назв.

Для суднового дизеля 9S50ME MAN-B&W встановлено, що під час використання паливних сумішей, до складу яких входить паливо нафтового походження RMG380 та паливо біологічного походження FAME B100, можливо експериментальне визначення кутів випередження подачі палива за якими забезпечується мінімальне збільшення емісії оксидів азоту з одночасним близьким до максимального зниженням емісії діоксидів вуглецю.

Ключові слова: екологічні показники, емісія діоксиду вуглецю, емісія оксидів азоту, палива нафтового походження, паливо біологічного походження, парниковий ефект, судновий дизель

Tab. 9. Fig. 24. Refer.: 35.

For the 9S50ME MAN-B&W marine diesel engine, it was found that when using fuel mixtures that include RMG380 petroleum fuel and FAME B100 biological fuel, it is possible to experimentally determine the fuel advance angles that ensure a minimal increase in nitrogen oxide emissions with a simultaneous close to maximum reduction in carbon dioxide emissions.

Keywords: biofuels, carbon dioxide emissions, greenhouse effect, marine diesel, nitrogen oxide emissions, environmental indicators, petroleum fuels

УДК 621.438

DOI: 10.31653/1819-3293-2026-1-31-126-140

Сандлер, А. К., Дончев І. І. Автоматизований волоконно-оптичний пристрій для температурного контролю елементів газотурбінних установок // Автоматизація суднових технічних засобів: наук.-техн. зб. – 2026. – Вип. 31. – Одеса: НУОМА. – С. 126 – 140.

Рис. 3. Список літ.: 32 назв.

Одним з показників енергоефективності газотурбінного двигуна є ресурс роботи його окремих елементів, особливо тих, які не мають резервованих вузлів. До таких вузлів відноситься, в першу чергу, жарова труба. Одним із найпоширеніших рішень для моніторингу розподілу температурного поля жарової труби є розподілені волоконно-оптичні датчики температури. Однак існуючі волоконно-оптичні датчики температури характеризуються обмеженою точністю, високою вартістю обладнання та чутливістю до зовнішніх факторів. Тому актуальним є визначення шляхів вдосконалення характеристик температурних датчиків для особливих умов експлуатації. Науково-технічне завдання, яке створено запитом практики, вирішується тим, що пропонується ВОДТ для особливих умов експлуатації створювати із застосуванням оптичного волокна з рутилу у сполученні з волокном зі штучного сапфіру. Відмінність пропонованого датчика полягає у тому, для виробництва застосовані альтернативні скломатеріали, та спрощена процедура обробки результатів вимірювання.

Ключові слова: газотурбінний двигун; камера згорання; жарова труба; теплове навантаження; волоконно-оптичний датчик; рутил, сапфірове волокно.

Fig. 3. Refer.: 32.

One of the indicators of a gas turbine engine's energy efficiency is the service life of its individual components, particularly those without redundant units. The turbine fire tube is one of the primary components in this category. One of the most common solutions for monitoring the temperature distribution of the hot wall is distributed fiber-optic temperature sensors. However, existing fiber-optic temperature sensors are characterized by limited accuracy, high equipment costs, and sensitivity to external factors. Therefore, it is important to identify ways to improve the performance of temperature sensors for special operating conditions. The scientific and technical problem, which arose from practical needs, is addressed by proposing that fiber-optic temperature sensors for special operating conditions be manufactured using rutile optical fiber coupled with synthetic sapphire fiber. The proposed sensor differs in that alternative glass materials are used in its manufacture, and the procedure for processing measurement results is simplified.

Keywords: gas turbine engine; combustion chamber; flame tube; thermal load; fiber-optic sensor; rutile, sapphire fiber.

УДК 681.7.068.4

DOI: 10.31653/1819-3293-2026-1-31-141-152

Сандлер, А. К., Парменова, Д. Г. Волоконно-оптичний датчик для контролю валів гребних гвинтів // Автоматизація суднових технічних засобів: наук.-техн. зб. – 2026. – Вип. 31. – Одеса: НУОМА. – С. 141 – 152.

Рис. 4. Список літ.: 22 назв.

Проаналізовано вимоги щодо метрологічного забезпечення процесу тензометрії гребних валів сучасних суден. Аналітичним дослідженням встановлено, що схемотехнічних рішень в області волоконно-оптичних тензометрів, які повною мірою задовольняють вимогам до якості контролю валопроводів ГВ, до останнього часу не було відомо. Для подолання цієї проблеми запропоновано нове схемотехнічне рішення волоконно-оптичного датчика для контролю величин крутіння гребних валів. Основна відмінність датчика полягає у застосуванні закритого оптичного каналу на основі оптичного тунельного ефекту з одночасною деформацією зсуву та вигину чутливого елементу. Це забезпечить зменшення впливу дестабілізуючих експлуатаційних факторів на точність та вірогідність вимірювань.

Ключові слова: вал, крутіння, тензометрія, волоконно-оптичний, датчик, оптичний канал, оптична потужність

Fig. 4. Refer.: 22.

The requirements for metrological support of the process of tensometry of propeller shafts of modern vessels have been analyzed. Analytical research has established that until recently, circuit solutions in the field of fiber-optic strain gauges that fully meet the requirements for the quality control of propeller shafts were not known. To overcome this problem, a new circuit solution of a fiber-optic sensor for controlling the values of propeller shaft rotation has been proposed and tested. The main difference of the sensor is the use of a closed optical channel based on the optical tunnel effect with simultaneous shear and bending deformation of the sensitive element. This will ensure a reduction in the impact of destabilizing operational factors on the accuracy and reliability of measurements.

Keywords: shaft, torsion, strain gauge, fiber optic, sensor, optical channel, optical power.

УДК 656.6-042.5/8:502/504

DOI: 10.31653/1819-3293-2026-1-31-153-166

Суворов П. С., Тарасенко Т. В. Сценарний підхід до прогнозування переходу до еконавігації // Автоматизація суднових технічних засобів: наук.-техн. зб. – 2025. – Вип. 31. – Одеса: НУОМА. – С. 153 – 166.

Табл. 3. Рис. 5. Список літ.: 5 назв.

Розглянуто сценарний підхід до оцінювання техніко-економічних наслідків переходу існуючих вантажних суден до еконавігації в умовах запровадження вимог *FuelEU Maritime* та регуляторної рамки *IMO* щодо скорочення викидів парникових газів. Проаналізовано нормативні вимоги та розроблено кілька сценаріїв експлуатації універсального суховантажного судна із різними стратегіями судновласника, що відрізняються рівнем використання енергоефективних заходів, біопалива та берегового електроживлення.

Наведено оцінку сукупних витрат на паливо, платежів за викиди та можливих штрафних санкцій, а також показано, що застосування енергоефективних заходів і сумісних екологічних видів палива забезпечує зниження загальних витрат порівняно зі стратегією «нічого не робити».

Ключові слова: еконавігація, судноплавство, парникові гази, енергоефективність, *FuelEU Maritime*, стратегія судновласника, альтернативні види палива.

Tab. 3. Fig. 5. Refer.: 5.

The paper applies a scenario-based approach to assess the technical and economic implications of the transition of existing cargo vessels to eco-navigation under the requirements of the FuelEU Maritime Regulation and the IMO greenhouse gas emission framework. Several operational scenarios are developed for a universal bulk carrier, reflecting different shipowner strategies that combine energy-efficiency measures, the use of compatible biofuels and shore power supply. The study evaluates total fuel costs, payments for emissions and potential penalties, demonstrating that the implementation of energy-efficiency measures and compatible alternative fuels can reduce overall expenditures compared with a “do-nothing” strategy.

Keywords: eco-navigation, maritime shipping, greenhouse gas emissions, energy efficiency, FuelEU Maritime, shipowner strategy, alternative fuels.

УДК 629.12-8:629.12.037

DOI: 10.31653/1819-3293-2026-1-31-167-181

Яровенко В. О., Іовчев С. І., Єрпельова А. В. Оптимальне управління гребними двигунами електроходів при гальмуванні // Автоматизація судових технічних засобів: наук.-техн. зб. - 2026. - Вип. 31. - Одеса: НУОМА. - С. 167 – 181.

Табл. 5. Рис. 4. Список літ.: 9_ назв.

Запропоновано метод розрахунку оптимальних законів управління гребними електродвигунами під час гальмування. Удосконалено процедуру гальмування. Розроблено процедуру пошуку оптимального закону управління напругою живлення гребного електродвигуна під час переходу його в режим динамічного гальмування. Оцінено вплив зовнішніх факторів та конструктивних параметрів судового пропульсивного комплексу на отримані оптимальні рішення. Виявлено параметри, вплив яких є суттєвим. За результатами оптимізаційних розрахунків побудовано оптимальні закони управління гребними електродвигунами. Вони забезпечують мінімальний час гальмування електродвигунів з допустимими діапазонами змін режимних показників усіх складових електроенергетичної установки електроходу.

Ключові слова: пропульсивний комплекс електрохода, гребні електродвигуни, динамічне гальмування, час гальмування, оптимальні закони управління

Tabl. 5. Fig. 4. Refer.: 9.

A method has been developed for calculating the optimal control laws for propulsion electric motors during braking. The braking procedure has been improved. A procedure has been developed for determining the optimal control law for the supply voltage of the propulsion electric motor during its transition to dynamic braking

mode. The influence of external factors and design parameters of the propulsion ship complex on optimal solutions is assessed. The parameters that have a significant influence have been identified. Based on the results of optimization calculations, optimal control laws for propulsion electric motors were constructed. These laws ensure a minimum braking time of the propulsion electric motors with acceptable ranges of changes in the operating parameters of all components of the electric power plant of the electric ship

Keywords: electric ship propulsion complex, propulsion electric motors, dynamic braking, braking hour, optimal control laws

УДК 004.03

DOI: 10.31653/1819-3293-2026-1-31-182-207

Vychuzhanin V., Vychuzhanin O. Hybrid spatio-temporal neural network for predicting the risk of failures in ship power plant subsystems // Автоматизація суднових технічних засобів: наук.-техн. зб. – 2026. – Вип. 31. – Одеса: НУОМА. – С. 182 – 207.

Табл. 6. Рис. 11 Список літ.: 28 назв.

Представлено гібридну просторово-часову нейронну мережу для прогнозування ризику відмов підсистем суднової енергетичної установки в межах цифрового двійника. Запропонована архітектура на основі згорткових нейронних мереж і мереж довгої короткочасної пам'яті інтегрує телеметричні дані, фізично обґрунтовані обмеження та нечіткі діагностичні ознаки. Експериментальна валідація підтверджує підвищену точність і стійкість моделі. Інтерпретованість забезпечується за допомогою методу SHapley Additive exPlanations

Ключові слова: суднова енергетична установка; цифровий двійник; прогнозування відмов; нейронні мережі; довга короткочасна пам'ять; фізично інформоване навчання; нечітка логіка; діагностика технічного стану; інтерпретованість моделей; прогнозна аналітика.

Tab. 6. Fig. 11. Refer.: 28.

This presents a hybrid spatio-temporal neural network for predicting failure risks in ship power plant subsystems within a digital twin framework. The proposed convolutional neural network and long short-term memory architecture integrates telemetry data, physics-informed constraints, and fuzzy diagnostic indicators to ensure consistent and reliable predictions. Experimental validation, including Hardware-in-the-Loop testing, confirms improved accuracy and stability under noisy conditions. The model supports real-time deployment and enhances interpretability through subsystem-level analysis and SHapley Additive exPlanations

Keywords: ship power plant; digital twin; failure prediction; neural networks; long short-term memory; physically informed learning; fuzzy logic; technical condition diagnostics; interpretability of models; predictive analytics.

ЗМІСТ

Будуров М. І. Оптимізація налаштування електронного регулятора частоти обертання суднового дизель-генератора	3
Горб С. І. Ефективність мовних моделей штучного інтелекту для оцінювання операційних ризиків на судах	13
Горб С. І., Будуров М. І. Забезпечення регламентованого перевантаження головних дизелів на судах із гвинтами, крок яких регульований	32
Горб С. І., Будуров М. І., Поповський О. Ю. Ефективність методів пошуку екстремуму при оптимізації електронного регулятора частоти обертання суднового дизеля.....	40
Левінський М.В., Левінський В.М. Предиктивна модель оцінювання ризиків затримання суден із застосуванням штучного інтелекту та ансамблевих методів машинного навчання	55
Михайленко, В. С., Глазева, О. В., Грама, Г. П., Лещенко, В. В. Інтелектуальна система управління вентиляцією на маломірних і автономних судах.....	66
Михайленко В. С., Шевченко Т. І., Глазева, О. В. Перспективи використання IoT-платформи Blynk для суднових систем моніторингу.....	86
Сагін А. С. Системне оцінювання технологій декарбонізації морського транспорту.....	101
Сагін С. В., Парменова Д. Г., Власюк П. П. Управління екологічними показниками суднових дизелів під час використання палива біологічного походження.....	112
Сандлер, А. К., Дончев І. І. Автоматизований волоконно-оптичний пристрій для температурного контролю елементів газотурбінних установок.....	126
Сандлер, А. К., Парменова, Д. Г. Волоконно-оптичний датчик для контролю валів гребних гвинтів.....	141
Суворов П. С., Тарасенко Т. В. Сценарний підхід до прогнозування переходу до еконавігації	153
Яровенко В. О., Іовчев С. І., Єрпельова А. В. Оптимальне управління гребними двигунами електроходів при гальмуванні..	167
Vychuzhanin V., Vychuzhanin O. Hybrid spatio-temporal neural network for predicting the risk of failures in ship power plant subsystems	182
Реферати	208

ПРАВИЛА
оформлення та подання рукописів для збірника
"Автоматизація суднових технічних засобів"

1. Рукопис подається в електронному вигляді українською або англійською мовами: текст у форматі *.docx, набраний на аркушах формату А5 кегелем 10, гарнітура Times New Roman. Використання списків у редакторі Word не дозволяється. Рукопис має бути підписаний усіма авторами.

2. Обсяг статті (з ілюстраціями, підрисунковими підписами та резюме українською та англійською мовами) не повинен перевищувати 2 авторських листа.

3. На першій сторінці рукопису мають бути рядково вказані: індекс УДК; ПІБ авторів; найменування установи, в якій виконувалася робота; адреси електронної пошти авторів; назва статті; резюме українською та англійською мовами по 500 – 900 символів. Наприкінці рукопису наводиться реферат двома мовами – українською та англійською, – що включає ПІБ авторів, назву статті, кількість таблиць, ілюстрацій та найменувань списку літератури, резюме та ключові слова.

Якщо рукопис не є повністю англomовним, він супроводжується анотацією англійською мовою не менше 1800 знаків, включаючи ключові слова. Якщо рукопис не є повністю українomовним, він супроводжується анотацією українською мовою обсягом не менше 1800 знаків, включаючи ключові слова.

4. Таблиці друкуються в тексті і повинні бути забезпечені заголовками, що пояснюють. Посилання на таблиці даються у скороченому вигляді (таб.).

5. У формулах, літерних позначеннях та індексах латинський шрифт повинен мати нахил (за винятком тригонометричних функцій), а грецький шрифт та кирилиця мають бути набрані прямим шрифтом. Нумеруються лише формули, на які є посилання у тексті. Одиниці фізичних величин повинні відповідати ДСТУ 3651.0-97, ДСТУ 3651.1-97, ДСТУ 3651.2-97 "Метрологія. Одиниці фізичних величин" та мати загальноприйняті позначення.

6. Бібліографічний опис літератури має відповідати ДСТУ ГОСТ 7.1:2006. Бібліографічний опис. Загальні вимоги та правила складання (ГОСТ 7.1–2003).

7. Текст статей має відповідати вимогам постанови Президії ВАК України від 15.01.03 № 7-05/1 "Про підвищення вимог до спеціальних видань, внесених до переліків ВАК України": «... *постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями; аналіз останніх досліджень і публікацій, в яких започатковано розв'язання даної проблеми і на які спирається автор, виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття; формулювання цілей статті (постановка завдання); виклад основного матеріалу дослідження з повним обґрунтуванням отриманих наукових результатів; висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямку*».

Підписано до друку 29.05.2026.

Формат 60×84 1/16. Папір офсетний №1. Гарнітура Times New Roman.

Ум. друк. арк. 25,57. Тираж 50 екз. Замовлення №
НУОМА

Свідоцтво ДК №1292 від 20.03.2003

65052, г. Одеса, вул. Дідріхсона, 8, корп. 7, к. 206

Тел./факс: (094) 793-24-75

publish@onma.edu.ua