

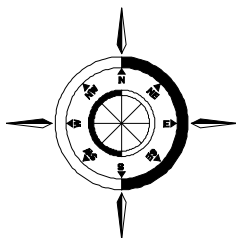
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
"ОДЕСЬКА МОРСЬКА АКАДЕМІЯ"

АВТОМАТИЗАЦІЯ СУДНОВИХ ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ

Науково-технічний збірник

ВИПУСК 30



Одеса
2025

УДК 681.5:629.12(045)

A22 Автоматизація суднових технічних засобів: науково-технічний збірник. – 2025. – Вип. 30. – Одеса: НУОМА. – 174 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" 29.05.2025, протокол № 9.

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. Будашко; 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: 10.31653/1819-3293-2025-1-29-03-20

ARTICLE HISTORY

Received 11.04.2025

Accepted 07.05.2025

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

Оптимізація електронного регулятора частоти обертання головного дизеля

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

Optimization of electronic speed governor for main diesel engine

Резюме – Обґрунтовано методику налаштування електронного регулятора частоти обертання головного суднового дизеля, яка враховує особливості навантаження на дизель під час хвилювання моря. За рахунок оптимізації параметрів налаштування регулятора, у тому числі його чутливості до розбалансу сигналів, отримано покращення стабільності частоти обертання при найімовірніших в експлуатації судна впливах, що обурюють. Запропоновано підхід адаптивного регулювання частоти обертання головного дизеля, який забезпечує задовільну стабільність швидкісного режиму дизеля під час хитавиці судна.

Abstract – A methodology for tuning the electronic speed governor of the main marine diesel engine has been substantiated, which takes into account the specific characteristics of diesel loading during sea disturbance. Through optimization of the governor tuning parameters, including its sensitivity to signal imbalance, improved rotational speed stability has been achieved under the most probable disturbing influences encountered during vessel operation. An adaptive approach to main diesel engine speed control

has been proposed, which ensures satisfactory stability of the diesel engine speed regime during vessel pitching.

Суднові дизелі є основним типом теплових двигунів, що застосовуються у складі енергетичних установок морського транспорту, забезпечуючи близько 97 % загальної кількості силових агрегатів [1]. Останнім часом електронні регулятори частоти обертання (РЧО) у складі головних двигунів (ГД) морських суден набули широкого розповсюдження. Проте на практиці постійно спостерігаються проблеми забезпечення якості регулювання, пов'язані із залежністю характеристик роботи електронного регулятора від режиму дизеля під час хвилювання моря. Як наслідок, для забезпечення задовільного регулювання обирається одна з двох стратегій:

1) під час зміни режимів роботи дизеля судновий персонал переналаштовує електронний регулятор з використанням візуальної оцінки стабільності частоти обертання, що ускладнює його обслуговування порівняно з гідравлічними регуляторами;

2) у разі незадовільного регулювання в умовах хитавиці судновий персонал зменшує швидкість ходу судна, що призводить до погіршення економічних показників роботи судна.

Таким чином, актуальною проблемою є підвищення ефективності автоматичного регулювання частоти обертання ГД з електронними регуляторами частоти обертання у всьому діапазоні експлуатаційних режимів, для яких характерним є хвилювання моря.

У сучасній практиці експлуатації суднових дизелів усталеною вважається методика налаштування регуляторів частоти обертання в умовах ступінчастих змін навантаження [2]. Однак у ГД обурення не можуть змінюватися ступенево як за каналом завдання частоти обертання, так і за каналом навантаження. Пояснюється це тим, що по каналу завдання сигнал навмисно уповільнюється системою дистанційного автоматизованого управління при його збільшенні, щоб не виникало неповного згоряння палива та не прогоряли випускні клапани, а також щоб не забруднювався газовий тракт. У гідравлічних РЧО додатковий захист від різкої зміни завдання забезпечує сопло перед сильфоном, в електронних РЧО – спеціальна інтегруюча ланка. По каналу навантаження обурення також не може змінитися миттєво, оскільки навіть на судах з гвинтами, крок яких регульований, лопаті гвинта розгортаються досить повільно.

У свою чергу, особливістю головних суднових дизелів морських суден є робота в умовах хвилювання моря, коли амплітуди та періоди зміни навантаження на дизель залежать від розмірностей, швидкості та

рискування судна, бальності моря та курсового кута судна по відношенню до напрямку хвиль та вітру, тобто є стохастичними. Як наслідок, якщо оптимізувати роботу САРЧ за конкретних детермінованих, а не випадкових збуреннях, це може призвести до погіршення стабільності швидкісного режиму дизеля при зміні умов плавання.

Тому традиційна методика налаштування РЧО не забезпечує стабільність роботи САРЧ у широкому діапазоні можливих експлуатаційних режимів роботи головних дизелів суден, динамічні режими яких пов'язані насамперед із хвилюванням моря.

У зв'язку з викладеним метою роботи є забезпечення якісної роботи на всіх експлуатаційних режимах головного дизеля без періодичного ручного переналаштування регуляторів і без зниження швидкості ходу судна через погіршення роботи регуляторів.

Для оптимізації параметрів електронного РЧО може використовуватися математичне моделювання, яке потребує менших ресурсів для проведення експерименту та дозволяє уникнути спотворення отриманих результатів випадковими факторами. Розрахунки проводилися з урахуванням результатів роботи [3], у якій обґрунтована коректність припущень про стаціонарність характеру збурюючого впливу на судову дизельну установку під час хвилювання моря та нормальність функції густини розподілу ймовірності, зокрема через те, що досліджувана система містить лінійні інерційні ланки, які фактично є фільтрами негауссовості закону розподілу випадкових сигналів. Із цієї роботи також запозичені кількісні залежності змін дисперсії збурюючого впливу D_λ від бальності вітру за шкалою Бофорта та взаємозв'язок параметрів α і β ($\alpha \approx 0,16\beta$), що характеризують ступінь загасання та середню частоту кореляційної функції збурюючого впливу. Спектральну густину збурюючого впливу рекомендовано задавати таким чином, щоб вона мала найменшу густину потужності на низьких частотах [4]. У зв'язку з цим для моделювання використовувалося її наближення відповідною поліноміальною функцією [5]:

$$S_\lambda(\omega) = D_\lambda \frac{\frac{4\alpha}{\pi\beta^2} \cdot \left[0,5 \cdot \left(\frac{\omega^2}{\beta^2} + \frac{\alpha^2}{\beta^2} + 1 \right) \right]}{\frac{\omega^4}{\beta^4} + 2 \frac{\omega^2}{\beta^2} \cdot \left(\frac{\alpha^2}{\beta^2} - 1 \right) + \left(\frac{\alpha^2}{\beta^2} + 1 \right)^2},$$

де D_λ – дисперсія збурюючого впливу, відн. од.; α – ступінь загасання кореляційної функції збурюючого впливу, с^{-1} ; β – середня частота кореляційної функції збурюючого впливу, рад/с .

Наприклад, для сили вітру 4 бали за шкалою Бофорта та попутного напрямку хвиль відносно корпусу судна ($\alpha = 0,1 \text{ с}^{-1}$; $\beta = 0,016 \text{ рад/с}$; $D_\lambda = 0,0015$ відн. од.) формула спектральної густини матиме вигляд:

$$S_\lambda(\omega) = A \frac{\omega^2 + \gamma}{\omega^4 + \delta_1 \cdot \omega^2 + \delta_2},$$

де $A = 0,095 \cdot 10^{-3}$; $\gamma = 10,25 \cdot 10^{-3}$; $\delta_1 = 19,5 \cdot 10^{-3}$; $\delta_2 = 0,105 \cdot 10^{-3}$ – параметри формуючого фільтра, відн. од.

Випадковий сигнал із такою спектральною густиною формується за допомогою джерела псевдобілого шуму, вихід якого підключений до лінійної інерційної ланки з передатною функцією фільтра:

$$W_\lambda(s) = k \cdot \frac{s + b_1}{s^2 + a_1 \cdot s + a_2},$$

де a_1 – коефіцієнт часу релаксації, відн. од.; $k \cdot (b_1/a_2)$ – загальний коефіцієнт підсилення фільтра, відн. од.

Врахуємо, що на вхід ланки надходить псевдобілий шум з одиничним (у певному діапазоні частот) значенням спектральної густини:

$$|W_\lambda(j\omega)|^2 = k^2 \cdot \frac{\omega^2 + b_1^2}{\omega^4 + (a_1^2 - 2 \cdot a_2) \cdot \omega^2 + a_2^2}.$$

Порівняючи з виразом для спектральної густини моделі випадкового вхідного збурення, можемо отримати числові значення параметрів фільтра: $k - \sqrt{A} \approx 0,00975$ відн. од.; $b_1 - \sqrt{\gamma} \approx 0,1012$ відн.

од.; $a_1 - \sqrt{\delta_1 + 2\sqrt{\delta_2}} = 0,2$ відн. од.; $a_2 - \sqrt{\delta_2} = 0,0102$ відн. од.

Отже, передатна функція формуючого фільтра матиме вигляд:

$$W(s) = 0,00975 \cdot \frac{s + 0,1012}{s^2 + 0,2s + 0,0102}.$$

Для моделювання використана модель системи автоматичного регулювання частоти обертання (САРЧ) суднового дизеля HYUNDAI MAN B&W 6S60MC-C7 з електронним регулятором NABTESCO MG-800 та з урахуванням циклової нестабільності крутного моменту [6]. Модель дозволяє проаналізувати вплив параметрів налаштування РЧО на динамічні властивості САРЧ дизеля та враховує запізнення у каналі передачі керуючого впливу від регулятора до дизеля (через циклічність

подачі палива і особливостей зміни крутного моменту в кривошипно-шатунному механізмі).

На рис. 1 наведена структурна схема САРЧ суднового дизеля HYUNDAI-MAN B&W 6S60MC-C7 з електронним регулятором Nabtesco MG-800 та блоком обліку циклічності роботи дизеля, який відтворює циклову нестабільність крутного моменту. У електронному регуляторі NABTESCO MG-800 конструктивно замість "жорсткої зони нечутливості" (коли регулятор взагалі не реагує на зміну вхідного сигналу) зменшується коефіцієнт передачі сигналу k_g , відн. од., та/або змінюється ширина зони – ε , відн. од. У зв'язку з цим у роботі ця зона названа зоною пониженої чутливості (ЗПЧ). Водночас вплив коефіцієнта передачі разом із величиною ширини зони, в якій він діє, впливають на динаміку РЧО аналогічним чином. Тому значення коефіцієнта k_g прийнято рівним 0,5 відн. од., а вплив ширини зони при різній інтенсивності та періодах хвилювання моря досліджувався шляхом зміни ширини ЗПЧ. Збурення на систему наноситься по каналу навантаження зміною відносного моменту опору на валу дизеля $\bar{M}_r$. ГД представлений у вигляді інтегруючої ланки 2 з часом розгону дизеля T_d , який розраховувався з урахуванням моментів інерції кривошипно-шатунного механізму, маховика, гребного валу та гвинта, маси води, а також приєднаної до гребного гвинта (під час його обертання). Елементи 3 – 9 формують необхідне значення ходу виконавчого механізму (ВМ) $\bar{z}_c'$, яке "відпрацьовується" елементами 10 – 20. Ланкою 4 задається величина ЗПЧ до розбалансу сигналів $\bar{\omega}_d$ і $\bar{\omega}_s$. Ланки 5, 6 і 7 формують керуючий сигнал за пропорційно-інтегрально-диференціюючим (ПІД) законом регулювання. ВМ має два зворотні зв'язки (ЗЗ): за положенням роликової гайки (вихідному сигналу $\bar{z}_c$) та за частотою обертання електродвигуна $\bar{n}_e$. Електродвигун на схемі представлений інтегруючою ланкою 15. Перетворювач частоти обертання електродвигуна в хід гайки зображений на схемі інтегруючою ланкою 17. ЗЗ із ланкою 21 використовується у разі забезпечення паралельної роботи дизелів. Оскільки метою моделювання є покращення динаміки регулятора при збуреннях, близьких до гармонійних, прийняте спрощення у структурній схемі виключає врахування обмеження допустимого ходу ВМ: як функції від виміряної частоти обертання; як функції від тиску повітря наддування та жорстко встановленого на пульті керування. На рис. 2 запропонована стохастична модель САРЧ суднового дизеля HYUNDAI MAN B&W 6S60MC-C7 з електронним регулятором NABTESCO MG-800 та блоком обліку циклічності роботи дизеля.

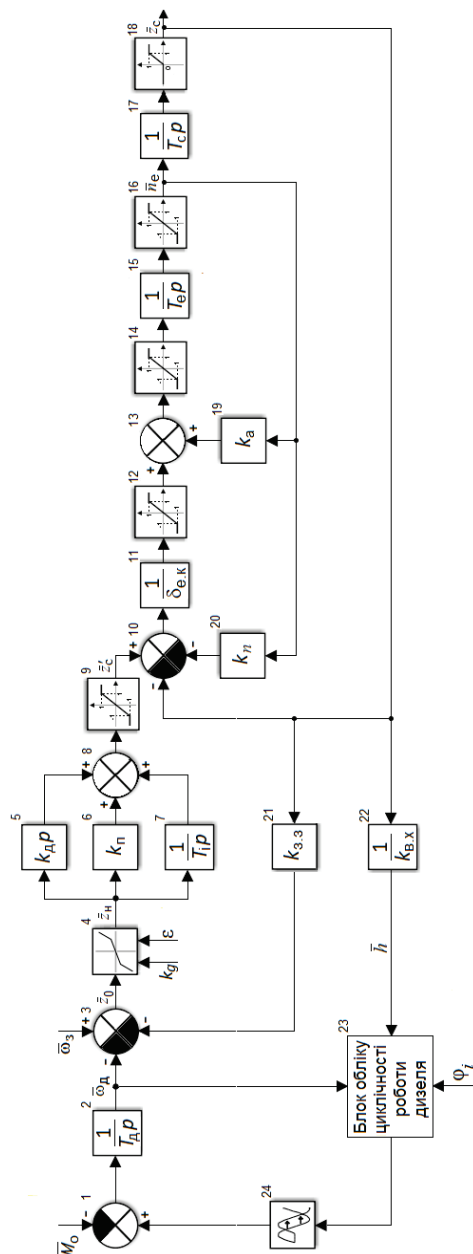


Рис. 1. Структурна схема САРЧ суднового дизеля HYUNDAI-MAN B&W 6S60MC-C7 з електронним рЧО Nabtesco MG-800: 1, 3, 8, 10, 13 – суматори; 2, 7, 15, 17 – інтегруючі ланки; 4 – функціональний перетворювач, який вводить ЗПЧ; 5 – диференціююча ланка; 6, 11, 19, 20, 21, 22 – пропорційні ланки; 9, 12, 14, 16 – нелінійні ланки, які враховують насичення сигналу на рівні ± 1 ; 18 – нелінійна ланка, яка враховує насичення сигналу в діапазоні $0 \dots 1$; 23 – блок обліку циклічності роботи дизеля; 24 – нелінійна ланка, що враховує запізнення зміни відносного індикаторного моменту дизеля щодо зміни відносного ходу рейки паливних насосів

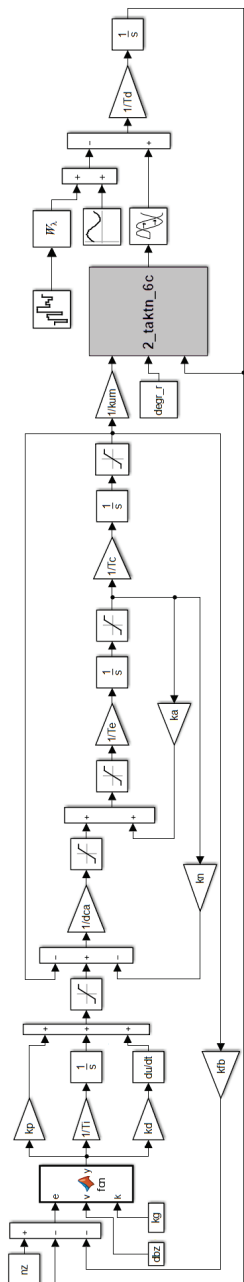


Рис. 2. Стохастична модель САРЧ суднового дизеля HYUNDAI-MAN B&W 6S60MC-S7 з електронним регулятором NABTESCO MG-800 та блоком обліку циклічності роботи дизеля

Використовувалися такі значення параметрів: час розгону дизеля $T_d = 2,3$ с; кут випередження упорскування палива $\varphi_i = -2,5$ град. повороту колінчастого валу; час запізнення τ_{del} , розрахований за формулою з [7], та для номінального режиму складає 0,024 с; відносна ширина ЗПЧ $\varepsilon = 0 \dots 0,08$ відн. од.; коефіцієнт передачі ЗПЧ $k_g = 0,5$ відн. од.; коефіцієнт підсилення пропорційної ланки $k_p = 0,5 \dots 5$ відн. од.; час інтегруючої ланки $T_i = 0,5 \dots 8$ с; час диференціюючої ланки $k_d = 0 \dots 0,4$ 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 передачі ланки, що форсує розгін і гальмування виконавчого електродвигуна $k_a = 0,3$ відн. од.; коефіцієнт передачі ЗЗ 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 ЗЗ $k_{fb} = 0$ відн. од.

Моделювання проводилося при базових (реально встановлених на пульті управління) налаштуваннях електронного РЧО: $k_p = 2,2$ відн. од.; $T_i = 2,0$ с; $\varepsilon = 0,005$ відн. од.; $k_n = 0,06$ відн. од.; $k_a = 0,3$ відн. од. Для зменшення впливу обмежень подачі палива на динаміку САРЧ, моделювання виконувалося за середнього навантаження на двигун 90 % від номінального.

Порівняння зміни відносного моменту опору та відносної частоти обертання валу суднової дизельної установки при трьох середніх періодах коливань обурюючого впливу $T_0 = 3,3; 7,9$ і $20,9$ с представлені на рис. 3.

Адекватність стохастичної математичної моделі оцінена для суднової дизельної енергетичної установки HYUNDAI MAN B&W 6S60MC-C7 танкеру "CATALAN SEA". У табл. 1 наведено порівняння експериментальних і розрахункових значень середньоквадратичного відхилення (СКВ) відносної частоти обертання валу $\sqrt{D_n}$ за різних умов плавання. Експериментальні значення параметрів розраховані на основі реалізації моменту скручування, частоти обертання гребного валу та ходу рейки паливних насосів.

Із табл. 1 видно, що СКВ розрахункових значень від експериментальних становить 10,1 %, що свідчить про адекватність розробленої моделі.

Відповідно до [9] для оптимізації параметрів налаштування РЧО при найімовірніших в експлуатації ГД амплітуді та частоті збурюючого впливу використано значення $\delta_\lambda = 0,12$ відн. од.

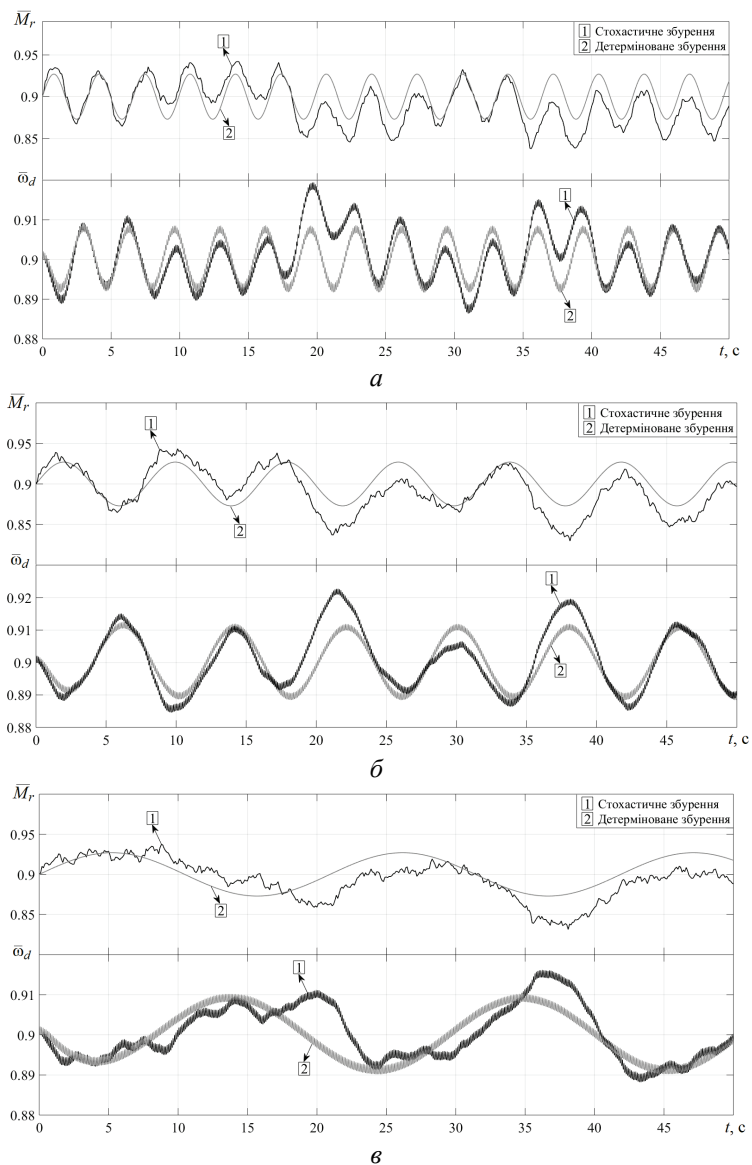


Рис. 3. Порівняння дії стохастичного та детермінованого синусоїдального збурення на дизельну установку при середньому періоді коливань обурюючого впливу T_0 : *a* – 3,3 с; *б* – 7,9 с; *в* – 20,9 с

Таблиця 1

Експериментальні та розрахункові значення ГД HYUNDAI MAN B&W 6S60MC-C7 танкера "CATALAN SEA" за різних умов плавання

Сила вітру, бали	Зиб, м	Напрямок хвиль відносно корпусу судна	Експериментальне значення $\bar{\omega}_d$	Експериментальні параметри, що характеризують збурення дизельної установки			СКВ відносної частоти обертання дизеля	
				$\alpha, \text{с}^{-1}$	$\beta, \text{рад/с}$	$D_\lambda, \text{відн. од.}$	експеримент	розрахунок
4	2		0,90	0,092	0,368	0,00195	0,014	0,010
6	1		0,90	0,115	0,419	0,00209	0,0095	0,0069
5	3		0,93	0,149	0,795	0,00128	0,0077	0,0086
4	–		0,87	0,088	0,608	0,00236	0,0109	0,0128
5	2,5		0,94	0,187	1,657	0,00290	0,0046	0,0031
7	2		0,90	0,215	1,013	0,00274	0,0042	0,0049
6	–		0,92	0,194	0,671	0,00249	0,0145	0,0152
8	4		0,89	0,229	0,506	0,215	0,0098	0,0061

При цьому враховано, що чим менше задана частота обертання дизеля, тим з меншою амплітудою коливатиметься момент опору гребного гвинта. У першому наближенні для цього використано статичну гвинтову залежність. Як критерій оптимальності обраний мінімум нестабільності параметра регулювання, тобто СКВ відносної частоти обертання валу дизеля – $\sqrt{D_n}$, відн. од. Цей мінімум повинен досягатися, перш за все, при найбільш імовірних значеннях амплітуди – δ_λ , відн. од., та середнього періоду коливань – T_0 , с, збурюючого впливу.

На рис. 4 порівняно перехідні процеси в САРЧ при базових значеннях параметрів налаштування електронного РЧО та оптимізованих: $k_p = 2,8$ відн. од.; $T_i = 1,5$ с; $\varepsilon = 0,05$ відн. од.; $k_n = 0,09$ відн. од.; $k_a = 0,6$ відн. од.

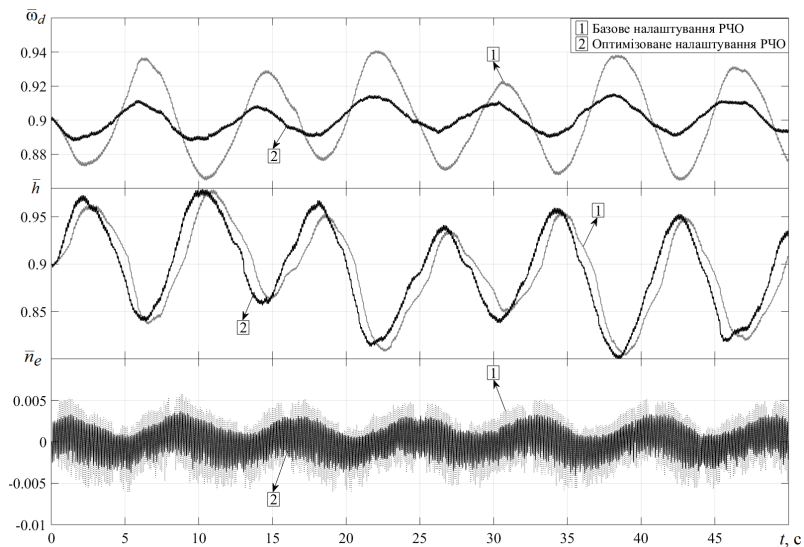


Рис. 4. Реакція системи на зовнішній обурюючий вплив при $\delta_\lambda = 0,12$ відн. од. та $T_0 = 7,9$ с

На рис. 4 результати отримані при $\delta_\lambda = 0,12$ відн. од. та $T_0 = 7,9$ с, проте у досить широкому діапазоні зміни δ_λ та T_0 оптимізовані значення параметрів регулятора забезпечили аналогічний ефект.

Налаштування РЧО істотно впливає на стабільність швидкісного та теплового режимів суднового дизеля, причому характер цього впливу за різних періодів і інтенсивності збурень є неоднозначним і в окремих випадках призводить до виникнення перерегулювання в САРЧ. Тому у ГД з гідравлічними регуляторами для забезпечення стабільної подачі палива на усталених режимах і/або незначному хвилюванні моря конструктивно визначена зона нечутливості. У реальних умовах роботи ГД під час хитавиці зона нечутливості регулятора практично не впливає на його роботу, регулятор "активно" змінює подачу палива, але при цьому швидкісний режим дизеля практично не стає стабільнішим. Фактично виникає нестабільність теплового режиму з тепловими перенавантаженнями двигуна, яка не супроводжується покращенням швидкісного режиму.

Для ГД з сучасними електронними РЧО оптимізація експлуатаційних режимів роботи дизелів за змінних умов плавання судна можлива на основі мікропроцесорної елементної бази, яка забезпечує реалізацію регулювання з перемінною структурою. У свою

чергу, якщо в електронних регуляторах ГД завищити величину ЗПЧ, то робота дизелів в умовах "штатного" хвилювання покращиться, але під час шторму регулятор не забезпечить нормальну стабільність швидкісного режиму дизеля, що безпосередньо пов'язано з життєздатністю судна. Це означає, що "жорстке" збільшення величини ЗПЧ регулятора є неприпустимим. У зв'язку з цим, пропонується підхід адаптивного регулювання частоти обертання головного дизеля, який забезпечує задовільну стабільність швидкісного режиму дизеля та враховує показники теплового режиму, під час хвитаці судна зі змінною амплітудою та періодом коливань шляхом адаптації величини ЗПЧ під стохастичні характеристики збурюючого впливу.

На рис. 5 зображений вплив пониженої чутливості електронного РЧО на СКВ відносної частоти обертання дизеля – $\sqrt{D_n}$, та СКВ відносного ходу рейки паливних насосів високого тиску (ПНВТ) – $\sqrt{D_h}$, за різної інтенсивності хвилювання (кількісно вираженої силою вітру за шкалою Бофорта). Результати отримані при трьох середніх періодах коливань обурюючого впливу $T_0 = 3,3; 7,9$ і $20,9$ с, які практично охоплюють весь діапазон значень, що трапляється в експлуатації. Дослідження виконувалося при малому, середньому та великому навантаженні на ГД, що відповідають експлуатаційним режимам з відносною частотою обертання дизеля $\bar{\omega}_d = 0,25; 0,5$ та $0,75$.

Із рис. 5, а та б, випливає, що при малому періоді коливання збурюючого впливу $T_0 = 3,3$ с зменшення чутливості (збільшення ширини ЗПЧ) в електронному РЧО підвищує стабільність як швидкісного, так і теплового режимів роботи ГД у всьому діапазоні вітрового хвилювання. Наприклад, під час хитавиці, яка викликана силою вітру 7 балів, для режиму $\bar{\omega}_d = 0,75$ при збільшенні ширини ЗПЧ з 0 до 0,08 відн. од. оцінка $\sqrt{D_n}$ зменшилася з 0,0219 до 0,0202 відн. од., а $\sqrt{D_h}$ зменшилася з 0,1092 до 0,0977 відн. од.

Таким чином, зменшення ширини ЗПЧ не приводить до поліпшення стабільності швидкісного режиму ($\sqrt{D_n}$ не зменшується) під час зміни навантаження на дизель у широкому діапазоні, тобто недоцільно збільшувати чутливість регулятора при малих відхиленнях параметра регулювання.

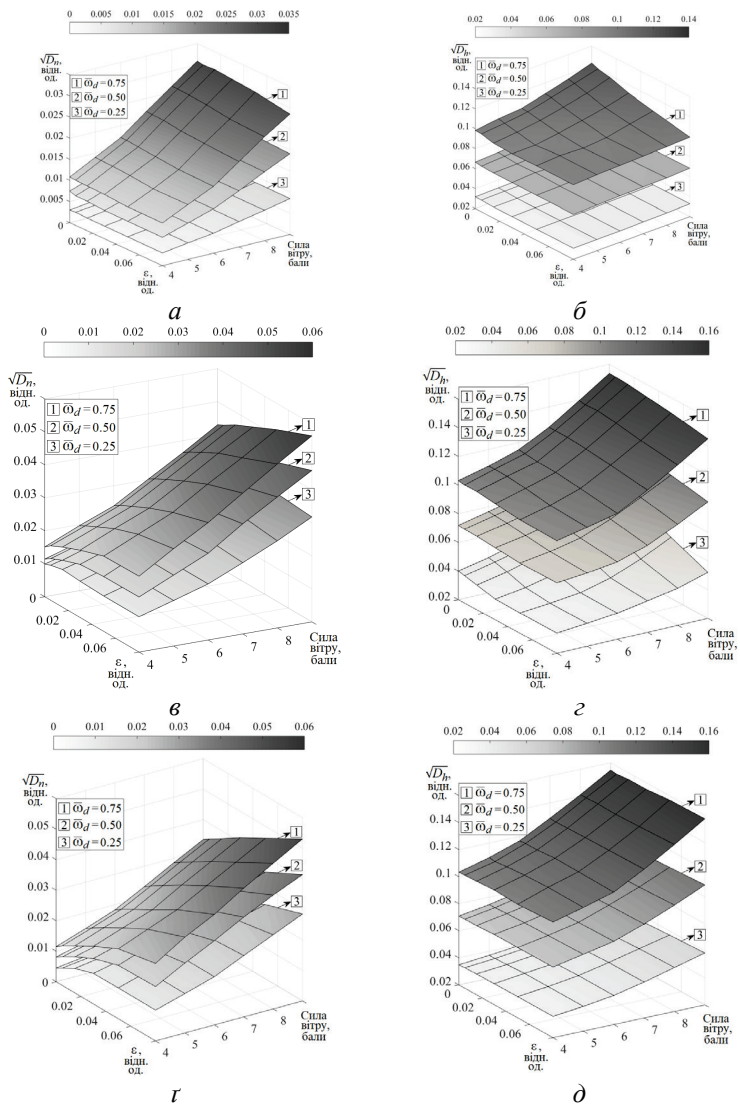


Рис. 5. Вплив пониженої чутливості електронного РЧО на $\sqrt{D_n}$ та $\sqrt{D_h}$ при зміні бальності вітру за шкалою Бофорта з періодом хвилювання моря: *a, б* – 3,3 с; *в, г* – 7,9 с; *г, д* – 20,9 с

У свою чергу, за рахунок зменшення чутливості РЧО при малому хвилюванні в експлуатаційних умовах спостерігається підвищення стабільності САРЧ та стабілізація теплового режиму роботи ГД, завдяки тому, що РЧО перестає надмірно реагувати на зміни навантаження на дизель (збурення з малою амплітудою).

Із рис. 5, *в* та *г*, випливає, що при середньому періоді $T_0 = 7,9$ с при зменшенні чутливості в електронному РЧО спостерігається незначна тенденція до стабілізації швидкісного режиму ($\sqrt{D_n}$ суттєво не змінюється) при малій інтенсивності хвилювання, а також покращення теплового режиму у всьому діапазоні вітрового хвилювання, у широкому діапазоні зміни навантаження на дизель. Наприклад, при хвилюванні моря, викликаному силою вітру 5 балів, на режимі $\bar{\omega}_d = 0,25$ у діапазоні ширини ЗПЧ $0 \dots 0,08$ відн. од. $\sqrt{D_n}$ стабілізується на рівні $0,013 \dots 0,014$ відн. од, а $\sqrt{D_h}$ зменшується з $0,0445$ до $0,036$ відн. од. При інтенсивному хвилюванні моря, яке викликає значні зміни частоти обертання дизеля (тобто при великій дисперсії збурюючого впливу) ширину ЗПЧ рекомендується задавати $0,01 \dots 0,025$ відн. од. для того, щоб РЧО більш "активно" регулював частоту обертання валу, одночасно стабілізуючи тепловий режим дизеля.

Із рис. 5, *г* та *д*, випливає, що при великому періоді коливання $T_0 = 20,9$ с зменшення чутливості РЧО як при помірному (викликаному силою вітру до 6 балів), так при інтенсивному хвилюванні (викликаному силою вітру 6 балів і вище), погіршує динаміку РЧО при зміні навантаження на дизель у широкому діапазоні, про що свідчить істотне збільшення оцінки $\sqrt{D_n}$. Наприклад, під час хвилювання моря, викликаного силою вітру 6 балів, на режимі $\bar{\omega}_d = 0,5$ при збільшенні ширини ЗПЧ з 0 до $0,08$ відн. од. $\sqrt{D_n}$ збільшилися з $0,0126$ до $0,0276$ відн. од. Схожа тенденція погіршення стабільності має і тепловий режим ГД: $\sqrt{D_h}$ збільшилися з $0,0792$ до $0,0815$ відн. од. Пояснюється це тим, що при зменшенні чутливості регулятор переміщує рейку ПНВТ із запізненням, але ривками, що не зменшує амплітуду її переміщення.

У табл. 2 приведені оптимальні налаштування пониженої чутливості електронного РЧО при різних середніх періодах коливань та дисперсії збурюючого впливу. Результати наведено для малого,

середнього та великого навантаження ГД, що відповідають режимам $\bar{\omega}_d = 0,25; 0,5$ та $0,75$ відповідно.

Таблиця 2

Оптимальні налаштування пониженої чутливості електронного РЧО при різних періодах коливань та дисперсії збурюючого впливу

$\bar{\omega}_d$	Сила вітру ε , відн. од.					
	при $T_0 = 3,3$ с		при $T_0 = 7,9$ с		при $T_0 = 20,9$ с	
	4 – 6 балів	7 – 9 балів	4 – 6 балів	7 – 9 балів	4 – 6 балів	7 – 9 балів
0,25	0,02	0,04	0,015	0,010	0,005	0,002
0,50	0,03	0,05	0,030	0,015	0,007	0,003
0,75	0,05	0,07	0,035	0,025	0,010	0,005

У ході дослідження впливу пониженої чутливості РЧО встановлено: при $T_0 = 3,3$ с стабільність швидкісного та теплового режимів дизеля як за помірного (спричиненого силою вітру до 6 балів), так і за інтенсивного хвилювання (спричиненого силою вітру 6 балів і більше), покращується зі збільшенням ширини ЗПЧ (зменшенням чутливості) РЧО, що підтверджується зниженням оцінок $\sqrt{D_n}$ та $\sqrt{D_h}$ (рис. 5 а, б);

при $T_0 = 7,9$ с при зменшенні чутливості РЧО (збільшенні ширини ЗПЧ), як за малої дисперсії збурюючого впливу, так і за хвилювання моря, що спричиняє інтенсивні та значні зміни частоти обертання дизеля, спостерігається вираж у стабільності теплового режиму (зменшення $\sqrt{D_h}$), при цьому суттєвого покращення стабільності швидкісного режиму не відбувається (рис. 5 в, г);

при $T_0 = 20,9$ с збільшення чутливості РЧО (зменшення ширини ЗПЧ) покращує динаміку РЧО в усьому діапазоні вітрового хвилювання, що підтверджується зменшенням $\sqrt{D_n}$ і $\sqrt{D_h}$ (рис. 5 г, д).

На практиці часто трапляється, що під час помірного хвилювання моря регулятор надмірно реагує на періодичні зміни навантаження, що викликає нестабільність теплового режиму двигуна. Якщо зменшити швидкодію регулятора на періодичні зміни навантаження на дизель, наприклад, зменшенням коефіцієнта підсилення пропорційної ланки та/або збільшенням часу інтегрування, стабільність теплового режиму ГД покращиться, але при інтенсивному хвилюванні моря погіршиться стабільність швидкісного режиму, що неприпустимо.

У зв'язку з цим, на рис. 6 пропонується підхід до забезпечення стабільності швидкісного режиму ГД при хвилюванні моря різної інтенсивності шляхом адаптації ширини ЗПЧ регулятора під стохастичні характеристики збурення.

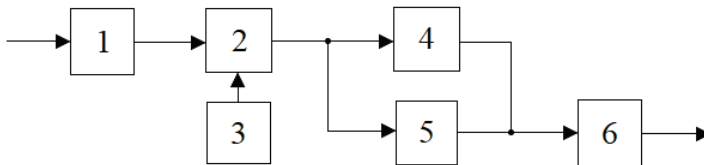


Рис. 6. Блок-схема для адаптації ширини ЗПЧ електронного регулятора ГД під стохастичні характеристики збурення: 1 – елемент обчислення модуля відхилення фактичної частоти обертання від заданої; 2 – елемент порівняння із заданим пороговим допустимим відхилення фактичної частоти обертання від заданої; 3 – елемент завдання порогового значення допустимого відхилення; 4 – елемент уповільнення сигналу; 5 – тригер; 6 – ланка ЗПЧ

Робота регулятора частоти обертання під час погіршення умов плавання переходить на режим "активнішого" регулювання частоти обертання. Для цього на елемент 1 надходить сигнал різниці між заданою та фактичною частотами обертання, скоригована на сигнал ЗЗ (у разі забезпечення статизму для можливості паралельної роботи ГД). За допомогою елемента 1 обчислюється модуль відхилення фактичної частоти обертання від заданої. Цей сигнал порівнюється за допомогою елемента 2 із заданим у блоці 3 пороговим допустимим відхилення фактичної частоти обертання від заданої, а саме 0,05 відн. од. У випадку, коли відхилення фактичної та заданої частоти обертання знаходиться у "допустимого порозі", за допомогою елемента уповільнення сигналу 4, який працює за інтегруючим або ступеневим позиційним законом, відбувається коригування ширини ЗПЧ ланки 6. Якщо заданий допуск не перевищується, то регулятор вибирає підвищену ширину ЗПЧ 0,03 відн. од., яка зменшує коливання рейки під час хитами судна. Якщо допуск під час хвиль із середньою інтенсивністю та періодом досягнув середини допустимого значення, система зменшує ширину ЗПЧ регулятора до 0,02 відн. од., що приводить до покращення швидкісного режиму та зменшенню теплових перенавантажень ГД. Якщо допуск підходить до верхньої границі під час хвилювання з великим періодом та/або інтенсивне або оператор змінив режим роботи головного дизеля, система зменшує

ширину ЗПЧ регулятора до 0,01 відн. од., що приводить до кращої роботи регулятора, завдяки більш "активнішій" реакції на збурення. У випадку перевищення допустимого порогу відхилення тригер 12 миттєво повертає ширину ЗПЧ до штатного значення.

Таким чином, виявлено закономірності впливу параметрів налаштування електронного РЧО на показники роботи суднової дизельної установки в умовах хвилювання моря. Ці закономірності, запропонована методика дослідження, а також підхід до забезпечення стабільності швидкісного режиму ГД при хвилюванні моря шляхом адаптації ширини ЗПЧ регулятора, дають змогу оптимізувати експлуатаційні режими головного дизеля у реальних умовах плавання.

Наступне дослідження планується в області обґрунтування вибору параметрів налаштування логічної частини електронних РЧО за допомогою яких найдоцільніше адаптувати експлуатаційні режими роботи суднових дизель-генераторів.

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. – 30 p.
2. Nielsen K., Blanke M., Eriksson L., Vejlggaard-Laursen M. Marine diesel engine control to meet emission requirements and maintain maneuverability. // *Control Engineering Practice*. – 2018. – Vol. 76. – P. 12 – 21.
3. Gorb S., Levinskyi M., Budurov M. Sensitivity optimisation of a main marine diesel engine electronic speed governor. // *Scientific Horizons*. – 2021. – Vol. 24. – № 11. – P. 9 – 19.
4. Parunov J., Guedes Soares C., Hirdaris S., Wang X. Uncertainties in modelling the low-frequency wave-induced global loads in ships. // *Marine Structures*. – 2022. – Vol. 86. – 21 p.
5. Lünser H., Hartmann M., Desmars N., Behrendt J., Hoffmann N., Klein M. The Influence of Characteristic Sea State Parameters on the Accuracy of Irregular Wave Field Simulations of Different Complexity. // *Fluids*. – 2022. – Vol. 7. – № 7. – 18 p.
6. 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.

7. 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.

8. Горб, С. І., Будуров, М. І. Оптимизация автоматического регулирования частоты вращения судового дизеля. // Автоматизація суднових технічних засобів: наук. -техн. зб. – 2021. – Вип. 27. – Одеса: НУ "ОМА". – С. 3 – 21.

Abstract. – Marine diesel engines are the primary type of heat engines used in marine transport power plants, providing approximately 97% of the total number of power units. However, in practice, marine main diesel engines with electronic speed governors constantly experience problems in ensuring control quality, related to the dependence of electronic governor operating characteristics on the diesel engine mode during sea disturbance. As a result, control quality becomes dependent on subjective actions of personnel.

In modern marine diesel engine operation practice, the methodology for tuning speed governors under conditions of stepwise load changes is considered established. However, a distinctive feature of main marine diesel engines on seagoing vessels is operation under sea disturbance conditions, when the amplitudes and periods of diesel load changes depend on vessel dimensions, speed and rolling, sea state and the vessel's course angle relative to wave and wind direction, i.e., they are stochastic. Therefore, the traditional methodology for tuning speed governors does not ensure adequate rotational speed stability at possible operational modes of main marine diesel engines.

A proposed model for automatic speed control of the HYUNDAI MAN B&W 6S60MC-C7 marine diesel engine of the tanker "CATALAN SEA" with NABTESCO MG-800 electronic governor is presented. The results of optimizing the electronic governor tuning parameters on the model provided improved control during sea disturbance of various intensities.

An adaptive approach to main diesel engine speed control under sea disturbance conditions is also proposed. Adaptation is ensured by changing the reduced sensitivity zone of the governor, which allows optimization of main diesel engine operational modes under real navigation conditions.

УДК 621.431.74

DOI: 10.31653/1819-3293-2025-1-29-21-40

ARTICLE HISTORY

Received 11.04.2025

Accepted 07.05.2025

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

Аналіз операційних ризиків на суднах з використанням штучного інтелекту

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

Operational Risk Analysis on Ships Using Artificial Intelligence

Резюме. Згідно існуючих вимог кожна операція на судні повинна бути оцінена з точки зору виникнення можливих ризиків перед її початком. Це стосується і таких рутинних операцій, як швартування судна. При проведенні таких операцій дуже виникає можливість формального підходу до оцінки ризиків. Також ця процедура має істотний вплив з боку людського елементу. Для запобігання цьому може використовуватися запропонована раніше концепція кругової оцінки ризиків, що дає можливість врахувати можливі ризики усіх учасників операції, а не тільки одного з них, як це робиться зазвичай. Для більш детальної оцінки ризиків використовується аналіз судових документів і кваліфікаційних документів моряків, а це, в свою чергу, можна пришвидшити і зробити більш якісно з допомогою технологій блокчейн, які вже успішно застосовуються у морській логістиці контейнерними лініями. Вартість розробки і складність системи компенсується усуненням можливих помилок і фальсифікацій, а також пришвидшенням всієї процедури та її більш точними результатами.

Summary. According to existing requirements, each operation on a vessel must be assessed from the point of view of the occurrence of possible

risks before it begins. This also applies to such routine operations as mooring a vessel. When conducting such operations, there is a great opportunity for a formal approach to risk assessment. This procedure also has a significant impact on the human element. To prevent this, the previously proposed concept of circular risk assessment can be used, which makes it possible to take into account the possible risks of all participants in the operation, and not just one of them, as is usually done. For a more detailed risk assessment, an analysis of ship documents and seafarers' qualification documents is used, and this, in turn, can be accelerated and made more qualitatively using blockchain technologies, which are already successfully used in maritime logistics by container lines. The cost of development and complexity of the system is compensated by the elimination of possible errors and falsifications, as well as by accelerating the entire procedure and its more accurate results.

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 відповідно до резолюції Міжнародної морської організації (IMO) MSC.273(85) з 01.07.2010.

У національному законодавстві пунктами 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, також вимагається забезпечити основну мету судноплавної компанії, пов'язану з "забезпечення захисту від усіх ризиків, що виявлені". Термін впровадження цієї вимоги – з 01.07.2004, тобто за 6 років раніше за відповідну вимогу ISM Code.

У Керівництві [1] зазначається, що ISM Code не визначає будь-якого конкретного підходу до управління ризиками і судноплавна компанія повинна самостійно вибрати методи, що відповідають її організаційній структурі, типу суден та характеру комерційній діяльності. Обрані методи можуть бути більш-менш формальними, але вони мають бути систематичними, щоб оцінка та реагування були повними та ефективними, та їх виконання було задокументовано для доказу процесу прийняття рішень. Оцінки ризиків повинні регулярно переглядатися, оскільки вони прив'язані до певних моментів часу,

певних умов і схильні до невизначеності. Додаткові оцінки ризику потрібні у разі аварій та небезпечних ситуацій чи нових або рідко виконуваних операцій.

Ризики судноплавної компанії можна класифікувати за різними ознаками.

За джерелом виникнення:

внутрішні ризики, пов'язані з діяльністю самої компанії (управлінські помилки, наприклад, неправильне планування маршрутів; технічні несправності суден, наприклад, поломка двигуна; помилки екіпажу – людський фактор);

зовнішні ризики, що зумовлені чинниками, куди компанія неспроможна вплинути безпосередньо (законодавчі зміни, зокрема зміни екологічних норм; коливання цін; природні явища – шторми, цунамі; закриття каналів; військові дії; піратство; кіберзагрози).

За характером впливу:

фінансові ризики, пов'язані з можливими грошовими втратами (курсові коливання, зміни цін на паливо чи фрахтових ставок, несплатежі контрагентів);

операційні ризики, що виникають у процесі експлуатації суден (аварії чи інциденти на морі, у тому числі зіткнення, посадка на міліну, навал на причал, пожежі, пошкодження вантажу, розлив при бункеруванні; поломки обладнання; травми та смерті персоналу суден);

репутаційні ризики, пов'язані зі шкодою для іміджу компанії (публікації у пресі; скандали, пов'язані з порушенням прав екіпажу).

Аналіз ризиків включає:

1. Виявлення (ідентифікацію) можливих ризиків;
2. Оцінку виявлених ризиків;
3. Вироблення заходів захисту від ризиків.

Екіпажі суден грають ключову роль в аналізі операційних ризиків проте аналіз фактичної реалізації нормативних вимог щодо аналізу операційних ризиків на борту морських суден показує, що ці вимоги виконуються незадовільно [2].

У більшості випадків до Керівництв із систем управління безпекою на морських судах включаються процедури аналізу ризиків, які:

містять об'ємні теоретичні відомості та не доведені до покрокових дій, пов'язаних з виявленням, оцінкою ризиків та виробленням заходів захисту;

передбачають використання складних методів виявлення та оцінки ризиків [3], рекомендованих судноплавним компаніям класифікаційними товариствами [4];

передбачають об'ємну роботу зі збирання, аналізу та моніторингу експлуатаційних даних.

Такі процедури не враховують відсутність у суднового персоналу навіть на рівні управління:

резервів робочого часу для серйозної аналітичної роботи [2];

необхідної компетентності творчого аналізу ризиків (компетентність з оцінки ризиків взагалі не передбачена Кодексом з підготовки та дипломування моряків та несення вахти) [5, 6].

Тому суднові екіпажі часто аналізують ризики поверхнево і основна увага приділяється не якості оцінки, а механічному заповненню звітних форм. Непоодинокими є випадки, коли на судах звітні форми з аналізу ризиків заповнюються після проведення суднових операцій.

У роботі [7] запропоновано покращити аналіз ризиків на судах за рахунок уніфікації дій. Для цього запропоновано словесні описи:

трьох категорій наслідків (незначні, помірні та крайні) для здоров'я людей;

чотирьох категорій ймовірності (ймовірно, ймовірно, малоймовірно і дуже малоймовірно) небезпек.

Також запропоновано матрицю оцінки ризику за п'ятьма категоріями (дуже низький, низький, середній, високий та дуже високий) з використанням трьох категорій наслідків для людей та чотирьох категорій ймовірності небезпек. Рекомендовано використовувати таку толерантність до оцінок ризику:

дуже низький – прийнятний;

низький – терпимий;

середній – необхідно зменшити;

високий – необхідно суттєво зменшити;

дуже високий – неприйнятний.

У роботах [8 – 10] запропоновано зменшити/регламентувати перелік суднових операцій для аналізу ризиків, а також уніфікувати звітні форми, використовуючи такі рекомендації.

1. У процедурах штатних суднових операцій (планування рейсу, швартування, прийом бункера, дегазація трюмів, навантаження та вивантаження, прийом на борт людей з катера, підготовка судна до відходу, несення вахти і так далі), у планах дій в аварійних ситуаціях, пошуку та порятунку, ризики мінімізуються за рахунок неухильного виконання вимог щодо безпеки мореплавання, охорони праці, охорони навколишнього середовища, пожежної безпеки, використання засобів індивідуального та колективного захисту, санітарних правил, а також недопущення до участі в цих операціях персоналу з недостатньою кваліфікацією. Ризики за цими операціями аналізуються і

мінімізуються тільки у разі появи суттєвої невизначеності в запланованих операціях.

2. Щодо судових регламентних робіт, які передбачені конструкторською документацією, ризики аналогічно мінімізуються за рахунок неухильного виконання інструкцій та нормативних вимог щодо їх виконання. Однак як заходи захисту від ризиків бажано оформлювати письмові наряди-завдання на ці роботи з переліком необхідних дій.

3. За всіма судовими роботами, які не мають регламентного характеру (їх часто називають разовими) обов'язково оформляються письмові наряди з переліком необхідних дій та захисних заходів, а також фіксацією дозволу на початок виконання робіт. За такими роботами ризики оцінюються якісно із заповненням уніфікованих звітних форм. Уніфіковані форми оцінки ризиків можуть розроблятися для двох категорій разових робіт – виконуваних вперше та виконуваних вдруге та більше разів. У цьому випадку у другій категорії виділяється підклас – "діючий персонал бере участь у них вперше".

Уніфіковані форми з оцінки ризиків можна розробити єдиними для всіх разових робіт і спеціалізованими залежно від характеру виконуваних робіт (наприклад, можна розділити всі роботи на "роботи в машинному відділенні", "роботи на палубі", "роботи в надбудові та містку" та "роботи поза корпусом судна").

У публікації [11] запропоновано заходи для покращення адміністрування роботи з ризиками, у тому числі:

"регулярна підготовка капітанів та інших старших офіцерів з питань управління ризиками";

"для оперативного управління ризиками на судні можуть створюватися спеціальні структури – наприклад, суднова рада з управління безпекою під головуванням капітана";

"не варто забувати і про роль рядових членів екіпажу в управлінні ризиками. Адже саме вони перебувають на передньому краї, безпосередньо стикаючись з небезпеками під час повсякденної роботи. Тому так важливо залучати моряків до процесу ідентифікації ризиків, заохочувати їх повідомляти про будь-які помічені небезпеки і потенційно небезпечні ситуації";

"... регулярні збори екіпажу з питань безпеки (safety meetings)".

Не заперечуючи позитивному ефекту від запропонованих заходів, навряд чи можна вважати, що вони будуть реалізовані докладно та забезпечать суттєве покращення аналізу операційних ризиків на судах.

Викладене означає, що є практична проблема вдосконалення практики аналізу операційних ризиків на морських судах. Ця проблема безпосередньо пов'язана із забезпеченням безпеки судноплавства. Її актуальність зазначена у роботах [12, 13] та у роботі [13] пояснена досить великою кількістю аварій та інцидентів на морі.

У роботі [2] підтверджена гіпотеза можливості суттєвого покращення аналізу операційних ризиків на судах шляхом використання інструментів штучного інтелекту. Для цього використано прямий діалог з однією з останніх моделей нейромереж. Також наведений приклад використання штучного інтелекту для конкретної судової операції, який продемонстрував високу ефективність цього методу.

Для подальшого розвитку цього методу пропонується розробляти спеціалізовані надбудови для нейромереж з їх адаптацією для конкретних суден та розв'язуваних завдань. Такі надбудови отримали назву користувацьких агентів (Custom Generative Pre-trained Transformer). Їх призначення:

- спростити взаємодію користувачів із нейромережами;
- мінімізувати вплив суб'єктивного фактору в оцінці ризиків;
- можливість підключити зовнішні джерела даних та бази знань;
- накопичувати досвід (навчатися на наданих їм даних, а також допущених помилках);

- полегшити оформлення звітів щодо аналізу ризиків;
- можливість підтримки "роздумів" на основі ланцюжка дій.

Це особливо важливо на морських судах через:

- відсутність у персоналу резервів робочого часу для глибокого аналізу ризиків;

- недостатню кваліфікацію персоналу для оцінки ризиків;

- періодичні зміни екіпажів, коли відсутня можливість передавати змінникам накопичений досвід щодо аналізу ризиків.

Користувацькі агенти, які використовують платні ресурси, мають пріоритетний доступ до провідних моделей нейронних мереж, дозволяють використовувати великі обсяги вузькоспеціалізованих даних, а також інтегруватися із зовнішніми базами знань та інструментів, зручніше налаштовуються на діалог з користувачем і генерацію необхідних звітних документів, мають вищу швидкість реагування.

Без використання платних ресурсів обмежується добовий обсяг запитів (загальна кількість токенів на добу чи місяць), що особливо відчутно для слов'янських мов, оскільки вони потребують більше токенів порівняно з романсько-германськими.

Для судноплавної компанії оплата розробки, підтримки та використання користувацьких агентів з метою аналізу ризиків не є надмірними витратами. Навпаки, ефект від підвищення якості аналізу ризиків і економії робочого часу значно перевищує понесені витрати. Водночас багато судноплавних компаній поки що психологічно не готові включати витрати на штучний інтелект до своїх бюджетів. У зв'язку з цим було поставлено завдання – досягти тільки основних переваг користувацьких агентів для аналізу операційних ризиків на судах, але без залучення платних ресурсів.

Для вирішення такого завдання прийнято рішення передбачити такі можливості:

1 – передача в нейронну мережу обмеженої кількості необхідних файлів – інструкції з аналізу ризиків; опису процесів або об'єктів, що аналізуються; не більше двох додаткових документів, які треба використати для аналізу ризиків;

2 – використання однієї з лідируючих моделей нейронної мережі з режимом "глибоке дослідження"/ "мислення"/ "міркування";

3 – необмежений час збереження діалогів з нейронною мережею для накопичення досвіду аналізу ризиків.

Таке завдання було вирішене за допомогою соціальної мережі X. Ця мережа дозволяє: звертатися до чат-боту Grok з використанням останньої моделі Grok 3 в режимі Think; передавати моделі достатню кількість файлів; зберігати діалоги з нейронною мережею доти, доки вони не будуть видалені користувачем.

Недолік прийнятого рішення: якщо входити до соціальної мережі X під одним логіном з різних комп'ютерів (що бажано при оцінці ризиків на судах), необхідно пройти досить об'ємну ідентифікацію користувача.

Ефективність запропонованого методу аналізу операційних ризиків перевірена для робіт, які виконуються на 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).

В інструкції з аналізу ризиків використані категорії прогнозованих втрат, ймовірність виникнення ризиків та категорії ризиків, які запропоновані у роботі [2], але з приведенням цифрових значень прогнозованих втрат до ринкової вартості судна.

До інструкції з аналізу ризиків також включено вимоги до форми звіту щодо аналізу операційних ризиків. Ці вимоги можна змінювати з урахуванням побажань судноплавної компанії.

З метою мінімізації текстів запитів (prompts) використано перший запит:

Вважай, що всі мої наступні запити починаються з фраз: "Вивчи доданий опис судна та виконай аналіз ризиків під час виконання заданої роботи на судні відповідно до доданої інструкції з аналізу ризиків. Я не повторюватиму це кожного разу – просто використовуй це як основу.". Задане завдання – ...

У наступних запитах треба записати лише зміст роботи за формою: "Задане завдання - ...".

У межах одного чату протягом 5 днів моделі нейронної мережі надсилалися завдання проаналізувати ризики для різних робіт на судні з незначними змінами у prompts, причому завдання періодично повторювалися. Такі дії призвели до покращення аналізу, тобто до донавчання моделі.

Після донавчання моделі для, наприклад, заданого завдання *"Ремонт тріщин у корпусі Scrubber методом зварювання. Тріщини знаходяться на висоті до 3 метрів від підлоги."* в режимі Think через 98 с отримано Звіт з аналізу операційних ризиків, який наведений на наступних сторінках з додаванням номера 1 до таблиці (для її ідентифікації у статті) та зі зміною лише кегля шрифту, інтервалів та ширини стовпців у таблиці.

Звіт моделі Grok 3 був порівняний зі Звітом аналізу ризиків для того ж завдання традиційним способом мозкового штурму, який було зроблено судовим персоналом та схвалено офісом.

При мозковому штурмі використовувалася матриця оцінки ризиків, яка прийнята в судноплавній компанії. У ній прогнозованим **втратам** надаються категорії: 1 – незначний; 2 – несуттєвий; 3 – помірний; 4 – серйозний; 5 – катастрофічний. **Імовірності** виникнення ризиків надаються категорії: 1 – рідко (не траплялось у компанії протягом останніх 8 років); 2 – малоімовірно (не траплялось у компанії протягом останніх 3 років); 3 – можливо (не траплялось у компанії протягом останнього року); 4 – ймовірно (трапляється кілька разів на рік у компанії); 5 – майже напевно (трапляється кілька разів на рік на кожному судні). Категорія **ризик** визначається добутком цифрових позначень категорії втрат та категорії ймовірності:

низький 1 – 2 (існуючі заходи контролю вважаються достатніми; подальші дії не потрібні);

середньо-низький 3 – 4 (здебільшого заходи контролю є достатніми; застосувати додаткові заходи для зменшення ризику);

середньо-високий 5 – 10 (існуючих заходів може бути недостатньо; визначити й застосувати додаткові заходи для зниження ризику);

ЗВІТ З АНАЛІЗУ ОПЕРАЦІЙНИХ РИЗИКІВ

Дата: (заповнюється вручну)

Судно: Oil Tanker "Diamondway"

Застосовані: нейромережа Grok; модель Grok 3; режим "Think".

Задане завдання для аналізу ризиків: Ремонт тріщин у корпусі Scubber методом зварювання. Тріщини знаходяться на висоті до 3 метрів від підлоги.

Опис задачі та контекст: Ремонт передбачає зварювання для усунення тріщин у корпусі, що може створювати низку ризиків через висоту, замкнений простір та специфіку зварювальних робіт.

1. Ідентифікація можливих ризиків

Нижче наведено перелік ідентифікованих ризиків із поясненням причин їх виникнення:

1. Пожежна небезпека через зварювання в корпусі Scubber
 - Причина: Зварювання генерує іскри та високі температури, які можуть запалити горючі матеріали або залишки вихлопних газів у димовій трубі.
2. Порушення цілісності конструкції Scubber через неправильне зварювання
 - Причина: Некваліфіковане зварювання може послабити корпус Scubber, що призведе до витоків або збоїв у системі очищення вихлопних газів.
3. Падіння з висоти під час доступу до зони зварювання
 - Причина: Тріщини розташовані на висоті до 3 метрів, що вимагає використання драбин або ристпунів, створюючи ризик падіння.
4. Вплив токсичних випарів від зварювання в замкненому просторі
 - Причина: Зварювання виділяє токсичні гази, а замкнений простір димової труби ускладнює їх розсіювання.
5. Відмова зварювального обладнання
 - Причина: Неправність обладнання може призвести до зупинки роботи або травмування працівників.
6. Електричний удар від зварювального обладнання
 - Причина: Зварювальні апарати працюють від електрики, і неправильне заземлення може спричинити ураження струмом.

7. Ризики, пов'язані з роботою в замкненому просторі
 - Причина: Обмежений доступ та вихід із димової труби можуть ускладнити евакуацію в разі надзвичайної ситуації.
8. Вплив залишкового тепла або хімікатів у Scubber
 - Причина: Залишки тепла або хімічних речовин від вихлюпних газів можуть спричинити опіки або отруєння.
9. Ризики від транспортування обладнання та матеріалів до місця роботи
 - Причина: Переміщення інструментів і матеріалів на висоту може призвести до їх падіння або травм.

2. Аналіз ризиків та розробка заходів

Для кожного ризику проведено якісний аналіз із визначенням категорій прогнозованих втрат, ймовірності та ризику. Потім розроблено заходи для їх зменшення та проведено повторну оцінку.

Таблиця 1 аналізу ризиків

Ідентифікований ризик	Категорія прогнозованих втрат	Категорія ймовірності ризику	Категорія ризику	Заходи щодо впливу на ризик	Категорія втрат з урахуванням заходів	Категорія ймовірності з урахуванням заходів	Категорія ризику з урахуванням заходів
Пожежна небезпека через зварювання в корпусі Scubber	Дуже великі	Висока	Критичний	Впровадження суворої системи дозволів на гарячі роботи, забезпечення відсутності легкозаймистих матеріалів, наявність вогнетасників та пожежної варті, використання зварювальних кодр	Дуже великі	Низька	Високий
Порушення цілісності конструкції Scubber через неправильне зварювання	Великі	Середня	Високий	Залучення сертифікованих зварювальників, проведення неруйнівного контролю, дотримання інструкцій виробника	Великі	Низька	Середній

Падіння з висоти під час доступу до зони зварювання	Великі	Середня	Високий	Використання засобів захисту від падіння, забезпечення стійкості драбин/риштувань, навчання працівників	Великі	Дуже низька	Низький
Вплив токсичних випарів від зварювання в замкненому просторі	Великі	Висока	Високий	Забезпечення вентиляції, використання ЗІЗ, моніторинг якості повітря	Середні	Низька	Низький
Відмова зварювального обладнання	Середні	Низька	Низький	Регулярний огляд та обслуговування, наявність резервного обладнання	Середні	Дуже низька	Низький
Електричний удар від зварювального обладнання	Великі	Низька	Середній	Забезпечення заземлення, використання ізолюваних інструментів, ЗІЗ, навчання	Великі	Дуже низька	Низький
Ризики, пов'язані з роботою в замкненому просторі	Великі	Середня	Високий	Дотримання процедур входу в замкнений простір, наявність рятувального обладнання, проведення навчань	Великі	Низька	Середній
Вплив залишкового тепла або хімікатів у Scrubber	Середні	Висока	Високий	Забезпечення охолодження та очищення, використання ЗІЗ, моніторинг умов	Низькі	Низька	Низький
Ризики від транспортування обладнання та матеріалів до місця роботи	Низькі	Низька	Низький	Використання шнурів для інструментів, закріплення матеріалів, забезпечення чистих шляхів	Низькі	Дуже низька	Несуттєвий

3. Пояснення до аналізу

- Пожежна небезпека: Потенційні втрати залишаються дуже великими через можливі значні пошкодження судна, але заходи суттєво знижують ймовірність.
- Цілісність конструкції: Заходи зменшують ймовірність невідального ремонту, але втрати у разі провалу залишаються значними.
- Падіння з висоти: Ефективні засоби захисту знижують ризик до низького рівня.
- Токсичні випари: Вентиляція та ЗІЗ зменшують як ймовірність, так і тяжкість наслідків.
- Відмова обладнання та електричні ризики: Регулярне обслуговування та безпекові заходи роблять ці ризики мінімальними.
- Замкнений простір: Процедури та підготовка знижують ймовірність, але потенційні втрати залишаються великими.
- Залишкове тепло/хімікати: Попереднє охолодження та очищення значно знижують ризик.
- Транспортування: Прості заходи роблять цей ризик несуттєвим.

4. Висновки

Після впровадження запропонованих заходів найвищий залишковий ризик – Високий (пожежна небезпека), що є прийнятним за умов суворого дотримання процедур. Решта ризиків знижено до Середнього, Низького або Несуттєвого рівня, що свідчить про ефективність заходів. Ремонт можна виконувати безпечно за умови реалізації всіх зазначених рекомендацій.

Відповідальний за аналіз ризиків

(заповнюється вручну)

високий 12 – 15 (існуючі заходи контролю недостатні; застосувати додаткові заходи для зниження ризику);

дуже високий 16 – 20 (ризик є неприйнятним; необхідно вжити всіх заходів для зниження ризику до прийняттого рівня);

надзвичайно високий 25 (ризик є неприйнятним; робота заборонена без значного зменшення ризику).

Звіт з мозкового штурму було зроблено повністю у табличній формі. Він наведений у табл. 2 у перекладі українською мовою з англійського оригіналу, із незначним редагуванням тексту, зміною звітної таблиці оригіналу на форму табл. 1 та без титульної інформації оригіналу.

Порівняння двох способів конкретної судової операції свідчить, що використання агента:

поглибило аналіз ризиків;

покращило опис кожного ризику, його причину, прогнозовані наслідки, логічну структуру оцінки ризиків до і після впровадження заходів;

забезпечило докладне пояснення впливу та ефективності впроваджених заходів на кожен конкретний ризик.

Мозковий штурм краще охопив нормативні вимоги до виконання робіт на судні: враховано дотримання вимог MARPOL щодо викидів сірки при відключенні Scrubber; чітко передбачено процедуру узгодження робіт з капітаном, офісом, складання чек-листів, призначення офіцера з пожежної безпеки; вказані умови для початку робіт, включно з включно з погодними, шумовими, візуальними та технічними критеріями.

Загалом можна вважати, що агент забезпечує якісніші результати аналізу операційних ризиків на судах при скороченні трудовитрат з кількох годин до кількох хвилин. Проте аналіз, виконаний штучним інтелектом, не можна вважати істиною в останній інстанції. Судновий персонал обов'язково має перевірити, доопрацювати та затвердити звіт, підготовлений штучним інтелектом.

Розглянутий аналіз ризиків для конкретної судової операції показав, що при використанні штучного інтелекту, в опис судна треба обов'язково включати задокументовані вимоги судноплавної компанії до погодження, затвердження процедур та отримання дозволу на виконання небезпечних робіт, а в Promt додатково вимагати виявити екологічні ризики.

Таблиця 2

Результати аналізу операційних ризиків на судні Oil Tanker "Diamondway" при ремонті тріщин у корпусі Scrubber методом зварювання

Ідентифікований ризик	Категорія прогнозованих втрат	Категорія ймовірності ризику	Категорія ризику	Заходи щодо впливу на ризик	Категорія втрат з урахуванням заходів	Категорія ймовірності з урахуванням заходів	Категорія ризику з урахуванням заходів
Порушення правил MARPOL щодо вмісту сірки через відключення Scrubber під час ремонту.	3	2	середній-високий	Робота має бути виконана, коли судно використовує паливо, що відповідає вимогам. Завдання бажано виконувати на якорній стоянці або в морі, коли Scrubber не потрібен. Необхідно отримати схвалення офісу.	3	1	низький - середній
Пожежа або вибух через іскри та виділення тепла під час гарячих робіт.	4	2	середній-високий	Дозвіл на проведення гарячих робіт має бути виданий капітаном і затверджений офісом перед початком робіт. Підготовка до гарячих робіт згідно з чек-листом підготовки місця – займісті матеріали мають бути вилучені з зони. Вживані електроприлади мають бути утилізовані належним чином. Під час виконання гарячих робіт має постійно здійснюватися нагляд на місці та з іншого боку. Пожежне обладнання має бути підготовлене, розкладене та готове до використання. Будь-яка діяльність, пов'язана з вантажом, бункруванням, вентиляцією, має бути заборонена під час гарячих робіт. Має бути	3	1	низький - середній

Ідентифікований ризик	Категорія прогнозованих втрат	Категорія ймовірності ризику	Категорія ризику	Заходи щодо впливу на ризик	Категорія втрат з урахуванням заходів	Категорія ймовірності з урахуванням заходів	Категорія ризику з урахуванням заходів
				призначений офіцер з безпеки для пожежного спостереження під час і після гарячих робіт. Провести нараду з техніки безпеки та повідомити вахтового інженера і вахтового офіцера перед початком робіт. Не розпочинати роботу доки ризик не усунуто. Негайно припинити роботи у разі надмірного диму або полум'я на місці виконання робіт.			
Травма персоналу внаслідок падіння при качці чи крені судна.	3	2	середній-високий	Робота має проводитися за спокійних погодних умов. Необхідно використовувати страховальний пояс. Відкласти або призупинити роботу до покращення погодних умов. Робоче місце повинно бути добре освітлене.	3	1	низький - середній
Втрата концентрації та помилки персоналу через шум.	2	2	низький - середній	Провести збори з інструктажем для персоналу, який бере участь у роботі. Використовувати засоби індивідуального захисту. Роботу слід зупинити у разі надмірного шуму, а джерела надмірного шуму мають бути усунені.	2	1	низький

Ідентифікований ризик	Категорія прогнозування втрат	Категорія ймовірності ризику	Категорія ризику	Заходи щодо впливу на ризик	Категорія втрат з урахуванням заходів	Категорія ймовірності з урахуванням заходів	Категорія ризику з урахуванням заходів
Поразка персоналу електричним струмом.	3	2	середній-високий	Зварювальне обладнання має бути перевірено старшим інженером перед використанням. Роботу має виконувати досвідчена людина з використанням засобів індивідуального захисту. Один член екіпажу повинен бути напототові, щоб вимкнути автоматичний вимикач у разі удару струмом. Команда рятувальників - готова за необхідності надати першу допомогу.	3	1	низький - середній
Травма очей через опромінення, опіки шкіри від тепла при зварюванні.	3	2	середній-високий	Використання засобів індивідуального захисту під час зварювання. Проведення наради з техніки безпеки для обговорення захисту. Роботи слід негайно припинити у разі виявлення травми. Джерело живлення зварювального апарата має бути вимкнене черговим. Рятувальна команда має бути в режимі очікування. У разі потреби надати першу допомогу.	3	1	низький - середній
Травма при падінні з висоти.	2	2	низький - середній	Використання відповідної платформи. Отримання дозволу на роботи на висоті. Дотримання заходів безпеки під час виконання робіт на висоті.	2	1	низький

Ідентифікований ризик	Категорія прогнозованих втрат	Категорія ймовірності ризику	Категорія ризику	Заходи щодо впливу на ризик	Категорія втрат з урахуванням заходів	Категорія ймовірності з урахуванням заходів	Категорія ризику з урахуванням заходів
Задуха внаслідок вдихання диму, що виникає під час гарячих робіт. Пожежа/вибух через наявність горючих газів або матеріалів поблизу робочої зони.	3	2	середній-високий	Перевірити, що подаючий і витяжний вентилятори працюють належним чином. Портативний вентилятор має бути встановлений для видалення зварювального диму та пилу. Використання масок та інших засобів індивідуального захисту. Постійний контроль за рівнем газів. Проведення регулярної перевірки атмосфери відповідно до вимог дозволу на гарячі роботи. Черговий з пожежної безпеки має контролювати стан вентиляції.	3	1	низький - середній
Пожежа або активація датчика пожежної сигналізації через іскри, дим і виділення тепла під час гарячих робіт.	3	2	Низький	Забезпечити наявність протипожежних кодр і розмістити їх для вловлювання іскор, що розлітаються навколо зони гарячих робіт. Місцевий пожежний датчик має бути за дозволом керівництва ізольований на час роботи. Призначити чергового з безпеки для постійного нагляду за зоною.	3	1	низький - середній
Травми персоналу та пошкодження обладнання.	2	2	низький - середній	Роботи проводити у відкритій зоні приміщення. Перевірки на наявність газу мають проводитися з регулярними інтервалами.	2	1	низький

Висновки.

Проаналізовано актуальні проблеми реалізації процедур аналізу операційних ризиків на морських судах відповідно до вимог міжнародних та національних нормативних документів. Фактичне виконання цих вимог часто є незадовільним через нестачу часу, компетентності екіпажу та складність існуючих процедур.

Для вирішення цієї проблеми запропоновано використовувати інструменти штучного інтелекту, зокрема користувацьких агентів на основі нейронних мереж. Експериментальне дослідження показало, що використання такого агента значно підвищує якість аналізу ризиків та суттєво скорочує трудовитрати.

Особливу увагу приділено можливості реалізації такого підходу без залучення платних ресурсів, що є важливим фактором для впровадження в практику судноплавних компаній. Для цього розроблено методологію використання вільнодоступної нейромережі у режимі "мислення", з можливістю передачі обмеженого обсягу вхідних даних та збереження результатів діалогів.

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. ДСТУ EN IEC 31010:2022. Керування ризиками – методи оцінки ризиків.
4. Guidance Notes on Risk Assessment Applications for the Marine and Offshore Industries. – USA: American Bureau of Shipping, - 2020. – 79 p.
5. 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.
6. 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.
7. M. Hess, S. Kos, M. Njegovan. Assessment and control of operational risks on board ships in accordance with the ISM code. //Scientific Journal of Maritime Research. – 2011. № 25/2. – P. 405 – 416.

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

9. 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.

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

11. Torskyi V., Rossomakha O., Oberto Santana L. Systematic risk assessment and management in modern shipping: a comprehensive approach to safety analysis. – Boston, USA: Primedia eLaunch, 2024. – 114 p.

12. Jerzy Herdzik. Problemy wykonania procedur oceny ryzyka prac na statkach. //Bezpieczeństwo i ekologia. – 6/2018. – P. 106 – 109.

13. Carmen Gasparotti. The Assessment of the Marine Risks Based on the Formal Safety Assessment. //The Annals of "Dunarea de Jos". – Galati: University of Galati, 2022. – P. 91 – 98.

Abstract. Risk analysis includes the identification of potential risks, assessment of identified risks, and the development of protective measures against those risks. Ship crews play a key role in the analysis of operational risks on vessels. However, analysis of the actual implementation of regulatory requirements for risk analysis onboard maritime vessels shows that compliance is unsatisfactory. This indicates a practical issue in the current practice of operational risk analysis on ships that needs to be improved.

Significant improvements in analysis are possible through the use of artificial intelligence tools, particularly custom agents. Custom agents that use paid resources have prioritized access to leading neural network models, the ability to process large volumes of highly specialized data, integration with external knowledge bases and tools, easier customization for user interaction and report generation, and higher response speeds. Without access to paid resources, the daily volume of queries is limited.

For a shipping company, the cost of developing, maintaining, and using custom agents for risk analysis is not considered excessive. On the contrary, the benefits of improved analysis quality and time savings significantly outweigh the expenses incurred. At the same time, many shipping companies are still psychologically unprepared to include artificial intelligence expenses in their budgets. Therefore, a task was set: to achieve the core benefits of custom agents for operational risk analysis on ships without relying on paid resources. To solve this problem, it was decided to include the following capabilities: upload a limited number of necessary files to the

neural network – including risk analysis guidelines, descriptions of the processes or objects under analysis, and no more than two additional documents required for the analysis; use one of the leading neural network models in a mode such as "deep research"/"think"/"reasoning"; ensure unlimited storage time for dialogues with the neural network, allowing for the accumulation of experience in risk analysis.

This task was accomplished using the social network X. This platform enables users to: interact with the Grok chatbot, using the latest Grok 3 model in "Think" mode; upload a sufficient number of files; and store dialogues with the neural network until manually deleted by the user.

To confirm the advantage of the custom agent, operational risk analysis on a real vessel was carried out using two methods: a) with a neural network agent without paid resources for process automation; b) the traditional brainstorming method. The results of comparing both methods for a specific ship operation showed that the use of the agent significantly improved the quality of the analysis and reduced labor time from several hours to just a few minutes.

УДК 621.431.7

DOI: 10.31653/1819-3293-2025-1-30-41-51

ARTICLE HISTORY

Received 11.05.2025

Accepted 23.05.2025

Горб Сергій Іванович¹, Кар'янський Сергій Анатолійович²
НУ "Одеська морська академія", Одеса, Україна
gs@onma.edu.ua¹, karikonma@gmail.com²

Можливості штучного інтелекту в аналізі ризиків на судах

Gorb Sergii¹, Karianskyi Sergey²,
National University "Odessa Maritime Academy", Odessa, Ukraine
gs@onma.edu.ua¹, karikonma@gmail.com²

The Capabilities of Artificial Intelligence in Risk Analysis on Ships

Резюме. Системи управління безпекою на судах передбачають ідентифікацію небезпек, оцінювання ризиків та визначення заходів для їх усунення. Застосування інструментів штучного інтелекту дозволяє підвищити ефективність цієї роботи. З метою виявлення можливостей таких інструментів для аналізу ризиків на судах виконано порівняльний аналіз моделей: GPT-4.5, Sonnet 4, Grok 3, 2.5 Flash, GPT-4, Qwen3-235B-A22B та DeepSeek-R1. Встановлено, що всі розглянуті моделі порівняно з експертними методами забезпечують глибший аналіз, кращу структурованість опису ризиків, пропонують ефективніші контрзаходи, точніше оцінюють категорії ризиків та значно скорочують трудові витрати. Найкращі результати продемонстрували моделі GPT-4.5 та Sonnet 4.

Summary. Ship safety management systems involve hazard identification, risk assessment, and determining measures to mitigate them. The application of artificial intelligence tools enhances the efficiency of this process. To explore the potential of such tools for risk analysis on ships, a comparative analysis of the following models was conducted: GPT-4.5, Sonnet 4, Grok 3, 2.5 Flash, GPT-4, and DeepSeek-R1. It was found that all the models examined, compared to expert methods, provide deeper analysis, better-structured risk descriptions, propose more effective countermeasures,

more accurately assess risk categories, and significantly reduce labor costs. The best results were demonstrated by the GPT-4.5 and Sonnet 4 models.

Сучасне морське судноплавство характеризується високою складністю операцій і зростанням потенційних загроз безпеці. Широкий спектр небезпек охоплюють операційні ризики на судах: від ризиків навігації і стихійних явищ до аварій обладнання та помилок екіпажу. Згідно з Міжнародним кодексом з управління безпечною експлуатацією суден та запобіганням забруднення (ISM Code) судноплавні компанії зобов'язані впроваджувати Системи управління безпекою (Safety Management System – SMS), які включають ідентифікацію небезпек, оцінку ризиків і запобіжні заходи. ISM Code допускає гнучкість у виборі методів аналізу ризиків.

Управління ризиками ґрунтується на стандарті ISO 31000:2018 [1], який визначає комплексний підхід, що інтегрується в усі процеси організації. Цикл управління ризиками включає встановлення контексту, ідентифікацію, аналіз ризиків, прийняття рішень щодо контрзаходів, моніторинг і перегляд. Ідентифікація ризиків полягає у виявленні можливих подій, які можуть негативно вплинути на цілі судноплавства (наприклад, загоряння, затоплення, втрата ходових властивостей тощо). Аналіз ризиків означає оцінку ймовірності та наслідків цих подій. Часто для цього застосовують якісні матриці ризику 3×3 або 5×5, FMEA (аналіз відмов і наслідків), дерева подій (Event tree) чи інші методи [2].

У суднових SMS вимагається для кожної ідентифікованої загрози оцінювати її ймовірність (частоту) і тяжкість наслідків (втрати). За цими показниками з використанням матриці ризику визначається "категорія ризику", яка умовно відображає ситуацію "ймовірність × втрати" [3, 4]. Основний метод такого аналізу – експертний мозковий штурм з узагальнення фактів і даних з минулого.

За результатами аналізу ризиків вибираються пріоритетні контрзаходи – технічні, організаційні, людські (наприклад, тренування, інструктаж). Заходи мають усунути причину ризику або зменшити його ймовірність/наслідки.

Після умовного впровадження контрзаходів кожен ризик переоцінюється щоб визначити залишковий ризик та оцінити ефективність заходів. Цей процес є циклічним з уточненням результатів на кожному кроці.

Для виявлення потенційних джерел і аналізу ризиків у судових SMS рекомендується використовувати структуровані методики HAZID (Hazard Identification) та HAZOP (Hazard and Operability Study). HAZID – це методологія, яка використовується для якісної оцінки ризиків шляхом ідентифікації потенційних небезпек та їх можливих наслідків. HAZOP – це більш деталізована методологія, яка застосовується для аналізу складних систем, таких як силові установки, паливні системи чи системи управління судном. HAZOP базується на систематичному аналізі відхилень від нормального функціонування системи з використанням керівних слів (наприклад, "більше", "менше", "немає"). Метод передбачає розбиття системи на вузли, визначення можливих відхилень у роботі кожного вузла та оцінку їх наслідків [5]. Наприклад, відхилення типу "немає потоку" в системі подачі палива може призвести до зупинки двигуна, що становить серйозний ризик у відкритому морі.

Незважаючи на наявність методик, судові екіпажі часто не мають часу та компетентності для повноцінного аналізу ризиків [4, 6, 7]. Через це звітність іноді заповнюється формально або постфактум [8, 9]. Окремі компанії впроваджують офісний контроль, інструктажі, створення баз даних інцидентів, однак ці заходи не усувають системних проблем, і вдосконалення практики аналізу ризиків на судах залишається актуальним [10].

Попереднім дослідженням [4] показано, що застосування штучного інтелекту для аналізу ризиків може кардинально покращити ефективність цієї роботи на судах. Однак для оцінки можливостей інструментів штучного інтелекту необхідно продовжити це дослідження для аналізу ризиків при виконанні більш спеціалізованих робіт на судах і визначити які моделі нейромереж дають кращі результати.

Для поставленого завдання обрано роботу – капітальний ремонт дизель-генератора CAT 3512C потужністю 1600 кВт при 690 В / 60 Гц. (TOP Overhaul of Diesel Generator) на самопідйомній баржі Jack Up Barge "Falcon Pearl" (IMO № 9757709). Ця робота зазвичай виконується в умовах обмеженого простору машинного відсіку, високого рівня шуму та вібрацій, наявності горючих речовин (паливного, мастила), а також у складних морських умовах, що включають можливі нахили та хитавицю судна. Під час ремонту є складні дії з демонтажу і монтажу вузлів двигуна, очищення і заміни компонентів, випробування систем живлення та охолодження, що створює багатофакторний ризиковий профіль.

Самопідйомна баржа "Falcon Pearl" має загальну довжину 89,9 м, загальну ширину 40,2 м, дедвейт 7602 т, максимальну швидкість 6,0 вузлів, екіпаж – 15 осіб, пасажирів до 135 осіб.

Нейросетям надавалася Інструкція з аналізу ризиків, в якій використані категорії прогнозованих втрат, ймовірність виникнення ризиків та категорії ризиків, що запропоновані у роботі [4], але з приведенням цифрових значень прогнозованих втрат до ринкової вартості баржі (за оцінкою нейронної моделі Grok 3 ринкова вартість дорівнює 100 млн. доларів).

Для аналізу використано запит (prompt): "Вивчи доданий опис судна та виконай аналіз ризиків відповідно до доданої інструкції з аналізу ризиків під час здійснення на судні капітального ремонту дизель-генератора CAT 3512C".

При виконанні цієї роботи у 2025 році судновий екіпаж ідентифікував експертним методом 9 ризиків, яким надав початкові (до вжиття заходів впливу) та кінцеві (після вжиття заходів впливу) категорії: високий; середній; низький. Це такі ризики (у дужках наведено їх категорії до і після вжиття заходів впливу):

1. Неправильне технічне обслуговування (середній/низький);
2. Неправильне використання засобів індивідуального захисту (середній/низький);
3. Травми при ремонті (середній/низький);
4. Посковзування, спотикання та падіння (середній/низький);
5. Помилки під час підготовки робіт (середній/низький);
6. Помилки під час підйому компонентів (середній/низький);
7. Теплове ушкодження персоналу (високий/низький);
8. Відмова обладнання судна (високий/низький);
9. Знеструмлення у разі відмови дизель-генератора (середній/низький).

Перераховані ризики лише частково сформульовані в термінах можливих негативних подій/наслідків, які можуть статися в майбутньому внаслідок виконання ремонту. Це ускладнює їх порівняння з ризиками, що ідентифікуються штучним інтелектом. Також слід врахувати, що ризики 1, 8 і 9 не належать безпосередньо до роботи – "капітальний ремонт дизель-генератора".

В Інструкції з аналізу ризиків для нейромереж використовувалися більш деталізовані категорії ризиків: критичний; високий; середній; низький; несуттєвий. Результати аналізу ризиків нейромережами наступні.

Чат-бот **Grok** з використанням моделі "**Grok 3**" у режимі "Think" ідентифікував 6 ризиків та надав їм категорії, які наведені у дужках до і після вжиття заходів впливу:

1. Зіпсування обладнання під час ремонту (середній/низький);
2. Травмування персоналу (високий/низький);
3. Пожежа або вибух (високий/середній);
4. Затримка в термінах ремонту (середній/несуттєвий);
5. Забруднення середовища (низький/несуттєвий);
6. Фінансові втрати (високий/низький).

Результати аналізу ризиків (також заходи впливу) моделлю "**Grok 3**" в порівнянні з ручним аналізом виявилися більш повними й обґрунтованими.

Бот **ChatGPT** з використанням моделі **GPT-4** (у моделі не використовується режим "Deep Research") ідентифікував 6 ризиків та надав їм категорії, які наведені у дужках до і після вжиття заходів впливу:

1. Пожежа через витік палива або масла під час демонтажу (високий/низький);
2. Ушкодження персоналу через падіння важких деталей (високий/низький);
3. Ураження електричним струмом під час випробування після ремонту (середній/несуттєвий);
4. Інтоксикація парами пального, мастила, мийних засобів (високий/низький);
5. Порушення стабільності судна через зсув вантажу або обладнання (середній/несуттєвий);
6. Вибух при запуску після капремонту внаслідок помилок складання (середній/низький).

Результати аналізу ризиків (також заходи впливу) моделлю "**GPT-4**" в порівнянні з результатами "**Grok 3**" виявилися менш повними та ідентифікований ризик "порушення стабільності судна через зсув вантажу або обладнання" навряд чи може оцінюватись як середній, якщо співвіднести вагу компонентів дизель-генератора з розмірами судна.

Бот **ChatGPT** з використанням моделі "**GPT-4.5**" та режиму "Deep Research" спочатку оцінив прогнозовані втрати з використанням назв категорій, які не відповідали Інструкції з аналізу ризиків. Але після зауваження виправив аналіз, ідентифікував 10 ризиків та надав їм категорії, які наведені у дужках до і після вжиття заходів впливу:

1. Падіння важких компонентів при підйомних роботах (високий/середній);
2. Руйнування двигуна, вихід генератора з ладу та потенційні травми через неправильну збірку деталей двигуна (високий/середній);
3. Пожежа через розливи пального чи масла під час ремонту (високий/середній);
4. Пожежа через виконання зварювальних або різальних робіт (високий/середній);
5. Ураження електричним струмом при роботі з електричними компонентами генератора (середній/середній);
6. Спотикання і падіння з травмами через слизькі або нерівні поверхні в машинному відділенні, а також нахил судна (високий/низький);
7. Теплове ушкодження персоналу через високу температуру повітря (середній/низький);
8. Захворювання дихальних шляхів та шкіри через контакт і вдихання парів пального, масла або хімікатів (середній/низький);
9. Зниження резервних потужностей судна та вплив на роботу критичних систем, наприклад, динамічного позиціонування (середній/низький);
10. Розтягування і травми м'язів спини через ручне переміщення важких агрегатів (середній/низький).

Такий аналіз можна вважати найбільш повним та обґрунтованим. Однак слід враховувати, що модель "GPT-4.5" може бути недоступною у безкоштовній версії ChatGPT.

Чат-бот **Gemini** з використанням моделі **"2.5 Flash"** та режиму **"Deer Research"** ідентифікував 7 ризиків та надав їм категорії, які наведені у дужках до і після вжиття заходів впливу:

1. Серйозна травма або смертельний випадок через падіння важких компонентів, ураження електричним струмом, небезпеки замкнутого простору, впливу небезпечних матеріалів, посковзування/спотикання/падіння, шуму/вібрації (критичний/високий);
2. Пожежа/вибух під час ремонту через витік палива/мастила, іскри від гарячих робіт, несправності електрообладнання, накопичення горючих парів (критичний/середній);
3. Пошкодження дизель-генератора через неправильне зберігання, падіння інструментів/деталей, неправильне збирання, забруднення систем (високий/середній);
4. Забруднення навколишнього середовища через розливи палива/мастила, неналежної утилізації відходів, викидів небезпечних речовин (критичний/середній);

5. Затримка завершення ремонту та простий судна (високий/низький);

6. Перевитрата бюджету (середній/низький);

7. Втрата репутації компанії через серйозні інциденти (високий/низький).

У такому аналізі ризики добре структуровані та найбільш добре пояснені. Проте деякі оцінки категорій ризиків можливо завищені за рахунок завищення категорій прогнозованих втрат.

Чат-бот **Claude** з використанням моделі "**Sonnet 4**" найбільш чітко дотримувався Інструкції з аналізу ризиків, ідентифікував 10 ризиків та надав їм категорії, які наведені у дужках до і після вжиття заходів впливу:

1. Втрата електроживлення судна під час демонтажу основного генератора через одночасний вихід з ладу інших генераторів (високий/низький);

2. Пожежа в машинному відділенні через розлив палива (високий/низький);

3. Травмування персоналу під час підйому важких компонентів дизель-генератора (високий/низький);

4. Пошкодження системи динамічного позиціонування через вібрації або відключення живлення (високий/низький);

5. Забруднення морського середовища розливом масел або палива (середній/низький);

6. Затримка в графіку робіт через непогоду або технічні проблеми (середній/низький);

7. Втрата остійності судна через переміщення важких компонентів (середній/низький);

8. Пошкодження інших систем судна через помилки при монтажі або підключенні (середній/низький);

9. Неправильна робота після ремонту через дефекти монтажу або налаштування (низький/несуттєвий);

10. Корозійне пошкодження через вплив морського середовища під час тривалих робіт (середній/низький).

Заходи впливу на ризики викладені лаконічно, але у достатньому обсязі. В цілому аналіз ризиків виконано на високому рівні, але як і у моделі "**Grok 3**" є сумнів, що ідентифікований ризик "втрата остійності судна через переміщення важких компонентів" може оцінюватися як середній, якщо співвіднести вагу компонентів дизель-генератора з розмірами судна.

Чат-бот **Qwen** з використанням моделі "**Qwen3-235B-A22B**" без режиму "Think" чітко дотримувався Інструкції з аналізу ризиків, ідентифікував 8 ризиків та надав їм категорії, які наведені у дужках до і після вжиття заходів впливу:

1. Ураження електричним струмом (середній/несуттєвий);
2. Пожежа або вибух (низький/несуттєвий);
3. Механічні травми (високий/низький);
4. Забруднення морського середовища (низький/несуттєвий);
5. Втрати працездатності дизель-генератора (середній/низький);
6. Отруєння або хімічний опік (низький/несуттєвий);
7. Перегрів двигуна після ремонту (низький/несуттєвий);
8. Вплив на здоров'я через шум і вібрацію (низький/низький).

Загалом модель виконала поставлене завдання, але надмірно лаконічно запропонувала заходи впливу. У моделі передбачено режим "Think", але у безкоштовній версії він має великі обмеження. Пробне використання цього режиму не покращило опис заходів впливу, але трохи уточнило оцінку категорій ризиків.

Чат-бот **DeepSeek** з використанням моделі "**DeepSeek-R1**" та режиму "Deep Think" спочатку виконав аналіз ризиків із порушенням вимог Інструкції з аналізу ризиків. Але після зауваження ідентифікував 5 ризиків та надав їм категорії, які наведені у дужках до і після вжиття заходів впливу:

1. Втрата електропостачання через вимкнення генератора під час ремонту (критичний/несуттєвий);
2. Пожежа/вибух під час робіт з паливною системою (високий/несуттєвий);
3. Падіння обладнання (високий/низький);
4. Пошкодження суднових систем при демонтажі (середній/несуттєвий);
5. Травми персоналу (високий/низький).

Такий аналіз ризиків, а також запропоновані заходи щодо впливу на ризики, найменш якісні порівняно з використанням інших моделей.

Чат-бот **Mistral AI** у безкоштовній версії не дозволив виконати аналіз ризиків оскільки не допускає завантаження більше одного файлу.

Порівняння способів та моделей нейромереж для аналізу ризиків конкретної судової операції свідчить, що використання нейромереж дозволяє:

- поглибити аналіз ризиків;

покращити структурування та опис ризиків;
запропонувати більш ефективні заходи щодо впливу на ризики;
більш точно оцінити категорії ризиків до та після запровадження заходів щодо впливу на ризики;
суттєво скоротити трудовитрати на аналіз ризиків.

Порівняння моделей нейромереж дозволило сформулювати їх умовний рейтинг для аналізу ризиків:

1. ChatGPT з використанням моделі "GPT-4.5" (модель стала доступна з березня 2025 року) та режиму "Deep Research";

2. Claude з використанням моделі "Sonnet 4" (модель стала доступна з травня 2025 року);

3. Grok з використанням моделі "Grok 3" у режимі "Think";

4. Gemini з використанням моделі "2.5 Flash" та режиму "Deep Research";

5. Qwen з використанням моделі "Qwen3-235B-A22B";

6. ChatGPT з використанням моделі GPT-4;

7. DeepSeek з використанням моделі "DeepSeek-R1" та режиму "Deep Think".

Рейтинг показує, що нові моделі дали результати, які перевершили результати раніше лідируючої моделі "Grok 3".

Оскільки на ринок нейромереж динамічно виводяться нові моделі, можна припустити, що рейтинг має тимчасовий характер і навіть у найближчому майбутньому з'являться нові моделі, які дозволять суттєво покращити аналіз ризиків на судах.

В даний час через можливі неточності у відповідях моделей нейромереж доцільно одночасно оцінювати ризики за допомогою декількох моделей та інтегрувати їх результати.

ЛІТЕРАТУРА REFERENCES

1. ISO 31000:2018 Risk management – Guidelines. Second edition. – Geneva: ISO copyright office. – 2018. – 24 p.

2. ДСТУ EN IEC 31010:2022. Керування ризиками – методи оцінки ризиків.

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

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

5. Kletz T. A. Hazop & Hazan: Identifying and assessing process industry hazards (4th ed.). – Rugby, UK: Institution of Chemical Engineers, 1999. – 232 p.

6. 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.

7. 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.

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

9. 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.

10. Carmen Gasparotti. The Assessment of the Marine Risks Based on the Formal Safety Assessment. //The Annals of "Dunarea de Jos". – Galati: University of Galati, 2022. – P. 91 – 98.

Abstract. Ship safety management systems involve hazard identification, risk assessment, and determination of measures for their elimination. In order to identify the capabilities of artificial intelligence tools for risk analysis on ships, a comparison of analysis results was performed using 7 models for the major overhaul operation of a CAT 3512C diesel generator on the self-elevating barge Jack Up Barge "Falcon Pearl".

The risk analysis results (including impact measures) from the "Grok 3" model compared to manual analysis proved to be more comprehensive and well-founded.

The risk analysis results (including impact measures) from the "GPT-4" model compared to "Grok 3" results proved to be less comprehensive and well-founded.

The risk analysis by the "GPT-4.5" model can be considered the most comprehensive and well-founded.

The risks identified by the "2.5 Flash" model are well-structured and best explained. However, some risk category assessments may be overestimated due to inflated predicted loss categories.

When using the "Sonnet 4" model, risk impact measures are presented concisely but in sufficient detail. Overall, the risk analysis was performed at a high level, but similar to the "Grok 3" model, there are doubts about the validity of one risk.

The "Qwen3-235B-A22B" model completed the assigned task but proposed impact measures too concisely.

When using the "DeepSeek-R1" model, the risk analysis as well as the proposed risk impact measures were of the lowest quality compared to using other models.

The comparison of neural network methods and models for risk analysis of a specific ship operation demonstrates that using neural networks allows for: deepening risk analysis; improving risk structuring and description; proposing more effective risk impact measures; more accurately assessing risk categories before and after implementing risk impact measures; significantly reducing labor costs for risk analysis.

It was concluded that due to possible inaccuracies in neural network model responses, it is advisable to simultaneously assess risks using several models and integrate their results.

УДК 004.5:004.67

DOI: 10.31653/1819-3293-2025-1-30-52-65

ARTICLE HISTORY

Received 11.04.2025

Accepted 07.05.2025

Михайленко Владислав Сергійович¹, Гвоздева Ірина Маратівна²,
Харченко Роман Юрійович³
Національний університет "Одеська морська академія"
vladmihailen@gmail.com¹, onopchenko.im@gmail.com²,
romannn30@gmail.com³

Суднова система моніторингу параметрів насосного обладнання, діюча на основі технології інтернет речей

Vladislav Mikhailenko¹, Iryna Hvozdeva², Roman Kharchenko³
NU "Odessa Maritime Academy", Odessa, Ukraine
vladmihailen@gmail.com¹, onopchenko.im@gmail.com²,
romannn30@gmail.com³

Ship system for monitoring parametrs of pumping equipment dased on internet of things technology

***Резюме** – Наведено аналіз перспективних технологій Інтернет речей з метою інтеграції з судновими системами моніторингу, діагностики та управління. Показано прерогативу клієнт – серверної архітектури для віддаленого контролю технологічних параметрів суднових механізмів на автономних та традиційних судах. Вказано, що актуальним напрямком забезпечення безпечної експлуатації суднових систем є розвиток методів інтелектуальної діагностики. Авторами запропоновано експертну систему, що реалізує методи інтелектуального аналізу даних для визначення ймовірності відмови елементів суднового насосного обладнання. Система діагностики реалізована за допомогою програми Orange Date Mining. Апробація представленої програми демонструє її ефективність та можливість впровадження до суднових інтегрованих систем контролю та управління діючих на основі технологій Інтернет-речей.*

Summary – *The paper presents an analysis of promising Internet of Things technologies for possible integration with ship monitoring, diagnostics and control systems. The prerogative of client-server architecture for remote control of technological parameters of ship mechanisms on autonomous and traditional vessels is shown. It is indicated that the current of ensuring of ship systems safe operation is the development of intelligent diagnostics methods. The authors propose an expert system that implements data mining methods to determine the probability of failure of ship pumping equipment elements. The diagnostic system is implemented using the Orange data mining program. Testing of the presented program demonstrates its effectiveness and the possibility of implementation in ship integrated monitoring and control systems operating on the basis of Internet of Things technologies.*

Розробки та експерименти в галузі автономної навігації розпочалися у 2012 році з дослідницького проекту MUNIN (Maritime Unmanned Navigation through Intelligence in Networks – Морська безпілотна навігація з використанням інтелектуальних мережевих технологій) [1]. На даний час експерименти в області автономної навігації проводяться компаніями Rolls-Royce, Holdings, Kongsberg (судно Yara Birkeland), Sitronics, Nippon, Yusen, Sea Machines Robotics, Wärtsilä, Samsung Heavy Industries [2].

Світовий ринок автономних суден здійснює прорив у сфері морських перевезень завдяки досягненням у галузі штучного інтелекту та робототехніки, обіцяючи більш безпечне та ефективне управління. Прагнення до автономного судноплавства обумовлене кількома чинниками: пошуком ефективних рішень у галузі судноплавства, необхідністю зменшити нестачу робочої сили та експлуатаційні витрати, підвищити рівень технологічної та екологічної безпеки. Розробники автономних суден працюють над проблемами оптимізації їх маршрутів, зниження витрат палива та ризику аварій, що призведе до економічної ефективності. Прогнози вказують на зростання обсягу інвестицій у розробку автономних суден з \$4,1 млрд у 2022 році до \$8,4 млрд до 2030 [3].

Разом з тим слід зазначити що, незважаючи на перспективи, ринок автономних суден стикається з нормативними та технологічними перешкодами. Розробка комплексних технологій, інтелектуальних методів, алгоритмів та стандартів їх впровадження на автономних судах має вирішальне значення для забезпечення безпечної та ефективної експлуатації. Можна відзначити, що інтеграція нових технологій, таких, як інтелектуальні помічники (чати GPT, Gemini та

ін.), Інтернету речей, може дозволити покращити можливості управління та пошуку несправностей, відкриваючи шлях інтеграції до глобальної інтелектуальної системи моніторингу та управління судноплавством загалом.

Відомо, що система Інтернету Речей або Internet of Things (IoT) – це мережа речей, які підключені до мережі Інтернет. Ці речі включають IoT-пристрої і фізичні об'єкти. За допомогою систем Інтернету речей IoT можна отримувати інформацію про доступність обладнання, його технічний стан, завантаження, технологічні порушення, графік технічного обслуговування тощо [4]. Промисловий Інтернет речей дозволяє оперативно, в режимі реального часу, отримати інформацію з усього обладнання на підприємстві, оперативно розрахувати коефіцієнти корисної дії обладнання та енергоспоживання, а із застосуванням методів інтелектуального аналізу даних та апарату нейронних мереж спрогнозувати графік планово-попереджувальних ремонтів та оптимальне завантаження.

З огляду на перспективність використання технології Інтернету речей у суднових системах моніторингу, управління та діагностики представляється актуальним аналіз можливих системних рішень щодо впровадження IoT на судах, а також розробка інтелектуальної системи прийняття рішень для діагностики технологічного обладнання на судні.

Аналіз технологій IoT для впровадження на автономних та традиційних судах.

У структурі судової системи Інтернету речей можна умовно виділити чотири частини: мікропроцесорна система збору даних (програмовані логічні контролери (ПЛК)), система мережевої взаємодії, система зберігання даних (база даних), система диспетчерського управління і збору даних (SCADA) компанії судновласника (рис. 1).

Система зберігання даних передбачає створення баз даних або використання хмарних сервісів. Розумні пристрої (інтелектуальні датчики) генерують дані і передають їх за допомогою каналів зв'язку до серверу, а потім вони потрапляють у додаток користувача (оператора). Виміряні дані часто відправляються в хмару для більш довгострокового зберігання, резервного копіювання або глибокого аналізу.

Система управління та моніторингу - це комплекс додатків, що дозволяють працювати з даними в режимі реального часу. Система має вміти підключатися до розумного пристрою через канали зв'язку, задавати параметри роботи, збирати інформацію зі сховища даних,

обробляти інформацію та видавати поради оператору суднових агрегатів.

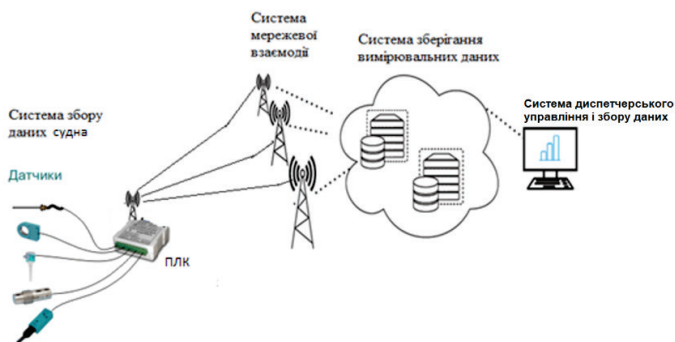


Рис. 1. Структура технології Інтернет речей на судні

Кінцевим елементом системи Інтернету речей є ПЛК, до якого підключені датчики (Д) та пристрої управління (ПУ). Через дротовий або бездротовий інтерфейс контролер взаємодіє із сервером, як правило, за мережевим протоколом прикладного рівня HTTP (рис. 2).

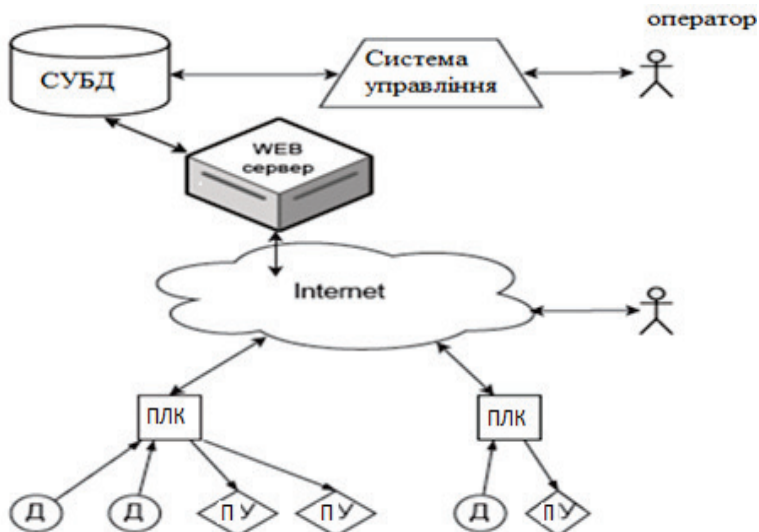


Рис. 2. Суднова система IoT в архітектурі "клієнт-сервер"

У клієнт-серверному варіанті на клієнті потрібно реалізувати всі мережеві рівні та алгоритми обробки збоїв, що неминуче ускладнює програмне забезпечення ПЛК. Замість розробки програмного забезпечення для Інтернету речей, автори пропонують, скористатися готовими платформами IoT для підключення та керування пристроями та з'єднаннями. Це дає можливість створити власну судову мережу розумних пристроїв за лічені дні та масштабувати її [5].

Важливим напрямком у сфері безпечної експлуатації автономних та звичайних суден є розвиток методів інтелектуальної діагностики судових механізмів та агрегатів. Процес інтелектуального діагностування включає в себе моніторинг робочих параметрів судових механізмів за допомогою датчиків та логічне порівняння отриманих даних з еталонними значеннями.

Діагностування здійснюється в режимі функціонування об'єкта або при тестовому впливі на об'єкт. У процесі інтелектуального діагностування можна отримати результат про працездатність об'єкта. Більш складним завданням є визначення місцезнаходження несправності. Це досягається спеціальними методами та способами пошуку несправностей, що реалізуються алгоритмами діагностування.

Для вирішення поставленого завдання – впровадження інтелектуальних засобів діагностування у судові технології IoT, автори використовують метод, що реалізує ієрархічний принцип. У цьому методі функціональні елементи пристрою розбиваються на кілька груп, при цьому вихідні параметри кожної групи порівнюються з індикатором несправності, що дає змогу оперативно визначити несправний елемент або вузол судового механізму.

Аналіз причин несправності роботи судового насосного обладнання.

Суднові відцентрові циркуляційні насоси призначені для прокачування забортної або прісної води через різні теплообмінні апарати судових систем: водяні та масляні холодильники, охолоджувачі повітря тощо.

Під час експлуатації неминуче постає питання: як виконати технічне обслуговування циркуляційних насосів та ремонт, щоб вони продовжували працювати стабільно та безвідмовно.

Діагностування циркуляційних насосів – це дії, які повинні виконуватися не тільки при першому пуску, але й при кожному плановому та позаплановому ремонті, при кожному запуску після періоду бездіяльності та, звичайно, при підозрі на несправність.

Діагностування циркуляційних насосів виконується з допомогою спеціального устаткування (рис. 3 - 4).



Рис. 3. Замір опору ізоляції двигуна

Під час перевірки насос примусово працює на межі допустимої потужності. Протягом усього періоду експлуатації бажано періодично проводити сервіс циркуляційних насосів водопостачання:

- місця приєднання перевіряються на предмет протікання;
- візуально перевіряється наявність та стан заземлення;
- звук працюючого двигуна не повинен супроводжуватися брязкотом або ударами, сторонніми звуками;
- двигун не повинен сильно вібрувати.

Разом з тим, розробка експертної системи допомоги судновим офіцерам для своєчасного виявлення причин відмови насосного обладнання та впровадження механізмів його контролю та діагностування у технологію IoT є актуальним науково-прикладним завданням. Для його вирішення використовується спеціалізований програмний пакет Orange [6 – 8].

Аналітична система Orange – це програма з відкритим вихідним кодом для машинного навчання та візуалізації даних, що має великий набір дослідницьких функцій.

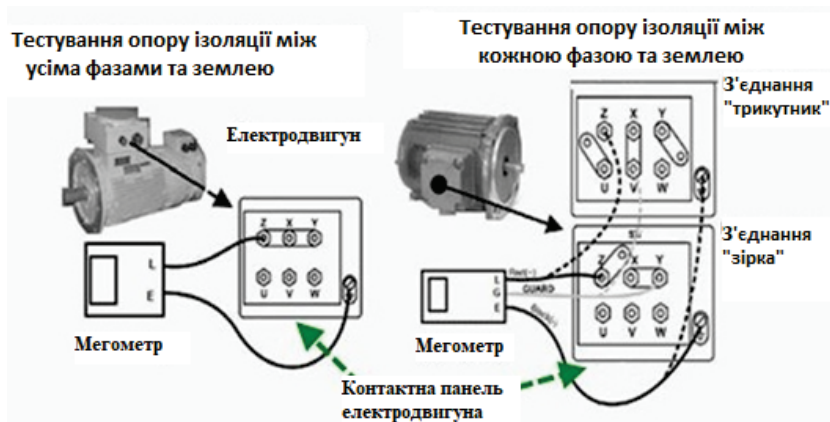


Рис. 4. Схема підключення приладу до двигуна насоса

Створення експертної системи для пошуку несправності суднового насосного обладнання в програмі Orange

Програмний продукт Orange, що розробляється Лабораторією біоінформатики Люблянського університету, призначений для інтелектуального аналізу даних, статистичних досліджень та візуалізації даних [9]. Програма реалізує метод теорії прийняття рішень – дерево рішень. Дерево прийняття рішень (також називають деревом класифікації або регресійним деревом) – засіб підтримки прийняття рішень, що використовується в машинному навчанні, аналізі даних та статистиці. Структура дерева – це "листя" та "гілки". На ребрах ("гілках") дерева рішення записані ознаки, від яких залежить цільова функція, на "листях" записані значення цільової функції, а інших вузлах — ознаки, за якими відрізняються випадки. Щоб класифікувати новий випадок, треба спуститись по дереву до листа і видати відповідне значення [10]. Подібні дерева рішень широко використовують у інтелектуальному аналізі даних. Мета полягає в тому, щоб створити модель, яка передбачає значення цільової змінної на основі декількох змінних на вході. Кожен лист є значенням цільової змінної, зміненої в ході руху від кореня по ребрах дерева до листа. Кожен внутрішній вузол зіставляється з однією з вхідних змінних. При інтелектуальному аналізі даних дерева рішень можуть бути використані, як математичні, так і обчислювальні методи, щоб допомогти описати, класифікувати і узагальнити набір даних, які можуть бути записані наступним чином:

$$(x, Y) = (x_1, x_2, \dots, x_n, Y).$$

Залежна змінна Y є цільовою змінною (стан насосу і двигуна), які необхідно проаналізувати, класифікувати та узагальнити. Вектор x складається з вхідних змінних, які вимірюють за допомогою датчиків – x_n (температура, тиск, вібрація, опір), що використовуються для виконання завдань діагностування. Для аналізу вхідної інформації складено програму бінарної класифікації з алгоритмом дерева рішень (рис. 5)

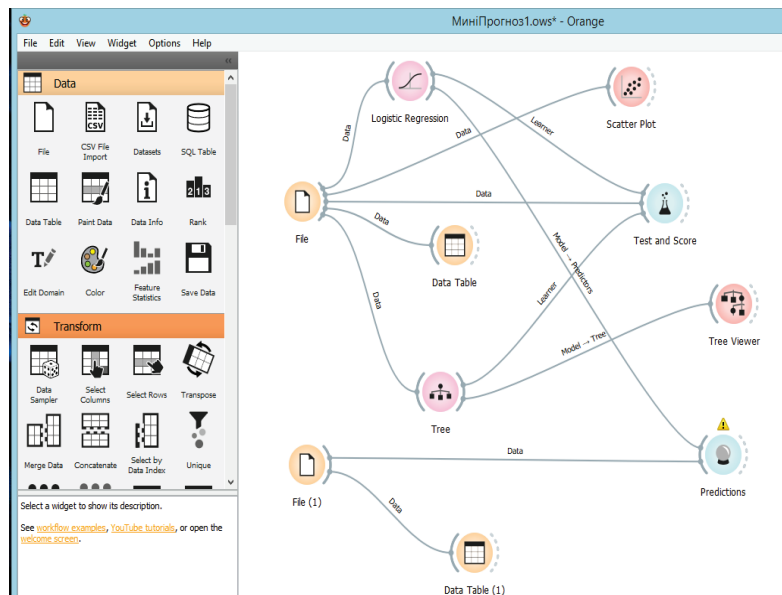


Рис. 5. Програма пошуку причин несправності суднового насосного обладнання

На початковому етапі була розроблена база даних (рис. 6) на основі інформації щодо допустимих робочих характеристик елементів насоса та його електродвигуна.

Для перегляду бази даних використовується програмний модуль Data Table (див. рис. 6).

Як робочі параметри для діагностування несправностей використовуються температура корпусу насоса, тиск води, рівень вібрації та опір обмоток ізоляції двигуна.

Data Table - Orange						
Info						
11 instances (no missing data)						
4 features						
Target with 2 values						
No meta attributes						
Variables						
☒ Show variable labels (if present)						
☐ Visualize numeric values						
☒ Color by instance classes						
Selection						
☒ Select full rows						
насос	Темпер корпус	Тиск	Вибрація	Опір обмотки		
1 двигун	90	10	9	5		
2 насос	110	8	12	15		
3 двигун	120	10	7	3		
4 насос	115	6	10	12		
5 двигун	80	9	6	2		
6 насос	121	3	10	10		
7 двигун	100	8	7	3		
8 насос	80	8	15	15		
9 двигун	120	10	7	5		
10 насос	115	1	15	12		
11 двигун	116	5	6	4		

Рис. 6. Фрагмент бази даних характеристик насоса та двигуна

На рис. 7 можна побачити розподіл даних вимірювання для початкової класифікації.

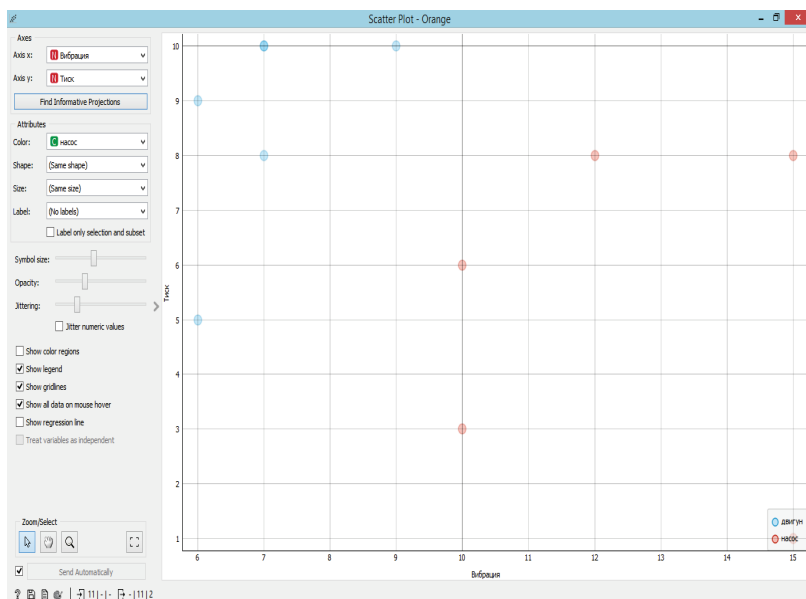


Рис. 7. Розподіл значень вимірювальних параметрів насосу за рівнем вібрації та тиску

З метою побудови дерева рішень або експертної системи використовується модуль Test and Score (див. рис. 5) для оцінки якості моделі, з граничним значенням розрахунку – 83 %. Показник адекватності моделі $AUC = 0,83$ (рис.8).

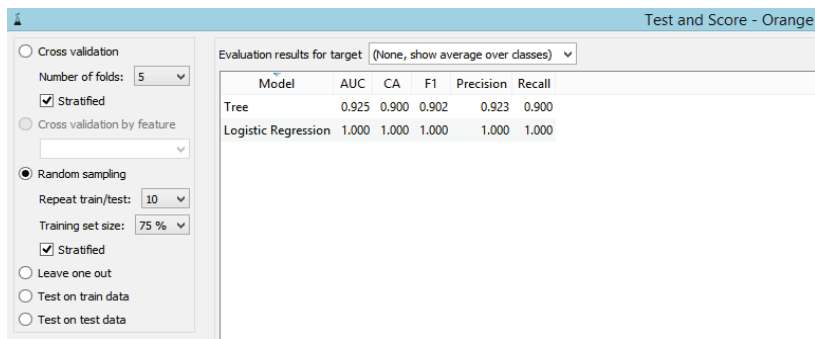


Рис. 8. Модуль Test and Score (аналіз якості моделі класифікації)

Показник AUC (Area Under the ROC Curve) – це міра, яка дозволяє підсумовувати продуктивність моделі одним числом, вимірюючи площу під кривою ROC. AUC коливається від 0 до 1, де більш високе значення AUC вказує на більш високу ступень адекватності отриманої математичної моделі дерева рішень [11].

Розроблене програмою дерево рішень для класифікації причин несправності представлено на рис. 9.

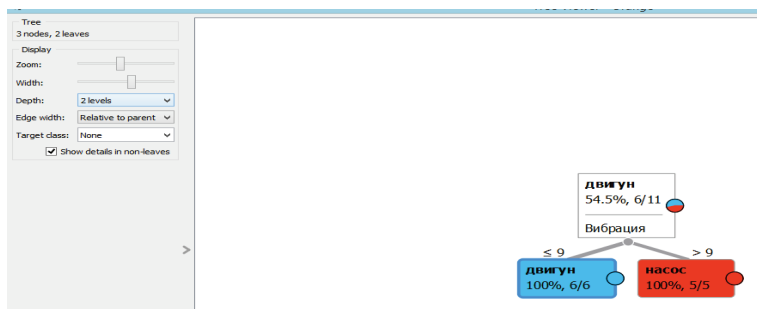


Рис. 9. Фрагмент дерева рішень бінарної класифікації відмови двигуна або насоса в залежності від вимірювальних параметрів (рівня вібрації)

В якості критерію процесу діагностування була обрана вібрація. Рівень вібрації насосних агрегатів є важливим параметром прогнозування терміну їхньої служби. Це також важливий критерій для оцінки якості насоса. З вказаних вище причин, серед інших, слід враховувати рівень вібрацій як один із факторів, що впливають на роботу насоса.

Можуть бути виміряні різні параметри вібрації, але як основа для оцінки динамічного стану зазвичай використовується середньоквадратичне значення віброшвидкості, виражене в мм/с. Це фізична величина, пов'язана із кінетичною енергією коливань. Відповідно до стандарту PN-ISO 10816-1 вимірювання зазвичай проводяться на корпусах підшипників, у двох напрямках - взаємно перпендикулярних і перпендикулярних валу.

Для отримання більш повного аналізу даних був використаний блок логістичної регресії (Logistic Regression) [12]. Блок реалізує функцію прогнозу віднесення нових даних від датчиків до класу несправності двигуна або насоса (рис. 10).

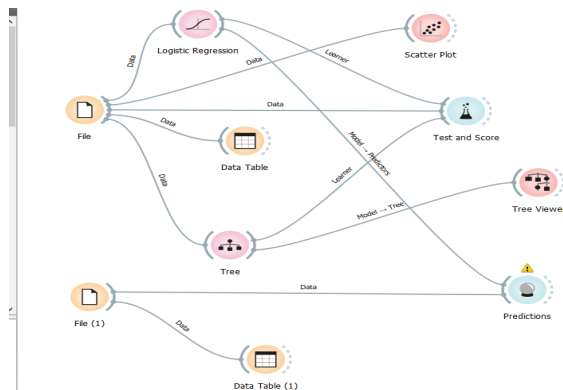


Рис. 10. Програма класифікації з функцією прогнозування причини відмови обладнання

Показник AUC прогновної логістичної регресії дорівнює 0,7, тобто точність прогнозу по пошуку причин несправності у двигуні або насосі дорівнює 70 % (рис. 11).

☐ Cross validation Number of folds: 5 ☒ Stratified ☐ Cross validation by feature ☐ Random sampling Repeat train/test: 10 Training set size: 75 %		Evaluation results for target (None, show average over classes)					
		Model	AUC	CA	F1	Precision	Recall
		Tree	0.853	0.786	0.775	0.809	0.786
		Logistic Regression	0.707	0.686	0.687	0.689	0.686

Рис. 11. Показники точності використовуваних математичних моделей

Для перевірки ефективності прогнозу було проведено експеримент із пред'явленням експертної системи файлу з новими вимірювальними даними (тестовими) (рис. 12). Програма дозволяє визначити відмову електродвигуна або насосу при врахуванні наступних параметрів: температури корпусу насоса, тиску води, рівня вібрації та опору обмоток ізоляції двигуна.

На основі вхідних значень експертна програма яка реалізує логістичну регресію вказує на відмову двигуна (рис.12).

Predictions - Orange						
Show probabilities for	(None)	Shown regression error:		Absolute difference		
Logistic Regression	Діагноз	Темпер	Тиск	Вибрац	Опір	
1 двигун	?	110	7	8	11	

Рис. 12. Дані визначення ймовірності віднесення до одного з класів відмови (двигун)

Висновки

Запропонована система аналізу вимірюваних даних на прикладі судового насосного обладнання з допустимим ступенем ймовірності оперативно виявляє причину відмови. Програма використовує методи дерева рішень та логістичну регресію. Оснащення системи моніторингу мікропроцесорними інтелектуальними датчиками з функцією віддаленого доступу бездротовою мережею дозволить впровадити механізм Інтернету речей для визначення технічного стану судового обладнання. Як продовження дослідження авторами передбачається надалі розробка експертної системи пошуку

несправності конкретного елемента насосного обладнання залежно від вхідних параметрів, наприклад, пошук причини несправності за рівнем вібрації (прогнугий вал, проблеми з підшипниками, дисбаланс робочого колеса і т.д.). Таким чином, віддалений моніторинг дозволяє своєчасно виявляти причини несправності суднових механізмів та запобігати аварійним ситуаціям.

ЛІТЕРАТУРА REFERENCES

1. Maritime Unmanned Navigation through Intelligence in Networks [Електронний ресурс]. — Режим доступу: <https://cordis.europa.eu/project/id/314286/reporting> (дата звернення: 12.02.2025).
2. Майбутнє морських перевезень [Електронний ресурс]. — Режим доступу: <https://www.dsnews.ua/ukr/future/budushchee-morskih-perevozok-norvegiya-spuskaet-na-vodu-pervoe-avtonomnoe-gruzovoe-sudno-03092021-435366> (дата звернення: 14.02.2025). — Назва з екрана.
3. Autonomous Ships Market Size [Електронний ресурс]. — Режим доступу: <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/autonomous-ships-market> (дата звернення: 15.02.2025).
4. Simplify IoT device management and visualization [Електронний ресурс]. — Режим доступу: <https://thethings.io/> (дата звернення: 16.02.2025).
5. Системи штучного інтелекту: навч. посіб. / Н. Б. Шаховська, Р. М. Камінський, О. Б. Вовк. — Львів: Вид-во Львівської політехніки, 2018. — 346 с.
6. Data Mining Fruitful and Fun [Електронний ресурс]. — Режим доступу: <https://orangedatamining.com/> (дата звернення: 17.02.2025).
7. Михайленко, В. С., Гунченко, Ю. О., Мартинович, Л. Я. Інтелектуальний аналіз даних з допомогою спеціалізований програми Orange // Збірник тез доповідей матеріалів 19 МНК "Військова освіта і наука" м. Київ, КНУ ім Т.Г. Шевченка. —2023. — С. 47 – 50.
8. Коваленко, І. О., Михайленко, В. С. Комплексна модель тестування систем інтернету речей. Інформаційні технології: моделі, алгоритми, системи (ITMAS – 2023): Матеріали IV Всеукраїнської науково-практичної інтернет конференції (30-31 жовтня 2023 р.). — Миколаїв: НУК імені адмірала Макарова, 2023. — С. 43 - 45.
9. Михайленко, В. С. Комп'ютерно-інтегровані системи управління організаційно-технологічними комплексами. — Одеса: НУОМА, 2024. — 162 с.

9. Левінський, М. В. Віддалене управління технологічними процесами: навчальний посібник. – Одеса: НУОМА, 2020. – 108 с.

10. Пупена, О. М., Ельперін, І. В. Програмування промислових контролерів у середовищі Unity Pro: підручник / За ред. О. М. Пупени. – К.: Ліпа-К, 2021. – 376 с.

11. Mikhailenko, Vladislav Sergeevich, Kharchenko, Roman Yurievich, Leshchenko, Valery Vladislavovich Fuzzy method of approximating values of parameters of dynamic models of ship boilers // Автоматизація суднових технічних засобів: наук.-техн. зб. – 2023. – Вип. 28. – Одеса: НУОМА. – С. 121 – 131.

Abstract – the article examines modern approaches to monitoring ship pumping equipment using Internet of Things (IoT) technology. It is noted that the global market for autonomous shipping is actively developing due to artificial intelligence, robotics, and automation. The main objective of the study is to analyze potential system solutions for the implementation of IoT in ship monitoring and control systems, as well as to develop an intelligent diagnostic system for ship technological equipment.

Structurally, the ship IoT system consists of four main elements: a microprocessor-based data collection system, network interaction, an information storage system, and a management and monitoring system. Data obtained from intelligent sensors is processed in cloud storage or databases, enabling deep analysis and failure prediction. The use of IoT technologies in ship systems enhances management efficiency, ensures rapid response to equipment failures, and optimizes maintenance processes.

The article analyzes methods of intelligent diagnostics for ship mechanisms based on logical comparison of received data with reference values. The authors propose the use of a hierarchical classification principle for functional device elements, allowing the identification of a faulty component or node of the pumping equipment. Special attention is given to the application of the decision tree method for fault detection, as well as the implementation of predictive logistic regression to improve data analysis accuracy.

The proposed measurement data analysis system enables the prompt identification of ship pumping equipment failures with an acceptable level of probability. The use of microprocessor-based intelligent sensors with remote access functionality via a wireless network facilitates the full integration of IoT technology in shipping. A promising area for further research is the development of an expert system for identifying specific pump equipment failures, which will ensure the safe and uninterrupted operation of ship systems.

УДК 004.5:004.67

DOI: 10.31653/1819-3293-2025-1-30-66-78

ARTICLE HISTORY

Received 11.04.2025

Accepted 07.05.2025

Михайленко Владислав Сергійович¹, Харченко Роман Юрійович²
Національний університет "Одеська морська академія"
vladmi hailen@gmail.com¹, romannn30@gmail.com²

Нечітка експертна система моніторингу технічного стану суднових дизелів

Vladislav Mykhailenko¹, Roman Kharchenko²
NU "Odessa Maritime Academy", Odessa, Ukraine
vladmi hailen@gmail.com¹, romannn30@gmail.com²

Fuzzy expert system for monitoring the technical condition of ships diesel engines

Резюме. Розглянуто процес розробки нечіткої експертної системи моніторингу технічного стану суднових дизельних двигунів. Запропонована система використовує базу знань і механізми нечіткої логіки для діагностики несправностей, що підвищує ефективність технічного обслуговування суднових енергетичних установок і забезпечує надійність їх експлуатації. Систему реалізовано в математичному пакеті Matlab (FLT) та хмарному середовищі Google Colab. За результатами експерименту представлено програмний код із відповідними рекомендаціями для оператора. Апробація розробленої системи підтвердила її ефективність і перспективність упровадження в системи моніторингу суднового енергетичного обладнання.

Summary. This publication discusses the development of a fuzzy expert system for monitoring the technical condition of marine diesel engines. The proposed system utilizes a knowledge base and fuzzy logic mechanisms to diagnose faults, thereby improving the efficiency of maintenance for marine power plants and ensuring operational reliability. The system is implemented using the Matlab (FLT) mathematical package and the Google Colab cloud environment. Based on the experimental results, the program code is presented along with corresponding recommendations for the system

operator. The testing of the developed system confirms its effectiveness and its potential for integration into marine power equipment monitoring systems.

Аналіз процесів експлуатації суднових енергетичних установок показує, що найчастіше відмова обладнання пов'язана з судновими дизельними агрегатами (СД) головних і допоміжних установок. При цьому 60 – 90 % всіх відмов припадає на дизелі і допоміжні системи, що їх обслуговують [1]. З представленого обсягу від 15 до 25 % припадало на судові дизель-генератори (СДГ) [2].

У зв'язку з цим аналіз сучасних наукових методів та алгоритмів діагностики параметрів СД є актуальним науковим завданням. В даний час у суднових системах контролю та моніторингу агрегатів СЕУ, зокрема компанії Kongsberg, використовується значна кількість спеціальних програмних засобів контролю та виведення повідомлень про аварійні ситуації [3]. Разом з тим, практика показує, що необхідно вдосконалення наявних та розробка нових практичних методів, які б забезпечували більш ефективний контроль та прогноз можливих ризиків виходу з ладу обладнання СД.

Одним із можливих наукових напрямів, що сприяють підвищенню якості процесів контролю та діагностики технічного стану СД, можна вважати запровадження експертних систем (ЕС), зокрема працюючих на основі теорії нечіткої логіки [4, 5]. Дані експертні системи успішно зарекомендували себе під час діагностики широкого ряду технічних систем. Головною відмінністю даних інтелектуальних систем є використання досвіду, знань та інтуїції експертів (технічних фахівців із ремонту та обслуговування СД).

Основна труднощі у створенні інтелектуальної ЕС для СД у тому, що експлуатація судового обладнання характеризується суттєвою невизначеністю. Це пов'язано характерними для морської експлуатації факторами: хитавиця, вплив людського фактора, необхідність здійснення маневрів і пов'язані з цим змінні режими навантаження роботи СД. Для визначення технічного стану елементів СД доцільним є застосування апарату нечіткої логіки, що дозволяє працювати з існуючою невизначеністю, неповнотою та нечіткістю інформації. Так, на думку ряду авторів [6 - 8] у моделі нечіткої експертної системи для визначення технічного стану СДГ входними змінними є опір ізоляції, повна потужність, температура обмотки статора, температура обмотки ротора, температура підшипника, вібрація генератора, зміна кольору вихлопних газів дизеля, зміна температури охолоджуючої води та тиску мастила у дизелі, збільшення подачі палива на базових режимах.

Виходом параметром є технічний стан СД та його підсистем у вигляді нечітких множин ("не задовільний", "задовільний", "добрий", "дуже добрий") та рекомендації щодо подальшої експлуатації та обслуговування.

Умови експлуатації суднових дизелів, на відміну стаціонарних, характеризуються нестабільністю. Це пов'язано з низкою факторів, характерних для морської експлуатації: бортова, кильова та вертикальна хитація; змінні вологість, температура та тиск навколишнього середовища; необхідність здійснення маневрів та пов'язані з цим змінні навантажувальні режими; частий перехід різні сорти палива: від легкого дизельного до важкого; вплив людського чинника. Враховуючи об'єктивно існуючу невизначеність, неповноту та нечіткість інформації про об'єкт при розробці бази знань та механізмів виведення експертних систем, доцільно, на думку авторів, використовувати апарат нечіткої логіки, що дозволяє об'єктивно оцінити технічний стан та більш обґрунтовано приймати рішення щодо управління ремонтом суднового обладнання (рис. 1).

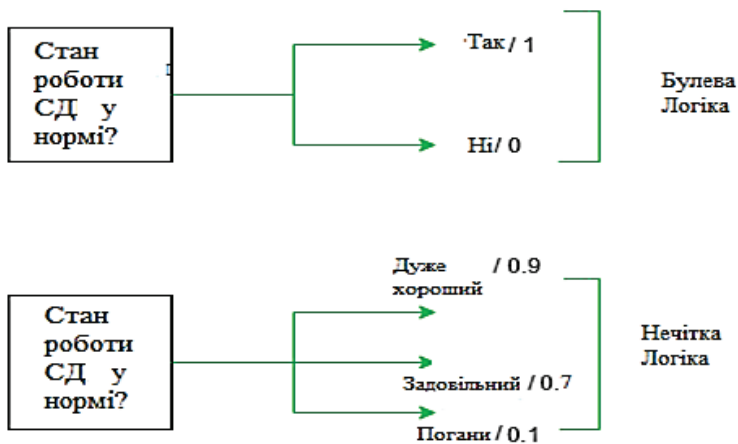


Рис. 1. Порівняння нечіткої логіки з булевою

Розробка нечіткої експертної системи

Архітектура роботи системи нечіткої логіки має наступні частини (рис. 2).

1. База ПРАВИЛ: містить набір правил та умови, надані експертами для управління системою прийняття рішень на основі лінгвістичної інформації. Останні розробки в теорії нечітких теорій пропонують

кілька ефективних методів для проектування та настройки нечітких контролерів. Більшість із цих розробок зменшують кількість нечітких правил.

2. Фази́фікація: використовується для перетворення входів, тобто чітких чисел, в нечіткі набори.

3. Блок Виводу: визначає ступінь узгодження поточного нечіткого вводу щодо кожного правила.

4. Дефази́фікація: використовується для перетворення нечітких множин у чітке значення. Доступно декілька методів дефази́фікації, і найкращий із них використовується із спеціальною експертною системою для зменшення помилки (рис. 2).

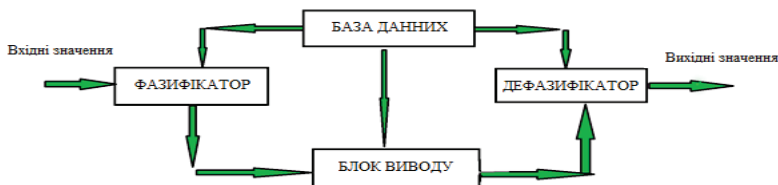


Рис. 2. Структура нечіткої експертної системи діагностики технічного стану СД

З урахуванням вищесказаного за допомогою Fuzzy Logic Toolbox пакета програм MATLAB була складена система підтримки прийняття рішень для операторів судна.

Етап розробки ЕС технічного стану елементів суднового дизеля.

Для визначення інформаційної цінності параметрів роботи такого складного технічного об'єкта, як судновий дизель, може бути використаний критерій інформативності K_i , що визначається за виразом [9]:

$$K_i = I_x K_z,$$

де I_x - кількість інформації про стан двигуна, що визначається технічними параметрами дизеля; K_z - значущість (вага) параметра.

У табл. 1 наведено значення критерію інформативності для деяких суднових дизелів. Наведені вихідні параметри за значеннями K_i можуть бути умовно поділені на три групи: високоінформативні $K_i = (1,0 \div 0,3) K_{i\text{макс}}$; середньої інформативності $K_i = (0,3 \div 0,03) K_{i\text{сер}}$; низької інформативності $K_i < 0,03 K_{i\text{низ}}$.

Основні контрольовані параметри СД, які використовуються для аналізу у ЕС представлені в табл. 1

Таблиця 1

Параметри суднового дизеля MAN B&W 8L28/32 з високою інформативністю [9]

Параметри	Межі роботи параметрів
Тиск води контуру прісного охолодження	не нижче 2,4 бар
Тиск мастила	не нижче 3,5 бар
Тиск палива	не нижче 3,0 бар
Температура води контуру високої температури	не більше 90 ° С
Температура мастила дизель-генератора	не більше 80 ° С
Температура підшипників колінчатого вала	до 100 ° С
Різниця температури вихлопних газів щодо встановленої	не більше $\pm 50^{\circ}\text{C}$
Тиск пускового повітря	не нижче 15 бар

Етап фазифікації вхідних та вихідних параметрів у програмі Fuzzy Logic Toolbox пакету MATLAB (версія online) (рис. 3) [9].

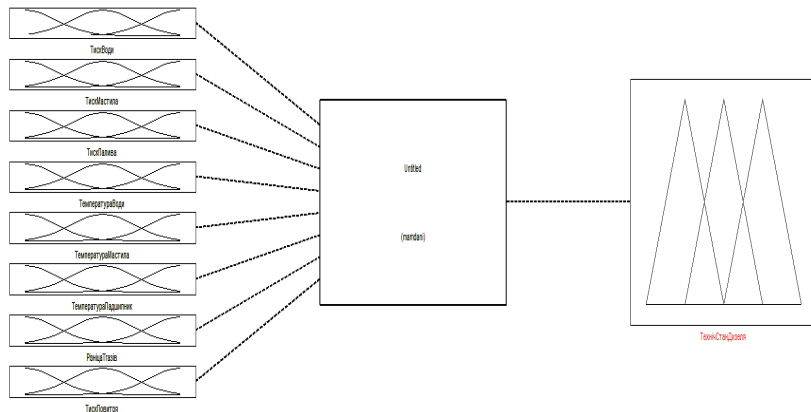


Рис. 3. Вікно інтерфейсу розробки ЕС діагностики технічного стану СД

При формуванні виведення були задані такі відносини щодо загального стану дизеля:

від 0 до 25 % – рівень технічного стану дизеля "дуже низький". Потрібно виведення обладнання з експлуатації для запобігання аварії;

від 25 до 50 % – рівень технічного стану "низький". Потрібне технічне обслуговування (заміна підшипників, перевірка стану паливної апаратури і т.д.), рекомендується тимчасове виведення обладнання з ладу;

від 50 до 75 % – рівень "нормальний". Потрібне технічне обслуговування (ревізія, огляд, перевірка стану вузлів) без виведення ладу;

від 75 до 85 % – рівень технічного стану «вищий за нормальний». Через певний інтервал часу роботи потрібна обробка нових даних, отриманих під час додаткової діагностики.

від 85 до 100 % – рівень "дуже високий". Дизель знаходиться в робочому стані, жодних додаткових дій, крім запису показань системи, не потрібно.

Також, для отримання більш достовірної інформації рекомендується проведення позарегламентних вимірювань. Це пов'язано з визначенням можливих неконтрольованих, в момент попереднього виміру, несправностей, які опосередковано впливають на значення основних контрольованих параметрів;

Етапи процесу вибору типу функцій належності та інтервалу вимірювань контрольованих параметрів роботи суднового дизеля (вхідних та вихідного ЕС) показані на рис. 4 - 10.

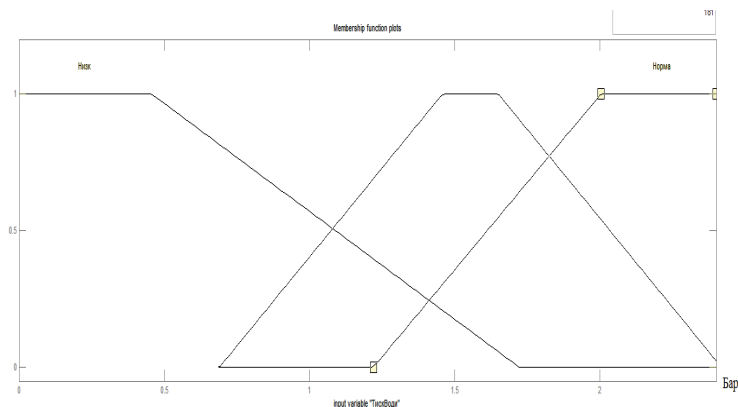


Рис. 4. Функції належності змінної "Тиск води на охолодження"

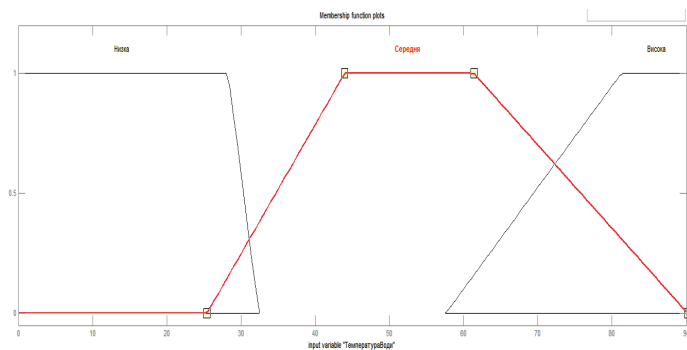


Рис. 5. Функції належності вхідного параметра "Температура води, що охолоджує дизель"

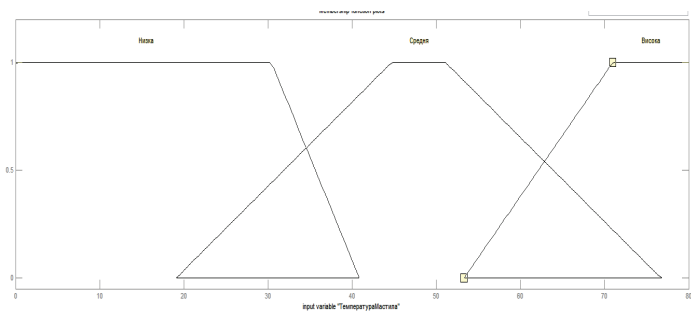


Рис. 6. Функції належності вхідного параметра "Температура мастила"

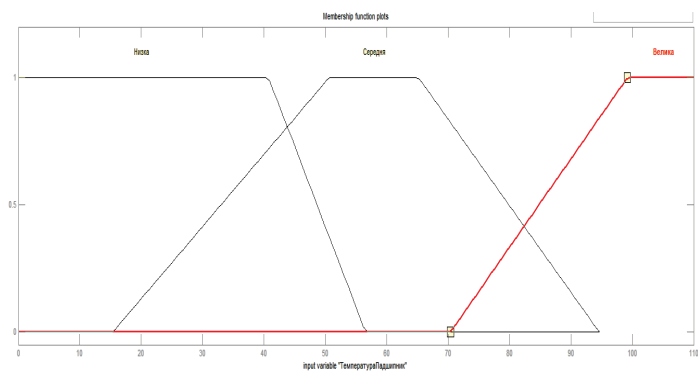


Рис. 7. Функції належності вхідного параметра "Температура підшипників на валу"

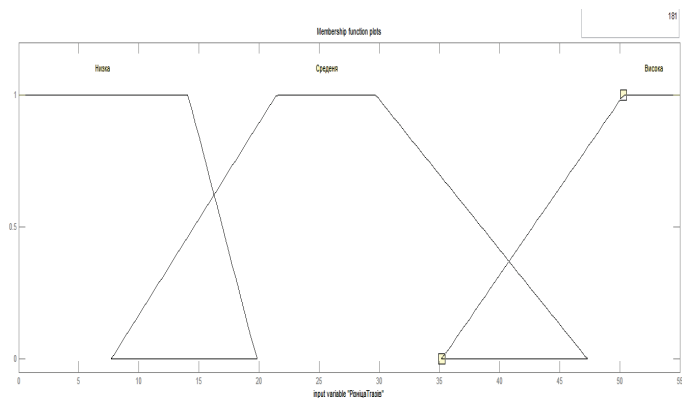


Рис. 8. Функції належності вхідного параметра "Різниця температури вихідних газів від норми"

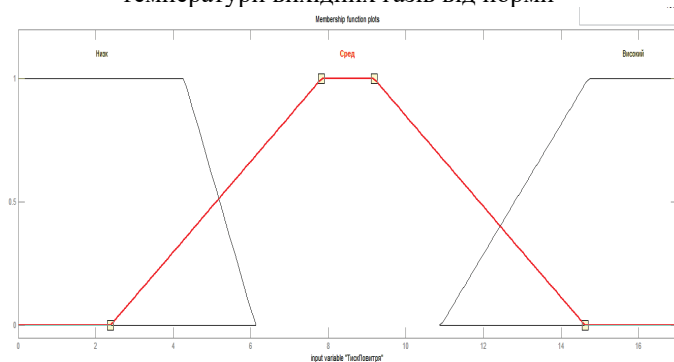


Рис. 9. Функції належності вхідного параметра "Тиск повітря"

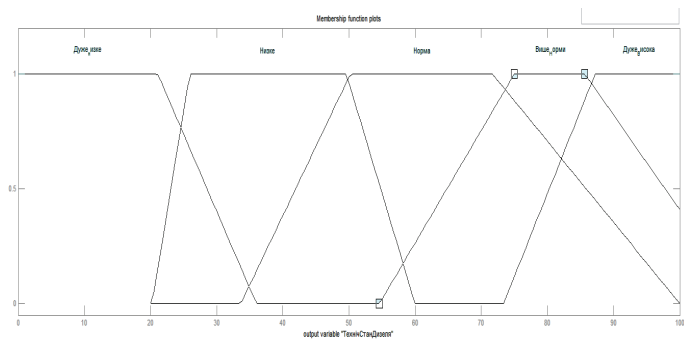


Рис. 10. Функції належності вхідного параметра "Технічний стан дизеля, Т"

Розробка бази знань ЕС показана на рис. 11.

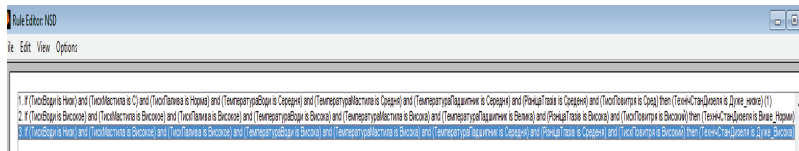


Рис. 11. Етап розробки бази знань НЕС виду "Умова № 1"
..I...."Умова ... № 8" ТО "Висновок про технічний стан суднового
дизеля

Правило-орієнтована база знань включає в себе досвід та знання спеціаліста з діагностики роботи СД. Правила складаються із логічних висновків виду ЯКЩО "Умова" ТО "Висновок". Зв'язок між вхідними умовами здійснюється за рахунок логічної операції - кон'юнкції.

Демонстрація роботи ЕС та оцінки технічного стану дизеля представлені на рис. 12 - 14. Перевірка роботи ЕС здійснювалася за умови варіювання контрольованих параметрів (моделювання різних значень контрольованих параметрів які відображають стан роботи СД).



Рис. 12. Показники технічного стану дизеля $T = 80\%$ (рівень роботи СД вище за нормальний)

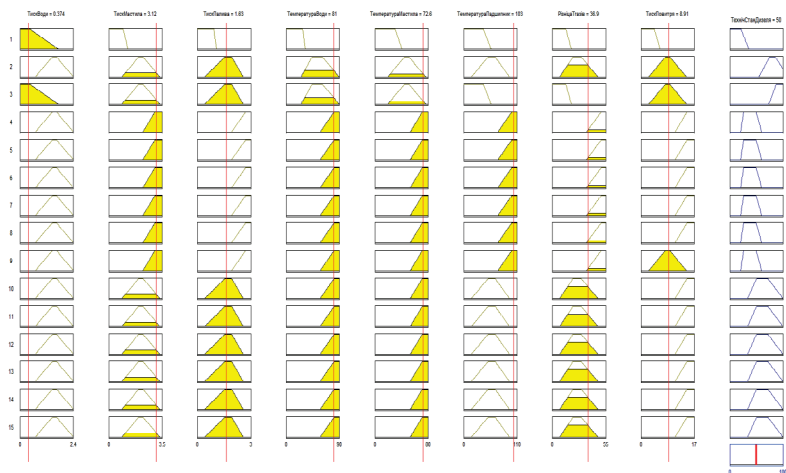


Рис. 13. Показники технічного стану дизеля $T = 50\%$ (рівень технічного стану низький). Потрібне технічне обслуговування

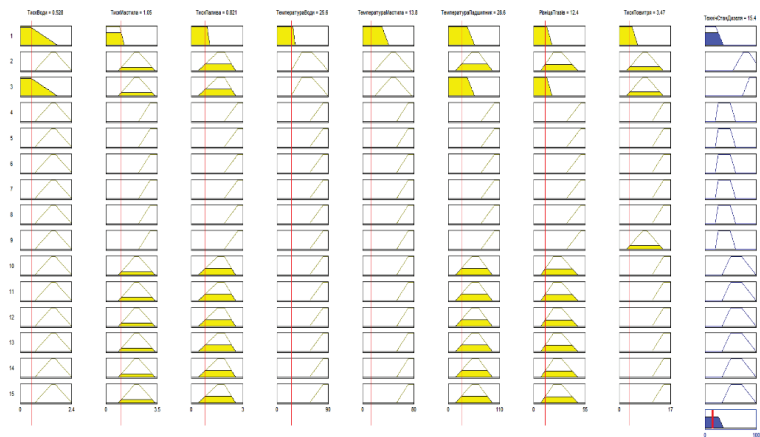
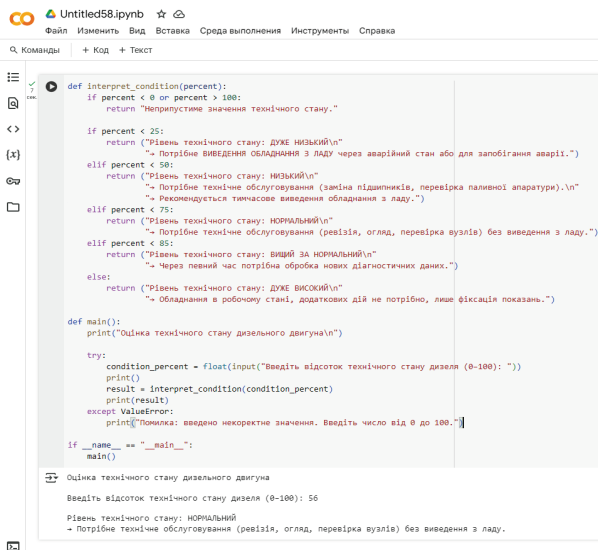


Рис. 14. Показники технічного стану дизеля $T = 15,4\%$ рівень технічного стану дизеля дуже низький. Потребує зупинки та ремонту

Для видачі рекомендацій оператору щодо подальшої дії в середовище Google Colab мовою Python була розроблена додаткова ЕС (рис. 15).



```
def interpret_condition(percent):
    if percent < 0 or percent > 100:
        return "Напрямуйте значення технічного стану."

    if percent < 25:
        return ("Рівень технічного стану: ДУЖЕ НИЗЬКИЙ\n"
                "-> Потрібне ВИВЕДЕННЯ обладнання з ладу через аварійний стан або для запобігання аварії.")
    elif percent < 50:
        return ("Рівень технічного стану: НИЗЬКИЙ\n"
                "-> Потрібне технічне обслуговування (заміна підшипників, перевірка паливної апаратури).\n"
                "-> Рекомендується тимчасове виведення обладнання з ладу.")
    elif percent < 75:
        return ("Рівень технічного стану: НОРМАЛЬНИЙ\n"
                "-> Потрібне технічне обслуговування (ревізія, огляд, перевірка вузлів) без виведення з ладу.")
    elif percent < 85:
        return ("Рівень технічного стану: ВИЩИЙ ЗА НОРМАЛЬНИЙ\n"
                "-> Через певний час потрібна обробка нових діагностичних даних.")
    else:
        return ("Рівень технічного стану: ДУЖЕ ВИСОКИЙ\n"
                "-> Обладнання в робочому стані, додаткових дій не потрібно, лише фіксація показань.")

def main():
    print("Оцінка технічного стану дизельного двигуна\n")

    try:
        condition_percent = float(input("Введіть відсоток технічного стану дизеля (0-100): "))
        print()
        result = interpret_condition(condition_percent)
        print(result)
    except ValueError:
        print("Помилка: введено некоректне значення. Введіть число від 0 до 100.")

if __name__ == "__main__":
    main()
```

Оцінка технічного стану дизельного двигуна

Введіть відсоток технічного стану дизеля (0-100): 56

Рівень технічного стану: НОРМАЛЬНИЙ

-> Потрібне технічне обслуговування (ревізія, огляд, перевірка вузлів) без виведення з ладу.

Рис. 15. Програмний код та рекомендації оператора

Висновки

Демонстрування роботи ЕС показало ефективний процес визначення показників працездатності дизеля та своєчасну підтримку у прийнятті рішень електромеханіком щодо подальшого обслуговування та експлуатації СД.

При цьому можна зазначити, що робота ЕС може відбуватися в режимі безпосереднього виміру технічних показників температури, тиску та інших параметрів дизеля. Інформація на станцію управління та моніторингу запропонованої експертною системою надходить від датчиків через контролер. Контролер надсилає інформацію на робочу станцію оператора експертною системою, яка здійснює розрахунок ступеня працездатності та робить рекомендації щодо подальшої експлуатації дизельного обладнання.

Таким чином, впровадження експертних систем у підсистеми моніторингу та діагностування технічного стану суднових дизельних агрегатів дозволяє своєчасно приймати вірні та своєчасні рішення при плануванні ремонту та проводити технічне обслуговування без аварійних ситуацій.

ЛІТЕРАТУРА
REFERENCES

1. Шостак, В. П. Системи суднових дизельних установок: навчальний посібник – Миколаїв: НУК, 2021. - 128 с.
2. Полянский, С. К., Жерновий, А. С. Лесько, В. І., Тінченко, С. Х. Діагностика і технічне обслуговування дизелів. – К.: Либідь, 1995. – 312 с.
3. Kongsberg Maritime. Technologies for sustainable oceans [Електронний ресурс]. — Режим доступу: <https://www.kongsberg.com/maritime> (дата звернення: 12.05.2025).
4. Steklov, A.S. Neuro-fuzzy model for diagnosing the technical condition of a synchronous generator / A.S. Steklov, D.S. Podkovyrin // Chief power engineer. - 2015. - № 11–12. - P. 34 – 42.
5. Mamdani, E. H. Application of fuzzy algorithms for control of simple dynamic plant / E. H. Mamdani // Proc. Inst. Elect. Eng. Contr. Sci. – 1974. - Vol. 121. – P. 1585 – 1588.
6. Россомеха, О. І. Концептуальна модель системи технічного обслуговування і ремонту складних технічних систем // Розвиток транспорту – 2020. - №1(6). – С. 56 – 70.
7. Porteiro, J.; Collazo, J.; Patiño, D.; Míguez, J.L. Diesel engine condition monitoring using a multi-net neural network system with nonintrusive sensors. Appl. Ther. Eng. – 2011. – 31. – P. 4097 – 4105.
8. Mikhailenko, V. S., Kharchenko, R. Y., Leshchenko, V. V. Fuzzy method of approximating values of parameters of dynamic models of ship boilers // Автоматизація суднових технічних засобів: наук.-техн. зб. – 2023. – Вип. 28. – Одеса: НУ "ОМА". – С. 121 – 131.
9. Fuzzy logic based expert system for diesel engine oil analysis diagnosis [Електронний ресурс]. — Режим доступу: <https://www.researchgate.net/publication/233644748> (дата звернення: 14.05.2025).

Abstract. The article presents the development of a fuzzy expert system for monitoring the technical condition of a MAN marine diesel engine using modern tools such as MATLAB (Fuzzy Logic Toolbox) and Python in the Google Colab environment. The aim of the study is to create an intelligent tool that ensures timely detection of deviations in engine operation based on the analysis of control parameters. The system is based on fuzzy logic, which allows for the consideration of uncertainty and vagueness in expert assessments of equipment condition. The core of the system consists of a knowledge base developed with the participation of marine engineering

specialists and a fuzzy inference mechanism that generates recommendations for the operator.

The design process incorporated key control parameters of the MAN marine diesel engine: fresh water cooling circuit pressure, lube oil pressure, fuel pressure, high-temperature water circuit temperature, diesel generator oil temperature, crankshaft bearing temperature, exhaust gas temperature deviation from the set value, and starting air pressure. Each parameter is assigned an informativeness coefficient that is considered in the diagnostic conclusions.

The system was implemented in two software environments. In MATLAB, the fuzzy logic model was built using the Fuzzy Logic Toolbox, including input variables, rules, membership functions, and output recommendations. In Google Colab, a Python script was created to process input data from sensors, calculate signal informativeness coefficients, and visualize results. This approach ensures flexibility, scalability, and practical applicability of the system.

The developed expert system is capable of real-time data analysis and provides clear recommendations regarding the technical condition of the marine diesel engine. It contributes to improved maintenance efficiency, reduced downtime, and enhanced reliability of ship power plants.

УДК 629.5.058.44

DOI: 10.31653/1819-3293-2025-1-30-79-92

ARTICLE HISTORY

Received 11.04.2025

Accepted 07.05.2025

Рябцов Олександр Васильович
НУ "Одеська морська академія", Одеса, Україна
alex.ryabtsov@gmail.com

Організаційне вдосконалення технічної експлуатації волоконно-оптичних гіроскопів для суднових систем динамічного позиціонування

Ryabtsov Oleksandr
NU "Odessa Maritime Academy". Odessa. Ukraine
alex.ryabtsov@gmail.com

Organization improvement of technical maintenance of fiber optic gyroscopes for ship dynamic positioning systems

Резюме. Проаналізовано тенденцію заміни суднових механічних гірокомпасів на волоконно-оптичні інтерференційного типу, що підвищує їх надійність завдяки відсутності рухомих частин та пов'язаних із ними відмов. Запропоновано безперервний контроль стану оптичного волокна як чутливого елементу. Розглянуто організаційно-технічні заходи для вдосконалення експлуатації волоконно-оптичних гірокомпасів шляхом впровадження додаткового контролю параметрів, спрямованого на підвищення надійності систем динамічного позиціонування суден.

Summary. The trend of replacing ship mechanical gyrocompasses with fiber-optic interference-type gyrocompasses has been analyzed, which enhances their reliability due to the absence of moving parts and associated failures. Continuous monitoring of the optical fiber condition as a sensitive element is proposed. Organizational and technical measures to improve the operation of fiber-optic gyrocompasses through the introduction of

additional parameter control, aimed at increasing the reliability of ship dynamic positioning systems, are considered.

В зв'язку з безперервним скороченням доступних запасів мінеральних ресурсів дедалі більша частка корисних копалин видобувається на морському шельфі. У багатьох країнах офшорна промисловість стає пріоритетною галуззю економіки. При цьому в більшості районів, де корисні копалини залягали на невеликій глибині, що раніше дозволяло використовувати традиційні видобувні установки стаціонарного типу, які спиралися на підводний ґрунт, ресурси вже значною мірою вичерпані. Для пошуку та розробки нових глибоководних родовищ використовуються як самохідні, так і несамохідні плавучі об'єкти. До самохідних зазвичай відносяться сейсморозвідувальні, бурові та допоміжні судна, до несамохідних - бурові або видобувні платформи, що буксируються суднами. Для їхньої ефективної роботи першочергового значення набувають системи стабілізації становища цих плавучих об'єктів відносно робочої позиції на морському дні.

Для цієї мети були розроблені спеціалізовані системи автоматичного управління судновими рушіями або якірними лебідками, що дозволяють утримувати судно в заданій точці при дії таких дестабілізуючих факторів, як вітер, течія і хвилювання водного середовища. Такі види систем отримали назву систем динамічного позиціонування (ДП) або якірного позиціонування (ЯП) [1, с. 216]. Незважаючи на високу вартість та складність, ці системи нині перебувають у процесі прискореного розвитку. Кількість компаній, що займаються їхньою розробкою, з кожним роком зростає, а також розширюється сфера їх застосування.

Однією з найважливіших складових кожної з таких систем позиціонування є так звана референсна система, що дозволяє обчислити координати плавучого об'єкта у відкритому морі з високою точністю. Значення похибки позиціонування об'єкта у відкритому морі для більшості систем позиціонування середньої складності становить 0,5 - 2 м, однак у системах з диференціальною корекцією (GNSS augmentation) вона досягає одиниць сантиметрів. Очевидно, що така точність не може бути досягнута без застосування сучасних високоточних вимірювальних пристроїв, результати вимірювання яких надходять до спеціалізованих суднових обчислювальних комплексів, що виробляють математичну обробку отриманої інформації з метою отримання найбільш достовірного результату.

До складу будь-якої референсної системи входить кілька підсистем, що одночасно визначають координати судна, його курс, параметри зовнішніх впливів, кути відхилення та зміщення щодо заданої точки тощо. Зупинимося лише на одній підсистемі, що вимірює курс судна.

Традиційним способом визначення курсу судна був магнітний компас, який і досі займає заслужено шановане місце на будь-якому найсучаснішому судні. Однак, внаслідок мінливості магнітного поля Землі та паразитного впливу від металевих частин судна і працюючого судового обладнання, магнітні компаси не можуть забезпечити необхідної точності та стабільності показань, тому в даний час вони використовуються на судах лише як резервний засіб вимірювання.

Нині відомо багато різних типів фізичних явищ, на підставі яких можливе створення гіроскопічних приладів. Однак для цілей практичної навігації застосовують в основному два види гірокомпасів: механічні та оптичні. Сучасні механічні у свою чергу поділяються на інерційні та вібраційні, та позначаються відповідно DTG і MEMS. Оптичні також поділяються на оптоволоконні та лазерні з позначеннями FOG і RLG [2]. У сучасній морській практиці найбільш широко застосовуються інерційні механічні гірокомпаси рідинного типу, в конструкцію яких входить гіросфера, що обертається, вільно плаваючі в підтримуючій рідині. Щільність і температуру такої рідини підбирають таким чином, щоб сила, що виштовхує гіросферу, компенсувала її вагу, і тим самим запобігають дотику сферою до внутрішніх стінок або донця резервуара. Також для точної компенсації ваги гіросфери створюється примусова циркуляція вертикальної рідини всередині резервуара. Усередині самої сфери знаходяться електромотори, що забезпечують її обертання з високою швидкістю, що створює гіроскопічний ефект. Вільно обертаючись в рідині гіросфера зберігає постійне становище у просторі за будь-яких відхиленнях судна. Спеціальні датчики кутових відхилень дозволяють з високою точністю визначити кут прецесії, тобто відхилення на курсу судна від встановленого напрямку.

Досвід практичної експлуатації гірокомпасів, що забезпечують роботу судна в режимах динамічного позиціонування, показує, що, незважаючи на ретельно розроблену конструкцію та високу якість виготовлення сучасних морських гірокомпасів, інтенсивність їх відмов у складних морських умовах може перевищувати нормоване значення. Існуючі графіки технічного обслуговування судових гірокомпасів, розроблені на основі рекомендацій їх виробників, передбачають, що плановий інтервал безвідмовної роботи між двома технічними обслуговуваннями, зокрема без заміни підтримуючої рідини, становить

не менш ніж 18 місяців [3]. Однак важкі умови експлуатації викликають прискорене погіршення властивостей рідини та інші відмови, які призводять до неочікуваних збоїв у роботі гірокомпасів.

Рівноважне положення гіросфери, що обертається, порушується також при впливі ударів хвиль у штормових умовах або сильної вібрації при роботі потужних суднових механізмів. При цьому внаслідок маятникового ефекту виникає інтеркардинальна девіація, що знижує точність гірокомпасу. Для зменшення впливу качки виробники використовують різні методи, наприклад застосування двох гіроскопів в одній гіросфері, що збільшує складність пристрою і знижує його загальну надійність. Ще одним методом зменшення девіації є підвищення в'язкості рідини, що підтримує, але це збільшує споживання потужності при прокачуванні рідини і розкручуванні гіросфери.

Крім того, при погіршенні якості або рівня рідини, що підтримує, можливі короткочасні торкання сферою внутрішніх поверхонь резервуара. Це явище призводить до передчасного зношування її електричних контактів, і, що особливо неприпустимо, викликає «підгальмовування» сфери, яке також веде до неприпустимого зростання похибки вимірювань курсу судна. Крім цього, досить часто спостерігається підвищене зношування карданних підвісів, пересихання силіконових шлангів у місці їх приєднання до штуцерів насосів системи циркуляції підтримуючої рідини, що призводить до втрати їх еластичності або розтріскування і, відповідно, до витoku рідини. Такий дефект практично завжди призводить до виходу гіросфери з ладу та необхідності її повної заміни.

Розбирання та якісний ремонт гіросфери в суднових умовах практично неможливі, а зберігання запасних гіросфер на судні зазвичай недоцільно через їхню велику вартість та складність підтримки потрібних умов зберігання, тому будь-яка поломка гірокомпасу зазвичай повністю виводить його з експлуатації. У цьому виникає серйозна проблема, що з вимушеним скороченням сертифікованої конфігурації системи ДП. Невідповідність системи ДП необхідному класу позбавляє судно можливості продовжувати виконувати заплановану роботу відповідно до контракту, що практично завжди призводить до суттєвих фінансових втрат.

У зв'язку з цим питання правильної організації технічної експлуатації таких важливих елементів суднових систем ДП, як гірокомпаси, стає пріоритетним для судовласника.

Проблема полягає у тому, що, при наявності на судні, наприклад, трьох справних гіроскопів, тобто при конфігурації, яка відповідає класу

DP Class2, питання вибору справжнього значення курсу судна вирішується шляхом "голосування" (voting). При цьому з трьох показань різних гіроскопів правильним визнаються лише ті два, які повністю збігаються. Показання третього гіроскопа, що навіть трохи не збігаються з двома іншими, навіть за його повної працездатності будуть відкидатися системою як помилкові. Така ситуація трапляється при довготривалій роботі гірокомпасу без корекції з поступовим накопичення постійної помилки дрейфу, або при нестабільному електроживленні. При виході одного гіроскопа з ладу виникає дилема вибору правильного показання між двома, які залишилися. Якщо вони збігаються, то приймаються як єдино правильне, але якщо їх показання теж будуть відрізнятися, то ДП-оператор повинен самостійно прийняти рішення, якому з двох гіроскопів, що продовжують працювати, він довіряє більше. Рішення приймається оператором з урахуванням статистичного аналізу похибок показань за попередній період роботи. У такому випадку в активному стані залишається лише один з трьох судових гірокомпасів, який продовжує передачу показань в систему ДП. Інші гірокомпаси переводяться в неактивний режим, при цьому система ДП втрачає надмірність і переходить у конфігурацію класом нижче.

В попередні роки єдиним способом підвищення точності та достовірності показів референсної системи ДП в процесі позиціонування судна було забезпечення надлишковості системи за рахунок включення додаткової кількості дублюючих елементів. З появою нових типів гірокомпасів, які не мають механічних елементів, що рухаються, завдання дещо спростилося. Замість збільшення кількості механічних гірокомпасів для забезпечення необхідного рівня надійності системи ДП використовують оптоволоконні гірокомпаси, що теоретично мають значно більшу надійність чутливого елемента. На відміну від розглянутих вище механічних гірокомпасів, що мають складні конструкції і вимагають ретельного налагодження та періодичної корекції показань, чутливий елемент нових гіроскопів являє собою простий відрізок оптичного волокна довжиною не менше 1000 м, розташований в захисному боксі у вигляді вільно намотаних кілець або петель.

Однак такі переваги, як простота і надійність чутливого елемента оптоволоконного гірокомпасу, в деякій мірі пригнічується тією обставиною, що для вимірювання надзвичайно малих фазових відхилень оптичних сигналів малої інтенсивності потрібні дуже складні електронні пристрої, які мають велику вартість. Остання обставина є причиною того, що традиційні механічні гірокомпаси

продовжують використовуватись на більшості ДП суден. Конфігурація багатьох систем ДП на суднах, що знаходяться в експлуатації в даний час, все ще передбачає наявність як мінімум двох рідинних механічних гірокомпасів, до яких додається один волоконно-оптичний гірокомпас (ВОГ), який теоретично має більш високу надійність і точність. Слід зазначити, що в деяких випадках конфігурацію референсної системи можуть додаватися також DGPS-компаси, але такі компаси не вимірюють кутові відхилення, а обчислюють їх непрямым шляхом, тому їх розгляд не входить до цієї теми.

Принцип роботи ВОГ, заснований на ефекті Саньяка [4], який було відкрито ще в 1913 році. Проте широке практичне застосування даний тип гірокомпасів знайшов лише нещодавно у зв'язку з попитом на пристрої гіростабілізації траєкторій руху мобільних об'єктів.

Конструкція оптоволоконного гірокомпаса досить проста. Оптична вимірювальна частина на основі інтерферометра визначає різницю довжини оптичних шляхів двох променів, що розповсюджуються в оптичному волокні у протилежних напрямках. Електронна частина вимірювальної схеми обчислює фазовий зсув променів, і, отже, величину кутового повороту приладу в інерційній системі відліку, пов'язаної з положенням судна. Оскільки величина $\Delta\varphi$ дуже мала, її пряме вимірювання за допомогою пасивних інтерферометрів можливе лише при довжині волокна не менш 1000 м [5].

Заміна механічних гіроскопів волоконно-оптичними мала суттєво підвищити надійність суднових систем динамічного позиціонування та знизити витрати на їх технічне обслуговування. Однак, як часто трапляється при впровадженні технічних новинок, очікування не зовсім виправдалися. Незважаючи на таку безперечну перевагу ВОГ, як повна відсутність рухомих механічних частин і використання в якості чутливого елементу простого, надійного і дешевого відрізка оптоволокна, виявилось, що ВОГ мають цілу низку недоліків. Більшість виробників оптоволоконних гіроскопів, такі як Sperry Marine, стверджують, що оптоволоконні гірокомпаси, які ними випускаються, наприклад, NAVIGAT 2500 Fiber Optic Gyro Compass, відносяться вже до класу MF (maintenance free), тобто не вимагають ніякого технічного обслуговування, а також забезпечують значно вищі точність і надійність ніж попередні механічні версії. Але просте порівняння між паспортними даними двох зразків їхньої продукції показує, що їхні відмінності не мають принципового характеру [6].

Результати порівняння специфікацій волоконно-оптичного гірокомпаса NAVIGAT 2500 та механічного рідинного NAVIGAT 200 компанії Sperry Marine наведено у таблиці.

Таблиця

Параметри гірокомпасів

Технічні параметри	NAVIGAT 2500 Fiber Optic Gyro Compass	NAVIGAT 200 Spinning mass compass
Точність курсу / Heading accuracy	≤ 0.23 deg. secant latitude (RMS)	$\leq 0.4^\circ$ secant latitude (avrg)
Допустима швидкість повороту / Rate of Turn	$\leq 0,06$ deg/ min	$\leq 0.5 \pm 5\%$ °/min
Допустимі кути крену / Roll/Pitch angle	Roll/Pitch angle 0.5° RMS	Freedom of Roll & Pitch $\pm 40^\circ$
Надійність (напрацювання на відмову) / Mean Time Between Failure (MTBF)	150,000 hrs	120,000 hrs

До негативних факторів, що знижують точність вимірювань ВОГ та його загальну надійність як елемента системи ДП, можна віднести:

- внутрішні та зовнішні втрати потужності в оптичному волокну;
- флуктуації коефіцієнта пропускання по довжині волокна, що призводять до появи дробових шумів;
- чутливість до зовнішніх впливів, таких як вібрації та удари;
- температурні зміни, а також довготривалі стискаючі механічні навантаження;

девіація ступеня та кута поляризації по довжині волокна.

Внутрішні втрати потужності оптичного волокна складаються з втрат на поглинання, дисперсійних втрат і втрат на розсіювання, спричинених структурними дефектами або якістю оптичного волокна. Зовнішні втрати оптичного волокна виникають через втрати на з'єднаннях та відгалужувачах променю та втрат на вигинах або деформаціях волокна.

Ключову роль у забезпеченні точності та стабільності показань ВОГ гірокомпасу відіграє якість оптичного волокна. В даний час застосовують два види оптоволокон: скляне та полімерне. Найбільш високоякісне скло з плавленого кварцу з високим ступенем очищення застосовується для виготовлення ВОГ для морських суден, що випускаються компаніями Anschütz (Німеччина), Furuno (Японія), Teledyne TSS (США), Sperry Marine (США), GEM Elettronica (Італія) та деякими іншими. Однак вартість таких ВОГ дуже висока, тому такі

виробники як Eгіссо (Китай) та iX Blue (Франція) освоїли виробництво гірокомпасів на основі полімерного оптоволокна. Полімерне оптоволокно має ряд недоліків у порівнянні зі скляним, що обмежує його застосування у високоточних системах. Однак наростаюча тенденція до всебічного скорочення витрат і підвищення економічної ефективності морських перевезень, а також світова економічна криза, що посилюється, роблять полімерне оптоволокно більш конкурентним.

Основними недоліками чутливих полімерних елементів гірокомпасів є:

- вищі оптичні втрати ніж у склі;

- менша пропускна здатність волокна;

- найгірша температурна стабільність;

- додаткові втрати внаслідок більшої чутливості до деформацій волокна;

- менша довговічність внаслідок меншої стійкості до зовнішніх дій.

Ці недоліки оптоволокна не дозволяють дістатися потрібного рівню надійності гірокомпасів, тому логічно запропонувати застосування автоматичного тестування стану оптичних і електронних елементів ВОГ, а також діагностування та прогнозування їх відмов за рахунок використання нових алгоритмів обробки даних.

Для якісної оцінки стану оптичної вимірювальної системи ВОГ виникає необхідність проведення складних вимірювальних процедур, які раніше проводилися лише для лабораторних досліджень. Для цього можна скористатися вже відомими методами контролю стану оптоволокна, реалізованими в системах моніторингу оптичних мереж зв'язку, наприклад, таких як система автоматичного моніторингу оптичних волокон DTS (Distributed Temperature Sensing) [7], і система NewNets FiberWatch2 [8]. Такі системи дозволяють автоматично визначати відхилення параметрів оптичного волокна та виявляти можливі несправності на ранніх стадіях. До структури системи DTS входять: джерело тестового випромінювання (одномодовий оптичний лазер), волокно, оптичні роздільники, фільтри і детектор зворотного розсіяного випромінювання. Аналіз та обробка інформації про стан волокна здійснюються за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення. Метод FiberWatch пропонує проактивний контроль волоконно-оптичної лінії на основі Remote Test Units (RTU), оснащених модулями оптичних рефлектометрів (OTDR), які підключаються до оптичних волокон через модулі оптичного перемикача (Optical Test Access Unit, OTAU). Модулі OTDR виконують тестування оптоволокна, вимірюючи такі параметри, як відхилення довжини хвилі та динамічний діапазон.

Ці методи були впроваджені, коли з'ясувалося, що основним фактором зниження якості оптоволокна є температурний градієнт волокна, а також механічні напруги в ньому при вібраціях, які призводять до виникнення "уявної кутової швидкості". Особливо небезпечний вплив мають постійні збільшення температури, навіть невеликі і з малою швидкістю наростання, але такі що викликають тривалі теплові дрейфи ВОГ. Причиною даного явища є зміна показника заломлення волокна внаслідок п'єзооптичного ефекту в умовах появи термічних напружень в оптичному контурі.

На основі вищевикладеного можна зробити висновок, що для підвищення надійності ВОГ і зниження вартості експлуатаційних витрат за рахунок раціональної організації технічного обслуговування обладнання систем ДП, структура волоконно-оптичного гірокомпасу повинна містити не тільки основний оптичний вимірювальний тракт, але і додатковий оптичний канал, що дозволяє здійснювати моніторинг стабільності параметрів чутливого елементу ВОГ. Така система моніторингу має забезпечувати:

- вимірювання відхилень параметрів оптичних елементів гірокомпасу;

- автоматичне виявлення інших несправностей та пошкоджень в оптичних елементах ВОГ;

- на базі аналізу відхилень прогнозування зміни параметрів оптичних та електронних елементів ВОГ.

Контроль стану оптичних волокон можна реалізувати на основі оптичних імпульсних рефлектометрів, що діагностують стан волокна за зворотним розсіюванням світлової хвилі при введенні в волокно зондувальних імпульсів.

Спрощена оптична функціональна схема ВОГ, оснащеного тестовим каналом моніторингу, наведено на рисунку.

Вимірювальна частина цієї схеми не відрізняється від класичної конструкції гіроскопа, що базується на ефекті Саньяка. Вона виконує основне завдання визначення курсу судна шляхом вимірювання кута зсуву фаз між двома оптичними променями, що поширюються по кільцевому шляху, утвореному вільно укладеним оптоволоконком. Два зустрічно спрямованих оптичних потоку f_{B1} і f_{B2} утворюються у вимірювальній системі шляхом поділу напівпрозорою дзеркальною поділяючої пластинкою на два протилежно спрямовані промені.

Для забезпечення безперервного циркуляції променів у волокні використовується лазерний діод підживлення з розподіленим зворотним зв'язком (DBF LD, distributed feedback laser), що працює в оптичному діапазоні випромінювання з довжиною хвилі 1550 нм. У

стані спокою гірокомпаса, завдяки симетрії оптичної схеми, між променями зберігається нульова різниця фаз. При поворотах гіроскопа внаслідок релятивістського закону складання швидкостей утворюється пропорційний зсув фази між променями.

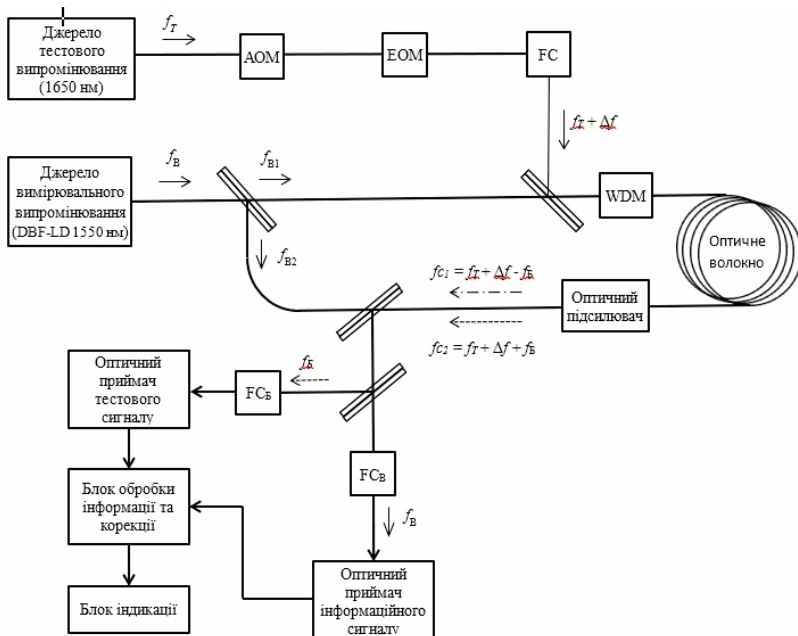


Рис. Схема оптичного тракту волоконно-оптичного гірокомпаса, оснащеного тестовим каналом для моніторингу технічного стану

У найпростішому випадку кільцевої намотування оптоволокна фазовий зсув між променями може бути розрахований за відомою формулою для інтерферометра Саньяка:

$$\Delta\varphi = \frac{4 \cdot \pi \cdot R \cdot L}{\lambda \cdot c} \cdot \Omega,$$

де $\Delta\varphi$ - різниця фаз, що виникає між променями в оптоволокну, R - радіус контуру намотування оптоволокна, L - довжина відрізка оптоволокна, λ - довжина хвилі вимірювального випромінювання, C -

швидкість світла у вакуумі, Ω - кутова швидкість обертання гіроскопа [9].

Крім вимірювального тракту до складу оптичної схеми гірокомпаса додано тестуючий тракт, який складається з джерела тестуючого випромінювання, яке частотне рознесено з основним гіроскопічним вимірювальним сигналом, двох додаткових віддзеркалювачів, фільтра, приймача оптичного тестового сигналу та блоку обробки інформації. Призначення тестуючого тракту - безперервний моніторинг стану оптичних елементів гірокомпаса з метою визначення параметрів та передбачення моменту їх переходу до граничного стану.

Принциповою відмінністю моніторингу стану об'єкта від моніторингу його параметрів полягає у отриманні результату у вигляді експертної оцінки його стану та прийняття управлінського рішення про подальші дії з об'єктом.

Світло в оптоволокну розсіюється на мікроскопічних неоднорідностях, розмір яких менший за довжину хвилі. Це розсіяне світло, що сприймається в оптичному приймачі, містить як мінімум три компоненти: одну з вихідною довжиною хвилі, обумовлену релеєвським розсіюванням, і дві компоненти зворотного розсіювання Мандельштама-Брілюена, що мають зсув спектра внаслідок неоднорідностей в волокну, так звані стоксову ($f_T + \Delta f - f_B$) і антістоксову ($f_T + \Delta f + f_B$). Інтенсивність антістоксової компоненти залежить від температури оптоволокну, що дає можливість якісної оцінки його стану [10].

Тестова частина оптичної системи БОГ є рефлектометр, що працює за принципом вимірювання інтенсивності розсіювання Брілюена (BOTDR, Brillouin Optical Time Domain Reflectometer), і що вимірює тимчасові залежності зсуву частот зворотного розсіювання щодо вихідної частоти тестового оптичного випромінювання. Переваги BOTDR рефлектометрів полягають у великому динамічному діапазоні в порівнянні з рефлектометрами OTDR і малими похибками [11]. Джерелом тестового випромінювання також служить DFB лазер із довжиною хвилі 1650 нм, частотна модуляція тестового сигналу здійснюється акустооптичною коміркою (АОМ), імпульсна модуляція - електроабсорбційним модулятором (ЕОМ). Для поляризаційної модуляції тестового випромінювання f_T використовується фільтр (FC). Тестове випромінювання накачування вводиться у кільце оптоволокну та змішується мультиплексором WDM (Wavelength Division Multiplexing) з оптичним сигналом вимірювального тракту f_B .

При проходженні тестового сигналу повздовж кільця оптоволокну частка оптичної енергії у вигляді бриллюенівського розсіювання, яке

відбивається від неоднорідностей структури, передається за допомогою відгалужувачів через розподільчий фільтр ФС_Б на вхід фотоприймача тестового випромінювання, а потім на блок обробки та аналізу стану волокна (див. рисунок). Результат визначення курсового кута судна та результат аналізу інформації про стан гірокомпасу виводиться на індикаторну панель, а також надходять до системи ДП.

Таким чином, впровадження діагностичних методів для аналізу стану волоконно-оптичних гірокомпасів для систем ДП дозволять отримати об'єктивну інформацію, необхідну для правильної організації їх технічної експлуатації та складання обґрунтованих графіків профілактичного обслуговування, а також значно скоротить час ремонту (MTTR) за рахунок швидкого виявлення та локалізації несправностей.

Аналіз можливих шляхів удосконалення суднових гірокомпасів для підвищення надійності систем динамічного позиціонування дозволяє сформулювати кілька висновків.

1. Підвищення надійності ВОГ шляхом переходу на використання тільки високоякісного кварцового оптоволокна малоімовірно тому що вимагає застосування значно кращих технологій очищення сировини та більш енергоємного обладнання, що суттєво здорожує виробництво ВОГ.

2. Зниження вартості ВОГ при збереженні точності та надійності можливе за умови розробки нових типів полімерного оптоволокна з меншими спотвореннями та вищою стабільністю параметрів. Робота в цьому напрямку ведеться безперервно, так само, як і пошук нових методів та засобів гіроскопічних вимірів.

3. Усунення дестабілізуючих факторів шляхом повної ізоляції гірокомпасу від зовнішніх впливів, таких як вібрації, температурні коливання, зовнішні електромагнітні поля, та інші, дозволить зменшити похибки та підвищити надійність ВОГ, проте вимагатиме додаткових організаційно-технічних заходів та суттєвих фінансових витрат. Це може бути ефективним рішенням в окремих випадках, але для масового застосування на судах не підходить.

4. Такі процедури технічної експлуатації існуючих моделей механічних гірокомпасів, як початкове налаштування гірокомпасу на істинний меридіан, періодичне ручне коригування його показань та регулярні перевірки його працездатності завжди були передбачені виробниками гірокомпасів в інструкціях з експлуатації. Тож підтримувати потрібну надійність ВОГ, в яких ще не запроваджені алгоритми тестового аналізу стану волокна, допомогла б відповідна організація їх технічного обслуговування, наприклад впровадження

періодичного контролю їх оптичних параметрів за допомогою портативних рефлексометрів, таких як, наприклад, Grandway M1000-D22-PRO, розроблених для оперативного тестування наземних ліній оптичного зв'язку. Однак це рішення передбачає організацію та проведення додаткової спеціальної підготовки судового персоналу або використання певної кількості залучених берегових фахівців, що не завжди є економічно ефективним рішенням.

5. Можна припустити, що найбільш перспективним шляхом зниження ймовірності несподіваних відмов гірокомпасів суден, що призводять до аварійного виходу судна з режиму ДП, буде впровадження автоматичного тестування стану оптичного каналу ВОГ. Розробка нових алгоритмів прогнозування відмов на підставі аналізу відхилень параметрів може значно покращити надійність ВОГ та систем ДП в цілому.

ЛІТЕРАТУРА REFERENCES

1. Правила класифікації та побудови морських суден. Том 4. / Регістр судноплавства України. - К.: Регістр судноплавства України, 2020. – 558 с.
2. Gyrocompasses. Electronic resource: [www. geo-matching.com](http://www.geo-matching.com). URL: <https://geo-matching.com/categories/gyrocompasses>.
3. Sperry_Navigat_x_MKI_Gyro_-_Operation-Installation-Service_Manual. Electronic resource: www.sperrymarine.com. URL: [Sperry_Navigat_x_MKI_Gyro_-_Operation-Installation-Service_Manual.pdf&usg=AOvVaw2KkO8vNbq4tw2uINpSpZun&opi=89978449](http://www.sperrymarine.com/Manual.pdf&usg=AOvVaw2KkO8vNbq4tw2uINpSpZun&opi=89978449).
4. Андропова, И. А., Малькин, Г. Б. Физические проблемы волоконной гироскопии на эффекте Саньяка. // УФН. - 2002. - Т. 172. - № 8. - С. 849 – 873. DOI:10.3367/UFNr.0172.200208a.0849
5. Оптоелектроніка: від макро до нано. Генерація оптичного випромінювання: навч. посіб. У 2 кн. / В. О. Чадюк. – К.: НТУУ "КПІ", 2012. – Кн. 1. – 380 с.
6. Sperry Marine. NAVIGAT 2500 Fiber Optic Gyro Compass. Electronic resource: www.sperrymarine.com. URL: <https://www.sperrymarine.com/solutions/compass/navigat-2500>.
7. A Remote Fiber Test System (RFTS) for continuous network monitoring. Electronic resource: www.ntestinc.com. URL: <https://www.ntestinc.com/fiberwatch-by-ntes>.
8. DTS Fiber Optic Sensor Cables. Electronic resource: www.sensornet.co.uk. URL: <https://www.sensornet.co.uk/sensor-cables/>

9. Волоконно-оптичний гіроскоп. Електронний ресурс. Режим доступу: https://ua.wikipedia.org/wiki/Волоконно-оптичний_гіроскоп

10. Некрасов, С. Е. Системы дистанционного мониторинга оптических кабелей // Технологии и средства связи. – 2000. – №5. – С. 28 - 32.

11. Zhu Fan, Xuping Zhang, Junhui Hu, Yixin Zhang. Design fast pulse coding/decoding system for BOTDR // Photonics Global Conference (PGC). – 2012. – P. 1 - 6.

Abstract. *This article analyzes the practical experience of using mechanical and fiber-optic gyrocompasses in offshore ship dynamic positioning (DP) systems. It examines the advantages and disadvantages of currently used gyroscopic devices in the maritime fleet and identifies the main causes of their failures during operation.*

To enhance the overall operational reliability of ship DP systems, the study proposes improving the organizational principles of constructing measurement circuits for fiber-optic gyrocompasses. Specifically, it suggests introducing an additional test signal into the gyrocompass measurement channel. This signal would be transmitted through an optical fiber segment of at least 1000 meters in length, allowing for analytical assessment of fiber parameter deviations under internal and external destabilizing factors. Such an approach would enable a prognostic evaluation of the gyrocompass's reliability.

To assess the fiber's condition, both manual testing using a portable interferometer and automated testing with additional test signals can be employed. The study advocates for a testing method based on Brillouin scattering on fiber inhomogeneities, a technique that has proven effective in communication technology.

As a result of this analysis, the article suggests possible directions for improving DP system reliability through organizational and technical solutions. These improvements focus on enhancing fiber-optic gyrocompass designs by incorporating operational monitoring methods to track the sensitive element's current status and predict future parameter changes. Implementing these solutions would facilitate rational maintenance planning, optimize gyrocompass servicing, and reduce DP system dependence on unexpected failures.

УДК 621.431.74

DOI: 10.31653/1819-3293-2025-1-30-93-103

ARTICLE HISTORY

Received 10.04.2025

Accepted 06.05.2025

Сагайдак Олександр Іванович,
Одеський національний морський університет, Одеса, Україна
captalex@te.net.ua

Використання блокчейн технології у концепції кругової оцінки ризиків операції швартування судна

Sagaydak Oleksander,
Odessa National Maritime University, Odessa, Ukraine
captalex@te.net.ua

Using blockchain technology for all-around risk assessment concept of ship's mooring operation

Резюме. Згідно існуючих вимог кожна операція на судні повинна бути оцінена з точки зору виникнення можливих ризиків перед її початком. Це стосується і таких рутинних операцій, як швартування судна. При проведенні таких операцій дуже виникає можливість формального підходу до оцінки ризиків. Також ця процедура має істотний вплив з боку людського елементу. Для запобігання цьому може використовуватися запропонована раніше концепція кругової оцінки ризиків, що дає можливість врахувати можливі ризики усіх учасників операції, а не тільки одного з них, як це робиться зазвичай. Для більш детальної оцінки ризиків використовується аналіз судових документів і кваліфікаційних документів моряків, а це, в свою чергу, можна пришвидшити і зробити більш якісно з допомогою технологій блокчейн, які вже успішно застосовуються у морській логістиці контейнерними лініями. Вартість розробки і складність системи компенсується усуненням можливих помилок і фальсифікацій, а також пришвидшенням всієї процедури та її більш точними результатами.

***Summary.** According to existing requirements, each operation on a vessel must be assessed from the point of view of the occurrence of possible risks before it begins. This also applies to such routine operations as mooring a vessel. When conducting such operations, there is a great opportunity for a formal approach to risk assessment. This procedure also has a significant impact on the human element. To prevent this, the previously proposed concept of circular risk assessment can be used, which makes it possible to take into account the possible risks of all participants in the operation, and not just one of them, as is usually done. For a more detailed risk assessment, an analysis of ship documents and seafarers' qualification documents is used, and this, in turn, can be accelerated and made more qualitatively using blockchain technologies, which are already successfully used in maritime logistics by container lines. The cost of development and complexity of the system is compensated by the elimination of possible errors and falsifications, as well as by accelerating the entire procedure and its more accurate results.*

Розвиток сучасної транспортної системи призводить до збільшення розмірів і швидкостей морських суден, з іншого боку – процеси їхнього завантаження і розвантаження у портах також суттєво пришвидшилися. Таким чином, терміни виробничих процесів скоротилися настільки, що іноді наближаються до термінів процесів невиробничих – таких, як проходження каналами, швартувальні операції, оформлення документів, інспекції Контролю держави порту, тощо.

Ці досягнення стали можливими завдяки стрімкому розвитку технологій, зокрема цифрових.

Тим часом вимоги до безпеки залишаються незмінними, але часу на їхнє виконання залишається дедалі менше. Це стається з багатьох причин, зокрема тому, що розміри і складність суден зростають, а екіпажі суден скорочуються, тоді як обсяг обов'язків залишається незмінним, навіть на судах, що використовують сучасні технології автоматизації.

Однією з таких незмінних вимог є постійний контроль і менеджмент ризиків, що вимагається згідно Кодексу [1]. Оцінка та керування ризиками може виконуватися багатьма способами [2, 3], але, здебільшого, процес керування ризиками під час виконання так званих рутинних операцій (таких, як швартування судна) зводиться до відміток у чек-листах, як, наприклад, передбачено у Системах управління якістю компаній China Navigation, Orion, Triton Maritime, Asterismos Navigation, що можуть робитися суто формально, або навіть

постфактум. Звісно, таке ставлення неприпустиме, особливо якщо це стосується швартування суден з небезпечними вантажами (наприклад, LNG-танкерів).

Таким чином, існує можливість суттєвого впливу людського фактора на базові засади контролю ризиків на морському транспорті, що може спричинити людську помилку з катастрофічними наслідками.

Потрібно також зауважити, що зазвичай сам процес оцінки ризиків є однобічним – кожен з учасників швартовної операції проводить її самостійно, у межах своєї обізнаності та своєї Системи керування безпекою. Враховуючи те, що у швартовних операціях приймають участь щонайменше чотири учасники (судно, лоцман, буксири та берегова швартовна бригада), можна сказати, що потрібен загальний погляд на всю безпекову картину з урахуванням взаємодії усіх учасників.

Для вирішення цих двох завдань (мінімізація впливу людського фактора та врахування взаємодії усіх учасників операції) була запропонована концепція кругової оцінки ризиків [4], що полягає у створенні єдиної для усіх учасників операції незалежної інтернет-платформи (окремий сервер або хмарний сервер), який може належати стороні, що найбільше зацікавлена у безпеці проведення операції, та не належить до сторін, що беруть участь у цій операції (наприклад, клубу взаємного страхування P&I).

Маючи практично необмежені можливості такого незалежного серверу (хмарної платформи), можна почати оцінку ризиків майбутньої операції з аналізу судових документів і кваліфікаційних документів моряків та інших учасників операції (лоцмана, персоналу буксирів, берегової швартовної бригади). Крім того, можна проаналізувати історію судна (записи інспекції Контролю держави порту), можливі аварійні випадки за участі лоцмана та буксирів, аварійні випадки, що, можливо, мали місце під час швартування на цьому терміналі. Ці дані опрацьовуються сервером завчасно, задовго до початку операції. Під час операції сервер обробляє у режимі реального часу змінні дані від сенсорів, що передають положення судна, його курс, швидкість, відхилення від запланованої траєкторії, режими та положення буксирів тощо.

Таким чином, на сервер завантажуються дані від усіх учасників операції – як змінні, так і незмінні (тобто такі, що не змінюються у процесі проведення цієї операції). Крім того, сюди надходять дані від зовнішніх джерел безпекової інформації – баз даних інспекції Контролю держави порту, Меморандумів взаєморозуміння, Держави прапору, Визнаних організацій тощо. Базуючись на цих даних,

спеціальна програма здійснює обчислення рівня безпеки проведення операції для кожного окремого учасника та для всієї операції загалом (рис. 1).

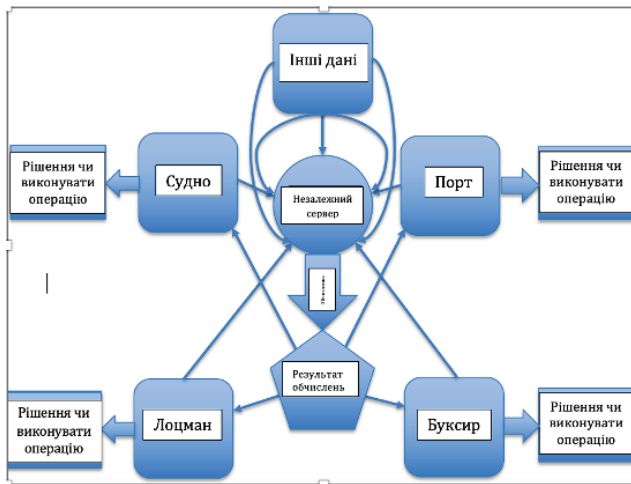


Рис. 1. Концепція кругової оцінки ризиків [4]

Подібна система може також використовувати можливості штучного інтелекту, що насамперед дає змогу якісного пошуку потрібної для всебічної оцінки ризиків інформації [5].

Очевидно, що для використання такої системи дуже важливо забезпечити її безпеку і неможливість зовнішнього втручання. Іншим важливим фактором є забезпечення конфіденційності інформації, тобто запобігання потрапляння інформації від одного учасника операції до іншого. Загалом конфіденційність забезпечується тим, що обчислення безпеки для кожного з учасників і загальної безпеки операції здійснюється саме на незалежному сервері у закритому режимі – учасники бачать тільки кінцевий результат, тобто отримані значення та рекомендації щодо проведення (або непроведення) операції швартування. При цьому сервер повинен мати досить високий рівень кіберзахисту для запобігання можливих хакерських атак [6].

Загалом завдання пошуку документів та обміну такою інформацією може вирішуватись за допомогою розподілених баз даних. Це рішення просте і вигідне для окремих учасників обмеженої кількості операцій. Але, враховуючи кількість подібних операцій, що проводяться

постійно, можна дійти висновку, що раціонально застосувати більш складну, але й більш надійну технологію.

Враховуючи те, що обчислення стосуються системи безпеки (SMS), цьому потрібно приділити достатньо уваги. Ця задача може бути більш ефективно вирішена за допомоги технології блокчейн.

Блокчейн-технології самі по собі практично унеможливають злам системи. Крім того, існують ще й очевидні переваги з точки зору збереження інформації та неможливості її фальшування. Наприклад, якщо в систему завантажили якийсь сертифікат, то його зміна або заміна сфальшованим, практично неможлива. Для забезпечення гарантованої автентичності документів, потрібно включити у систему органи, що їх видають, тобто урядові органи та визнані організації.

Документообіг за допомогою блокчейн-технології вже досить давно використовується у деяких компаніях, зокрема контейнерними лініями [7]. Вантажні документи, у тому числі коносаменти, платіжні документи, та багато інших успішно виконують свої функції та забезпечують увесь процес перевезення контейнерів від продавця до покупця.

В нашому випадку завдання навіть трохи простіше: забезпечити процес зберігання та обміну даних учасників операції, надходження даних з серверів інших установ (країни Меморандуму, Адміністрації, що видали судові документи, або кваліфікаційні документи членів екіпажу, тощо) та обчислення рівня ризику проведення операції у режимі реального часу.

Таким чином можна не тільки забезпечити безпечно зберігання даних, але й набагато спростити процес аутентифікації виданих документів. При використанні блокчейн-технології немає необхідності чекати на підтвердження легітимності певного документа: якщо він вже завантажений у систему, то відповідь буде практично миттєвою.

Треба зауважити також, що всі дії офіцерів палубної та машинної команд на судні, на буксирах, дії лоцмана (за допомогою системи запису рейсу) будуть фіксуватися у режимі реального часу. А впровадження постійного моніторингу рівня безпеки надасть можливість не тільки вчасно відреагувати на зміну ситуації, але й суттєво знизити вплив на операцію людського елементу. Але в цьому випадку застосування блокчейну вбачається тільки на етапі збереження логів, тобто журналів інформації про виконані дії, тому що використання блокчейну для аналізу потоків даних буде істотно гальмувати систему.

За рахунок того, що практично всі елементи в системі блокчейн пов'язані з попередніми та зашифровані, унеможливилося будь-яка зміна або фальсифікація жодного елемента.

Таким чином, у разі поганого розвитку подій, що призведе до аварії, система буде надійним джерелом доказів та інформації про весь хід операції швартування.

Звісно, є і певні складнощі, що полягають у необхідності створити саму систему на основі блокчейн-технологій, що складно не так з технічного, як з фінансового боку – такі системи достатньо дорогавартісні. Хоча, враховуючи можливі збитки від аварії, особливо якщо мова йде про судна з небезпечними вантажами, застосування дорогавартісних технологій виглядає цілком виправданим.

Іншим складним аспектом на шляху створення системи кругової оцінки ризиків на основі блокчейн-технології є необхідність уніфікації її для всіх учасників операції, та для тих організацій, що постачатимуть дані до системи (тобто для Держав прапору та порту, для Визнаних організацій, для держав, що видають кваліфікаційні документи членам екіпажу, тощо).

Крім того, якщо не всі подібні організації будуть використовувати блокчейн-технології (а це найбільш вірогідно на першому етапі), тоді виникає певна складність у взаємодії між ними, та користувачами такої технології.

Зазвичай при використанні блокчейн-технологій усі дані захищені від сторонніх очей, але доступні усім учасникам мережі. В даному випадку необхідно обмежити доступ учасників до даних інших учасників, що мають певний рівень конфіденційності. З іншого боку, змінити або видалити дані, що є в мережі, не може ніхто, бо єдиного адміністратора не існує.

Тут треба зробити певну ремарку, бо в принципі зміна даних у системі блокчейн можлива, але вони задіяють певні заздалегідь погоджені учасниками алгоритми, такі як «доказ ставки» або «доказ авторитету», коли досягається або консенсус, або рішення приймається ключовою підмножиною учасників мережі. При цьому попередні дані все одно будуть захищені завдяки «блоковим» та «ланцюговим» принципам технології. Тобто кожен блок пов'язаний з іншими і містить у собі інформацію попередніх блоків – це базові принципи блокчейну, які не можна змінити. Це означає, що для зміни даних у певному блоці потрібна зміна даних в усіх попередніх блоках. А для цього потрібне рішення усіх учасників мережі [7]. Перевага використання технології блокчейну саме для оцінки ризиків полягає саме в тому, що необхідність щось міняти може виникнути тільки у виключних дуже

рідких випадках, тому що судові документи тільки доповнюються при подовженні, або міняються, кваліфікаційні документи моряків теж тільки міняються, при чому видаляти щось із системи немає потреби, тому що наявність попередніх документів буде підґрунтям для видачі нових. І, якщо виникне необхідність перевірити правильність видачі моряку нових документів – завжди можна звернутися до попередніх. Так само і з судовими документами: збереження усіх документів, що видавалися певному судну, прив'язаних до його номеру ІМО, надасть можливість бачити усю безперервну історію судна, що і вимагається Кодексом ОСПЗ [8]. Що стосується інших даних, наприклад історії проходження судном інспекцій Контролю держави порту, Меморандумів, інших інспекцій, а також баз даних GISIS та Equasis, – вони теж можуть тільки доповнюватися, що і потрібно при усторонній оцінці ризиків.

Ще один позитивний аспект – неможливість зміни даних логів (журналів), що переведені у блокчейн, що гарантує достовірність отриманих даних у випадку розслідування можливої аварії. Але потрібно зауважити, що повністю перевести усю систему кругової оцінки ризиків у блокчейн не вбачається раціональним, тому частина системи, що обробляє змінні дані в реальному часі має працювати в звичайному режимі.

Організовувати мережу блокчейн для досить обмеженої кількості учасників (як показано на рис. 2) немає сенсу – це буде дуже дорого і ускладнить взаємодію із тими, хто такої мережі не матиме. Тому найбільш ефективним рішенням є створення розгалуженої мережі блокчейн у першу чергу для тих організацій, що видають судові документи та кваліфікаційні документи моряків, до якої будуть також залучені судовласники, інспекції Контролю держави порту та Адміністрації держав прапору. Крім того, потрібна мережа для Меморандумів та інспекцій Контролю держави порту (безумовно, вона може стати частиною загальної мережі – це не набагато ускладнить систему).

Таким чином, схема, що показана на рис. 1 трохи зміниться: незалежний сервер (платформа) стане частиною мережі блокчейн, звідки він буде отримувати незмінні дані. Ті ж дані, що швидко змінюються (режими роботи двигуна, координати, курс, швидкість, тощо), будуть надходити безпосередньо від відповідних пристроїв (рис. 2).

Усі інші етапи обробки інформації та прийняття рішень залишаються без змін.

Окрім вже зазначених переваг використання блокчейн-технології, треба сказати і про можливість суттєвого підвищення швидкості обробки даних – саме блокчейн дає таку можливість за рахунок практично миттєвої верифікації документів та забезпечення майже стовідсоткового її результату.

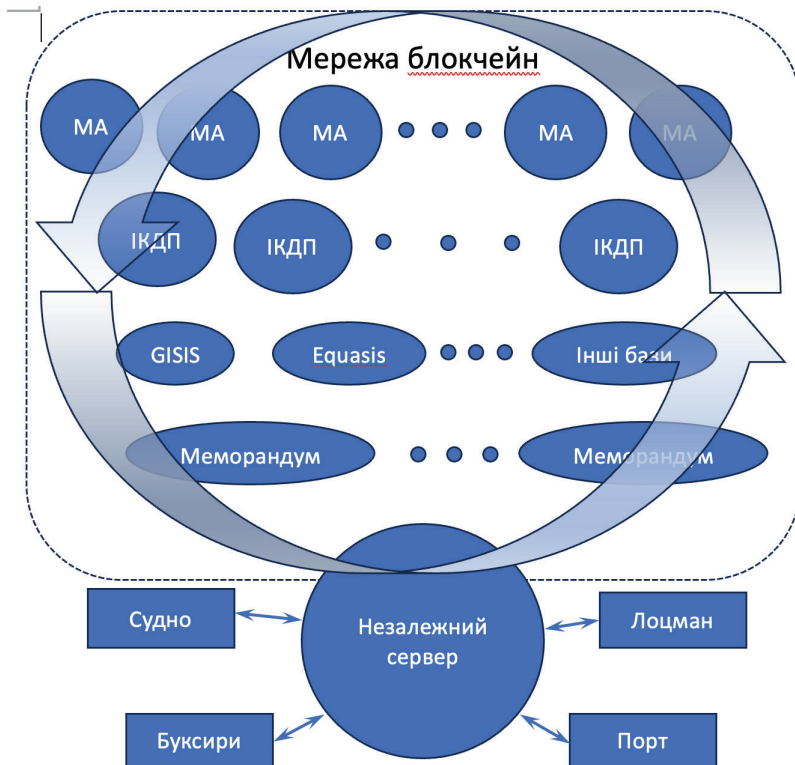


Рис. 2. Схема організації роботи системи кругової оцінки ризиків з використанням блокчейн-технології

У таблиці наведено позитивні та негативні аспекти впровадження блокчейн-технології у процес керування ризиками.

Як ми бачимо, до недоліків можна віднести тільки високу вартість та складність створення такої системи, а також необхідність домовлятися про єдині стандарти (якщо одночасно буде створено

кілька таких різних систем, то їхня уніфікація буде складною і дуже коштовною).

Таблиця.

Позитивні та негативні аспекти впровадження технології блокчейн у процес керування ризиками.

Позитивні аспекти	Негативні аспекти
Захист інформації	Складність системи
Прозорість, але і конфіденційність інформації	Велика вартість
Надійність інформації	Можливі складнощі під час роботи з елементами, які не входять в блокчейн
Пришвидшення процесу перевірки документів перед початком операції	Можливість застосування тільки для обробки документів
Робота в режимі реального часу	Неможливість роботи зі змінним потоком даних від сенсорів
Практична відсутність помилок	Практична неможливість виправлення помилок, якщо вони будуть
Неможливість несанкціонованого втручання	Можливість втручання у частину системи, що не захищена блокчейн
Збереження інформації практично необмежений час	–
Відсутність необхідності змінювати інформацію – тільки доповнювати	–
Неможливість фальсифікації	–
Можливість використання на глобальному рівні	Висока початкова вартість при обмеженому використанні
Використання єдиного стандарту інформації	Необхідність впровадження єдиного стандарту інформації

Вже існують розробки, що використовуються у логістичному сегменті морського транспорту. Вони успішно дають змогу суттєво зменшити паперову роботу та пришвидшити процеси оформлення вантажів. Більше того, блокчейн-технології вже використовуються і для випуску коносаментів, а також і для оплати фрахту та вантажів. Є

досить позитивний досвід деяких контейнерних ліній, де навіть митне оформлення вже здійснюється з допомогою таких технологій.

Таким чином, можна зробити висновки, що незважаючи на досить високу ціну розробки та експлуатації системи на основі технологій блокчейн, вони мають дуже гарні перспективи використання не тільки у логістичному сегменті морського транспорту, але й при оцінці ризиків, зокрема при оцінці ризиків рутинних невиробничих операцій, таких як швартування судна. Це надасть змогу пришвидшити процес, гарантувати істинність документів суден та суднових екіпажів, убезпечити систему оцінки ризиків, зменшити вірогідність помилки та вплив людського елементу, гарантувати відсутність фальсифікацій та збереження інформації практично необмежений час. Але застосування блокчейну для усієї системи кругової оцінки ризиків вбачається нерациональним, тому існує необхідність розробляти частину системи для роботи без застосування технологій блокчейн, що може додати складнощів у процес розробки та експлуатації такої системи.

ЛІТЕРАТУРА REFERENCES

1. Міжнародний кодекс з управління безпечною експлуатацією суден і запобіганням забрудненню (МКУБ), прийнятий резолюцією ІМО А.741(18) від 04.11.1993, з поправками.
2. ДСТУ EN IEC 31010:2022 Керування ризиками – методи оцінки ризиків.
3. A Guide to Risk Assessment in Ship Operations – No 127: IACS Rec. 2012/Rev.1 2021. – 6 p.
4. Сагайдак, О. І. Модель кругової оцінки ризиків швартовної операції судна з використанням інформаційних технологій. //Розвиток транспорту. – 2024. Вип. 4(23). С. 29 - 41.
- 5 Горб, С. І., Сагайдак, О. І., Горб, О. С. Використання штучного інтелекту для оцінки ризиків на морських суднах// Автоматизація суднових технічних засобів: наук.-техн. зб. – 2024. – Вип. 29. – Одеса: НУОМА. – С. 33 – 42.
6. Сагайдак, О., Мельник, О. Аналіз та оцінка нових факторів ризику в сучасному морському судноплавстві //Судноводіння. – 2024. – Вип. 36. – С. 147 – 162.
7. Мазуренко, О. К. Технології Blockchain в інформаційному забезпеченні логістичних послуг //БІЗНЕСІНФОРМ. – 2019. – № 12. – С. 255 – 261.

8. The International Ship and Port Facility Security Code (ISPS Code), adopted on 12.12.2002 with amendments.

9. Procedures for Port State Control, adopted on 06.12.2023. Resolution A.1185(33).

10. Сагайдак, О. І., Шахов, А. В. Модель оцінки ризиків усіх учасників операції швартування за допомогою ІТ технології. //ДНІПРОВСЬКІ ЧИТАННЯ-2022: зб. матеріалів III міжнар. наук.-практ. конференції 08.12.2022. – Київ: КІВТ імені гетьмана Петра Конашевича-Сагайдачного Державного університету інфраструктури та технологій, 2022. – С. 73 – 77.

Abstract. *According to existing requirements, each operation on a vessel must be assessed from the point of view of the occurrence of possible risks before it begins. This also applies to such routine operations as mooring a vessel. When conducting such operations, there is a great opportunity for a formal approach to risk assessment. This procedure also has a significant impact on the human element. To prevent this, the previously proposed concept of circular risk assessment can be used, which makes it possible to take into account the possible risks of all participants in the operation, and not just one of them, as is usually done. For a more detailed risk assessment, an analysis of ship documents and seafarers' qualification documents is used, and this, in turn, can be accelerated and made more qualitatively using blockchain technologies, which are already successfully used in maritime logistics by container lines. The cost of development and complexity of the system is compensated by the elimination of possible errors and falsifications, as well as by accelerating the entire procedure and its more accurate results.*

УДК 629.5

DOI: 10.31653/1819-3293-2025-1-30-104-120

ARTICLE HISTORY

Received 15.05.2025

Accepted 19.05.2025

Сагін Сергій Вікторович¹, Куропятник Олексій Андрійович²
НУ "Одеська морська академія", Одеса, Україна
saginsergii@gmail.com¹, kuropyatnyk83@gmail.com²

Аналіз впливу біодизельного палива на екологічні та економічні показники роботи суднових дизелів

Sagin Sergii, Kuropyatnyk Oleksii
NU "Odessa Maritime Academy", Odessa, Ukraine
saginsergii@gmail.com¹, kuropyatnyk83@gmail.com²

Analysis of the impact of biodiesel fuel on the environmental and economic performance of marine diesel engines

Резюме – Наведено результати досліджень щодо визначення впливу біодизельного палива B10 та B30 на екологічні та економічні показники роботи суднових дизелів 5S60ME-C8 MAN-B&W Diesel Group та 6DL-16 Daihatsu Diesel, що використовувались як головний та допоміжні на судні класу Bulk Carrier дедвейтом 58640 тонн. Експериментально підтверджено, що під час використання біодизельного палива B10 та B30 в порівнянні з паливом нафтового походження RMG380 досягається 24 ... 25 % зниження концентрації оксидів азоту в випускних газах, при цьому відбувається підвищення питомої витрати палива на 1,7 ... 6,0 %.

Abstract – The results of research on determining the impact of biodiesel fuel B10 and B30 on the environmental and economic indicators of the work of ship diesels 5S60ME-C8 MAN-B&W Diesel Group and 6DL-16 Daihatsu Diesel, which were used as main and auxiliary on Bulk Carrier class vessels with a deadweight of 58,640 tons, are provided. It has been experimentally confirmed that when using biodiesel fuel B10 and B30, in comparison with fuel of petroleum origin RMG380, a 24 ... 25 % decrease in the

concentration of nitrogen oxides in exhaust gases is achieved, while there is a 1.7 ... 6.0 % increase in fuel consumption.

Головними та допоміжними двигунами на морських судах є двигуни внутрішнього згоряння / дизелі [1, 2]. Саме цей тип теплових двигунів має найвищий коефіцієнт корисної дії та найнижчу питому витрату палива [3, 4]. Дизелі – основний тип теплових двигунів, що забезпечує рух морських суден, а також функціонування їх систем та механізмів [5, 6]. Сучасними альтернативами судновим дизелям є сонячні батареї, вітрогенератори, жорсткі та скайт вітрила, акумуляторні батареї, паливні елементи можуть забезпечити енергетичні потреби морських суден лише за певних умов та обмежений період часу.

Функціонування суднових дизелів неможливе без використання рідкого палива нафтового походження, що є основним джерелом енергії всіх теплових двигунів. Відповідно до міжнародного стандарту на паливо DIS DP-8217, розробленого міжнародною організацією зі стандартизації ISO, у суднових дизелях використовуються два сорти дистильного палива – чисте дизельне паливо DMA, DMB та змішане паливо DMC, а також очищене паливо RM [7, 8]. Діапазон в'язкості палива класу DMA, DMB, DMC за 50 °C лежить у межах 2 ... 15 сСт, їх густина за 15 °C становить 880 ... 920 кг/м³. У зв'язку з цим дані сорти палива називають легкими. Теплотворна здатність палив DMA, DMB, DMC знаходиться в межах 42000 ... 44000 кДж/кг. Паливо класу RM (наприклад, RMA30, RME180, RMG380, RMK700) мають в'язкість 30 ... 700 сСт (за температурою 50 °C), густину 960 ... 1010 кг/м³ (за температурою 15 °C) та називаються важкими. Теплотворна здатність палив класу RM знаходиться в межах 39000 ... 42000 кДж/кг. Важкі сорти палива мають нижчу вартість порівняно з легкими, що обумовлює використання цих сортів в суднових дизелях для скорочення фінансових витрат на їх придбання [9, 10]. Також слід зазначити, що у сучасних суднових дизелях (як головних, так і допоміжних) важкі сорти палив використовуються для забезпечення всіх режимів роботи, зокрема режимів пуску і реверсування [11, 12].

Одним із критеріїв використання нафтових палив у суднових енергетичних установках є вміст сірки [13, 14]. Відповідно до вимог Annex VI MARPOL вміст сірки в паливі в разі експлуатації дизелів у спеціальних екологічних районах Sulphur emission control areas (SECAs) не повинен перевищувати 0,1 % за масою; у разі експлуатації поза районами SECAs – вміст сірки у паливі не повинен перевищувати 0,5 % за масою. Використання палива із вмістом сірки понад 0,5 % за

масою можливе лише у разі додаткового очищення випускних газів у спеціальних системах очищення (як правило – у скруберах) [15, 16].

До одного з компонентів випускних газів суднових дизелів, значення якого регламентується Annex VI MARPOL, відносяться оксиди азоту NO_x . Відповідно до вимог Annex VI MARPOL встановлено три рівні викидів оксидів азоту – Tier I, Tier II, Tier III, які встановлюють максимальний рівень емісії оксидів азоту залежно від року побудови судна та частоти обертання дизеля [17, 18].

Джерелами утворення NO_x є азот, що знаходиться в повітрі, та азот, що знаходиться в паливі. Під час згоряння паливовітряної суміші, з азоту, що знаходиться в повітрі, утворюються термічні NO_x та швидкі NO_x ; з азоту, що входить до складу палива, – паливні NO_x . За температур вище ніж 1500°C відбувається ланцюгова реакція утворення оксидів азоту. Тому всі методи та технології, які забезпечують зменшення емісії NO_x , спрямовані на зниження максимальної температури в циліндрі дизеля [19, 20].

Одним із варіантів зниження емісії SO_x та NO_x з випускними газами суднових дизелів є використання альтернативних палив, основними видами якого є скраплений природний газ, скраплений нафтовий газ, водень, аміак, рослинні олії, біопаливо – біодизель [21, 22]. При цьому, через меншу кількість або відсутність сірки в складі біодизеля, забезпечуються вимоги щодо вмісту сірки в паливі, через меншу температуру згоряння біодизеля – виконуються вимоги щодо викидів оксидів азоту.

Основними компонентами, які використовують під час виробництва біодизеля, є рослинні та тваринні жири, хімічний склад яких незначно відрізняється один від одного [23, 24]. В результаті естерифікації у присутності метанолу або етанолу, а також каталізатора ці речовини реагують з утворенням моноалкілових ефірів, саме цей продукт називають біодизель. Далі біодизельна фаза додатково очищається за допомогою дистиляції та мембранного поділу [25, 26]. Таким чином, біодизельне паливо (або FAME – Fatty Acid Methyl Ester, метилові ефіри жирних кислот) на відміну від дизельного палива на нафтовій основі, виробляється з відновлюваних органічних джерел. Основні експлуатаційні характеристики FAME (густина, в'язкість, температура спалаху, теплотворна здатність) збігаються з аналогічними показниками дизельного палива – це дозволяє використовувати його у більшості сучасних дизельних двигунів [27, 28]. Як правило, у чистому вигляді біодизельне паливо FAME не використовується. Найбільш доцільний варіант його використання – паливні суміші із паливом нафтового походження. У таких сумішах

нафтове паливо є основним компонентом та його кількість становить 70 ... 95 % за масою. Біодизельне паливо використовується як добавка, його кількість становить 5 ... 30 % за масою. Такі палива класифікуються як B5, B10...B25, B30.

Незважаючи на застосування різних видів біодизельного палива, загальні рекомендації щодо визначення його оптимальної концентрації у дизельному паливі не розроблено. Також не існує рекомендацій щодо досягнення економічної та екологічної ефективності використання суміші дизельного та біодизельного палива на різних режимах роботи дизеля.

Біодизельне паливо використовується як у головних, так і у допоміжних двигунах різної потужності. Однак більшість наукових досліджень, спрямованих на вивчення можливості використання біодизельного палива, переважно присвячені автомобільному та залізничному транспорту [29, 30]. Крім того, не розроблено критеріїв, за якими можна провести оцінку ефективності використання біодизельного палива в дизелях морських суден.

У зв'язку з цим метою дослідження було визначення впливу біодизельного палива на екологічні та економічні показники роботи суднових дизелів.

Дослідження щодо вивчення впливу біодизельного виконувались на судні класу Bulk Carrier дедвейтом 58640 т. Як головний двигун на судні використовувався судновий дизель 5S60ME-C8 MAN-B&W Diesel Group, як допоміжні – три суднові дизелі 6DL-16 Daihatsu Diesel. Основні характеристики суднових дизелів наведено у табл. 1.

Таблиця 1
Основні характеристики суднових дизелів

Характеристика	5S60ME-C8 MAN-B&W Diesel Group	6DL-16 Daihatsu Diesel
Діаметр циліндра, м	0,6	0,165
Хід поршня, м	2,4	0,21
Тип	двотактний	чотиритактний
Кількість	1	3
Потужність, кВт	8200	530
Частота обертання, мин ⁻¹	92	1200
Питома витрата палива, кг/(кВт·год)	0,176	0,191

Дизелі 5S60ME-C8 MAN-B&W Diesel Group та 6DL-16 Daihatsu Diesel мали загальну паливну систему, схема якої показана на рис. 1.

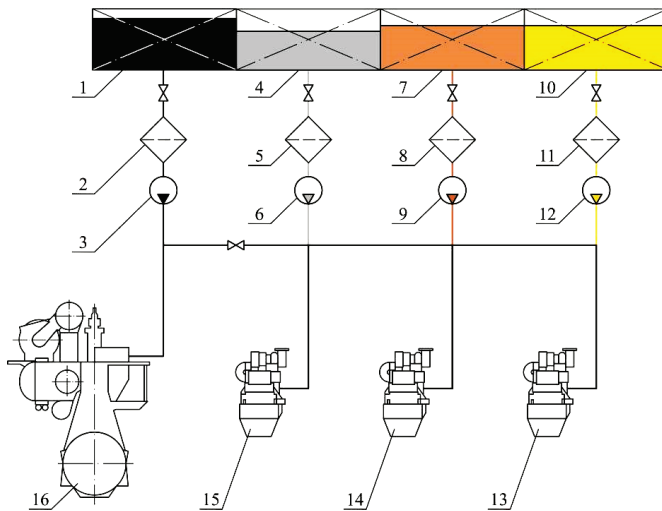


Рис. 1. Принципова паливна схема суднових дизелів 5S60ME-C8 MAN-B&W Diesel Group та 6DL-16 Daihatsu Diesel:

- 1 – важке паливо ($S > 0,1 \%$); 2, 5, 8, 11 – паливний фільтр;
- 3, 6, 9, 12 – паливний насос; 4 – легке паливо ($S < 0,1 \%$);
- 7 – біодизельне паливо B10; 10 – біодизельне паливо B30;
- 13, 14, 15 – допоміжний двигун 6DL-16 Daihatsu Diesel;
- 16 – головний двигун 5S60ME-C8 MAN-B&W Diesel Group

Подача палива до головного двигуна 16 та допоміжних двигунів 13, 14, 15 здійснювалася з паливних танків 1, 4, 7, 10 з використанням паливних фільтрів 2, 5, 8, 11 та паливних насосів 3, 6, 9, 12. Основні параметри роботи паливної системи (тиск, витрата, температура, в'язкість палива) контролювалися та підтримувалися автоматично. Також автоматично підтримувалася частота обертання та навантаження головного двигуна та допоміжних двигунів [31, 32]. Крім того, автоматично підтримувався розподіл навантаження між кількома допоміжними двигунами (двома або трьома) у разі їхньої паралельної роботи. Дизелі були обладнані системою діагностики ProPower, яка забезпечувала контроль основних показників робочого процесу – тиску згоряння p_z , ефективної потужності N_e , питомої ефективної витрати палива b_e , температури випускних газів t_g . Система ProPower також

здійснювала контроль та аналіз випускних газів дизелів, у тому числі визначення концентрації оксидів азоту NO_x [33, 34]. Система ProPower відноситься до сучасних систем діагностики робочого процесу суднових дизелів та використовується на великій кількості морських суден. Експлуатація дизелів здійснювалася з використанням палив нафтового походження DMA та RMG380, а також біодизельних палив B10 та B30. Палива B10 та B30 включають до свого складу дизельне паливо – 90 % або 70 %, а також паливо FAME – 10 % або 30 %. Основні характеристики палив наведені у табл. 2.

Таблиця 2

Основні характеристики палив

Характеристика	DMA	RMG380	B10	B30
Густина за 20° C, кг/м ³	894	942	891	889
В'язкість за 40° C, мм ² /с	6,4	376	6,26	6,12
Вміст сірки, %	0,072	0,43	0,065	0,058
Теплотворна здатність, кДж/кг	43680	40020	43686	43032

У разі знаходження судна у спеціальних екологічних районах SECAs експлуатація дизелів виконувалася на паливі DMA, під час знаходження судна поза SECAs – на паливі RMG380. Крім того, під час проведення експериментів дизелі використовували паливо B10 та B30. Під час проведення експерименту густина та в'язкість палива постійно контролювалися за допомогою суднової лабораторії фірми Unitor. Це забезпечувало однорідність палива та гарантувало коректність проведення експериментів [35].

Головний двигун 5S60ME-C8 MAN-B&W Diesel Group передавав свою потужність на гвинт фіксованого кроку за допомогою прямої передачі. Залежно від навігаційних умов та комерційного завдання на рейс, експлуатаційні режими роботи дизеля 5S60ME-C8 MAN-B&W Diesel Group становили 65 ... 95 % від номінального навантаження. Під час пускових та маневрових режимів роботи дизель експлуатувався на навантаженнях 10 ... 50 % від номінального.

Допоміжні двигуни 6DL-16 Daihatsu Diesel були приводом електричних генераторів та входили до складу суднової електростанції. Їхньої потужності вистачало для забезпечення всіх операцій на судні на всіх експлуатаційних режимах (аварійному, швартовому, вантажному, нормальному). При цьому в експлуатації знаходився або один із трьох двигунів, або два двигуни – в цьому випадку вони працювали в паралельному режимі. Залежно від потреб в електричній

енергії, експлуатаційні режими роботи дизелів 6DL-16 Daihatsu Diesel становили 50 ... 80 % від номінального навантаження.

Під час проведення експериментальних досліджень головний двигун 5S60ME-C8 MAN-B&W Diesel Group експлуатувався рівні проміжки часу на важкому паливі RMG380, а також на паливі B10 та B30 на навантаженнях 65 %, 75 %, 85 %, 95 % від номінальної потужності. Тривалість проведення експерименту на кожному з навантажень становила 1 ... 3 години і залежала від умов плавання судна.

Допоміжні дизелі 6DL-16 Daihatsu Diesel експлуатувалися рівні проміжки часу на важкому паливі RMG380, а також на паливі B10 та B30 на навантаженнях 50 %, 60 %, 70 %, 80 % від номінальної потужності. Тривалість проведення експерименту на кожному з навантажень становила 2 ... 4 години та залежала від енергетичних потреб судна.

Ефективність використання біопалив B10 та B30 оцінювалася за екологічним та економічним критеріями. Як екологічний критерій приймалася концентрація оксидів азоту у випускних газах дизелів – NO_x , г/(кВт·год). Саме цей показник в більшості наукових досліджень визначається як основний під час оцінки екологічності роботи морських суден. Як економічний критерій приймалась питома ефективна витрата палива – b_e , г/(кВт·год), яка впливає на загальну витрату палива (добову або відносно пройденого шляху). Отримані результати наведені у табл. 3 - 6.

Таблиця 3

Концентрація оксидів азоту NO_x , г/(кВт·год), в випускних газах суднового дизеля 5S60ME-C8 за різних навантажень

Навантаження, %	Вид палива		
	B10	B30	RMG380
50	5,74	5,23	6,73
60	5,92	5,42	7,11
70	6,02	5,64	7,48
80	6,16	5,87	7,84

Для кращої візуалізації, залежності концентрації оксидів азоту у випускних газах NO_x , а також питомої ефективної витрати палива b_e для різних навантажень суднових дизелів під час використання важкого палива RMG380, а також біопалив B10 та B30 показані на рис. 2, 3.

Таблиця 4

Питома ефективна витрата палива b_e , г/(кВт·год),
суднового дизеля 5S60ME-C8 за різних навантажень

Навантаження, %	Вид палива		
	B10	B30	RMG380
65	191	194	183
75	186	190	180
85	182	185	177
95	179	181	176

Таблиця 5

Концентрація оксидів азоту NO_x , г/(кВт·год), в випускних газах
суднового дизеля 6DL-16 за різних навантажень

Навантаження, %	Вид палива		
	B10	B30	RMG380
65	9,21	8,81	10,58
75	9,92	9,32	11,64
85	10,32	9,88	12,65
95	10,75	10,25	13,42

Таблиця 6

Питома ефективна витрата палива b_e , г/(кВт·год),
суднового дизеля 6DL-16 за різних умов проведення експерименту

Навантаження, %	Вид палива		
	B10	B30	RMG380
50	204	209	199
60	199	202	195
70	196	198	193
80	194	197	191

Використання біопалива сприяє зниженню концентрації оксидів азоту у випускних газах як для дизеля 5S60ME-C8 MAN-B&W Diesel Group, так і для дизелів 6DL-16 Daihatsu Diesel.

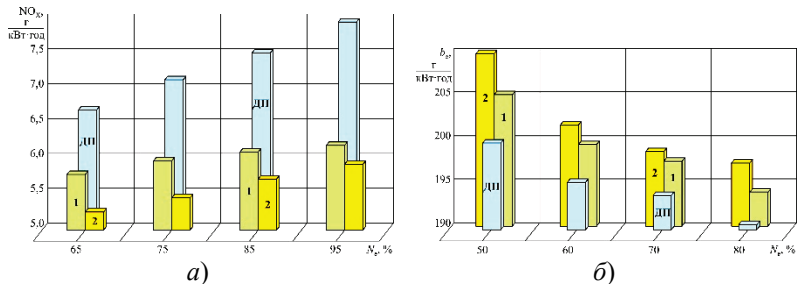


Рис. 2. Залежність концентрації оксидів азоту в випускних газах (а), та питомої ефективної витрати палива (б) для різних навантажень суднового дизеля 5S60ME-C8 MAN-B&W Diesel Group: ДП – дизельне паливо; 1 – біопаливо B10; 2 – біопаливо B30

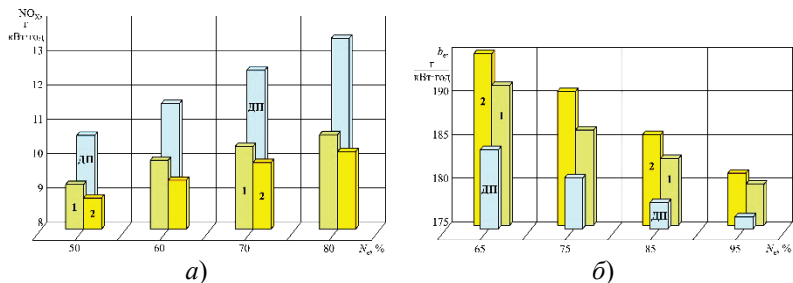


Рис. 3. Залежність концентрації оксидів азоту в випускних газах (а), та питомої ефективної витрати палива (б) для різних навантажень суднового дизеля 6DL-16 Daihatsu Diesel: ДП – дизельне паливо; 1 – біопаливо B10; 2 – біопаливо B30

Однак, при цьому збільшується питома ефективна витрата палива. Відносна зміна цих параметрів оцінювалася за виразами: відносне зниження концентрації оксидів азоту у випускних газах

$$\Delta NO_x = \frac{NO_x^{ДП} - NO_x^{Біо}}{NO_x^{ДП}} \cdot 100 \% ; \quad (1)$$

відносне збільшення питомої ефективної витрати палива

$$\Delta b_e = \frac{b_e^{Біо} - b_e^{ДП}}{b_e^{ДП}} \cdot 100 \% ; \quad (2)$$

де $\text{NO}_x^{\text{ДП}}$, $\text{NO}_x^{\text{Біо}}$ – концентрація оксидів азоту у випускних газах під час використання дизельного та біодизельного палива (В10 або В30); $b_e^{\text{ДП}}$, $b_e^{\text{Біо}}$ – питома ефективна витрата палива під час використання дизельного палива та біопалива (В10 або В30).

Отримані в такий спосіб значення наведено у табл. 7 - 10.

Таблиця 7

Відносне зниження концентрації оксидів азоту у випускних газах
суднового дизеля 5S60ME-C8 за різних навантажень

Навантаження, %	Вид палива	
	В10	В30
65	12,95	16,73
75	14,78	19,93
85	18,42	21,90
95	19,90	23,62

Таблиця 8

Відносне збільшення питомої ефективної витрати палива суднового
дизеля 5S60ME-C8 за різних навантажень

Навантаження, %	Вид палива	
	В10	В30
65	4,37	6,01
75	3,33	5,56
85	2,82	4,52
95	1,70	2,84

Таблиця 9

Відносне зниження концентрації оксидів азоту у випускних газах
суднового дизеля 6DL-16 за різних навантажень

Навантаження, %	Вид палива	
	В10	В30
50	14,71	22,29
60	16,74	23,77
70	19,52	24,60
80	21,43	25,13

Таблиця 10

Відносне збільшення питомої ефективної витрати палива суднового дизеля 6DL-16 за різних навантажень

Навантаження, %	Вид палива	
	B10	B30
50	2,51	5,03
60	2,05	3,59
70	1,55	2,59
80	1,57	3,14

Для кращої візуалізації розрахунків значення відносного зниження концентрації оксидів азоту у випускних газах та відносного збільшення питомої витрати палива, які наведені в табл. 7 - 10, представлені у вигляді діаграм (рис. 4, 5).

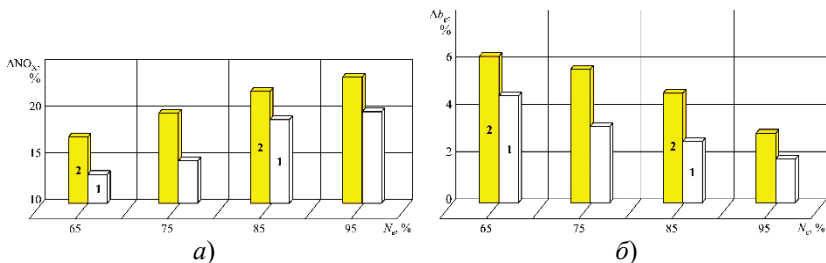


Рис. 4. Відносне зниження концентрації оксидів азоту у випускних газах (а), відносне збільшення питомої ефективної витрати палива (б) дизеля 5S60ME-C8 MAN-B&W Diesel Group за різних навантажень: 1 – біопаливо B10; 2 – біопаливо B30

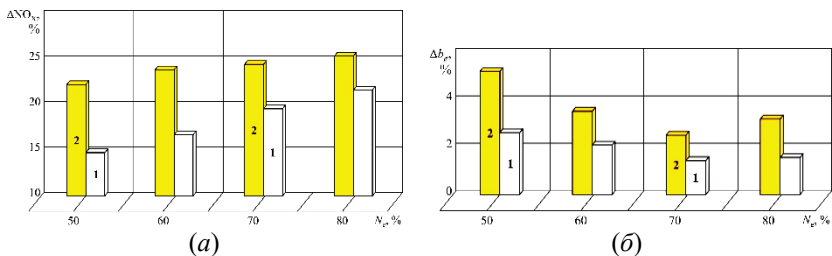


Рис. 5. Відносне зниження концентрації оксидів азоту у випускних газах (а) та відносне збільшення питомої витрати палива (б) дизеля 6DL-16 Daihatsu Diesel за різних навантажень: 1 – біопаливо B10; 2 – біопаливо B30

Наведені результати свідчать, що біопаливо B10 так і біопаливо B30 сприяють поліпшенню екологічності роботи дизеля (а саме забезпечують зниження емісії оксидів азоту NO_x). Водночас при цьому погіршується економічність роботи дизель (збільшується питома ефективна витрата палива), причому для біопалива B30 на деяких режимах роботи збільшення питомої ефективної витрати палива становить 4,5 ... 6,0 % (для дизеля 5S60ME-C8 MAN-B&W Diesel Group) та 3,1 ... 5,0 % (для дизеля 6DL-16 Daihatsu Diesel).

Під час проведення досліджень контролювались та підтримувалися у необхідному діапазоні всі основні параметри роботи головного та допоміжних дизелів, а також параметри у системах, що забезпечують їхнє функціонування. До них були віднесені:

тиск у циліндрі в кінці стиснення, температура випускних газів, середній індикаторний тиск, а також відхилення цих показників від середнього значення по всіх циліндрах;

частота обертання валу дизеля;

фази газорозподілу (кути відкриття та закриття продувних та випускних клапанів);

тиск і температура охолоджувальної води та циркуляційного мастила на вході та виході з дизелів;

температура та в'язкість палива, а також технічний стан паливної апаратури високого тиску [36, 37].

Отримані результати дозволяють зробити наступні висновки.

Одним із способів забезпечення екологічної ефективності та розширення діапазону екологічної стійкості дизелів морських суден є використання біопалива. До одного з найпоширеніших типів біопалива належить біодизельне паливо FAME – Fatty Acid Methyl Ester. У суднових дизелях використовуються паливні суміші, основну частину яких (70 ... 90 %) становлять дистилятні сорти палива, як добавка (10 ... 30 %) використовуються палива класу FAME. Як подібні суміші під час проведення досліджень використовувалися біопалива B10 і B30.

Експерименти, які були виконані на суднових дизелях 5S60ME-C8.2 MAN-Diesel&Turbo та 6DL-16 Daihatsu Diesel визначили таке:

1) біопалива B10 (яке містить 90 % дистилятного палива та 10 % біодизельного палива FAME) та B30 (яке містить 70 % дистилятного палива та 30 % біодизельного палива FAME) у порівнянні з важким паливом RMG380 забезпечують зниження концентрації оксидів азоту в діапазоні:

для дизеля 5S60ME-C8.2 MAN-Diesel&Turbo на 12,95 ... 19,90 % (біопаливо B10) та на 16,73 ... 23,62 % (біопаливо B30);

для дизеля 6DL-16 Daihatsu Diesel на 14,71 ... 21,43 % (біопаливо B10) та на 22,29 ... 25,13 % (біопаливо B30);

2) одночасно з цим під час використання біопалива збільшується питома ефективна витрата палива:

для дизеля 5S60ME-C8.2 MAN-Diesel&Turbo на 1,70 ... 4,37 % (біопаливо B10) та на 2,84 ... 6,01 % (біопаливо B30);

для дизеля 6DL-16 Daihatsu Diesel на 1,55 ... 2,51 % (біопаливо B10) та на 2,59 ... 5,03 % (біопаливо B30);

3) підвищення питомої ефективної витрати на окремих режимах роботи дизелів є негативним фактором і може бути причиною обмеження використання біопалива;

4) покращення екологічних характеристик роботи суднових дизелів у разі використання біопалива є ключовою перевагою та сприяє інтенсивності використання біопалива в енергетичних установках морських суден. Це підвищує екологічну безпеку роботи дизелів у разі виникнення аварійних ситуацій, а також випадкових та короточасних викидів в атмосферу випускних газів із підвищеним вмістом оксидів азоту – явищах, які можливі на пускових режимах роботи дизеля, а також на режимах стрибкоподібної зміни навантаження.

ЛІТЕРАТУРА REFERENCES

1. Sagin S., Madey V., Sagin A., Stoliaryk T., Fomin O., Kučera P. Ensuring Reliable and Safe Operation of Trunk Diesel Engines of Marine Transport Vessels // *Journal of Marine Science and Engineering*. – 2022. – Vol. 10(10). – P. 1373.

2. 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.

3. Zablotskyi Yu.V., Sagin A.S. Applying of fuel additives in marine diesel engines // *Суднові енергетичні установки: наук.-техн. зб.* – 2021 – Вип. 43. – Одеса: НУ «ОМА». – С. 5 - 17.

4. Sagin S.V., Stoliaryk T.O. Comparative assessment of marine diesel engine oils // *Austrian Journal of Technical and Natural Sciences. Scientific journal*. – 2021. – № 7-8. – P. 29 - 35.

5. Заблоцький, Ю. В. Підвищення економічності роботи суднових дизелів // *Суднові енергетичні установки: наук.-техн. зб.* – 2020. – Вип. 40. – Одеса: НУ "ОМА". – С. 12 - 16.

6. Горб, С. И., Будуров, Н. И. Анализ состояния газового тракта дизеля безразборным методом // Матеріали міжнародної науково-технічної конференції «Суднова електроінженерія, електроніка і автоматика», 24.11.2020, 25.11.2020. – Одеса: НУ"ОМА", 2020. – С. 211 - 216.

7. Sagin S.V. Decrease in mechanical losses in high-pressure fuel equipment of marine diesel engines // Materials of the International Conference "Scientific research of the SCO countries: Series Synergy and Integration. – 2019. – P. 139 - 145.

8. Petrychenko O., Levynskyi M., Prytula D., Vynohradova A. Fuel options for the future: a comparative overview of properties and prospects // Transport Systems and Technologies. – 2023. – № 41. – P. 96 - 106.

9. Сагін, С. В. Определение диапазона стратификации вязкости смазочного материала в трибологических системах судовых дизелей // Вісник Одеського національного морського університету: зб. наук. праць. – 2019. – Вип. 1(58). – С. 89 - 100.

10. Побережний, Р. В., Сагін, С. В. Забезпечення екологічних показників дизелів суден річкового та морського транспорту // Суднові енергетичні установки: наук. -техн. зб. – 2020. – Вип. 41. – Одеса: НУ"ОМА". – С. 5 - 9.

11. 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.

12. Сагін, С. В., Заблоцкий, Ю. В. Определение триботехнических характеристик поверхностей по степени упорядоченности пристенных слоев углеводородных жидкостей // Проблеми техніки: наук.-виробн. журнал. – 2011. – № 3. – Одесса: ОНМУ. – С. 78 - 88.

13. Заблоцкий, Ю. В., Сагін, А. С. Визначення динамічних навантажень під час зміни режимів мащення прецизійних пар паливної апаратури судових дизелів // Суднові енергетичні установки: наук. – техн. зб. – 2022. – Вип. 44. – Одеса: НУ «ОМА». – С. 121 - 131.

14. Sagin S.V., Kuropyatnyk O.A., Zablotskyi Yu.V. Gaichenia O.V. Supplying of Marine Diesel Engine Ecological Parameters // Nase More : International Journal of Maritime Science & Technology. – 2022.– Vol. 69. – Iss. 1. – P. 53 - 61.

15. Руснак, Д. Ю., Сагін, С. В. Забезпечення екологічних вимог при ультразвуковій десульфурізації вуглеводних палив // Суднові енергетичні установки: наук.-техн. зб. – 2020. – Вип. 40. – Одеса: НУ"ОМА". – С. 49 - 54.

16. Sagin A.S., Zablotskyi Yu.V. Reliability maintenance of fuel equipment on marine and inland navigation vessels // Austrian Journal of Technical and Natural Sciences. Scientific journal. – 2021. – № 7 - 8. – P. 14 - 17.

17. Куропятник, А. А., Сагин, С. В. Управление выпускными газами судовых дизелей для обеспечения экологических показателей // Автоматизация судовых технических средств: науч. -техн. сб. – 2018. – Вып. 24. – Одесса: НУ "ОМА". – С. 72 - 80.

18. Sagin S.V., Kuropyatnyk A.A. Application of the system of recirculation of exhaust gases for the reduction of the concentration of nitric oxides in the exhaust gases of the ship diesels // American Scientific Journal. – 2017. – № 15. – Iss. 2. – P. 67 - 71.

19. Sagin S., Kuropyatnyk O., Sagin A., Tkachenko I., Fomin O., Píšťek V., Kučera P. Ensuring the Environmental Friendliness of Drillships during Their Operation in Special Ecological Regions of Northern Europe // Journal of Marine Science and Engineering. – 2022. – Vol. 10(9). – P. 1331.

20. Sagin S. V., Kuropyatnyk O. A. Using exhaust gas bypass for achieving the environmental performance of marine diesel engines // Austrian Journal of Technical and Natural Sciences. – 2021. – № 7 - 8. – P. 36 - 43.

21. Sagin S., Karianskyi S., Madey V., Sagin A., Stoliaryk T., Tkachenko I. Impact of Biofuel on the Environmental and Economic Performance of Marine Diesel Engines // Journal of Marine Science and Engineering. – 2023. – Vol. 11. – P. 120.

22. Сагин, С. В., Куропятник, А. А. Оптимизация режимов работы системы перепуска выпускных газов судовых среднеоборотных дизелей // Автоматизация судовых технических средств: науч. -техн. сб. – 2019. – Вып. 25. – Одесса: НУ "ОМА". – С. 79 - 89.

23. Поповский, А. Ю., Сагин, С. В. Комплексная оценка эксплуатационных характеристик смазочных углеводородных жидкостей // Автоматизация судовых технических средств: науч.- техн. сб. – 2014. – Вып. 20. – Одесса: НУ "ОМА". – С. 74 - 83.

24. 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. – Одесса: НУ "ОМА". – С. 66 - 74.

25. Сагин, С. В., Мадей, В. В., Сагин, А. С. Работа судового дизеля на бодизельному паливі // Автоматизация судовых технических засобів: наук. -техн. зб. – 2021. – Вип. 27. – Одеса: НУ "ОМА". – С. 93 - 107.

26. Мацкевич, Д. В., Сагин, С. В., Ханмамедов, С. А. Изменение реологических характеристик смазочных материалов в циркуляционной масляной системе в процессе эксплуатации

среднеоборотного двигателя // Судовые энергетические установки: науч.-техн. сб. – 2010. – Вып. 25. – Одесса: ОНМА. – С.109 - 118.

27. Petrychenko O., Levynskyi M. Trends and preconditions for widespread adoption of liquefied natural gas in maritime transport // Transport Systems and Technologies. – 2024. – № 43. – P. 21 - 36.

28. Сагін, С. В. Зниження енергетичних втрат в прецизійних парах паливної апаратури суднових дизелів // Суднові енергетичні установки: наук. -техн. зб. – 2018. – Вип. 38. – Одеса: НУ "ОМА". – С. 132 - 142.

29. Sagin S. V., Sagin S. S., Fomin O., Gaichenia O., Zablotskiy Y., Piřtřek V., Kuřcera P. Use of biofuels in marine diesel engines for sustainable and safe maritime transport // Renewable Energy. – 2024. – Vol. 224. – P. 120221.

30. Заблоцький, Ю. В. Підвищення паливної економічності суднових дизельних установок // Вісник Одеського національного морського університету: зб. наук. праць. – 2020. – № 2(62). – С. 106 - 119.

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

32. 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.

33. Сагін, С. В., Побережний, Р. В. Аналіз основних способів зниження емісії оксидів азоту дизелів суден морського та внутрішнього водного транспорту // Суднові енергетичні установки: наук. –техн. зб. – 2022. – Вип. 44. – Одеса: НУ «ОМА». – С. 132 - 141.

34. Куропятник, А. А. Комплексное управление выпускными газами судовых дизелей как способ обеспечения их экологических показателей работы // Вісник Одеського національного морського університету: зб. наук. праць. – 2020. – № 2(62). – С. 142 - 159.

35. Сагін, С. В., Поповський, Ю. М., Гребенюк, М. Н. Влияние ориентационной упорядоченности в граничных смазочных слоях на триботехнические характеристики узлов трения // Судовые энергетические установки: науч. -техн. сб. – 1998. – Вып. 1. – Одесса: ОГМА. – С. 102 - 104.

36. Горб, С. И., Никольский, В. В., Хнюнин, С. Г., Шапо, В. Ф. Методическое обеспечение технологий автоматизации на базе программируемых контроллеров // Автоматизация судовых

технических средств: науч. -техн. сб. – 2017. – Вып. 23. – Одесса: ОНМА. – С. 30 - 35.

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

Abstract – *The results of research on determining the impact of biodiesel fuel on the environmental and economic performance of marine diesel engines are provided. The experiments were carried out on a Bulk Carrier class ship with a deadweight of 58,640 tons during the operation of a MAN-B&W Diesel Group 5S60ME-C8 marine diesel engine (which served as the main engine) and three 6DL-16 Daihatsu Diesel marine diesel engines (which were used as auxiliary engines). Diesels were operated on distillate fuels DMA (with a sulfur content of 0,072 % by mass) and RMG380 (with a sulfur content of 0,043 % by mass). When the vessel was located in special ecological areas, diesel engines were operated on DMA fuel, while the vessel was outside these areas – on RMG380 fuel. During the experiments, diesel engines used RMG380 distillate fuel, as well as B10 and B30 fuels, which include diesel fuel – 90 % or 70 %, as well as FAME biodiesel fuel – 10 % or 30 %. During experimental studies, the main engine 5S60ME-C8 MAN-B&W Diesel Group was operated at equal intervals on heavy fuel RMG380, as well as on B10 and B30 fuel at loads of 65 %, 75 %, 85 %, 95 % of the rated power. The duration of the experiment on each of the loads was 1 to 3 hours and depended on the vessel's sailing conditions. Auxiliary diesels 6DL-16 Daihatsu Diesel were operated at equal intervals on heavy fuel RMG380, as well as on B10 and B30 fuel at loads of 50 %, 60 %, 70 %, 80 % of the rated power. The duration of the experiment on each of the loads was 2 to 4 hours and depended on the energy needs of the ship. The efficiency of using B10 and B30 fuels was evaluated according to ecological and economic criteria. The concentration of nitrogen oxides in the exhaust gases of diesel engines was taken as an environmental criterion. The specific effective fuel consumption was taken as an economic criterion. It has been experimentally confirmed that when using biodiesel B10 and B30, compared to petroleum-derived fuel RMG380, a 24 ... 25 % reduction in nitrogen oxides concentration in exhaust gases was observed, accompanied by a 1,7 ... 6,0 % increase in specific fuel consumption.*

УДК 629.5

DOI: 10.31653/1819-3293-2025-1-30-121-138

ARTICLE HISTORY

Received 15.05.2025

Accepted 19.05.2025

Сагін Сергій Вікторович¹, Куропятник Олексій Андрійович²,
Руснак Дмитро Юрійович³, Парменова Дана Георгіївна⁴
НУ "Одеська морська академія", Одеса, Україна
saginsergii@gmail.com¹, kuropyatnyk83@gmail.com²,
rusnakd570@gmail.com³, parmenovadana12@gmail.com⁴

Зниження емісії оксидів сірки з випускними газами суднових дизелів шляхом ультразвукової обробки палива

Sagin Sergii¹, Kuropyatnyk Oleksiy²,
Rusnak Dmytro³, Parmenova Dana⁴
NU "Odessa Maritime Academy", Odessa, Ukraine
saginsergii@gmail.com¹, kuropyatnyk83@gmail.com²,
rusnakd570@gmail.com³, parmenovadana12@gmail.com⁴

Reduction of sulfur oxide emissions from marine diesel exhaust gases by ultrasonic fuel treatment

Резюме – Розглянуті питання щодо використання додаткової ультразвукової обробки палива для зменшення емісії оксидів сірки з випускними газами суднових дизелів. Дослідження виконувались на судні класу Bulk Carrier дедвейтом 64710 т. Енергетичну установку судна складали головний двигун MAN-B&W 6S50ME-C9.7 та три допоміжних дизель-генератора MAN-B&W 5L23/30H. Випускні гази всіх двигунів очищувались від домішок сірки за допомогою скрубберної системи очищення – SO_x Exhaust Gas Cleaning System. Встановлено, що використання скрубберної системи очищення випускних газів та ультразвукової обробки палива (в порівнянні лише зі скрубберним очищенням випускних газів) забезпечує зниження на 9,27 ... 33,08 % емісії оксидів сірки. Для найбільшого зниження емісії оксидів сірки, обробку палива необхідно виконувати з оптимальною частотою ультразвуку.

Abstract – The issues of using additional ultrasonic fuel treatment to reduce sulfur oxide emissions in the exhaust gases of marine diesel engines

were considered. The studies were conducted on a Bulk Carrier vessel with a deadweight of 64,710 tons. The vessel's power plant consisted of a main engine MAN-B&W 6S50ME-C9.7 and three auxiliary diesel generators MAN-B&W 5L23/30H. The exhaust gases of all engines were cleaned of sulfur impurities using a scrubber system – the SO_x Exhaust Gas Cleaning System. It was established that the use of the scrubber system for exhaust gas cleaning combined with ultrasonic fuel treatment (compared to scrubber cleaning alone) reduces sulfur oxide emissions by 9.27 to 33.08%. To achieve the greatest reduction in sulfur oxide emissions, fuel treatment should be performed at the optimal ultrasonic frequency.

Згоряння палива у циліндрах суднових дизельних двигунів не лише сприяє отриманню кінетичної енергії газів, яка в подальшому трансформується у крутний момент, але також супроводжується утворенням випускних газів, що викидаються в атмосферу. До їх складу разом з нейтральними та нешкідливими речовинами (наприклад, водяної парою H₂O, остаточними киснем O₂ та азотом N₂) входять токсичні речовини, такі як оксиди азоту NO_x, оксиди сірки SO_x, монооксид вуглецю CO. Ці речовини негативно впливають на довкілля та людину, тому рівень їх емісії обмежуються відповідно до вимог міжнародних та національних конвенцій та резолюцій [1 - 3]. Відповідно до Додатку VI MARPOL, вміст сірки в паливі не повинен перевищувати 0,1 % у разі знаходження судна в спеціальних зонах контролю викидів (Sulphur Emission Control Areas – SECAs) та бути не більш за 0,5 % під час знаходження судна поза цими районами [4 - 6].

В разі, коли суднова енергетична установка додатково обладнана системою очищення випускних газів (найбільш розповсюдженим при цьому є скрубберне очищення), експлуатація дизелів може здійснюватися з використанням палива, вміст сірки в якому досягає 3,5 [7, 8]. При цьому повинне бути підтверджена еквівалентність коефіцієнту викидів SO₂/CO₂ вмісту сірки в судновому паливі (табл. 1).

Таблиця 1
Відповідність вмісту сірки в паливі максимальним значення
коефіцієнту викидів

Вміст сірки в паливі, %	Коефіцієнту викидів, SO ₂ /CO ₂ (млн ⁻¹ /%)
0,50	21,7
0,10	4,3

В умовах експлуатація морських суден та їх енергетичних установок зниження вмісту сірки в паливі досягається за допомогою додаткової обробки палива, якими є тонка фільтрація, гідродинамічне очищення, кавітаційна та ультразвукова обробка [9, 10]. Найбільш інтенсивні дослідження та розвиток технологій, що спрямовані на зниження вмісту сірки в судовому паливі, виконувались в той період, коли дозволялась експлуатація судових дизелів з використанням палива, вміст сірки в якому досягав 3,5 %. Саме в той період часу найбільш розповсюдженим способом підготовки палива, що забезпечує зменшення концентрації оксидів сірки в випускних газах, були його гомогенізація, а також кавітаційна та ультразвукова обробка. При цьому основною метою забезпечення процесу десульфурізації палива за допомогою вказаних способів було не зменшення рівню емісії оксидів сірки, а зменшення сірчистої корозії циліндрової групи та газовипускного тракту дизеля. Цей тип корозії виникав через утворення в циліндрі сірчистої кислоти – як результат реакції незгорілих сірчистих з'єднань та водяних парів, що входять до складу продувного повітря. Особливої актуальності це завдання набувало для чотиритактних дизелів, які не мають окрему систему циліндрового мащення. В цих типах дизелів мащення циліндрової групи та колінчатого валу забезпечується одною загальною циркуляційною системою мащення [11, 12]. При цьому вміст лужних компонентів моторного мастила може не в повній мірі нейтралізувати кількість сірчистої кислоти, що утворюється в циліндрі [13, 14].

В теперішній час десульфурізація палива як окреме технологічне рішення, що сприяє зменшенню вмісту сірки в паливі, втратила актуальність. Це пов'язано з більш суворими обмеженнями щодо вмісту сірки в паливі, які висуваються вимогами Додатку VI MARPOL [15, 16]. Якщо раніше зниження вмісту сірки в паливі з рівню 3,2...3,4 % до 2,3...2,5 % (чому, наприклад, сприяла кавітаційна або ультразвукова обробка палива) сприймалось як серйозне досягнення, на сьогодні втратило актуальність та не має практичного застосування [17, 18]. Перш за все це пов'язано з необхідністю забезпечення вимоги Додатку VI MARPOL щодо заборони використання палива з вмістом сірки більш за 0,5 %. На сьогодні подібні сорти палива можуть використовуватися лише за умовою додаткового очищення випускних газів від оксидів сірки [19, 20].

Додаткову обробку палива за допомогою ультразвукових хвиль можна застосовувати на різних ділянках паливної системи. Схематичне це зображено на принциповій схемі, що надано на рис. 1.

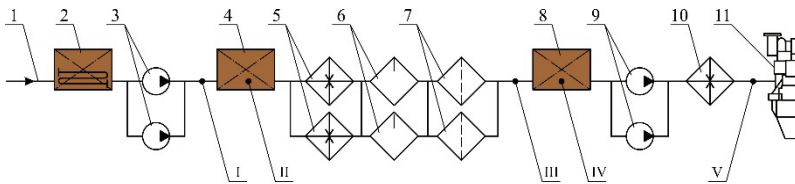


Рис. 1. Принципова схема паливної системи суднового дизеля:

1 – отримання палива на борт судна під час бункеровці; 2 – приймальний танк з підігрівом палива від зовнішнього джерела тепла; 3 – насоси, що перекачують паливо; 4 – цистерна відстоювання палива; 5 – підігрівач; 6 – сепараційна установка; 7 – фільтр; 8 – витратна цистерна; 9 – насоси, що нагнітають паливо; 10 – підігрівач; 11 – дизель; I, II, III, IV, V – осередки проведення ультразвукової обробки

Схема працює в такий спосіб. Під час бункеровці паливо магістраллю 1 потрапляє в танк 2, в якому передбачено підігрів палива теплою зовнішнього джерела (як правило пара). Далі паливо поступає в машинне відділення судна за допомогою перекачувальних насосів 3, які спрямовують паливо до відстійних танків 4. Попередня підготовка палива здійснюється в танках 4 (в яких забезпечується його відстоювання та попереднє видалення води та механічних домішок); в підігрівачах 5 (які забезпечують необхідну температуру палива); сепараторах 6 та фільтрах 7 (які призначені для остаточного видалення з палива води та механічних домішок). Після цього паливо потрапляє до витратної цистерни 8 та далі за допомогою насосів 9 через підігрівач 10 (за допомогою якого підтримується не лише його температура, а також в'язкість) спрямовується до дизелю 11.

Осередки, що рекомендовані для проведення ультразвукової обробки палива, позначені як I, II, III, IV, V.

Першою та другою ділянками паливної системи, на яких можливе застосування ультразвукової обробки палива, є паливна магістраль, якою здійснюється перекачування палива з приймального танку (позиція I на рис. 1), або цистерна відстоювання палива (позиція II на рис. 1). На цих ділянках ультразвукові хвилі активізують розкладання важких сірковмісних сполук в паливі, яке ще проходило ніяких способів обробки або очищення, тому в його об'ємі ще знаходяться вода та механічні домішки [21, 22]. Це знижує інтенсивність ультразвукових хвиль, що погіршує ефективність процесу десульфурізації палива. Також негативним чинником проведення ультразвукової обробки палива на цих ділянках (особливо на ділянці I – в паливній магістралі)

є необхідність стежити за осадам, що утворюється як результат видалення з потоку палива компонентів, що містять сірку. Через підвищену густину та наявність в паливі механічних домішок та води саме на цьому осередку утворення осаду йде з більшою ефективністю в порівнянні з іншими осередками паливної системи [23, 24].

Вказані недоліки усуваються на третьої та четвертої ділянках, що рекомендовані для використання ультразвукової обробки палива. Ці ділянки (позиція III та IV на рис. 1) відповідають стану палива, яке вже пройшло підігрів, сепарацію та фільтрацію (що забезпечується обладнанням, яке відповідає позиціям 5, 6, 7 на рис. 1). Це призводить до того, що ультразвукові хвилі оказують свою дію безпосередньо на сірковмісні компоненти [25, 26]. Це збільшує ефективність проведення десульфурізації палива в цих осередках паливної системи. При цьому (аналогічно під час десульфурізації палива на ділянці I) необхідно стежити за її технічним станом паливної магістралі, який погіршується через випадіння осаду. Під час ультразвукової обробки палива в витратній цистерні, його десульфурізації здійснюється через видалення парів палива, до яких входять сірковмісні компоненти. Це зменшує кількість осаду важких складових палива, до яких входить сірка [27, 28].

Експериментальними дослідженнями біло підтверджено, що найбільш ефективним місцем для ультразвукової обробки є ділянка магістралі безпосередньо перед паливною апаратурою високого тиску дизеля (позиція V на рис. 1). В цьому осередку паливної системи паливо досягає максимальної температури та мінімальної в'язкості, що сприяє підвищенню ефективності видаленню сірчистих домішок. Також в деяких дослідженнях біло запропоновано використання комплексної системи ультразвукової десульфурізації палива [29, 30]. При цьому як перший ступень пропонується ультразвукова обробка в витратній цистерні (що відповідає позиції IV на рис. 6), як другий ступінь – ультразвукова обробка перед паливною апаратурою високого тиску (що відповідає позиції V на рис. 1). Перша ступінь сприяє попередньому видаленню сірки з палива, друга – забезпечує розривання сірковмісних компонентів та їх активацію перед подачею в камеру згоряння дизеля.

Наведена інформація підтверджує, що на сьогоднішній основним способом, що забезпечує виконання вимог Додатку VI MARPOL щодо концентрації SO_x в випускних газах в разі використання палива вміст сірки в якому може досягати 3,5 %, є скрубберне очищення.

В зв'язку з цим процеси безпосередньої десульфурізації палива слід розглядати в поєднанні з основною технологією зниження емісії

оксидів сірки – очищенням випускних газів у суднових скруберах. [31, 32].

З урахуванням вищевикладеного, метою досліджень було визначення впливу додаткової ультразвукової обробки судового високосірчистого палива на емісію оксидів сірки з випускними газами, очищення яких від сірчистих з'єднань здійснюється за допомогою скруберної системи.

Цикл досліджень з визначення впливу додаткової ультразвукової обробки палива на зміну емісії оксидів сірки під час проведення скруберного очищення випускних газів судового дизеля виконувався на судні класу Bulk Carrier дедвейтом 64,710 т. Енергетичну установку судна складали головний двигун YMD MAN B&W 6S50ME-C9.7 та три допоміжних дизель-генератора CMP-MAN 5L23/30H.

Експлуатація головного та допоміжних дизелів здійснювалася на двох сортах палива: RMG380 і DMA10. Паливо DMA10 використовувалось під час пуску дизелів (як головного двигуна YMD MAN-B&W 6S50ME-C9.7 також й допоміжних двигунів CMP MAN-B&W 5L23/30H), а також під час реверсування головного двигуна YMD MAN-B&W 6S50ME-C9.7. Паливо RMG380 використовувалось на всіх інших експлуатаційних режимах.

Забезпечення вимог Annex VI MARPOL щодо емісії оксидів сірки здійснювалось за допомогою системи очищення випускних газів SO_x Exhaust Gas Cleaning System (SO_x EGCS), яка забезпечувала очищення випускних газів дизелів (головного та допоміжних) від сірчистих з'єднань [33, 34].

Принципова схема системи наведена на рис. 2.

Функціонування EGCS було можливим на широкому діапазоні експлуатаційних режимів: від режиму мінімального навантаження (що відповідав 25 % потужності одного допоміжного двигуна CMP MAN-B&W 5L23/30H) до максимального (що відповідав одночасної роботі головного двигуна YMD MAN-B&W 6S50ME-C9.7 з потужністю 95 %, та трьох допоміжних дизелів CMP MAN-B&W 5L23/30H з потужністю 75 % кожний). Експлуатація EGCS на цих режимах, а також на всіх інших режимах, що більш за мінімальний та менш за максимальний, була можлива на протязі необмеженого часу. Система EGCS також передбачає короточасну (на протязі на більш 1 години) експлуатацію на режимі, що відповідає 105 % навантаженню на головний двигун YMD MAN-B&W 6S50ME-C9.7 та 150 % загальному навантаженню на допоміжні двигуни CMP MAN-B&W 5L23/30H.

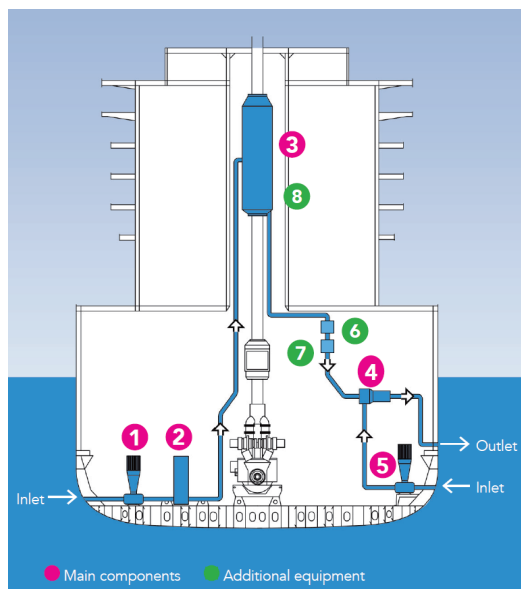


Рис. 2. Скруберна система очищення випускних газів від оксидів сірки: 1 – насос заборотної води; 2 – фільтр заборотної води; 3 – скрубер SO_x; 4 – змішувач; 5 – буферний насос; 6 – дегазатор; 7 – фільтр води, що виходить із скрубера; 8 – терморегуююче обладнання

Як додатковий метод підготовки палива, що забезпечує його десульфурізацію та через це в подальшому сприяє зменшенню емісії SO_x з випускними газами, була обрана ультразвукова обробка палива. Як джерело ультразвукових хвиль використовувався ультразвуковий генератор PLS-QXDY3000W. Під час проведення досліджень потужність ультразвукового генератора PLS-QXDY3000W для всіх випадків підтримувалась на рівні 2500 кВт. Частота ультразвукових хвиль, на якій проводилась ультразвукова обробка палива, в залежності від умов проведення експерименту змінювалась та складала 20 кГц, 25 кГц, 28 кГц, 33 кГц, 40 кГц.

Ультразвуковий генератор PLS-QXDY3000W встановлювався на осередку паливної системи безпосередньо перед паливною апаратурою високого тиску дизелів.

Схема паливної системи дизелів YMD MAN-B&W 6S50ME-C9.7 та CMP MAN-B&W 5L23/30H судна наведена на рис. 3.

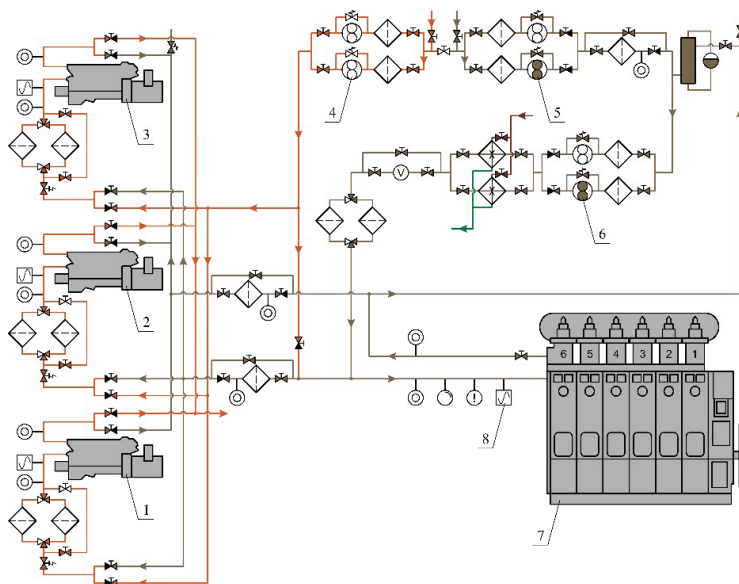


Рис. 3. Паливна система суднових дизелів YMD MAN-B&W 6S50ME-C9.7 та CMP MAN-B&W 5L23/30H судна Bulk Carrier дедвейтом 64,710 т: 1, 2, 3 – допоміжні дизелі CMP MAN-B&W 5L23/30H; 4 – перекачувальний насос допоміжних двигунів; 5 – перекачувальний насос головного двигуна; 6 – бустерний насос; 7 – головний двигун YMD MAN-B&W 6S50ME-C9.7; 8 – ультразвуковий генератор PLS-QXDY3000W

Головний двигун YMD MAN-B&W 6S50ME-C9.7 (позиція 7 на рис. 3) та допоміжні дизелі CMP MAN-B&W 5L23/30H (позиції 1, 2, 3 на рис. 3) експлуатувались на морських паливах RMG380 або DMA10. Подача палива RMG380 забезпечувалась перекачувальними насосами 5 та бустерними насосами 6. Подачу палива DMA10 здійснювали перекачувальні насоси 4. Для забезпечення додаткової ультразвукової обробки палива безпосередньо перед паливною апаратурою високого тиску кожного з двигунів встановлювався ультразвуковий генератор (позиція 8 перед головним двигуном 7 та їй подібні перед допоміжними двигунами 1, 2, 3). Призначення іншого обладнання та вимірювальної апаратури зрозуміло з рис. 8 та не вимагає додаткового пояснення.

Дослідження з визначення впливу ультразвукової обробки палива на емісію SO_x виконувались за умовою різного навантаження на судову енергетичну установку відповідно до режимів, що наведені в табл. 2.

Таблиця 2

Режими роботи судової енергетичної установки

Режим	Навантаження на судові дизелі, %		
	Головний двигун	Допоміжний двигун № 1	Допоміжний двигун № 2
I	60	60	—
II	75	75	—
III	70	55	55
IV	80	65	65

Під час досліджень дизелі експлуатувались в використанні палива RMG380. Випробування виконувались виключно на сталих режимах роботи судових дизелів, що виключало вплив перехідних процесів на точність результатів. Перед фіксацією даних двигуни працювали протягом 0,5 ... 1 години на обраному навантаженні, що дозволяло досягти стабілізації температури, тиску та інших параметрів робочого циклу [35, 36]. Тривалість кожного випробування складала 2 ... 3 години, що забезпечувало сталість визначення показників, що вимірювались. Дослідження виконувались у двох варіантах: за умовою використання лише скрубєрного очищення випускних газів, а також за умовою скрубєрного очищення випускних газів з одночасною додатковою ультразвуковою обробкою палива. Дослідження виконувались під час знаходження судна всередині SECA.

Результати вказаних досліджень наведені в таблицях 3 - 5.

Таблиця 3

Емісія діоксиду вуглецю CO_2 , %, з випускними газами судових дизелів MAN-B&W 6S50ME-C9.7 та MAN-B&W 5L23/30H

Експлуатаційний режим*	Умови експерименту					
	0	1	2	3	4	5
I	4,88	4,74	4,67	4,63	4,61	4,66
II	4,76	4,68	4,63	4,58	4,51	4,63
III	5,26	5,17	5,11	5,08	5	5,09
IV	5,03	4,88	4,81	4,78	4,74	4,81

Таблиця 4

Емісія діоксиду сірки SO_2 , млн^{-1} , з випускними газами суднових дизелів MAN-B&W 6S50ME-C9.7 та MAN-B&W 5L23/30H

Експлуатаційний режим*	Умови експерименту					
	0	1	2	3	4	5
I	18,36	16,62	15,85	14,52	14,22	14,78
II	18,02	16,35	15,25	14,32	14,28	14,43
III	19,36	17,84	16,62	14,68	14,44	15,58
IV	19,12	17,12	16,45	14,42	14,35	16,08

Таблиця 5

Відношення SO_2/CO_2 , $\text{млн}^{-1}/\%$, з випускними газами суднових дизелів MAN-B&W 6S50ME-C9.7 та MAN-B&W 5L23/30H

Експлуатаційний режим*	Умови експерименту					
	0	1	2	3	4	5
I	3,76	3,51	3,39	3,149	3,08	3,17
II	3,79	3,49	3,29	3,13	3,17	3,12
III	3,68	3,45	3,25	2,89	2,89	3,06
IV	3,80	3,51	3,42	3,02	3,036	3,34

В табл. 3 - 5:

0 – використання лише скрубєрного очищення випускних газів; 1, 2, 3, 4, 5 – використання скрубєрного очищення випускних газів з одночасною додатковою ультразвуковою обробкою палива з частотою ультразвукових хвиль 20 кГц, 25 кГц, 28 кГц, 33 кГц, 40 кГц;

I, II, III, IV – експлуатаційні режими, що відповідають наведеним в табл. 2.

Покращення екологічності роботи судна та його енергетичної установки в разі використання додаткової ультразвукової обробки палива може бути визначення через відносне зменшення емісії шкідливих речовин:

діоксиду вуглецю

$$\Delta\text{CO}_2 = \frac{\text{CO}_2^- - \text{CO}_2^{\text{UST}}}{\text{CO}_2^-} \cdot 100\%; \quad (1)$$

діоксиду сірки

$$\Delta\text{SO}_2 = \frac{\text{SO}_2^- - \text{SO}_2^{\text{UST}}}{\text{SO}_2^-} \cdot 100\%; \quad (2)$$

відношення

$$\Delta(\text{SO}_2/\text{CO}_2) = \frac{(\text{SO}_2/\text{CO}_2)^- - (\text{SO}_2/\text{CO}_2)^{\text{UST}}}{(\text{SO}_2/\text{CO}_2)^-} \cdot 100\%; \quad (3)$$

де CO_2^- , SO_2^- , $(\text{SO}_2/\text{CO}_2)^-$ – емісія діоксиду вуглецю, діоксиду сірки, а також їх відношення для відповідного режиму роботи системи очищення випускних газів без використання додаткової ультразвукової обробки палива;

CO_2^{UST} , SO_2^{UST} , $(\text{SO}_2/\text{CO}_2)^{\text{UST}}$ – значення цих же показників під час використання додаткової ультразвукової обробки палива.

З урахуванням чисельних значень, що наведені в табл. 3 - 5, за виразами (1) - (3) отримані значення, які подані в табл. 6 - 8.

Таблиця 6

Відносне зменшення емісії діоксиду вуглецю ΔCO_2 , %, з випускними газами дизелів MAN-B&W 6S50ME-C9.7 та MAN-B&W 5L23/30H

Експлуатаційний режим	Умови експерименту				
	1	2	3	4	5
I	2,87	4,30	5,12	5,53	4,51
II	1,68	2,73	3,78	5,25	2,73
III	1,71	2,85	3,42	4,94	3,23
IV	2,98	4,37	4,97	5,77	4,37

Таблиця 7

Відносне зменшення емісії діоксидів сірки ΔSO_2 , %, з випускними газами дизелів MAN-B&W 6S50ME-C9.7 та MAN-B&W 5L23/30H

Експлуатаційний режим	Умови експерименту				
	1	2	3	4	5
I	9,48	13,67	20,92	22,55	19,50
II	9,27	15,37	20,53	20,75	19,92
III	7,85	14,15	24,17	25,41	19,52
IV	10,46	15,60	28,57	33,08	21,18

Таблиця 8

Відносне зменшення відношення SO_2/CO_2 , %, з випускними газами дизелів MAN-B&W 6S50ME-C9.7 та MAN-B&W 5L23/30H

Експлуатаційний режим	Умови експерименту				
	1	2	3	4	5
I	6,80	9,79	16,64	18,01	15,70
II	7,72	12,99	17,41	16,36	17,67
III	6,25	11,63	21,49	21,53	16,84
IV	7,71	10,03	20,64	20,36	12,05

Для кращої візуалізації, за результатами, що наведені в табл. 6 - 8, побудовані діаграми на рис. 4.

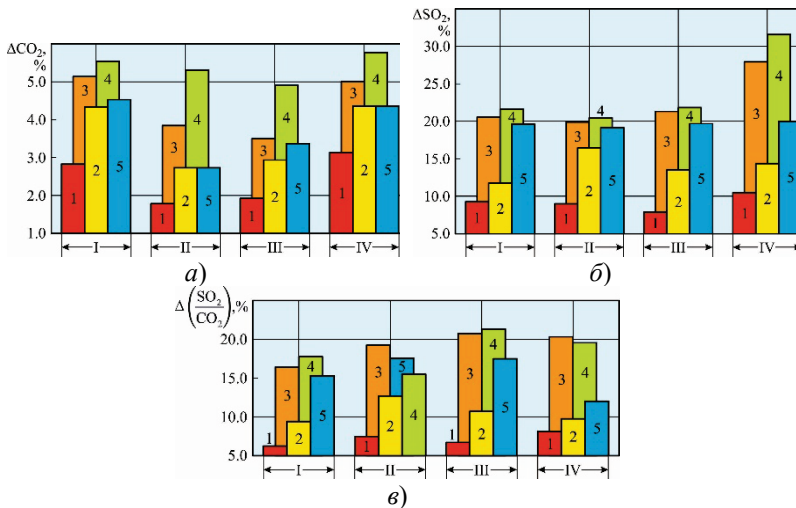


Рис. 4. Відносне зменшення емісії діоксидів вуглецю ΔCO_2 (а), емісії діоксидів сірки ΔSO_2 (б), відношення $\Delta(\text{SO}_2/\text{CO}_2)$ (в) з випускними газами суднових дизелів MAN-B&W 6S50ME-C9.7 та MAN-B&W 5L23/30H за різних умов проведення експерименту

Всі дослідження виконувались безпосередньо судновим екіпажем. Технологія проведення дослідження була узгоджена з технічним департаментом компанії, що забезпечує менеджмент судна [37 - 40]. Під час проведення досліджень виконувались всі вимоги з технічного

обслуговування суднових дизелів MAN-B&W 6S50ME-C9.7 та MAN-B&W 5L23/30H, а також систем, що забезпечують їх функціонування.

Наведені результати дозволяють зробити наступні **висновки**.

1. Додаткова ультразвукова обробка палива сприяє покращенню екологічних показників роботи суднових дизелів. Комплексне використання скруберної системи очищення випускних газів та ультразвукової обробки палива (в порівнянні лише зі скруберним очищенням випускних газів) забезпечує зниження емісії діоксиду вуглецю CO_2 , діоксиду сірки SO_2 та їх відношення SO_2/CO_2 . Найбільш ефективний вплив додаткова ультразвукова обробка палива створює на такі складові, що містять сірку. Це виявляється в суттєвому зменшенні емісії SO_2 з випускними газами. Для різних умов експлуатації суднових дизелів YMD MAN-B&W 6S50ME-C9.7 та CMP MAN-B&W 5L23/30H було встановлено зменшення на:

2,87 – 5,77 % емісії CO_2 ;

9,27–33,08 % емісії SO_2 .

Це забезпечує зменшення на 6,25 – 21,53 % відношення SO_2/CO_2 , яке є головною ознакою під час оцінки ефективності роботи скруберної системи очищення випускних газів та регламентується вимогами Annex VI MARPOL.

2. З метою досягнення найбільшої ефективності в зниженні емісії CO_2 та SO_2 , ультразвукову обробку палива необхідно виконувати з оптимальною частотою ультразвукових хвиль. Під час проведення дослідження було встановлено, що з діапазону частоти ультразвукових хвиль 20 кГц, 25 кГц, 28 кГц, 33 кГц, 40 кГц, на яких проводилась додаткова ультразвукова обробка палива, найбільше зниження емісії CO_2 та SO_2 досягається для значень 28 кГц, 33 кГц. Саме ці показники ультразвукового генератору визнані як оптимальні для проведення додаткової ультразвукової обробки палива в разі її використання в комплексі зі скруберним очищенням випускних газів.

3. Важливою перевагою ультразвукової обробки є її універсальність. Цей метод може застосовуватися до будь-яких видів рідкого морського палива незалежно від його фракційного складу та фізико-хімічних характеристик (в'язкості, густини, температури спалаху). Це робить технологію ультразвукової обробки доступною для широкого впровадження без необхідності модифікації існуючих паливних систем.

4. Поєднання скруберних систем очищення випускних газів суднових дизелів від оксидів сірки SO_x та ультразвукової обробки палива перед його впорскуванням в циліндр дизеля сприяє зниженню

емісії SO_x та через це поширює екологічну стійкість енергетичних установок морських суден.

ЛІТЕРАТУРА REFERENCES

1. 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.
2. Sagin A. S., Zablotskiy Yu. V. Reliability maintenance of fuel equipment on marine and inland navigation vessels // *Austrian Journal of Technical and Natural Sciences. Scientific journal*. – 2021. – № 7 - 8. – P. 14 - 17.
3. Petrychenko O., Levinskiy M., Prytula D., Vynohradova A. Fuel options for the future: a comparative overview of properties and prospects // *Transport Systems and Technologies*. – 2023. – № 41. – P. 96 - 106.
4. Побережний. Р.В., Сагін, С.В. Забезпечення екологічних показників дизелів суден річкового та морського транспорту // *Суднові енергетичні установки: наук. -техн. зб.* – 2020. – Вип. 41. – Одеса: НУ"ОМА". – С. 5 - 9.
5. Sagin S., Karianskiy S., Madey V., Sagin A., Stoliaryk T., Tkachenko I. Impact of Biofuel on the Environmental and Economic Performance of Marine Diesel Engines // *Journal of Marine Science and Engineering*. – 2023. – Vol. 11. – P. 120.
6. Сагін, С. В., Куропятник, А. А. Оптимизация режимов работы системы перепуска выпускных газов судовых среднеоборотных дизелей // *Автоматизация судовых технических средств: науч. -техн. сб.* – 2019. – Вип. 25. – Одесса: НУ"ОМА". – С. 79 - 89.
7. Руснак, Д. Ю., Сагін, С. В. Забезпечення екологічних вимог при ультразвуковій десульфурізації вуглеводних палив // *Суднові енергетичні установки: наук.-техн. зб.* – 2020. – Вип. 40. – Одеса: НУ"ОМА". – С. 49 - 54.
8. Sagin S., Sagin A. Development of method for managing risk factors for emergency situations when using low-sulfur content fuel in marine diesel engines // *Technology Audit and Production Reserves*. – 2023. – № 5(1(73)). – P. 37–43.
9. Зверьков, Д. О., Сагін, С. В. Зниження механічних втрат у суднових дизелях // *Суднові енергетичні установки: наук.-техн. зб.* – 2020. – Вип. 41. – Одеса: НУ"ОМА". – С. 20 - 25.

10. Марченко, О. О., Сагін, С. В. Вдосконалення процесу очищення судових важких палив // Суднові енергетичні установки: наук.-техн. зб. – 2020. – Вип. 41. – Одеса: НУ "ОМА". – С. 10 - 14.

11. Сагін, С. В., Заблоцкий, Ю. В. Влияние анизотропных жидкостей на работу узлов трения судовых дизелей // Проблемы техники : наук.-виробн. журнал. – 2012. – № 4. – Одесса: ОНМУ. – С. 68 - 81.

12. Сагін, С. В., Побережний, Р. В. Аналіз основних способів зниження емісії оксидів азоту дизелів суден морського та внутрішнього водного транспорту // Суднові енергетичні установки: наук. –техн. зб. – 2022. – Вип. 44. – Одеса: НУ "ОМА". – С. 132 - 141.

13. Заблоцкий, Ю. В. Підвищення паливної економічності судових дизельних установок // Вісник Одеського національного морського університету: зб. наук. праць. – 2020. – № 2(62). – С. 106 - 119.

14. Куропятник, А. А. Комплексное управление выпускными газами судовых дизелей как способ обеспечения их экологических показателей работы // Вісник Одеського національного морського університету: зб. наук. праць. – 2020. – № 2(62). – С. 142 - 159.

15. Sagin S.V., Kuropyatnyk A.A. Application of the system of recirculation of exhaust gases for the reduction of the concentration of nitric oxides in the exhaust gases of the ship diesels // American Scientific Journal. – 2017. – № 15. – Iss. 2. – P. 67 - 71.

16. Sagin S. V., Kuropyatnyk O. A. Using exhaust gas bypass for achieving the environmental performance of marine diesel engines // Austrian Journal of Technical and Natural Sciences. – 2021. – № 7 - 8. – P. 36 - 43.

17. Сагін, С. В., Заблоцкий Ю. В. Определение триботехнических характеристик поверхностей по степени упорядоченности пристенных слоев углеводородных жидкостей // Проблемы техники : наук.-виробн. журнал. – 2011. – № 3. – Одесса: ОНМУ. – С. 78 - 88.

18. Сагін, С. В. Определение диапазона стратификации вязкости смазочного материала в трибологических системах судовых дизелей // Вісник Одеського національного морського університету: зб. наук. праць. – 2019. – Вип. 1(58). – С. 89 - 100.

19. Заблоцкий, Ю. В. Підвищення економічності роботи судових дизелів // Суднові енергетичні установки: наук.-техн. зб. – 2020. – Вип. 40. – Одеса: НУ"ОМА". – С. 12 - 16.

20. Сагін, С. В., Мадей, В. В., Сагін, А. С. Робота судового дизеля на біодизельному паливі // Автоматизація судових технічних засобів: наук. -техн. зб. – 2021. – Вип. 27. – Одеса: НУ"ОМА". – С. 93 - 107.

21. Zablotskyi Yu.V., Sagin A.S. Applying of fuel additives in marine diesel engines // Суднові енергетичні установки: наук.-техн. зб. – 2021 – Вип. 43. – Одеса: НУ "ОМА". – С. 5 - 17.

22. Сагін, С. В. Зниження енергетичних втрат в прецизійних парах паливної апаратури суднових дизелів // Суднові енергетичні установки: наук. -техн. зб. – 2018. – Вип. 38. – Одеса: НУ "ОМА". – С. 132 - 142.

23. Сагін, С. В., Бондар, С. А. Метод попередження аварійних ситуацій під час експлуатації суднових дизелів за аналізом потоку відмов його основних вузлів // Суднові енергетичні установки: науково-технічний збірник. – 2023. – Вип. 46. – Одеса: НУ "ОМА". – С. 101 - 109.

24. 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.

25. Заблоцький, Ю. В., Сагін, А. С. Визначення динамічних навантажень під час зміни режимів мащення прецизійних пар паливної апаратури суднових дизелів // Суднові енергетичні установки: наук. – техн. зб. – 2022. – Вип. 44. – Одеса: НУ "ОМА". – С. 121 - 131.

26. Сагин, С. В., Поповский, Ю. М., Гребенюк, М. Н. Влияние ориентационной упорядоченности в граничных смазочных слоях на триботехнические характеристики узлов трения // Судовые энергетические установки: науч. -техн. сб. – 1998. – Вип. 1. – Одесса: ОГМА. – С. 102 - 104.

27. 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. – Одеса: НУ "ОМА". – С. 5 - 16.

28. Сагін, С. В., Сагін, А. С. Контроль та діагностування надійності та економічності дизелів морських та річкових засобів транспорту // Суднові енергетичні установки : науково-технічний збірник. – 2023. – Вип. 46. – Одеса: НУ "ОМА". – С. 118 - 131.

29. Сагін, С. В., Суворов, П. С., Бондар, С. А. Розробка методу оцінки ризиків виникнення аварійних подій під час експлуатації дизелів морських суден // Суднові енергетичні установки : науково-технічний збірник. – 2023. – Вип. 47. – Одеса: НУ "ОМА". – С. 122 - 130.

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

31. Мацкевич, Д. В., Сагин, С. В., Ханмамедов, С. А. Изменение реологических характеристик смазочных материалов в циркуляционной масляной системе в процессе эксплуатации среднеоборотного двигателя // Судовые энергетические установки: науч.-техн. сб. – 2010. – Вып. 25. – Одесса: ОНМА. – С.109 - 118.

32. Petrychenko O. Levynskyi M. Trends and preconditions for widespread adoption of liquefied natural gas in maritime transport // Transport Systems and Technologies. – 2024. – № 43. – P. 21 - 36.

33. Sagin S.V., Sagin S.S., Madey V. Analysis of methods of managing the environmental safety of the navigation passage of ships of maritime transport // Technology Audit and Production Reserves. – 2023. – № 4(3(72)). – P. 33 - 42.

34. Сагін, С. В., Мадей, В.В., Сагін, С.С., Чимшир, В.І., Разінкін, Р.О. Аналіз екологічної стійкості та енергетичної ефективності використання скрубберного очищення випускних газів дизелів суден морського транспорту // Суднові енергетичні установки : наук.-техн. зб. – 2023. – Вип. 47. – Одеса: НУ "ОМА". – С. 157 - 171.

35. 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.

36. 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.

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

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

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

40. 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). – P. 95 - 99.

Abstract – The issues of using additional ultrasonic fuel treatment to reduce sulfur oxide emissions from exhaust gases of marine diesel engines are considered. The research was carried out on a Bulk Carrier class vessel with a deadweight of 64710 t. The ship's power plant consisted of the main engine MAN-B&W 6S50ME-C9.7 and three auxiliary diesel generators MAN-B&W 5L23/30H. The exhaust gases of all engines were cleaned of sulfur impurities using a scrubber cleaning system – SO_x Exhaust Gas Cleaning System. This allowed the use of marine fuel with a sulfur content of up to 3.5 % to ensure the operation of the engines. It was established that the use of a scrubber exhaust gas cleaning system and ultrasonic fuel treatment (in comparison with only scrubber exhaust gas cleaning) provides a reduction in emissions of carbon dioxide CO₂, sulfur dioxide SO₂ and their SO₂/CO₂ ratio. The most effective effect of additional ultrasonic treatment of fuel is on such components containing sulfur. This is manifested in a significant reduction in SO₂ emissions with exhaust gases. For various operating conditions of MAN-B&W 6S50ME-C9.7 and MAN-B&W 5L23/30H marine diesel engines, a reduction in CO₂ emissions of 2.87 ... 7.53 % and a reduction in SO₂ emissions of 9.27 ... 33.08 % were established. This provides a reduction in the SO₂/CO₂ ratio (which is the main one when assessing the efficiency of the scrubber exhaust gas cleaning system and is regulated by the requirements of Annex VI MARPOL) of 6.25 ... 23.68 %. It has been experimentally proven that in order to achieve the greatest efficiency in reducing CO₂ and SO₂ emissions, ultrasonic treatment of fuel must be performed with the optimal frequency of ultrasonic waves. The combination of a scrubber system for cleaning the exhaust gases of marine diesel engines from sulfur oxides and ultrasonic treatment of fuel before its injection into the diesel cylinder and subsequent combustion contributes to the reduction of SO₂ emissions and thereby increases the environmental sustainability of marine vessel power plants.

УДК 629.12-8:629.12.037

ARTICLE HISTORY

DOI: 10.31653/1819-3293-2025-1-30-139-154

Received 15.05.2025

Accepted 19.05.2025

Шумило Олександр Миколайович¹,
Яровенко Володимир Олексійович²,
Малаксіано Миколо Олександрович³

Одеський національний морський університет, Одеса, Україна
shumylo.alexander@gmail.com¹, yarovenko@3g.ua², malax@ukr.net³

Метод оцінки показників маневреності пропульсивних комплексів електроходів з Azipod

Schumylo Oleksandr¹, Yarovenko Volodymyr², Malaksiano Mykolo³
Odessa National Maritime University, Odessa, Ukraine
shumylo.alexander@gmail.com¹, yarovenko@3g.ua², malax@ukr.net³

Method of assessing maneuverability indicators of electric ships' propulsion complexes with Azipod

Резюме. Запропоновано метод оцінки навантажень на електроенергетичні установки електроходів з рушійно-кермовими системами Azipod при виконанні маневрених операцій. Побудовано узагальнену структурну схему пропульсивних комплексів електроходів. Запропоновано аналітичний метод гідродинамічного розрахунку упору та моменту опору гребних гвинтів Azipod у косому потоці води. Розроблено математичну модель та метод розрахунку поточних значень режимних показників комплексу на перехідних режимах. Наведено результати досліджень впливу інтенсивності маневрування на показники траєкторії руху судна та на показники якості роботи суднової електроенергетичної установки. Отримано їх залежності від швидкості виходу судна на циркуляцію.

Summary. A method for assessing the loads on electric power plants of electric ships with Azipod propulsion and steering systems during maneuvering operations is proposed. A generalized structural diagram of

the electric ships' propulsion complexes is constructed. An analytical method for hydrodynamic calculation of the thrust and moment of resistance of Azipod propellers in an oblique water flow is proposed. A mathematical model and a method for calculating the current values of the system's performance indicators in transient modes are developed. The research results of the influence of maneuvering intensity on the vessel's trajectory indicators and on the performance indicators of the ship's electric power plant are presented. Their dependencies on the speed of the vessel's entry into circulation are obtained.

Класичний гвинто-кермовий комплекс морських суден, на жаль, не забезпечує їм необхідну маневреність під час руху на малих швидкостях. Для поліпшення маневрених характеристик використовуються системи активного управління (САУ) рухом судна, які створюють тягу у напрямках, відмінних від напрямку діаметральної площини судна. Останнім часом для підвищення маневреності суден широко використовуються рушійно-кермові системи Azipod. Яскравими представниками таких суден є, наприклад, пасажирські [1]. Основними перевагами системи Azipod є те, що вона одночасно є і двигуном, і рушієм, і пристроєм активного управління рухом судна. Можливість повороту гондоли на 360° забезпечує повний крутний момент і тягу гвинтів у будь-якому напрямку, що підвищує маневреність судна в різних умовах роботи [2]. Низка конструктивних переваг таких систем електроруху сприяє також підвищенню міцності, свободі при проектуванні судна, зниженню вібрації корпусу та зменшенню витрати палива.

Новий, у порівнянні з класичним, тип рушійної установки зумовив появу нових проблем. Дуже складні процеси протікають в рушійно-кермовій системі поблизу від корпусу судна в умовах неосьового натікання потоку води. Неможливо побудувати адекватний математичний опис процесів взаємодії гвинтів рушійно-кермового комплексу (РКК), гондоли та корпусу судна між собою. Як наслідок – складно оцінити сили й моменти сил, які діють на корпус судна, при зміні кута повороту гондоли, так саме як складно оцінити й навантаження, які сприймають гребні електродвигуни і вся електроенергетична установка судна на неусталених режимах роботи.

Дослідження характеристик РКК Azipod здебільшого ґрунтуються на результатах модельних випробувань РКК у стаціонарних умовах натікання води [3]. При цьому характеристики гребного гвинта вважаються заданими [4, 5]. Але, висновки за результатами проведених досліджень часто суперечливі. Це істотно ускладнює навіть розрахунок

ходовості судна в усталених режимах роботи. У нестационарних умовах експлуатації рушійно-кермового комплексу ситуація ускладнюється. При маневруванні судна змінюються швидкість його руху, частота обертання гребного гвинта РКК Azipod та кут повороту гондоли. Це впливає на кут натікання потоку води, на коефіцієнт попутного потоку та на коефіцієнт засмокування. В результаті змінюються коефіцієнт навантаження гвинта, коефіцієнти упору та моменту опору гребного гвинта [6].

Зі зміною моменту опору гвинта змінюються навантаження на гребні електродвигуни і на всю судову електроенергетичну систему. При цьому, цілком природно встає питання щодо здатності гребної електроенергетичної установки забезпечити електроходу можливість виконання маневру без перевантажень і без спрацьовування систем захисту. Оцінка показників якості маневрування електроходів з РКК Azipod, з одночасним контролем показників якості роботи судової електроенергетичної установки і є метою даної роботи.

На величину тяги та моменту опору гребного гвинта РКК впливають коефіцієнти взаємодії між гондолою РКК й корпусом судна та між гондолою й гребним гвинтом. У зв'язку з тим, що гондола розташована на відносно великій відстані від корпусу, першим коефіцієнтом можна знехтувати [7]. У той же час, взаємний вплив гондоли та гребного гвинта слід враховувати, оскільки це впливає на коефіцієнт попутного потоку й відповідно на тягу та на момент опору гребного гвинта.

Традиційно розрахунок тяги та моменту опору гребних гвинтів здійснюється на основі результатів серійних випробувань відповідних пристроїв у дослідницьких басейнах. При маневруванні судна, в умовах неусталених режимів роботи, доцільно перетворити ці результати на аналітичні співвідношення, які дадуть можливість враховувати в процесі маневрування зміни і параметрів управління, і гідродинамічних характеристик гвинтів.

В основу розрахунку упору й моменту опору гребних гвинтів, які працюють у косому потоці води, покладемо методику А.Д. Гофмана [8]. З урахуванням того що поперечна сила гвинта, як це показано у роботі [9], невелика, схему обтікання гребного гвинта РКК Azipod потоком води довільного напрямку, можна представити у виді рис. 1.

При роботі в косому потоці води змінюється осьова складова швидкості натікання води на гвинт, що впливає на коефіцієнт навантаження гвинта. Сумарний упор та момент на валу гвинта змінюються. Кут φ_{Az} між напрямком вектору швидкості v_A натікання води на гребний гвинт та напрямом вектору результуючої сили R_{Az}

практично дорівнює куту ψ_{Az} повороту Azipod. Це означає, що поздовжня складова P_{Az} сили гвинта (упор гребного гвинта) практично дорівнює результуючій силі R_{Az} .

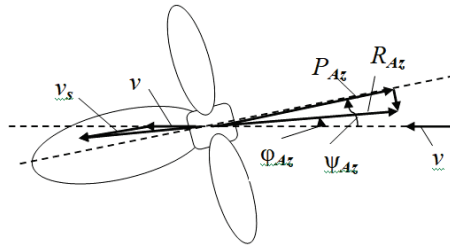


Рис. 1. Схема обтікання гребного гвинта Azipod потоком води

В загальному виді, упор та момент опору гребних гвинтів у косому потоці води залежать від крокового відношення P/D , де P і D – крок гвинта і його діаметр, та від навантаження гвинта σ_{T0} при осьовому натіканні води. У працях А.Д. Гофмана коефіцієнти упору та моменту представлені у вигляді функціональних залежностей:

$$k_R = 1,0 + C_1 \left[\left(\frac{P}{D} \right), \sigma_{T0} \right] f_1 \left[\left(\frac{P}{D} \right), \beta_k^* \right], \quad (1)$$

$$k_Q = 1,0 + C_2 \left[\left(\frac{P}{D} \right), \sigma_{T0} \right] f_2 [\beta_k^*], \quad (2)$$

$$f_2 [\beta_k^*] = [\beta_k^* + 4(\beta_k^*)^2], \quad (3)$$

де β_k^* – місцевий кут дрейфу у градусах.

В процесі маневрування електрохода змінюються частота обертання гвинта (частота обертання гребного електродвигуна), швидкість натікання води на гребний гвинт та кут повороту Azipod ψ_{Az} . Це призводить до того, що змінюється і вихідний (при осьовому потоці) коефіцієнт навантаження гвинта σ_{T0} , і коефіцієнти упору k_T , і коефіцієнти моменту k_Q . Оскільки частота обертання гвинта при маневруванні змінюється, рушійно-кермовий комплекс Azipod має розглядатися у складі єдиного суднового пропульсивного комплексу.

Саме це формує алгоритм розрахунку упору та моменту опору його гвинта. Він включає етапи:

1. За заданими конструктивними параметрами РКК, виходячи з розрахованих (на кожному кроці інтегрування системи рівнянь, що описують перехідні процеси пропульсивного комплексу) частоти обертання гвинта n і швидкості руху судна v , розраховується поступ гвинта $\lambda_0 = v_\lambda / D_n$ при осьовому потоці.

2. Із відомих [7, 9] залежностей $k_{T0} = k_T(P/D, \lambda)$ та $k_{Q0} = k_Q(P/D, \lambda)$ визначаються коефіцієнти упору k_{T0} та моменту k_{Q0} при осьовому натіканні потоку води. Для гребних гвинтів Azipod їх пропонується розраховувати за допомогою інтерполяційних співвідношень, подібних тим, що були надані у роботі [10]:

$$k_{T0} = \left[0,64 \left(\frac{P}{D} \right) - 0,1 \left(\frac{P}{D} \right)^2 \right] \cdot [1 - 0,502\lambda - 0,416\lambda^2], \quad (4)$$

$$10k_{Q0} = \left[0,072 \left(\frac{P}{D} \right) + 0,550 \left(\frac{P}{D} \right)^2 \right] \cdot [1 - 0,87\lambda]. \quad (5)$$

3. За співвідношеннями $P_0 = k_{T0} \rho D^4 n^2$ та $Q_0 = k_{Q0} \rho D^5 n^2$ розраховуються упор і момент на валу при осьовому $\psi_{Az} = 0$ натіканні.

4. Знаходиться коефіцієнт навантаження гребного гвинта при осьовому натіканні

$$\sigma_{T0} = \frac{8}{\pi} \left(\frac{k_{T0}}{\lambda^2} \right). \quad (6)$$

5. Коефіцієнт упору гвинтів k_R в косому потоці води при зміні відносного кроку гвинта P/D , коефіцієнта його навантаження σ_{T0} й кута повороту гондоли ψ_{Az} пропонується розраховувати за допомогою (1):

$$k_r = \left\{ \left[1 - 0,73 \left(\frac{P}{D} - 0,6 \right) \right] \cdot [1 + 0,775\psi_{Az} + 1,048\psi_{Az}^2] \right\} \cdot (e^{0,28\sigma_{T0}}), \quad (7)$$

після чого розраховуються упор гвинта у косому потоці води

$$P_{Az} = k_r P_0. \quad (8)$$

6. Для розрахунку моменту опору гвинта слід скористатися співвідношенням (1, 2). Аналітична інтерполяція графічної залежності співмножника $C_2[(P/D), \sigma_{T0}]$ дала такі результати:

$$C_2 \left[\left(\frac{P}{D} \right), \sigma_{T0} \right] = \left[\left[0,288 \left(\frac{P}{D} \right) + 0,348 \right] - \right.$$

$$-\left(\left[0,288\left(\frac{P}{D}\right)\right]+0,248\right)\cdot\left(1-e^{-0,635}\sigma_{T0}\right). \quad (9)$$

Коефіцієнт моменту q_Q визначається за співвідношенням (2) з урахуванням (9).

Момент опору гвинта при цьому розраховується як

$$M_{Az} = q_Q Q_0. \quad (10)$$

Гондола РКК Azipod має ще одне призначення. Створюючи додаткові сили та крутний момент, які діють на корпус судна, вона певною мірою виконує функцію керма. У цьому функціональному поданні гондола – це так зване пасивне кермо.

Вважатимемо [8], що частина гондоли (її кріплення) A_R^F обтикається водою зі швидкістю v_A , а сама гондола A_R^{Az} розташована в потоці струменя і обтикається водою зі швидкістю v_s . (Еквівалентна її площа, в першому наближенні, визначатиметься як $\text{Math } 0,6 A_R^{Az}$).

За результатами поділу пасивного керма на дві частини A_R^F і A_R^{Az} поперечна сила керма визначатиметься співвідношенням:

$$Y_{RAz} = \left(\frac{\partial C_{yR}}{\partial \Psi_{Az}} \right)_{isolated_rudder} \left(\frac{\rho v_A^2}{2} A_R^{\Sigma} \right) \Psi_{Az}, \quad (11)$$

де Y_{RAz} – градієнт підйомної сили керма, якій у першому наближенні, буде однаковим для всіх частин керма

$$Y_{RAz} = \left(\frac{\partial C_{yR}}{\partial \Psi_{Az}} \right)_{isolated_rudder};$$

v_A – номінальна швидкість натікання води на Azipod,

$$v_A = v k_v (1 - \psi), \quad (12)$$

v – швидкість руху центру тяжіння судна,

$$k_v = \frac{\cos \beta}{\cos \beta_k};$$

β – кут дрейфу у центрі тяжіння судна; β_k – місцевий кут дрейфу в районі Azipod; ψ' – коефіцієнт номінального попутного потоку;

A_R^Σ – "приведена" площа керма,

$$A_R^\Sigma = A_R^F + A_R^{A_z} \left(\frac{v_s}{v_A} \right)^2;$$

v_s – швидкість струменя води,

$$v_s = v_A \left[1 + \chi \left(\sqrt{1 + \sigma_T} - 1 \right) \right]; \quad (13)$$

χ – коефіцієнт стиснення струменю.

Представлений алгоритм дає можливість розраховувати поточні значення гідродинамічних сил і моментів, які створює рушійно-кермовий комплекс Azipod на маневрах.

Гребні електричні установки на основі РКК Azipod дають можливість змінювати тягу гвинта у будь якому напрямку. З одного боку, це забезпечує високі маневрені властивості електроходів, з іншого – створює суттєві додаткові навантаження як на гребну установку, так і на всю електроенергетичну систему. Це логічно породжує питання – чи спроможна електроенергетична установка забезпечити електроходу очікувані підвищені маневрені властивості й чи не будуть навантаження на її складові силові частини перевищувати допустимі значення. Для отримання відповіді на ці питання необхідно скористатися системним підходом до аналізу маневрених режимів роботи електроходів.

Рушійно-кермовий РКК Azipod входить невід'ємною частиною до єдиної суднової електроенергетичної системи, яка у свою чергу входить до складу суднового пропульсивного комплексу [9, 10, 11]. Укрупнена структурна схема такого комплексу надана на рис. 2.

До складу комплексу входять:

декілька генераторних агрегатів *GENERATOR SET*, кожний з яких має: тепловий двигун *D*; регулятор частоти обертання *DR* з системою розподілу активного навантаження; синхронний генератор *G*; регулятори напруги *GR* з системою розподілу реактивного навантаження;

пропульсивні силові контури *RIGHT CONTOR (R)* й *LEFT CONTOR (L)*, до складу кожного з яких входять: перетворювач частоти *SE*; гребний частотно-керований електродвигун *M*; система регулювання *SER* частоти α та напруги γ живлення електродвигуна; гребний гвинт *P* рушійно-кермового комплексу Azipod;

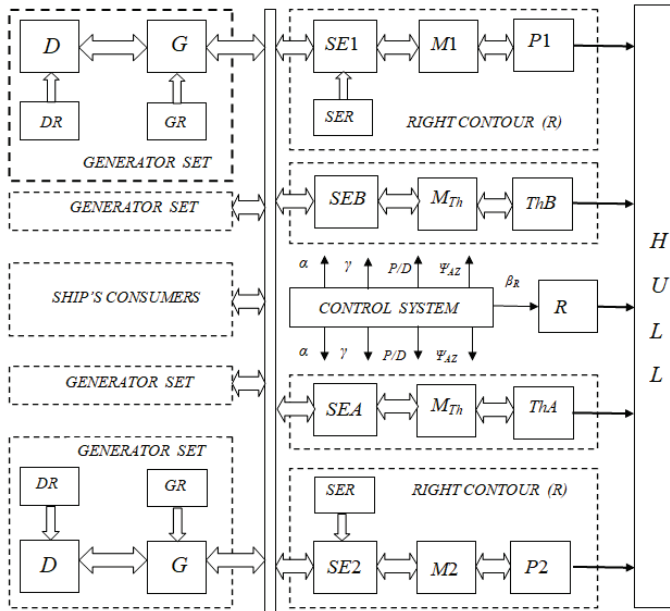


Рис. 2. Укрупнена структурна схема пропульсивного комплексу

силові контури електродвигунів підрулюючих пристроїв з: перетворювачами напруги SEB і SEA ; асинхронними короткозамкненими електродвигунами M_{ThB} і M_{ThA} ; гребними гвинтами (з регульованим кроком) ThB і ThA підрулюючих пристроїв загально-суднові споживачі електроенергії *SHIP'S CONSUMERS*; система управління *CONTROL SYSTEM*; кермо – R ; корпус судна *HULL*.

В роботах [10, 12, 13], наведена узагальнена математична модель перехідних режимів роботи пропульсивних комплексів електроходів з класичною компоновкою гребної електроенергетичної установки. Виявлено критерії динамічної подоби та узагальнені безрозмірні параметри комплексу. Саме ці критерії та параметри впливають на поточні значення основних режимних показників та на показники якості виконання маневрених операцій. Використання саме узагальнених безрозмірних параметрів дозволяє, в певній мірі, нівелювати вплив невисокої точності у визначенні низки фізичних

параметрів, що описують гідродинамічні процеси в комплексі Azipod та ефекти їх взаємодій на кінцеві результати досліджень.

Використання РКК Azipod потребує внесення певних змін у рівняння руху судна [13]. Додаткові гідродинамічні сили й моменти сил від РКК пропонується розраховувати за рівняннями (4) – (11).

Рух судна розглядається у пов'язаній з ним системі координат $GXYZ$, початок якої збігається з центром тяжкості судна G . Ось GX розміщується в діаметральній площині і направлена у ніс, вісь GY – на правий борт, ось GZ – вертикально. Після перетворень рівнянь руху судна у систему безрозмірних одиниць, вони набувають наступного виду.

Відносні складові швидкості руху судна $\overline{v_X}$ і $\overline{v_Y}$ вздовж осей X і Y :

$$\frac{d\overline{v_X}}{dT} = C_{\lambda 2} \overline{v_Y} \Omega_Z + N_X \left\{ \sum_j K_{p_j} \overline{P_{Azj}} \cos \psi_{Azj} - \sum_j k_{p_j} C \overline{P_{Azj}} \cos \psi_{Azj} - \overline{R_X} \right\}, \quad (14)$$

$$\frac{d\overline{v_Y}}{dT} = -\frac{1}{C_{\lambda 2}} \overline{v_X} \Omega_Z + \frac{N_X}{C_{\lambda 2}} \left\{ \sum_j \pm K_{p_j} \overline{P_{Azj}} \sin \psi_{Azj} \pm \sum_j k_{RL} k_{p_j} C_{RY} \beta_k^* \overline{v^2} - \overline{R_Y} \right\}, \quad (15)$$

Відносна швидкість обертання $\overline{\Omega_Z}$ навколо осі Z

$$\frac{d\overline{\Omega_Z}}{dT} = -\frac{N_\Omega}{N_X} C_{\lambda 21} \overline{v_X} \overline{v_Y} + N_\Omega \left\{ \sum_j \pm K_{p_j} h_{p_j} \overline{P_{Azj}} \sin \psi_{Azj} \pm \sum_j k_{RL} K_{p_j} h_{p_j} C_{RY} \beta_k^* \overline{v^2} + \sum_j K_{p_j} h_{p_j}^v \overline{P_{Azj}} \cos \psi_{Azj} \pm (\overline{M_{PZ}} - \overline{M_{DZ}}) \right\}, \quad (16)$$

У рівняннях (14) – (15):

$\overline{P_{Azj}}$ та K_{p_j} – корисний упор гребного гвинта та його частка у сумарному упорі відповідно; ψ_{Az} – кут повороту Azipod; $\overline{h_{p_j}}$ та $\overline{h_{p_j}^v}$ – відстань від центру системи координат до Azipod та відстань (координата по осі Y) від Azipod до поздовжньої осі X ; k_{RL} – коефіцієнт, що позначає розташування Azipod: для правого $k_{RL} = +1$, для лівого $k_{RL} = -1$; β_k^* – місцевий кут дрейфу на кермі у косому потоці води; $\overline{R_X}$ та $\overline{R_Y}$ – поздовжня та поперечна складові опору води руху судна [10, 12]; $\overline{M_{PZ}}$ та $\overline{M_{DZ}}$ – позиційна та динамічна складові моменту опору повороту судна [10, 12];

Критерії динамічної подоби N_X , N_Ω та безрозмірні параметри пропульсивного комплексу $C_{\lambda 2}$, $C_{\lambda 21}$, C_{RX} , C_{RY} розраховуються за співвідношенням, наведеними у роботі [10].

Рух судна у нерухомій системі координат $OX_1Y_1Z_1$ описується відповідно до рекомендацій у роботах [7, 9]. Поздовжня v_{X1} та поперечна v_{Y1} складові вектору швидкості центру тяжіння судна та його координати X_1 та Y_1 у нерухомій системі $OX_1Y_1Z_1$:

$$v_{X1} = v \cos \varphi_c,$$

$$v_{Y1} = v \sin \varphi_c.$$

Координати центру тяжіння X_1 , Y_1 , кут швидкості судна φ_c та кут курсу ψ_c визначаються як:

$$X_1 = \int_0^t v_{X1} dt = \int_0^t v \cos \varphi_c dt,$$

$$Y_1 = \int_0^t v_{Y1} dt = \int_0^t v \sin \varphi_c dt,$$

$$\varphi_c = \psi_c - \beta_{dr},$$

$$\psi_c = \int_0^t \Omega_z dt.$$

Математична модель перехідних режимів пропульсивного комплексу [10, 13] з урахуванням розробленого аналітичного методу обчислювання режимних показників РКК Azipod дає можливість розраховувати маневрені характеристики електроходів з одночасною оцінкою ступеню навантажень на електроенергетичну установку та її здібності щодо забезпечення якісного та безпечного маневрування.

У якості прикладу на рис. 3 надано результати розрахунків маневру "розгін електрохода – вихід на циркуляцію", а саме – поточні значення основних режимних показників пропульсивного комплексу по ходу маневрування. Розрахунки виконано для електрохода з характерним для цього типу розподілом електроенергії між споживачами: 40 % – загально-суднові споживачі; 60 % – гребна електрична установка, до складу якої входять пропульсивні гребні електродвигуни Azipod (49,8 %) та електроприводи підрулюючих пристроїв (10,2 %).

В процесі моделювання оцінювалися:

показники траєкторії руху судна: висування X_1 , пряме зміщення Y_1 , тактичний D_{CT} та усталений D_C діаметр циркуляції (в довжинах судна);

кутова швидкість обертання Ω_Z , тривалість маневру T_C , швидкість судна v_C (у відносних одиницях); ступінь зниження швидкості Δv_C (у долях по відношенню до початкової швидкості v_{str});

показники якості електроенергетичної установки (у відносних одиницях): максимальне значення тяги гвинтів T_{Az} ; момент опору гвинтів M_{Az} ; кутова швидкість обертання ω_M , рушійний момент M_M і струм I_M гребних електродвигунів Azipod; потужність теплових двигунів P_D .

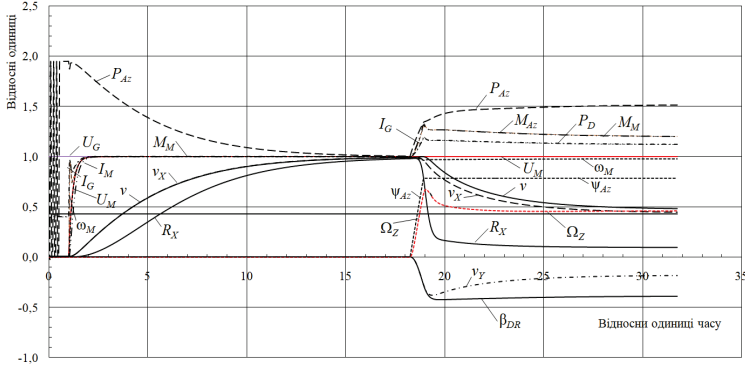


Рис. 3. Режимні показники пропульсивного комплексу

Аналіз поведінки пропульсивних комплексів при маневруванні показав, що навантаження на електроенергетичну установку залежать від швидкості v_{str} виходу судна на циркуляцію. Дослідження впливу v_{str} на маневреність електрохода та на показники якості роботи його електроенергетичної установки проведено для: $v_{str} = 0,1$; $v_{str} = 0,20$; $v_{str} = 0,40$; $v_{str} = 0,8$; $v_{str} = 1$. Вихід на циркуляцію здійснювався за рахунок повороту РКК на кут $\psi_{Az} = 35^\circ$. Результати розрахунків представлені у табл.

Результати розрахунків показують, що при збільшенні v_{str} навантаження на електроенергетичну установку зростають та починають перевищувати допустимі значення. На рис. 4 та 5, за результатами, наведеними у табл., побудовано залежності основних показників траєкторій циркуляційного руху та показників електроенергетичної установки від початкової швидкості судна v_{str} .

На рис. 4 показані залежності висування X_1 , прямого зміщення Y_1 , тактичного D_{CT} і усталеного D_C діаметра циркуляції, ступеня зниження швидкості судна Δv , кутової швидкості Ω_Z , і тривалості маневру T_C .

Таблиця

Вплив початкової швидкості руху судна v_{str}
на показники якості маневрування пропульсивного комплексу

Показники якості	Швидкість руху судна v_{str}					
	$v_{str} = 0,1$	$v_{str} = 0,2$	$v_{str} = 0,4$	$v_{str} = 0,6$	$v_{str} = 0,8$	$v_{str} = 1$
T_C, rv	100	76	39	27,7	20,5	16,8
X_1, L	2,54	2,64	2,74	2,83	2,91	2,99
Y_1, L	1,23	1,25	1,27	1,28	1,29	1,3
D_{CT}, L	3,52	3,64	3,67	3,7	3,71	3,73
D_C, L	3,3	3,3	3,3	3,3	3,3	3,3
v_C, rv	0,07	0,14	0,28	0,40	0,53	0,65
$\Delta v, rv$	0,30	0,30	0,30	0,33	0,34	0,35
Ω_Z, rv	0,06	0,12	0,24	0,35	0,45	0,55
T_{Az}, rv	1,44	1,44	1,44	1,44	1,44	1,44
M_M, rv	0,014	0,055	0,21	0,45	0,76	1,54
ω_M, rv	0,11	0,216	0,42	0,617	0,805	0,98
I_M, rv	0,014	0,055	0,21	0,45	0,76	1,14
P_D, rv	0,408	0,43	0,52	0,67	0,86	1,08

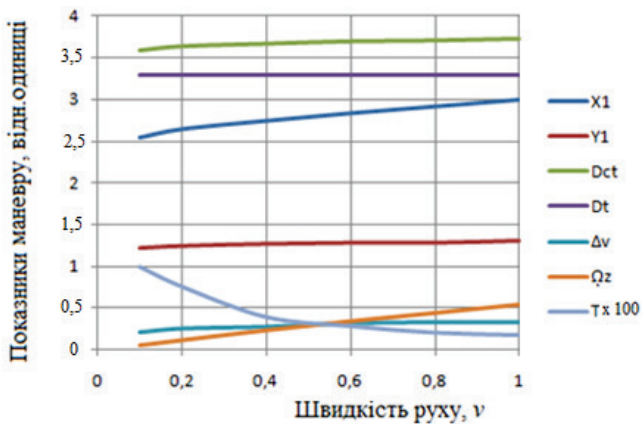


Рис. 4. Залежності показників траєкторій руху від швидкості v_{str} виходу судна на циркуляцію

На рис. 5 наведено залежності показників якості електроенергетичної установки: T_{Az} ; I_M ; P_D , M_M , ω_M .

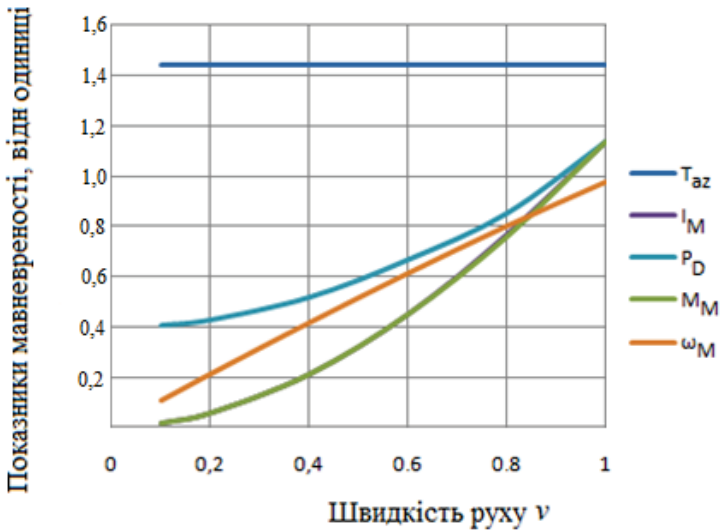


Рис. 5. Залежності показників електроенергетичної установки від швидкості v_{str} виходу судна на циркуляцію

Порівняльний аналіз показує наступне. Величина швидкості v_{str} , з якою судно виходить на циркуляцію, несуттєво впливає на показники траєкторії його руху Y_1 , D_{CT} , D_C , Δv . Збільшення швидкості v_{str} призводить лише до незначного зростання висунання судна. У той же час, кутова швидкість обертання корпусу електрохода Ω_z й тривалість маневру T_C змінюються дуже суттєво, що є цілком очікуваним. Кутова швидкість зростає більш ніж десятикратно, а тривалість маневру, навпаки, скорочується приблизно у п'ять разів.

Проте швидкість v_{str} істотно впливає на більшість показників роботи електроенергетичної установки. Зі зростанням v_{str} , лише один показник – тяга гвинтів РКК Azipod – практично залишається незмінною. Інші показники багаторазово зростають, і при швидкостях $v_{str} = 0,8 \dots 0,9$ починають наближатися до максимально допустимих значень. Це підтверджує той факт, що при виході на циркуляцію на великих швидкостях, необхідно обмежувати і кут повороту РКК Azipod, і швидкість його повороту.

Висновки.

1. Розроблено аналітичний метод гідродинамічного розрахунку корисного упору та моменту опору гребних гвинтів Azipod у косому

потоці води. Це дозволило на базі математичної моделі перехідних режимів роботи пропульсивних комплексів електроходів з РКК Azipod побудувати метод розрахунку показників якості маневрування електроходів з одночасним контролем показників роботи суднової електроенергетичної установки.

2. Показано, що маневрування на високих швидкостях з високою швидкістю повороту РКК підвищує маневреність електроходів, але одночасно з цим суттєво впливає на показники роботи СЕЕУ, що може привести до її перевантаження. Обґрунтовано необхідність обмеження інтенсивності маневрування.

3. Отримано залежності показників траєкторії руху судна та показників електроенергетичної установки від швидкості v_{str} виходу судна на циркуляцію.

4. Подальші, більш детальні, дослідження сприятимуть удосконаленню процесу управління пропульсивними комплексами електроходів з системою Azipod при маневруванні.

ЛІТЕРАТУРА REFERENCES

1. Friesch J. Investigations of podded drives in a large cavitation tunnel. //Proc. of the 9th PRADS Symposium, 16-21 September 2001. - Vol. 2. - Shanghai. - P. 749 - 756.

2. Dumez F-X. PODS, some encouraging conclusions. //Carenes. – 1977. - №7. - P. 18 - 23.

3. Friesch J. Investigations of podded drives in a large cavitation tunnel. //Proc. of the 9th PRADS Symposium, 16-21 September 2001. - Vol. 2. – Shanghai. - P. 749 - 756.

4. Gjerde K. M., Vartdal L., Bloch F., Poltak L. Application of various CFD methods in the development of AZIPULL Podded Propulsion System. //2nd International Conference CFD'99, 5 – 7 June 1999, Norway.

5. Breslin J. P., Andersen P. Hydrodynamics of ship propellers. Cambridge: Cambridge University Press, 1994. - 559 p.

6. Inoue S., Hirano M., Kijma K., Takashina J. A practical calculation method of ship manoeuvring motion. //Int. Shipbuild. Progr. – 1981. - Vol. 28. - № 325. - P. 207 - 222.

7. Лебедев, Э. П., Першиц, Р. Я., Русецкий, А. А., Аврашков, Н. С. Тарасюк А.Б. Средства активного управления судами. – Л.: Судостроение. - 264 с.

8. Гофман, А.Д. Движительно-рулевой комплекс и маневрирование судна: справочник. – Л.: Судостроение, 1988. – 360 с.

9. Яровенко, В. А. Расчет и оптимизация переходных режимов пропульсивных комплексов электроходов. - Одесса: Маяк, 1999. - 188 с.

10. Yarovenko, V. O., Chernicov, H. S., Schumylo, J. M., Zarinska, O. I. Mathematical model of transient modes of electric ships' propulsion complexes with thrusters. //Transport Development. - 2022. - №3(14). - Odesa: ONMU. - P. 110 - 129.

11. Yarovenko, V. A., Chernikov, P. S., Zaritskaya, E. I., Schumylo, A. N. (2020). Control of electric ships' propulsion motors when moving on curvilinear trajectory. //Electrical Engineering & Electromechanics. - 2020. - № 5. - P. 58 - 65.

12. 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.

13. Oleksandr Shumylo, Volodymyr Yarovenko, Mykola Malaksianj, Oleksiy Melnyk (2003). Comprehensive Assessment of Hull Geometry Influence of a Modernized Ship on Maneuvering Performance and Propulsion System Parameters. //Scientific Journal of Maritime Research (Pomorstvo). - 2003. - Vol. 37. - P. 314 - 325.

Abstract. *When an electric ship performs maneuvering operations, it is necessary to ensure control of the loads on the propulsion electric power plant. This allows assessing its ability to provide the successful execution of maneuvers by the vessel. It is proposed to build a procedure for such calculations based on the analysis of the transient modes of an electric power plant as part of a single ship's propulsion complex. A generalized structural diagram of the propulsion complex of electric ships based on the Azipod propulsion -steering system is proposed. An analytical method of hydrodynamic calculation of the thrust and moment of resistance of Azipod propellers in an oblique water flow, taking into account changes in the speed of propeller rotation, the vessel speed and the angle of nacelle rotation has been developed. The method is based on the results of serial tests of the corresponding devices in research basins. The method of calculating the propellers' thrust and the moment of resistance is integrated into the mathematical model of the transient operating modes of the electric ships' propulsion complexes. The computer modelling of transient modes allows calculating the current values of the main regime indicators and estimate the main indicators of the quality of electric ships' maneuvering. As such indicators, the characteristic parameters of the ship's trajectory and the operation parameters of the power units of the electric power plant were chosen. A study of the influence on ship's maneuverability of external factors*

and parameters determining the intensity of maneuvering was conducted. The degree of effect on the maneuverability indicators of the speed of the ship entering a curve, the angle of nacelle rotation of the propulsion-steering complex, and the speed of its rotation is estimated. Dependencies of ship trajectory indicators and electric power plant indicators on the speed of entry on circulation were obtained. It is shown that the use of Azipod propulsion-steering complexes adds up to electric ships' maneuverability. When maneuvering at high speeds and with a high turning speed of the nacelle, the loads on the electric power plant significantly increase. The need to limit the intensity of maneuvering so as to ensure necessary maneuverability with the simultaneous prevention of the electric power plant overloading is substantiated. The obtained results will contribute to the improvement of the process of controlling the electric ships' propulsion complexes with the Azipod system during maneuvering.

UDC 621.015.8

DOI: 10.31653/1819-3293-2025-1-30-155-164

ARTICLE HISTORY

Received 14.05.2024

Accepted 24.05.2024

Karianskyi Sergey
Institute of Marine Engineering, Science and Technology, Odessa Branch,
Odessa, Ukraine
secretary.ukr@branches.imarest.org

Jack-up Barges' Jacking System Simulator

Кар'янський Сергій Анатолійович
Інститут морської техніки, науки та технологій, Одеське відділення,
Одеса, Україна
secretary.ukr@branches.imarest.org

Симулятор підйомної системи самопідйомних барж

Summary. Jack-up barges are vital self-elevating platforms used in offshore oil and gas operations. Their sophisticated jacking systems, comprising extendable legs and high-pressure hydraulic systems, require precise control and comprehensive technical knowledge. There is a significant non-availabilities in simulator-based training for marine engineers responsible for these systems. This article emphasizes the urgent need for developing specialized simulators, outlining its potential to enhance safety, troubleshooting skills, and overall operational efficiency in high-risk offshore environments.

Резюме. Самопідйомні баржі є ключовими об'єктами офшорних операцій в нафто- та газовидобувній галузі. Їхні складні системи підйому, що включають висувні ноги та високонапірні гідравлічні мережі, вимагають точного керування і глибоких технічних знань. Існує суттєва нестача тренажерних програм для суднових механіків, відповідальних за ці системи. Стаття підкреслює необхідність розробки симуляторів, що сприятимуть підвищенню безпеки, розвитку навичок усунення несправностей та загальній ефективності роботи в умовах високих ризиків офшорних операцій.

1 Introduction

Modern offshore operations demand both precision and uncompromised safety. Jack-up barges, also known as self-elevating platforms essential to oil and gas extraction as well as offshore maintenance rely on sophisticated jacking systems to achieve stability. These systems, which integrate high-pressure hydraulics (operating up to 4500 PSI), extendable legs, and complex electrical controls, are indispensable for elevating the platform above the water and withstanding environmental forces.

In complex operational conditions, even minor errors can lead to catastrophic consequences. Nowadays the advanced control systems give possibility for some operational tolerance; however, the risk remains high for both personnel and the environment. In such a situation, practicing and acquiring hands-on skills under real conditions are not feasible. As an alternative, a dedicated simulator offers a safe, controlled environment in which system behavior from routine adjustments to emergency responses can be verified without endangering life or equipment.

The Figure below illustrates a conceptual scheme of a jack-up barge, highlighting the positions of its legs and the hydraulic control systems.

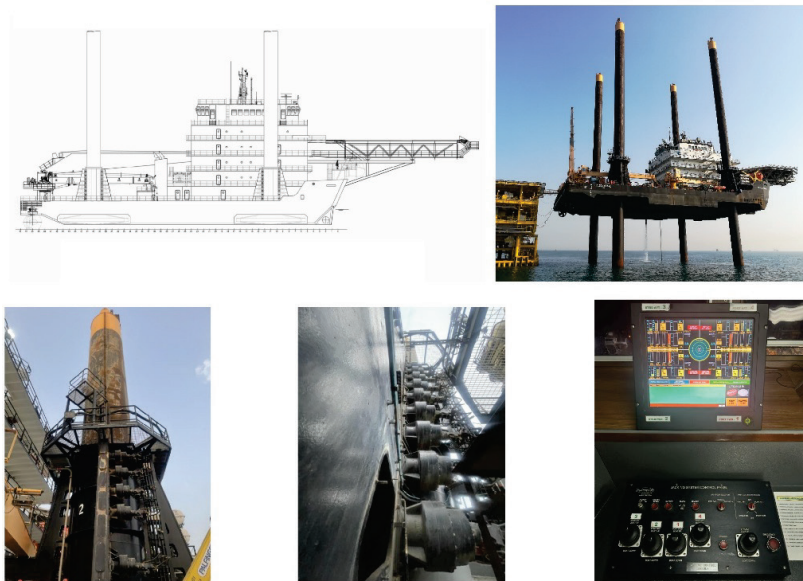


Fig. Schematic diagram of a jack-up barge highlighting its legs and hydraulic system.

2 Technical Characteristics of Jack-up Barges

Jack-up barges are designed to elevate their working decks above the water surface by extending their legs, which are firmly positioned on the seabed. The vertical movement of the structure is facilitated by sophisticated hydraulic systems that ensure accurate control of pressure and flow during the jacking process.

The hydraulic system incorporates electric motors, closed-loop hydraulic pumps, supercharge pumps, hydraulic motors, and specialized manifolds, all working in coordination to provide stable and precise vertical positioning of the platform. According to the Jacking System Manual, these systems typically employ electric motors rated at 300 HP, pressure-compensated flow control valves, and planetary gearboxes to maintain operational stability. The complexity of this system demands a high level of technical competence, especially during critical operational phases such as platform positioning, elevation, or departure from the site.

Precise synchronization between hydraulic components is essential to prevent structural overloading, minimize operational errors, and ensure the platform's structural integrity during jacking operations. The technical intricacies of these systems highlight the importance of advanced training for marine engineers involved in jack-up barge operations.

3 The Main Role of Jack-up Barges in Offshore Operations

Jack-up barges are indispensable in the oil and gas sector. They serve as stable bases for drilling rigs, maintenance operations, and the servicing of offshore platforms. By elevating the platform above the water, they ensure that all operational equipment remains safe from wave action and adverse weather. A malfunction during these operations can lead to severe damage not only to the platform but also to the surrounding infrastructure and the marine environment.

In recent years, incidents involving damage to oil platforms have underscored the need for enhanced operator training. Mishandling during the approach or departure such as improper leg deployment or unintentional contact with underwater pipes and cables can lead to catastrophic failures, resulting in environmental hazards and high economic costs.

4 Technical Complexity and Safety Challenges of Jacking Systems

The hydraulic jacking system on jack-up barges is characterized by:

- *High-Pressure Hydraulics*: Operating at pressures up to 4500 PSI, the system uses precise control mechanisms to manage fluid flow and pressure.

- *Integrated Electrical Controls:* Advanced control panels and joysticks allow for smooth coordination between the Captain and the Chief Engineer on the bridge during maneuvers.
- *Mechanical Precision:* Multiple electric motors, hydraulic pumps, and gearboxes work in tandem to raise or lower the barge's legs, ensuring stable operation even in dynamic sea conditions.

Further, detailed documentation such as the Jacking System Manual outlines these components and emphasizes the importance of routine maintenance and system monitoring. Such technical precision is essential to prevent inadvertent contact with underwater structures and to ensure safe operations.

5 Current Operational Programs and Existing Gaps

While numerous simulator-based courses are available for navigators focusing on platform maneuvering and overall operational procedures a critical gap remains for marine engineers tasked with managing the hydraulic and mechanical intricacies of jack-up systems. As demonstrated in Table 1, a comparative analysis reveals that existing programs do not fully address the specific challenges of hydraulic diagnostics and leg control required for effective system operation.

Below is a Table 1 that provides a comparative analysis of existing training programs versus the proposed simulator features.

Table 1
Comparative analysis of existing training programs versus the proposed simulator features

Course Name	Provider	Services/Techniques Provided	Existing Gaps	Proposed Simulator Advantages
1	2	3	4	5
Jack-Up Barge Advanced Introduction	<i>Education Marine</i>	Provides a theoretical foundation and practical examples from real maritime practice covering jack-up barge operations, crew responsibilities, jacking system operation, and barge movement preparation.	Focuses primarily on shipmaster responsibilities; does not offer in-depth training on the technical aspects (e.g., hydraulic system troubleshooting and leg operation) needed by marine engineers.	A dedicated simulator can offer realistic hands-on training for marine engineers, focusing on detailed hydraulic control, emergency procedures, and precise leg operations.

Continuation Table 1

1	2	3	4	5
Jack-Up Barge – Complete Course	<i>Educatio n Marine</i>	An online course taught by an experienced jack-up barge Captain that includes operational scenarios, interview preparation, maneuvering techniques, and practical insights from maritime practice.	Aimed at overall shipmaster operation with limited modules for technical maintenance and diagnostic procedures specific to marine engineers.	The simulator can be customized for marine engineers, incorporating modules on system diagnostics, technical troubleshooting, and maintenance of jacking systems.
Jack-Up Familiarization Course	<i>Lerus Training</i>	Delivers detailed information on jack-up operations, including various unit types, safety-critical equipment, operational planning, risk management, and emergency response procedures.	Emphasis is placed on overall platform operations and safety rather than the specific technical challenges encountered by marine engineers when managing hydraulic systems.	Provides an immersive, simulation-based environment for marine engineers focusing on the intricacies of hydraulic and mechanical systems, emergency drills, and system optimization.
Marine Operations of Self-Elevating Platforms	<i>Seaway Academy</i>	Offers an overview of operational procedures for self-elevating platforms, including platform positioning, basic maintenance practices, and general operational strategies.	General course content that does not address the specialized technical training required by marine engineers responsible for jacking system control and maintenance	A simulator tailored to marine engineers can deliver comprehensive technical training on jacking system dynamics, advanced hydraulic troubleshooting, and precise leg control

6 Functional Features and Algorithms of the Proposed Simulator

6.1 General Overview

The proposed simulator is designed to model the ship lifting system used in jack-up barges, allowing marine engineers to practice raising and lowering the platform safely. It emulates the behavior of hydraulic systems, electric

motors, and control systems, enabling operators to develop essential skills for both routine operations and emergency scenarios.

6.2 List of Function

The proposed simulator incorporates a comprehensive set of functions covering all phases of the lifting process:

- **System Cheking and Preparation:** Checking the condition of hydraulic and electrical components.
- **Barge Positioning:** Simulating the movement of the barge and the alignment of the platform legs to ensure safe contact with the seabed.
- **Jack Up:** Manages the extension of the legs for seabed contact and the hydraulic lifting of the platform above the water, including real-time monitoring and adjustments to maintain stability especially under wave and wind influences.
- **Jack Down:** Controls the retraction of the legs for a safe descent.
- **Monitoring and Control:** Provides real-time tracking of key parameters (such as pressure, fluid flow, and leg positions) and allows operators to adjust settings via control panels and simulated joysticks that mirror actual interfaces.
- **Emergency Handling:** Simulates potential failure scenarios including hydraulic leaks, leg misalignments, and electrical system faults and enables operators to practice diagnostics and troubleshooting under adverse conditions.

6.3 Operational Algorithms

To accurately simulate the complex dynamics of the lifting system, the simulator uses modular algorithms that include:

- **Hydraulic System Modeling:** Utilizes specialized libraries (e.g., Simcenter or Hopsan) to model high-pressure fluid dynamics, accurately replicating the behavior of pumps, valves, and motors.
- **Leg Movement Kinematics:** Implements kinematic models that simulate the extension and retraction of the legs, considering factors such as leg length, speed, and interaction with the seabed.
- **Control Logic:** Simulates the behavior of valves, motors, and pumps in response to operator inputs, ensuring that the virtual system behaves in a realistic and predictable manner.
- **User Interaction:** Processes inputs from simulated control panels and joysticks to deliver real-time feedback, closely mimicking the operation of actual jack-up barge systems.

6.4 Technical and Software Requirements

Hardware Requirements:

- **Computing Power:** High-performance CPUs for real-time simulations, GPUs for 3D visualization, and sufficient RAM for complex model processing.
- **Operating Systems:** Compatibility with Windows or Linux.
- **Peripheral Devices:** Joysticks or similar input devices and high-quality displays for detailed visualization (especially for 3D-rendered environments).
- **Network Connectivity:** Optional support for multi-user scenarios or online training to enable remote access and collaborative learning.

Software Requirements:

- **Programming Languages:** C++ for performance-critical physics simulation components and Python for scripting and configuration.
- **Simulation Libraries:** For hydraulic systems, libraries such as Simcenter; for physical dynamics, engines like Bullet Physics or PhysX.
- **3D Graphics:** Utilization of OpenGL, DirectX, or game engines (e.g., Unity or Unreal Engine) to render the jack-up barge and its operational environment realistically.
- **User Interface:** GUI frameworks such as Qt or wxWidgets for desktop applications, or web interfaces based on HTML5 and JavaScript that replicate real control panels and joysticks.

Table 2

Comparison of Hydraulic Simulation Libraries

Library	Advantages	Limitations
Simcenter	Supports complex systems; integrates with other tools	High licensing cost
Hopsan	Free; developed in academic settings	Limited documentation for beginners
MATLAB/Simulink	Well-known; offers powerful simulation tools	Requires additional configuration

7 The Role of Leading Simulator Manufacturers

Industry leaders in maritime simulation such as Kongsberg Digital, Wärtsilä Voyage, ECA Group, ARI, etc. Simulation have already

demonstrated their capability to develop high-fidelity simulation systems. By leveraging their technological expertise, these companies are well-positioned to create specialized simulators that accurately replicate the hydraulic and mechanical operations of jack-up systems. Such solutions can bridge the existing gap in operational support and contribute to enhanced safety and efficiency in offshore environments.

8 Conclusion and Recommendations

A comprehensive technical specification has been provided for developing a ship lifting system simulator, covering every aspect from functional features to equipment requirements. The simulator is envisioned as a critical training tool for marine engineers operating jack-up barges. By accurately replicating both routine operations and emergency scenarios such as hydraulic leaks or leg misalignments the system will enable effective hands-on training in a risk-free virtual environment.

Key Recommendations:

Enhanced Training Efficiency: The simulator will facilitate real-time practice and troubleshooting, reducing the risk of errors during live operations and significantly improving overall safety.

Comprehensive System Coverage: By integrating detailed models of hydraulic systems, electric motors, and control logic, the simulator addresses the training gaps currently present in conventional programs.

Robust Technical Infrastructure: Adoption of high-performance hardware and advanced simulation libraries will ensure that the system provides a realistic and responsive training experience.

Future-Proof Design: Its modular architecture allows for scalability and future integration of emerging technologies such as augmented or virtual reality, further enhancing training effectiveness and operational reliability.

In summary, the development of this simulator represents a vital step toward minimizing operational risks and enhancing the technical skills of marine engineers. It will contribute significantly to the safety, efficiency, and long-term sustainability of offshore operations.

ЛІТЕРАТУРА REFERENCES

1. Hydraquip CSI. 4680 Falcon Global Jacking System Manual. Houston, TX: Hydraquip Custom Systems, Inc., [2015].
2. Education Marine. Jack-Up Barge Advanced Introduction. Available at: <https://educationmarine.com>.

3. Lerus Training. Jack-Up Familiarization Course. Available at: <https://lerus.com>.

4. Seaway Academy. Marine Operations of Self-Elevating Platforms. Available at: <https://www.seawayacademy.com>.

5. Patent US4015434A. Available at: <https://patents.google.com/patent/US4015434A/en>.

6. Hydraquip. Available at: <https://www.hydraquip.com>.

7. Siemens PLM Software. Simcenter – Fluid System Simulation. Available at: <https://plm.sw.siemens.com/en-US/simcenter/simulation-test/fluid-system-simulation/>.

8. Linköping University. Hopsan – Open-source Simulation Package. Available at: <https://liu.se/en/research/hopsan>.

9. SEACOR Marine. Liftboats. 300 Class - Falcon Pearl. Available at: <https://seacormarine.com/vessel/falcon-pearl-300-class>.

Анотація. *Самопідйомні баржі виступають критично важливим елементом офшорних операцій з видобутку нафти та газу, забезпечуючи стабільну, самопідйомну платформу, необхідну для буріння, технічного обслуговування та будівництва в суворих морських умовах. Їхні високотехнологічні системи підйому, що поєднують високонапірну гідравліку, висувні ноги та сучасні електричні системи управління, гарантують безпеку експлуатації та структурну стійкість. Незважаючи на широкодоступні тренажерні курси для судноводіїв, існує суттєва нестача спеціалізованих симуляційних засобів для суднових механіків, відповідальних за технічне обслуговування, усунення несправностей та експлуатацію цих складних систем. У статті розглядається необхідність розробки спеціалізованого симулятора, що точно відтворює реальні умови роботи, включаючи як щоденні операційні виклики, так і аварійні ситуації. Представлено всебічний аналіз технічних складнощів, притаманних гідравлічним мережам та механічним компонентам, а також показано, як елементарні, модульні алгоритми можуть ефективно використовуватися для симуляції динаміки системи. Запропонований симулятор дозволяє судновим механікам практикувати діагностику систем, ін'єкцію збоїв та регулювання управління у віртуальному середовищі без ризику, що сприяє підвищенню стандартів безпеки, зниженню витрат на обслуговування та покращенню загальної ефективності експлуатації. Крім того, стаття аналізує існуючі програми підготовки та виявляє їхні недоліки, підкреслюючи потенціал провідних виробників симуляторів у розвитку цієї технології. Завдяки створенню реалістичного та занурюючого*

симуляційного середовища запропонована система не лише задовольняє нагальну потребу в ефективному навчанні, але й створює основу для постійного вдосконалення офішорних операцій. Її модульний дизайн забезпечує масштабованість та адаптивність до майбутніх технологічних досягнень, сприяючи формуванню культури безпеки та технічної досконалості серед суднових механіків. Інтеграція цих симуляційних засобів, як очікується, революціонізує протоколи обслуговування та стратегії реагування на надзвичайні ситуації, що суттєво вплине на стабільність та прибутковість офішорних проектів.

РЕФЕРАТИ

УДК 621.431.74

DOI: 10.31653/1819-3293-2025-1-29-03-20

Будуров М. І. Оптимізація електронного регулятора частоти обертання головного дизеля // Автоматизація суднових технічних засобів: наук.-техн. зб. – 2025. – Вип. 30. – Одеса: НУОМА. – С. 3 – 20.

Табл. 2. Рис. 6. Список літ.: 8 назв.

Обґрунтовано методику налаштування електронного регулятора частоти обертання головного суднового дизеля, яка враховує особливості навантаження на дизель під час хвилювання моря. За рахунок оптимізації параметрів налаштування регулятора, у тому числі його чутливості до розбалансу сигналів, отримано покращення стабільності частоти обертання при найімовірніших в експлуатації судна впливах, що обурюють. Запропоновано підхід адаптивного регулювання частоти обертання головного дизеля, який забезпечує задовільну стабільність швидкісного режиму дизеля під час хвитаці судна.

Ключові слова: дизель, електронний регулятор, частота обертання, качка судна, оптимізація налаштувань.

Tab. 2. Fig. 6. Refer.: 8.

A methodology for tuning the electronic speed governor of the main marine diesel engine has been substantiated, which takes into account the specific characteristics of diesel loading during sea disturbance. Through optimization of the governor tuning parameters, including its sensitivity to signal imbalance, improved rotational speed stability has been achieved under the most probable disturbing influences encountered during vessel operation. An adaptive approach to main diesel engine speed control has been proposed, which ensures satisfactory stability of the diesel engine speed regime during vessel pitching.

Keywords: diesel engine, electronic governor, rotational speed, ship rolling, settings optimization.

УДК 621.431.74

DOI: 10.31653/1819-3293-2025-1-29-21-40

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.

Табл. 2. Список літ.: 13 назв.

Екіпажі суден грають ключову роль в аналізі операційних ризиків на судах. Проте аналіз фактичної реалізації нормативних вимог щодо аналізу ризиків на борту морських суден свідчить про їх незадовільне виконання. Це вказує на наявність практичної проблеми щодо вдосконалення практики аналізу операційних ризиків на морських судах. Значне покращення аналізу можливо шляхом використання інструментів штучного інтелекту, зокрема

користувачьких агентів. Для підтвердження цього здійснено аналіз операційних ризиків на реальному судні двома способами: а) із застосуванням агента нейронної мережі без залучення платних ресурсів для автоматизації процесів; б) традиційним способом мозкового штурму. Результати порівняння обох способів для конкретної суднової роботи показали, що використання агента суттєво підвищило якість аналізу та скоротило трудовитрати з кількох годин до кількох хвилин.

Ключові слова: ризик, штучний інтелект, компетентність.

Tab. 2. Refer: 13.

The crews of vessels play a key role in the analysis of operational risks on ships. However, an analysis of the actual implementation of regulatory requirements for risk assessment on board maritime vessels indicates their unsatisfactory execution. This points to the existence of a practical problem in improving the practice of operational risk analysis on maritime vessels. Significant improvement in analysis can be achieved through the use of artificial intelligence tools, particularly custom agents. To confirm this, an operational risk assessment was carried out on a real vessel in two ways: a) using a neural network agent without relying on paid resources for process automation; b) using the traditional brainstorming method. The comparison of both approaches for a specific ship operation showed that the use of the agent significantly improved the quality of the analysis and reduced labor costs from several hours to just a few minutes.

Key words: risk, artificial intelligence, competence.

УДК 621.431.7

DOI: 10.31653/1819-3293-2025-1-30-41-51

Горб С. І., Кар'янський С. А. Можливості штучного інтелекту в аналізі ризиків на судах // Автоматизація суднових технічних засобів: наук.-техн. зб. – 2025. – Вип. 30. – Одеса: НУОМА. – С. 41 – 51.

Список літ.: 10 назв.

Системи управління безпекою на судах передбачають ідентифікацію небезпек, оцінювання ризиків та визначення заходів для їх усунення. Застосування інструментів штучного інтелекту дозволяє підвищити ефективність цієї роботи. З метою виявлення можливостей таких інструментів для аналізу ризиків на судах виконано порівняльний аналіз моделей: GPT-4.5, Sonnet 4, Grok 3, 2.5 Flash, GPT-4, Qwen3-235B-A22B та DeepSeek-R1. Встановлено, що всі розглянуті моделі порівняно з експертними методами забезпечують глибший аналіз, кращу структурованість опису ризиків, пропонують ефективніші контрзаходи, точніше оцінюють категорії ризиків та значно скорочують трудові витрати. Найкращі результати продемонстрували моделі GPT-4.5 та Sonnet 4.

Ключові слова: ISM Code; ризик; штучний інтелект; модель нейронної мережі, суднова операція; безпека судноплавства.

Refer: 10.

Ship safety management systems involve hazard identification, risk assessment, and determining measures to mitigate them. The application of artificial intelligence tools enhances the efficiency of this process. To explore the potential of such tools for risk analysis on ships, a comparative analysis of the following models was conducted: GPT-4.5, Sonnet 4, Grok 3, 2.5 Flash, GPT-4, Qwen3-235B-A22B and DeepSeek-R1. It was found that all the models examined, compared to expert methods, provide deeper analysis, better-structured risk descriptions, propose more effective countermeasures, more accurately assess risk categories, and significantly reduce labor costs. The best results were demonstrated by the GPT-4.5 and Sonnet 4 models.

Key words: ISM Code; risk; artificial intelligence; neural network model, ship operation; shipping safety.

УДК 004.5:004.67

DOI: 10.31653/1819-3293-2025-1-30-52-65

Михайленко В. С., Гвоздева І. М., Харченко Р. Ю. Суднова система моніторингу параметрів насосного обладнання, діюча на основі технології інтернет речей // Автоматизація суднових технічних засобів: наук.-техн. зб. – 2025. – Вип. 30. – Одеса: НУОМА. – С. 52 – 65.

Лл. 12. Список літ.: 12 назв.

У роботі наведено аналіз перспективних технологій Інтернет речей з метою інтеграції з судновими системами моніторингу, діагностики та управління. Показано прерогативу клієнт – серверної архітектури для віддаленого контролю технологічних параметрів суднових механізмів на автономних та традиційних суднах. Вказано, що актуальним напрямком забезпечення безпечної експлуатації суднових систем є розвиток методів інтелектуальної діагностики. Авторами запропоновано експертну систему, що реалізує методи інтелектуального аналізу даних для визначення ймовірності відмови елементів суднового насосного обладнання. Система діагностики реалізована за допомогою програми Orange Data Mining. Апробація представленої програми демонструє її ефективність та можливість впровадження до суднових інтегрованих систем контролю та управління діючих на основі технологій Інтернет-речей.

Ключові слова: моніторинг, інтернет речей, технічна діагностика.

Fig.. 12. Refer: 12.

The paper presents an analysis of promising Internet of Things technologies for possible integration with ship monitoring, diagnostics and control systems. The prerogative of client-server architecture for remote control of technological parameters of ship mechanisms on autonomous and traditional vessels is shown. It is indicated that the current of ensuring of ship systems safe operation is the development of intelligent diagnostics methods. The authors propose an expert system that implements data mining methods to determine the probability of failure of ship pumping equipment elements. The diagnostic system is implemented using the Orange data mining program. Testing of the presented program demonstrates its

effectiveness and the possibility of implementation in ship integrated monitoring and control systems operating on the basis of Internet of Things technologies.

Keywords: monitoring, Internet of Things, technical diagnostics.

УДК 004.5:004.67

DOI: 10.31653/1819-3293-2025-1-30-66-78

Михайленко В. С., Харченко Р. Ю. Нечітка експертна система моніторингу технічного стану суднових дизелів // Автоматизація суднових технічних засобів: наук.-техн. зб. – 2025. – Вип. 30. – Одеса: НУОМА. – С. 66 – 78.

Табл. 2. Іл. 12. Список літ.: 9 назв.

Розглянуто процес розробки нечіткої експертної системи моніторингу технічного стану суднових дизельних двигунів. Запропонована система використовує базу знань і механізми нечіткої логіки для діагностики несправностей, що підвищує ефективність технічного обслуговування суднових енергетичних установок і забезпечує надійність їх експлуатації. Систему реалізовано в математичному пакеті Matlab (FLT) та хмарному середовищі Google Colab. За результатами експерименту представлено програмний код із відповідними рекомендаціями для оператора. Апробація розробленої системи підтвердила її ефективність і перспективність впровадження в системи моніторингу суднового енергетичного обладнання.

Ключові слова: експертна система, технічний стан, діагностика.

Tab. 2. Fig. 12. Refer: 9.

This publication discusses the development of a fuzzy expert system for monitoring the technical condition of marine diesel engines. The proposed system utilizes a knowledge base and fuzzy logic mechanisms to diagnose faults, thereby improving the efficiency of maintenance for marine power plants and ensuring operational reliability. The system is implemented using the Matlab (FLT) mathematical package and the Google Colab cloud environment. Based on the experimental results, the program code is presented along with corresponding recommendations for the system operator. The testing of the developed system confirms its effectiveness and its potential for integration into marine power equipment monitoring systems.

Key words: expert system, technical condition, diagnostics.

УДК 629.5.058.44

DOI: 10.31653/1819-3293-2025-1-30-79-92

Рябцов О. В. Організаційне вдосконалення технічної експлуатації волоконно-оптичних гіроскопів для суднових систем динамічного позиціонування // Автоматизація суднових технічних засобів: наук.-техн. зб. – 2025. – Вип. 30. – Одеса: НУОМА. – С. 79 – 92.

Табл. 1. Іл. 1. Список літ.: 11 назв.

Проаналізовано тенденцію заміни суднових механічних гірокомпасів на волоконно-оптичні інтерференційного типу, що підвищує їх надійність завдяки відсутності рухомих частин та пов'язаних із ними відмов. Запропоновано

безперервний контроль стану оптичного волокна як чутливого елементу. Розглянуто організаційно-технічні заходи для вдосконалення експлуатації волоконно-оптичних гірокомпасів шляхом впровадження додаткового контролю параметрів, спрямованого на підвищення надійності систем динамічного позионування суден.

Ключові слова: гірокомпас, волоконно-оптичний, гіроскоп.

Tab. 1. Fig. 1. Refer: 11.

The trend of replacing ship mechanical gyrocompasses with fiber-optic interference-type gyrocompasses has been analyzed, which enhances their reliability due to the absence of moving parts and associated failures. Continuous monitoring of the optical fiber condition as a sensitive element is proposed. Organizational and technical measures to improve the operation of fiber-optic gyrocompasses through the introduction of additional parameter control, aimed at increasing the reliability of ship dynamic positioning systems, are considered.

Key words: gyrocompass, fiber optic, gyroscope.

УДК 621.431.74

DOI: 10.31653/1819-3293-2025-1-30-93-103

Сагайдак О. І. Використання блокчейн технології у концепції кругової оцінки ризиків операції швартування судна // Автоматизація суднових технічних засобів: наук.-техн. зб. – 2025. – Вип. 30. – Одеса: НУОМА. – С. 93 – 103.

Табл. 1. Іл. 2. Список літ.: 10 назв.

Проаналізована можливість використання блокчейн-технологій для оцінки ризиків перед та під час операції швартування судна. Також зроблено порівняння позитивних та негативних аспектів використання таких технологій для цілей оцінки ризиків. Наведено можливості застосування глобальної системи з використанням технологій блокчейн, та можливість її паралельного використання з метою контролю держави порту

Ключові слова: ризик, блокчейн, швартування.

Tab. 1. Fig. 2. Refer: 10.

The article analyzes the possibility of using blockchain technologies for the purposes of risk assessment before and during the mooring operation of a vessel. It also compares the positive and negative aspects of using such technologies for the purposes of risk assessment. The possibilities of using a global system using blockchain technologies, and the possibility of its parallel use for the purposes of Port State Control, are presented.

Key words: risk, blockchain, mooring.

УДК 629.5

DOI: 10.31653/1819-3293-2025-1-30-104-120

Сагін С. В., Куропятник О. А. Аналіз впливу біодизельного палива на екологічні та економічні показники роботи суднових дизелів // Автоматизація суднових технічних засобів: наук.-техн. зб. – 2025. – Вип. 30. – Одеса: НУОМА. – С. 104-120.

Табл. 10. Іл. 5. Список літ.: 37 назв.

Наведено результати досліджень щодо визначення впливу біодизельного палива B10 та B30 на екологічні та економічні показники роботи суднових дизелів 5S60ME-C8 MAN-B&W Diesel Group та 6DL-16 Daihatsu Diesel, що використовувались як головний та допоміжні на судні класу Bulk Carrier дедвейтом 58640 тонн. Експериментально підтверджено, що під час використання біодизельного палива B10 та B30 в порівнянні з паливом нафтового походження RMG380 досягається 24 ... 25 % зниження концентрації оксидів азоту в випускних газах, при цьому відбувається підвищення питомої витрати палива на 1,7 ... 6,0 %.

Ключові слова: біодизельне паливо, випускні гази, дистильатне паливо, екологічні показники, економічні показники, концентрація оксидів азоту, питома витрата палива, судновий дизель

Tabl. 01. Fig. 5. Refer: 37

The results of research on determining the impact of biodiesel fuel B10 and B30 on the environmental and economic indicators of the work of ship diesels 5S60ME-C8 MAN-B&W Diesel Group and 6DL-16 Daihatsu Diesel, which were used as main and auxiliary on Bulk Carrier class vessels with a deadweight of 58,640 tons, are provided. It has been experimentally confirmed that when using biodiesel fuel B10 and B30, in comparison with fuel of petroleum origin RMG380, a 24 ... 25 % decrease in the concentration of nitrogen oxides in exhaust gases is achieved, while there is a 1.7 ... 6.0 % increase in fuel consumption.

Key words: biodiesel fuel, concentration of nitrogen oxides, distillate fuel, economic indicators, environmental indicators, exhaust gases, marine diesel, specific fuel consumption.

УДК 629.5

DOI: 10.31653/1819-3293-2025-1-30-121-138

Сарін 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. – Одеса: НУОМА. – С. 121 – 138.

Табл. 8. Іл. 4. Список літ.: 40 назв.

Розглянуті питання щодо використання додаткової ультразвукової обробки палива для зменшення емісії оксидів сірки з випускними газами суднових дизелів. Дослідження виконувались на судні класу Bulk Carrier дедвейтом 64710 т. Енергетичну установку судна складала головний двигун MAN-B&W 6S50ME-C9.7 та три допоміжних дизель-генератора MAN-B&W 5L23/30H. Випускні гази всіх двигунів очищувались від домішок сірки за допомогою скрубберної системи очищення – SO_x Exhaust Gas Cleaning System. Встановлено, що використання скрубберної системи очищення випускних газів та ультразвукової обробки палива (в порівнянні лише зі скрубберним очищенням випускних газів) забезпечує зниження на 9,27 ... 33,08 % емісії оксидів сірки. Для найбільшого зниження емісії оксидів сірки, обробку палива необхідно виконувати з оптимальною частотою ультразвуку.

Ключові слова: морський транспорт, судновий двигун внутрішнього згоряння, суднове паливо, вміст сірки в паливі, емісія діоксиду сірки, емісія діоксиду вуглецю, очищення випускних газів, ультразвукова обробка палива

Tab. 8. Fig. 4. Refer: 40.

The issues of using additional ultrasonic fuel treatment to reduce sulfur oxide emissions in the exhaust gases of marine diesel engines were considered. The studies were conducted on a Bulk Carrier vessel with a deadweight of 64,710 tons. The vessel's power plant consisted of a main engine MAN-B&W 6S50ME-C9.7 and three auxiliary diesel generators MAN-B&W 5L23/30H. The exhaust gases of all engines were cleaned of sulfur impurities using a scrubber system – the SO_x Exhaust Gas Cleaning System. It was established that the use of the scrubber system for exhaust gas cleaning combined with ultrasonic fuel treatment (compared to scrubber cleaning alone) reduces sulfur oxide emissions by 9.27 to 33.08%. To achieve the greatest reduction in sulfur oxide emissions, fuel treatment should be performed at the optimal ultrasonic frequency.

Key words: maritime transport, marine internal combustion engine, marine fuel, sulfur content in fuel, sulfur dioxide emissions, carbon dioxide emissions, exhaust gas cleaning, ultrasonic treatment of fuel

УДК 629.12-8:629.12.037

DOI: 10.31653/1819-3293-2025-1-30-139-154

Шумило О. М., Яровенко В. О., Малаксіано М. О. Метод оцінки показників маневреності пропульсивних комплексів електроходів з Azipod // Автоматизація суднових технічних засобів: наук.-техн. зб. – 2025. – Вип. 30. – Одеса: НУОМА. – С. 139 – 154.

Табл. 1. Іл. 5. Список літ.: 13 назв.

Запропоновано метод оцінки навантажень на електроенергетичні установки електроходів з рушійно-кермовими системами Azipod при виконанні маневрених операцій. Побудовано узагальнену структурну схему пропульсивних комплексів електроходів. Запропоновано аналітичний метод гідродинамічного розрахунку упору та моменту опору гребних гвинтів Azipod у косому потоці води. Розроблено математичну модель та метод розрахунку поточних значень режимних показників комплексу на перехідних режимах. Наведено результати досліджень впливу інтенсивності маневрування на показники траєкторії руху судна та на показники якості роботи суднової електроенергетичної установки. Отримано їх залежності від швидкості виходу судна на циркуляцію.

Ключові слова: електрохід, рушійно-кермовий комплекс, маневріність.

Tabl. 1. Fig. 5. Refer: 13.

A method for assessing the loads on electric power plants of electric ships with Azipod propulsion and steering systems during maneuvering operations is proposed. A generalized structural diagram of the electric ships' propulsion complexes is constructed. An analytical method for hydrodynamic calculation of the thrust and moment of resistance of Azipod propellers in an oblique water flow is proposed. A

mathematical model and a method for calculating the current values of the system's performance indicators in transient modes are developed. The research results of the influence of maneuvering intensity on the vessel's trajectory indicators and on the performance indicators of the ship's electric power plant are presented. Their dependencies on the speed of the vessel's entry into circulation are obtained.

Key words: electric drive, propulsion and steering complex, maneuverability.

UDC 621.015.8

DOI: 10.31653/1819-3293-2025-1-30-155-164

Karianskyi Sergey. Jack-up Barges' Jacking System Simulator // Автоматизація суднових технічних засобів: наук.-техн. зб. – 2025. – Вип. 30. – Одеса: НУОМА. – С. 155 – 164.

Tabl. 1. Fig. 1. Refer: 9.

Jack-up barges are vital self-elevating platforms used in offshore oil and gas operations. Their sophisticated jacking systems, comprising extendable legs and high-pressure hydraulic systems, require precise control and comprehensive technical knowledge. There is a significant non-availabilities in simulator-based training for marine engineers responsible for these systems. This article emphasizes the urgent need for developing specialized simulators, outlining its potential to enhance safety, troubleshooting skills, and overall operational efficiency in high-risk offshore environments.

Keywords: barge, lifting system, simulator.

Табл. 1. Іл. 1. Список літ.: 9 назв.

Самопідйомні баржі є ключовими об'єктами офшорних операцій в нафто- та газовидобувній галузі. Їхні складні системи підйому, що включають висувні ноги та високонапірні гідравлічні мережі, вимагають точного керування і глибоких технічних знань. Існує суттєва нестача тренажерних програм для суднових механіків, відповідальних за ці системи. Стаття підкреслює необхідність розробки симуляторів, що сприятимуть підвищенню безпеки, розвитку навичок усунення несправностей та загальній ефективності роботи в умовах високих ризиків офшорних операцій.

Ключові слова: баржа, система підйому, симулятор.

ЗМІСТ

Будуров М. І. Оптимізація електронного регулятора частоти обертання головного дизеля.....	3
Горб С. І. Аналіз операційних ризиків на судах з використанням штучного інтелекту	21
Горб С. І., Кар'янський С. А. Можливості штучного інтелекту в аналізі ризиків на судах.....	41
Михайленко В. С., Гвоздева І. М., Харченко Р. Ю. Суднова система моніторингу параметрів насосного обладнання, діюча на основі технології інтернет речей	52
Михайленко В. С., Харченко Р. Ю. Нечітка експертна система моніторингу технічного стану судових дизелів	66
Рябцов О. В. Організаційне вдосконалення технічної експлуатації волоконно-оптичних гіроскопів для судових систем динамічного позиціонування	79
Сагайдак О. І. Використання блокчейн технології у концепції кругової оцінки ризиків операції швартування судна	93
Сагін С. В., Куропятник О. А. Аналіз впливу біодизельного палива на екологічні та економічні показники роботи судових дизелів	104
Сагін С. В., Куропятник О. А. Руснак Д. Ю., Парменова Д. Г. Зниження емісії оксидів сірки з випускними газами судових дизелів шляхом ультразвукової обробки палива	121
Шумило О. М., Яровенко В. О., Малаксіано М. О. Метод оцінки показників маневреності пропульсивних комплексів електроходів з Azipod.....	139
Karianskyi Sergey. Jack-up Barges' Jacking System Simulator ...	155
Реферати	165

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 кеглем 10, гарнітура Times New Roman. Використання списків у редакторі Word не дозволяється. Рукопис має бути підписаний усіма авторами.

2. Обсяг статті (з ілюстраціями, підписуваними підписами та резюме українською та англійською мовами) не повинен перевищувати 1,5 авторського 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 29.05.2025.

Формат 60×84 1/16. Папір офсетний №1. Гарнітура Times New Roman.

Ум. друк. арк. 10,11. Тираж 50 екз. Замовлення №
НУОМА

Свідоцтво ДК №1292 від 20.03.2003

65052, г. Одеса, вул. Дідріхсона, 8, корп. 7, к. 206

Тел./факс: (0482) 34-14-12

publish@onma.edu.ua