Методичний апарат комплексного оцінювання технічного стану суднових дизельних двигунів за параметричними та віброакустичними діагностичними ознаками

Methodological Framework for Comprehensive Technical Condition Assessment of Marine Diesel Engines Based on Parametric and Vibroacoustic Diagnostic Features

Ігор Давидов
кандидат технічних наук, доцент, професор кафедри корабельної енергетики факультету корабельної енергетики та водолазних робіт, e-mail: davydov.igor.f@gmail.com, ORCID ID: https://orcid.org/0000-0001-7745-4228

Костянтин Назаренко
кандидат технічних наук, доцент кафедри корабельної енергетики факультету корабельної енергетики та водолазних робіт, e-mail: sevport@gmail.com, ORCID ID: https://orcid.org/0009-0000-2639-4325

Володимир Бенедюк
Corresponding author: ад'юнкт штатний науково-організаційного відділення, e-mail: karpaten2024@ukr.net, ORCID ID: https://orcid.org/0009-0009-3681-6830

Інститут Військово-Морських Сил Національного університету "Одеська морська академія", м. Одеса, Україна

Ihor Davydov
PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Ship Power Engineering, Faculty of Ship Power Engineering and Diving Operations, e-mail: davydov.igor.f@gmail.com, ORCID ID: https://orcid.org/0000-0001-7745-4228

Kostiantyn Nazarenko
PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Ship Power Engineering, Faculty of Ship Power Engineering and Diving Operations, e-mail: sevport@gmail.com, ORCID ID: https://orcid.org/0009-0000-2639-4325

Volodymyr Benediuk
Corresponding author: Full-time Adjunct (PhD student), Research and Organisational Department, e-mail: karpaten2024@ukr.net, ORCID ID: https://orcid.org/0009-0009-3681-6830

Naval Institute of the National University "Odesa Maritime Academy", Odesa, Ukraine

Received: October 5, 2026 | Revised: October 27, 2026 | Accepted: October 31, 2026

УДК: 621.436.038

DOI: https://doi.org/10.33445/sds.2026.16.5.42

Мета роботи. Розробити методичний апарат комплексного оцінювання технічного стану суднових дизельних двигунів різного функціонального призначення на основі інтеграції параметричних і віброакустичних діагностичних ознак у єдиний кількісний показник для обґрунтування рішень щодо їх технічного обслуговування та ремонту.

Метод дослідження. Застосовано системний аналіз, узагальнення наукових джерел і технічної документації, нормування діагностичних параметрів, адитивну згортку часткових показників, статистичний і спектральний аналіз, метод попарних порівнянь та регресійне моделювання деградаційних процесів.

Результати дослідження. Сформовано шість груп діагностичних параметрів. Розроблено процедуру їх нормування, інтегральний показник технічного стану $K_{\text{тс}}$ із попередньою чотирирівневою шкалою оцінювання, критерії циклової нерівномірності COV і CII, вібродіагностичний критерій та модель прогнозування залишкового ресурсу. Запропоновано восьмикроковий алгоритм застосування методики.

Теоретична цінність дослідження. Систематизовано підходи до комплексного діагностування суднових дизелів. Обґрунтовано структуру методичного апарату, що поєднує прямі й непрямі методи контролю та передбачає адаптацію діагностичних критеріїв до двигунів різного функціонального призначення.

Практичне значення. Запропонований апарат створює методичні передумови для оцінювання фактичного технічного стану двигунів, планування ремонтних заходів, визначення

Purpose. To develop a methodological framework for the comprehensive assessment of the technical condition of marine diesel engines with different functional purposes by integrating parametric and vibroacoustic diagnostic features into a single quantitative indicator to support maintenance and repair decisions.

Method. The study employs systems analysis, a review of scientific literature and technical documentation, normalization of diagnostic parameters, additive aggregation of partial indicators, statistical and spectral analysis, the pairwise comparison method, and regression modeling of degradation processes.

Findings. Six groups of diagnostic parameters were identified. A normalization procedure, an integral technical condition index (Ktc) with a preliminary four-level assessment scale, cyclic irregularity criteria (COV and CII), a vibration diagnostic criterion, and a model for predicting remaining useful life were developed. An eight-step algorithm for applying the methodology was proposed.

Theoretical implications. Existing approaches to comprehensive marine diesel engine diagnostics were systematized. The structure of a methodological framework combining direct and indirect monitoring methods and allowing diagnostic criteria to be adapted to engines with different functional purposes was substantiated.

Practical implications. The proposed framework provides a methodological basis for assessing the actual technical condition of engines, planning maintenance and repair activities, determining diagnostic inspection intervals, and

періодичності діагностування та прогнозування залишкового ресурсу суднових енергетичних установок.

Оригінальність. Полягає у структурній інтеграції відомих методів параметричного, віброакустичного та статистичного діагностування в єдиний методичний апарат із некомпенсаторним правилом визначення граничного стану, незалежними критеріями циклової нерівномірності та моделлю прогнозування деградації.

Обмеження/подальші дослідження. Відсутність поточних експлуатаційних вимірювань обмежує можливість експериментального підтвердження результатів. Вагові коефіцієнти та порогові значення інтегрального показника потребують обґрунтування й верифікації. Подальші дослідження передбачають апробацію методики на двигунах Wärtsilä 8R22HF-D і Volvo Penta TAD121CHC.

Тип статті. Теоретико-методична.

predicting the remaining useful life of marine power plant engines.

Originality/value. The originality lies in the structural integration of established parametric, vibroacoustic, and statistical diagnostic methods into a unified methodological framework incorporating a non-compensatory rule for identifying critical conditions, independent cyclic irregularity criteria, and a degradation prediction model.

Limitations/future research. The absence of current operational measurements limits experimental validation of the results. Weighting coefficients and threshold values of the integral index require further justification and verification. Future research will focus on validating the methodology using Wärtsilä 8R22HF-D and Volvo Penta TAD121CHC engines.

Paper type. Theoretical and methodological.

Ключові слова: технічний стан, суднові дизельні двигуни; параметрична діагностика, вібродіагностика, інтегральний діагностичний критерій; обслуговування за фактичним станом.

Key words: technical condition, marine diesel engines; parametric diagnostics, vibration diagnostics; integral diagnostic criterion, condition-based maintenance.

Вступ

Надійність і безвідмовність суднової енергетичної установки (СЕУ) визначаються насамперед технічним станом головних і допоміжних дизельних двигунів, які експлуатуються в умовах змінних навантажень, підвищених вібрацій та несприятливих кліматичних впливів. Для суден, обладнаних головними двигунами серії Wärtsilä 22 (зокрема модифікації 8R22HF-D) та дизель-генераторними агрегатами на базі двигунів Volvo Penta TAD121CHC, своєчасне й об’єктивне оцінювання технічного стану має особливе значення. Відмова головного двигуна створює загрозу безпеці мореплавства, тоді як відмова дизель-генератора може призвести до порушення електропостачання суднових споживачів.

Традиційна система планово-запобіжного ремонту (ПЗР), що ґрунтується на регламентованих міжремонтних інтервалах, не повною мірою враховує індивідуальні особливості експлуатації конкретної одиниці обладнання та фактичну інтенсивність деградації її вузлів. Це може призводити як до передчасного виведення двигуна в ремонт унаслідок формального вичерпання встановленого ресурсу, так і до продовження його експлуатації за наявності прихованих дефектів, здатних спричинити відмову. Альтернативою є стратегія технічного обслуговування за фактичним станом (Condition-Based Maintenance, CBM), що передбачає кількісне оцінювання технічного стану за сукупністю вимірюваних діагностичних параметрів [1; 2]. Загальні процедури розроблення програм моніторингу технічного стану машин, зокрема вибору контрольованих параметрів і встановлення порогових значень спрацювання попереджувальних сигналів, визначено стандартом ISO 17359 [3].

Актуальність дослідження зумовлена також потребою в уніфікованій методиці кількісного оцінювання технічного стану, яка враховувала б особливості двох об’єктів, що істотно відрізняються за функціональним призначенням і конструктивним виконанням: середньообертового головного двигуна Wärtsilä 8R22HF-D із газотурбінним наддувом та високообертового двигуна дизель-генераторного агрегату Volvo Penta TAD121CHC із механічною системою паливоподачі та всережимним регулятором частоти обертання.

Огляд літератури

Питання параметричної діагностики суднових дизельних двигунів у режимі реального часу досліджено в роботі Р. А. Варбанця, Д. С. Мінчева, Ю. М. Кучеренка та В. І. Заложа [4], у якій проаналізовано параметри робочого процесу, вібродіаграми впорскування палива та особливості нестабільності робочих процесів за результатами аналізу індикаторних діаграм. Запропоновані в зазначеній роботі критерії — коефіцієнт варіації та індекс циклової

нерівномірності — покладено в основу відповідної складової методичного апарату цього дослідження. Розвиваючи зазначений підхід, ті самі автори запропонували портативну діагностичну систему, яка поєднує датчик тиску газів у циліндрі з віброакустичним датчиком і забезпечує можливість діагностування паливної апаратури та механізму газорозподілу безпосередньо в умовах експлуатації [5].

У роботі [6] систематизовано основні методи безрозбірного діагностування дизельних двигунів, зокрема вібраційний та акустичний методи, непряме індиціювання за напруженням у шпильках кріплення кришки циліндра, оцінювання ступеня зношування за вмістом металів у моторній оливі, а також діагностування за нерівномірністю частоти обертання колінчастого вала. Показано, що найбільш тісний зв’язок із фактичним технічним станом двигуна забезпечують прямі методи індиціювання робочого процесу. Методи оцінювання технічного стану суднових двигунів за результатами індиціювання на режимах, відмінних від номінального, розглянуто в [7]. Їх застосування є особливо важливим для суднових енергетичних установок, двигуни яких тривалий час експлуатуються за часткових навантажень. Подальший розвиток підходів до формування узагальнених діагностичних показників представлено в [8], де як інтегральні характеристики технічного стану дизельного двигуна запропоновано використовувати енергомісткість і нерівномірність обертання колінчастого вала.

Серед зарубіжних досліджень на особливу увагу заслуговує робота В. Ламаріса та Д. Хунталаса [9], у якій універсальну діагностичну методику застосовано одночасно до головного пропульсивного та допоміжних дизельних двигунів одного судна. Такий підхід є близьким до постановки наукового завдання цього дослідження, оскільки передбачає оцінювання технічного стану двигунів різного функціонального призначення. Для вібродіагностування суднових дизелів застосовують спектральний аналіз сигналів мікрофонів і акселерометрів із використанням дискретного перетворення Фур’є [10]. Водночас для аналізу нестаціонарних сигналів доцільним є застосування частотно-часових методів, систематизований огляд яких наведено в [1].

Окремим напрямом сучасних досліджень є розвиток інтелектуальних методів діагностування технічного стану суднових дизельних двигунів. Зокрема, запропоновано підходи на основі методу випадкового лісу та об’єднання діагностичних свідчень за тепловими параметрами [11], а також технології цифрових двійників для оцінювання технічного стану обладнання [12]. Водночас автори [11] звертають увагу на обмеженість реальних експлуатаційних даних про несправності, що зумовлює необхідність доповнення навчальних вибірок результатами математичного моделювання. Застосування цифрових двійників, зі свого боку, потребує калібрування математичних моделей відповідно до конструктивних та експлуатаційних особливостей конкретного двигуна.

Підходи до експертного оцінювання технічного стану циліндропоршневої групи та математичні критерії якості її діагностування розглянуто в [13; 14]. Результати цих досліджень можуть бути використані для обґрунтування шкал якісної інтерпретації часткових та інтегральних діагностичних показників. Конструктивні характеристики, експлуатаційні параметри та регламентні вимоги до об'єктів дослідження наведено в технічній документації виробників [15–17].

Дослідницька проблема та наукова прогалина

Незважаючи на значну кількість досліджень, присвячених окремим методам діагностування суднових дизельних двигунів, аналіз наукових джерел [1–14] свідчить про недостатнє висвітлення питань комплексного оцінювання їх технічного стану на основі єдиного методичного апарату, придатного для двигунів різного функціонального призначення.

Зокрема, у проаналізованих дослідженнях не виявлено методики, яка одночасно забезпечувала б:

1. Нормування різнорідних за фізичною природою та розмірністю діагностичних параметрів (індикаторних, віброакустичних, теплотехнічних, трибологічних та енергетичних) до єдиної безрозмірної шкали з урахуванням характеру й напряму їх зміни під час погіршення технічного стану двигуна.

2. Застосування некомпенсаторного правила визначення граничного технічного стану, за якого критичне відхилення хоча б одного діагностичного параметра не може бути компенсоване задовільними значеннями інших показників.

3. Використання незалежних від інтегрального показника критеріїв циклової нерівномірності робочого процесу та статистичної моделі тренду деградації для прогнозування залишкового ресурсу двигуна.

Важливою умовою є також можливість застосування зазначених складових у межах єдиного методичного підходу як до головного суднового двигуна, так і до дизель-генераторного агрегату.

Наявні інтегральні показники [8] характеризують переважно окремі фізичні аспекти функціонування двигуна. Модельні методи діагностування [9; 12] потребують попереднього калібрування математичних моделей робочого процесу, тоді як застосування методів машинного навчання [11] передбачає наявність репрезентативних масивів експлуатаційних даних про несправності, формування яких для конкретних типів суднових двигунів може бути ускладненим.

Отже, дослідницька проблема полягає в необхідності формування комплексного методичного апарату, який забезпечував би узгоджене використання різнорідних діагностичних параметрів, інтегрального оцінювання технічного стану, незалежних критеріїв виявлення критичних відхилень і прогнозування залишкового ресурсу суднових дизельних двигунів.

Наукова прогалина пов’язана насамперед із недостатньою інтеграцією зазначених складових у межах єдиного методичного підходу. Відповідно, науковий внесок дослідження полягає не в розробленні принципово нових методів діагностування, а в їх структурному поєднанні та адаптації до оцінювання технічного стану суднових дизельних двигунів різного функціонального призначення.

Наукове завдання дослідження

Наукове завдання дослідження полягає в розробленні методичного апарату комплексного оцінювання технічного стану суднових дизельних двигунів за параметричними та віброакустичними діагностичними ознаками на прикладі головного двигуна Wärtsilä 8R22HF-D та дизель-генератора Volvo Penta TAD121CHC.

Для розв’язання поставленого наукового завдання необхідно:

1. Систематизувати технічні та експлуатаційні характеристики об’єктів дослідження, що визначають склад і доступність діагностичних параметрів.

2. Сформувати вектори інформативних діагностичних параметрів для кожного типу двигуна з урахуванням можливостей прямих і непрямих методів контролю.

3. Розробити процедуру нормування часткових діагностичних показників, різнорідних за фізичною природою, розмірністю та характером зміни під час деградації технічного стану.

4. Сформувати інтегральний критерій оцінювання технічного стану та запропонувати попередню шкалу його якісної інтерпретації з визначенням необхідності подальшої експериментальної верифікації.

5. Розробити статистичну модель тренду деградації діагностичних параметрів залежно від наробітку двигуна для прогнозування його залишкового ресурсу.

6. Визначити умови коректного застосування запропонованого методичного апарату та сформулювати вимоги до вихідних експериментальних даних, необхідних для його практичної реалізації.

Методологія дослідження

Об’єктами дослідження є два дизельні двигуни, що виконують різні функції у складі суднової енергетичної установки.

Головний двигун Wärtsilä 8R22HF-D є восьмициліндровим рядним чотиритактним тронковим дизельним двигуном серії Wärtsilä Vasa 22 із газотурбінним наддувом і системою пуску стисненим повітрям. Основні технічні характеристики двигуна: діаметр циліндра – 220 мм, хід поршня – 240 мм, номінальна потужність – 1300 кВт за частоти обертання колінчастого вала 1000 об/хв, порядок роботи циліндрів – 1–3–7–4–8–6–2–5 [15].

Технічні характеристики головного двигуна уточнено на підставі сертифіката Регістра СРСР № 86.5184.260 від 04.12.1986. Базові значення його робочих параметрів визначено за протоколами стендових випробувань, проведених на заводі-виробнику 29.11.1986 із використанням палива MDF та моторної оливи Shell Argina T 30 [17]. Значна тривалість експлуатації двигуна зумовлює необхідність комплексного оцінювання його фактичного технічного стану з урахуванням можливих деградаційних процесів і зношування основних вузлів.

Дизель-генераторний агрегат побудовано на базі шестициліндрового рядного чотиритактного двигуна Volvo Penta TAD121CHC із турбонаддувом, охолодженням наддувного повітря та механічною системою паливоподачі. До складу паливної системи входить паливний насос високого тиску Bosch PE 6P із всережимним регулятором частоти обертання RSV.

Технічні характеристики дизель-генераторного агрегату систематизовано за керівництвом виробника з ремонту двигунів серій 100 і 120 [16]. Відповідно до наведеної в зазначеному джерелі системи позначень Volvo Penta, літера T вказує на наявність турбонаддуву, A – охолодження наддувного повітря, D – дизельний тип двигуна, числове позначення 120 – робочий об’єм близько 12 л, а літера C – належність до відповідної серії. Двигун TAD121CHC належить до 120-ї серії, для якої в технічній документації [16] наведено конструктивні характеристики, регулювальні параметри та допустимі значення зношування основних деталей і вузлів.

Порівняльні технічні характеристики досліджуваних двигунів наведено в табл. 1.

Таблиця 1. Порівняльні технічні характеристики об’єктів дослідження

Параметр	Wärtsilä 8R22HF-D	Volvo Penta TAD121CHC (120-та серія)
Призначення	Головний (пропульсивний) двигун	Привід дизель-генератора допоміжної/аварійної електростанції
Тип	4-тактний, тронковий, рядний, газотурбінний наддув з проміжним охолодженням повітря	4-тактний, рядний, з безпосереднім впорскуванням, турбонаддув з охолодженням наддувного повітря
Кількість циліндрів	8	6
Діаметр циліндра / хід поршня, мм	220 / 240	130,175 / 150
Робочий об’єм, л	≈ 73,0 (8 · 9,12)	11,97

Параметр	Wärtsilä 8R22HF-D	Volvo Penta TAD121CHC (120-та серія)
Номінальна потужність, кВт	1300	238
Номінальна частота обертання, хв$^{-1}$	1000	1500
Пуск	Стисненим повітрям	Електростартер Bosch KB, 24 В
Порядок роботи циліндрів	1-3-7-4-8-6-2-5	1-5-3-6-2-4
Паливо	Важке (HFO) з підігрівом або дизельне (MDO)	Дизельне (ISO 8217 DMA/DMB)
Система керування паливоподачею	Механічна	Механічна: ТНВД Bosch PE 6P 120A з всережимним регулятором Bosch RSV

Джерело: систематизовано авторами за [15-17]; дані Volvo Penta – за керівництвом з ремонту двигунів серій 100 і 120 [16].

Принципові відмінності між досліджуваними об’єктами зумовлені їх функціональним призначенням, конструктивними особливостями та режимами експлуатації. Зокрема, середньообертовий головний двигун працює переважно на важкому паливі за гвинтовою характеристикою, тоді як швидкохідний двигун дизель-генераторного агрегату функціонує за сталої частоти обертання колінчастого вала в умовах змінного електричного навантаження. Зазначені відмінності зумовлюють необхідність формування окремих векторів діагностичних параметрів для кожного типу двигуна зі збереженням єдиного методичного підходу до їх нормування, аналізу та комплексного оцінювання.

Методичну основу дослідження становлять аналіз наукових публікацій і технічної документації виробників, систематизація діагностичних параметрів за їх фізичною природою та способами отримання, нормування часткових діагностичних показників і їх адитивна згортка з урахуванням вагових коефіцієнтів, для визначення яких передбачено застосування методу попарних порівнянь [18]. Крім того, використано статистичні критерії циклової нерівномірності робочого процесу, спектральний аналіз вібраційних сигналів та регресійне моделювання тренду деградації технічного стану із застосуванням методу найменших квадратів для подальшого прогнозування залишкового ресурсу двигунів [19].

Результати дослідження

1. Формування вектора діагностичних параметрів

Технічний стан двигуна в момент часу t пропонується розглядати як багатовимірний об’єкт, що описується вектором діагностичних параметрів

$$X(t) = [x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t)]^T, \quad (1)$$

де $x_i(t)$ – поточне значення i-го діагностичного параметра;

n – кількість контрольованих параметрів.

До вектора (1) включено як індикаторні параметри робочого процесу, так і непрямі – вібраційні, теплотехнічні та трибологічні, що узгоджується з класифікацією методів безрозбірного діагностування [6] (табл. 2).

2: Групи діагностичних параметрів суднових дизелів

Група параметрів	Контрольовані параметри	Спосіб отримання
Індикаторні (робочого процесу)	Максимальний тиск згоряння p_{max}; тиск стиску p_c; кут положення p_{max} відносно ВМТ; середній індикаторний тиск p_i	Індиціювання циліндрів (п'єзоелектричні датчики тиску, непряме індиціювання за деформацією шпильок кришки)
Параметри нерівномірності	Коефіцієнт варіації COV; індекс циклової нерівномірності CII; нерівномірність частоти обертання колінчастого вала δ_ω	Аналіз миттєвої кутової швидкості за сигналом датчика частоти обертання
Вібраційні	Середньоквадратичне значення віброшвидкості v_{RMS}; спектральні складові на характеристичних частотах (обертовій, спрацьовування клапанів, впорскування); ексцес обвідної	П'єзоелектричні акселерометри, швидке перетворення Фур'є, аналіз обвідної спектра
Теплотехнічні	Температура відпрацьованих газів по циліндрах; температура та тиск наддувного повітря	Термопари, датчики тиску в ресивері наддуву
Трибологічні	Вміст продуктів зношування (Fe, Cu, Al, Cr, Pb) у моторній оливі; в'язкість; вміст води та палива в оливі	Спектральний і ферографічний аналіз проб оливи
Енергетичні та експлуатаційні	Питома ефективна витрата палива b_e; ефективна потужність N_e; наробіток, мотогодини	Витратоміри палива, дані системи моніторингу

Джерело: систематизовано авторами за [4-6].

2. Нормування часткових діагностичних показників

Оскільки параметри x_i мають різну фізичну природу, одиниці вимірювання та напрям зміни під час погіршення стану, для зведення їх до єдиної шкали застосовується нормування відносно номінального $x_{i,ном}$ (паспортного або виміряного на новому чи відремонтованому двигуні) та граничнодопустимого $x_{i,гр}$ значень:

$$\tilde{x}_i(t) = \frac{x_i(t) - x_{i,\text{ном}}}{x_{i,\text{гр}} - x_{i,\text{ном}}}, \; i = 1, \dots, n, \tag{2}$$

де $\tilde{x}_i(t)$ – нормоване безрозмірне відхилення, що дорівнює 0 для двигуна в базовому стані та 1 у разі досягнення граничного стану за цим параметром.

Вираз (2) є придатним без змін також для параметрів, значення яких зменшуються внаслідок погіршення технічного стану двигуна (наприклад, p_c або p_{max}). У такому випадку чисельник і знаменник виразу мають однаковий знак, що забезпечує коректність нормування.

Номінальні значення діагностичних параметрів $x_{i,\text{ном}}$ визначають за результатами приймально-здавальних або контрольних випробувань конкретного двигуна, а гранично допустимі значення $x_{i,\text{гр}}$ – відповідно до технічної документації виробника або галузевих нормативних документів із технічної експлуатації.

Зокрема, для головного двигуна Wärtsilä 8R22HF-D (заводський № 3890) у сертифікаті Регістра СРСР наведено номінальні характеристики навісних механізмів: газотурбонагнітача VTR 214-11 (витрата повітря — 2,63 кг/с, тиск — 2,3 бар), масляного насоса (подача — 30,4 м³/год, тиск — 4,0 бар), двох насосів системи охолодження (подача кожного — 44,0 м³/год, тиск — 1,7 бар) та паливопідкачувального насоса (подача — 0,7 м³/год, тиск — 3,0 бар). Зазначені характеристики можуть використовуватися як вихідні дані для встановлення номінальних значень відповідних теплотехнічних і гідравлічних діагностичних параметрів.

Крім того, базові значення окремих параметрів діагностичного вектора (1) для досліджуваних головних двигунів визначено за протоколами стендових випробувань, проведених на заводі-виробнику [17] за п’яти рівнів навантаження та частоти обертання колінчастого вала 1000 об/хв (табл. 3). Для порівняльного аналізу також наведено результати стендових випробувань однотипних дизельних двигунів тієї самої серії постачання.

Таблиця 3. Базові значення параметрів головного двигуна Wärtsilä 8R22HF-D за результатами стендових випробувань

Параметр	25 %	50 %	75 %	100 %	110 %	100 %, № 3889
Ефективна потужність, кВт	325	650	975	1300	1430	1300
Питома витрата палива, г/(кВт·год)	236,2	219,2	202,9	202,8	206,9	203,0
Середня температура відпрацьованих газів, °С	299	329	367	393	414	383
Середнє положення паливної рейки, мм	12,3	19,3	24,8	29,8	32,8	29,5
Частота обертання ротора ГТН, хв$^{-1}$	16 200	26 400	32 200	36 000	38 600	35 300
Тиск наддувного повітря в ресивері, бар	0,25	1,0	1,75	2,5	2,78	2,45

Джерело: систематизовано авторами за [17].

Наведені дані дають змогу встановити не лише номінальні значення діагностичних параметрів $x_{i,\text{ном}}$, а й базовий рівень міжциліндрової нерівномірності нового двигуна.

Зокрема, за навантаження 100 % середньоквадратичне відхилення максимального тиску згоряння p_{max} для восьми циліндрів становить 2,2 бар (коефіцієнт варіації – 1,6 %), а найбільше відхилення від середнього значення становить –3,25 бар (−2,4 %) для циліндрів А6 і А7. Для температури відпрацьованих газів відповідні показники становлять 13,9°С (коефіцієнт варіації – 3,5 %) та +26,9°С (+6,8 %) для циліндра А8.

Зазначені величини характеризують міжциліндрову нерівномірність розподілу діагностичних параметрів, а не їх циклову мінливість, тому їх не можна безпосередньо ототожнювати з критеріями, визначеними виразами (5) і (6). Водночас вони становлять важливу базу для подальшої інтерпретації результатів діагностування. Зокрема, збільшення міжциліндрового розкиду діагностичних параметрів у процесі експлуатації порівняно з базовими значеннями, отриманими під час стендових випробувань, може свідчити про погіршення технічного стану паливної апаратури або циліндропоршневої групи.

Порівняння результатів стендових випробувань дизельних двигунів із заводськими № 3889 і № 3890 показує, що за однакового навантаження 100 % різниця між середніми температурами відпрацьованих газів становить 10 °С, а між положеннями паливної рейки – 0,3 мм. Це свідчить про наявність індивідуальних відмінностей робочих характеристик однотипних двигунів та обґрунтовує доцільність визначення номінальних значень діагностичних параметрів $x_{i,\text{ном}}$ окремо для кожної одиниці обладнання.

Для забезпечення коректності подальшої адитивної згортки нормовані відхилення діагностичних параметрів обмежують інтервалом [0; 1]:

$$\hat{x}_i(t) = min\{max\{\tilde{x}_i(t);\ 0\};\ 1\}. \quad (3)$$

Водночас якщо $\tilde{x}_i(t) > 1$ хоча б для одного параметра, стан двигуна за цим параметром визнається граничним незалежно від значення інтегрального показника. Це

правило усуває притаманний адитивним показникам ефект маскування критичного відхилення одного параметра задовільними значеннями інших.

3. Інтегральний діагностичний критерій

Для отримання єдиної чисельної оцінки технічного стану запропоновано інтегральний показник $K_{\text{тс}}$, що формується адитивною згорткою обмежених нормованих відхилень із ваговими коефіцієнтами значущості:

$$K_{\text{тс}}(t) = 1 - \sum_{i=1}^{n} w_i \hat{x}_i(t), \quad \sum_{i=1}^{n} w_i = 1, \tag{4}$$

де w_i – ваговий коефіцієнт *i*-го параметра, що відображає його інформативність і зв'язок з імовірністю відмови відповідного вузла.

Інтегральний показник технічного стану $K_{\text{тс}}$ набуває значень у межах інтервалу [0; 1]. Значення, близькі до 1, відповідають справному технічному стану двигуна, тоді як наближення показника до 0 свідчить про погіршення технічного стану та наближення до його граничного рівня.

Протилежний напрям шкали інтегрального показника $K_{\text{тс}}$ відносно шкали нормованих відхилень забезпечується перетворенням виду "1 − Σ" у виразі (4). Зокрема, якщо для всіх діагностичних параметрів нормовані відхилення дорівнюють нулю ($\hat{x}_i$ = 0), що відповідає базовому стану двигуна, інтегральний показник набуває значення $K_{\text{тс}}$ = 1. Якщо всі нормовані відхилення досягають одиниці ($\hat{x}_i$ = 1), що відповідає граничному стану, то за умови нормування суми вагових коефіцієнтів (Σw_i = 1) інтегральний показник дорівнює нулю ($K_{\text{тс}}$ = 0).

Отже, шкала нормованих відхилень, у якій 0 відповідає базовому стану, а 1 — граничному, та шкала інтегрального показника $K_{\text{тс}}$, у якій 1 характеризує справний стан, а 0 — граничний, є математично узгодженими й відрізняються протилежним напрямом відліку.

Вагові коефіцієнти доцільно визначати методом попарних порівнянь [18] із залученням кваліфікованих суднових механіків або методом головних компонент на основі статистичного опрацювання масиву експлуатаційних вимірювань двигунів відповідної серії. Довільне встановлення вагових коефіцієнтів w_i без належного обґрунтування результатами аналізу статистики відмов або формалізованого експертного оцінювання є методологічно необґрунтованим. Тому в межах цього дослідження запропоновано математичну структуру інтегрального критерію (4) без визначення конкретних числових значень вагових коефіцієнтів та розрахунку інтегрального показника для досліджуваних двигунів.

Для якісної інтерпретації значень інтегрального показника $K_{\text{тс}}$ запропоновано попередню шкалу градацій (табл. 4), сформовану з урахуванням підходів до експертного оцінювання технічного стану циліндропоршневої групи [13; 14].

Таблиця 4. Попередня шкала якісної інтерпретації інтегрального показника $K_{\text{тс}}$

Діапазон K_{mc}	Якісна оцінка стану	Рекомендована дія
0,85-1,00	Справний, близький до номінального	Штатна експлуатація, плановий моніторинг
0,60-0,85	Працездатний з погіршеними показниками	Скорочення міжконтрольного інтервалу, поглиблене діагностування
0,35-0,60	Обмежено працездатний	Планування ремонту або ТО в найближчому порту заходу
< 0,35	Передвідмовний	Виведення з експлуатації, позаплановий ремонт

Джерело: розроблено авторами; порогові значення мають попередній характер і потребують експериментальної верифікації.

4. Критерії циклової нерівномірності робочого процесу

Для підвищення чутливості оцінки до дефектів паливної апаратури та циліндропоршневої групи (зависання голок форсунок, нерівномірність подачі палива по циліндрах, утрата компресії) використовуються критерії, апробовані для суднових дизелів у [4]. Коефіцієнт варіації максимального тиску згоряння за вибіркою послідовних робочих циклів:

$$COV = \frac{\sigma(p_{max})}{\bar{p}_{max}} \cdot 100\ \%, \tag{5}$$

де $\sigma(p_{max})$ – середньоквадратичне відхилення максимального тиску згоряння;
$\bar{p}_{max}$ – його середнє значення за тією самою вибіркою.

Індекс циклової нерівномірності, що узагальнює відхилення роботи циклу окремих циліндрів від середньої по двигуну:

$$CII = \frac{1}{z}\sum_{k=1}^{z} \frac{|W_k - \bar{W}|}{\bar{W}} \cdot 100\ \%, \tag{6}$$

де W_k – робота циклу k-го циліндра, обчислена за індикаторною діаграмою;
$\bar{W}$ – середня робота циклу по всіх z циліндрах.

Перевищення COV і CII граничнодопустимих для конкретного типу двигуна значень є прямою ознакою нерівномірної роботи циліндрів і слугує додатковим, незалежним від $K_{\text{тс}}$, критерієм стану паливної апаратури та циліндропоршневої групи. Критерій CII доповнює показник нерівномірності обертання колінчастого вала [8], оскільки дає змогу локалізувати циліндр із відхиленням.

5. Вібродіагностичний критерій

Віброакустичний контроль ґрунтується на середньоквадратичному значенні віброшвидкості $v(t)$, виміряної в контрольних точках блока циліндрів, підшипникових опор і турбокомпресора:

$$v_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T v^2(t)dt} \tag{7}$$

з подальшим частотним аналізом сигналу методом швидкого перетворення Фур'є для виявлення характеристичних частот дефектів, обертової частоти колінчастого вала, частот спрацьовування клапанів і впорскування палива та їх гармонік [10]. Для нестаціонарних режимів це пуск, зупинка, змінне навантаження генератора, доцільним є віконне перетворення Фур'є з поділом сигналу на квазістаціонарні відрізки [1]. Нормоване відхилення вібраційного параметра включається до вектора (1) за виразом (2) на загальних підставах.

6. Статистична модель тренду деградації

Для прогнозування залишкового ресурсу за параметром x_i його експлуатаційний тренд у функції наробітку τ (мотогодини) апроксимується регресійною залежністю, вид якої обирається за мінімумом суми квадратів відхилень з-поміж лінійної, степеневої та експоненційної моделей:

$$x_i(\tau) = x_{i,\text{ном}} + a\tau^b \quad \text{або} \quad x_i(\tau) = x_{i,\text{ном}} + a(e^{b\tau} - 1), \tag{8}$$

де a, b – емпіричні коефіцієнти, що визначаються регресійним аналізом фактичних вимірювань x_i на різних наробітках конкретного двигуна (для $b = 1$ степенева модель переходить у лінійну).

Прирівнявши $x_i(\tau)$ до $x_{i,\text{гр}}$, отримують оцінку наробітку до граничного стану за цим параметром для степеневої

$$\tau_{\text{гр}} = \left(\frac{x_{i,\text{гр}} - x_{i,\text{ном}}}{a}\right)^{1/b} \tag{9}$$

та експоненційної моделей:

$$\tau_{\text{гр}} = \frac{1}{b} ln\left(1 + \frac{x_{i,\text{гр}} - x_{i,\text{ном}}}{a}\right). \tag{10}$$

Залишковий ресурс дорівнює різниці між $\tau_{\text{гр}}$ та поточним наробітком. Такий підхід відповідає загальній схемі прогнозування залишкового ресурсу за індикатором технічного стану [19]. Коефіцієнти a і b є індивідуальними для кожної одиниці обладнання та кожного параметра і не можуть бути перенесені з одного двигуна на інший; для їх визначення потрібно щонайменше 5-7 вимірювань на різних наробітках у межах одного міжремонтного циклу.

7. Алгоритм застосування методики

Практична реалізація методики передбачає таку послідовність дій:

1) визначення переліку параметрів, доступних для вимірювання на конкретному двигуні штатними та додатковими засобами контролю;

2) встановлення номінальних $x_{i,\text{ном}}$ і граничнодопустимих $x_{i,\text{гр}}$ значень для кожного параметра;

3) проведення періодичних вимірювань вектора (1) на усталених режимах роботи: для головного двигуна – на фіксованих точках гвинтової характеристики, для дизель-генератора - на фіксованих рівнях електричного навантаження;

4) нормування отриманих значень за виразами (2), (3) та розрахунок критеріїв COV, CII і вібраційного показника;

5) визначення вагових коефіцієнтів w_i на основі статистики відмов або методом попарних порівнянь;

6) обчислення $K_{\text{тс}}$ за виразом (4) та його інтерпретація за шкалою (табл. 4) з урахуванням правила граничного стану за окремим параметром;

7) за наявності ретроспективного масиву вимірювань – побудова моделі тренду (8) і прогнозування залишкового ресурсу за (9) або (10);

8) формування рекомендацій щодо обсягу та термінів технічного обслуговування.

Обговорення

Структуру методичного апарату сформовано як інваріантну щодо функціонального призначення досліджуваних двигунів; можливість її адаптації до суднових дизелів іншого призначення та конструкції потребує окремої апробації. Для головного двигуна Wärtsilä 8R22HF-D, що працює у відносно вузькому діапазоні режимів за гвинтовою характеристикою, і для дизель-генератора, що працює за сталої частоти обертання 1500 об/хв.) зі змінним електричним навантаженням, структура критеріїв (2)-(10) залишається незмінною. Натомість склад вектора (1), значення $x_{i,\text{ном}}$, $x_{i,\text{гр}}$ і вагові коефіцієнти w_i визначаються індивідуально.

Порівняно з інтегральними показниками фізичної природи [8] запропонований показник $K_{\text{тс}}$ поєднує параметри різних груп і дає змогу враховувати зношування, вібраційний стан і стан оливи одночасно. На відміну від модельних методів [9; 12] він не потребує калібрування математичної моделі робочого процесу, а на відміну від методів машинного навчання [11] навчальних вибірок із даними про несправності. Ціною цього є те, що K_{mc} не ідентифікує конкретну несправність, а характеризує загальний запас працездатності, локалізацію дефекту забезпечують критерії COV, CII і спектральний аналіз вібрації, а поглиблене діагностування - методи індиціювання [4; 5; 7].

Отже, новим результатом роботи є не окремі методи, кожен з яких відомий, а їх структурна інтеграція в єдиний методичний апарат із некомпенсаторним правилом граничного стану та незалежними критеріями локалізації дефектів. Відмінність від наявних підходів полягає в тому, що апарат ґрунтується на штатно та додатково вимірюваних параметрах і не потребує ні моделі робочого процесу, ні навчальних вибірок. Межі його надійності визначаються якістю вихідних даних і припущеннями адитивної моделі, які розглянуто нижче.

Компенсаторність адитивної моделі. Адитивна згортка (4) за своєю природою допускає взаємну компенсацію відхилень, помірне погіршення кількох параметрів може дати таке саме значення $K_{\text{тс}}$ як і значне погіршення одного. Правило граничного стану за окремим параметром (розділ 2) усуває найнебезпечніший випадок, проте не усуває компенсації в докритичній області. Тому інтерпретацію $K_{\text{тс}}$ доцільно доповнювати аналізом максимального часткового відхилення max $\hat{x}_i$, а для порівняння розглядати некомпенсаторні форми згортки (мультиплікативну або мінімаксну).

Чутливість до вагових коефіцієнтів. Оскільки w_i мають експертне походження, значення $K_{\text{тс}}$ і віднесення стану до певної градації табл. 4 залежать від їх вибору. Під час апробації методики доцільно виконувати аналіз чутливості, варіювати ваги в межах розкиду експертних оцінок з контролем узгодженості матриці попарних порівнянь [18] і перевіряти стійкість висновку про градацію стану.

Кореляція діагностичних параметрів. Частина параметрів вектора (1) фізично пов'язана між собою, наприклад, p_{max}, температура відпрацьованих газів і питома витрата палива реагують на той самий дефект паливної апаратури. Включення корельованих параметрів у згортку (4) з незалежними вагами фактично збільшує сумарну вагу відповідного дефекту. Для зменшення цього ефекту доцільно аналізувати кореляційну матрицю експлуатаційних вимірювань і за потреби об'єднувати сильно корельовані параметри або визначати ваги методом головних компонент.

Залежність від базових і граничних значень. Нормоване відхилення (2) безпосередньо залежить від вибору $x_{i,\text{ном}}$ та $x_{i,\text{гр}}$, тому похибка їх визначення переноситься в $K_{\text{тс}}$. Це особливо суттєво для двигунів із тривалим строком служби, для яких результати приймально-здавальних випробувань можуть бути недоступні, у такому разі $x_{i,\text{ном}}$ доцільно встановлювати за контрольними вимірюваннями після капітального ремонту з фіксацією режиму та умов вимірювань.

Переносимість між типами двигунів. Між двигунами переноситься структура критеріїв (2)-(10), але не їх числова реалізація, склад вектора (1), значення $x_{i,\text{ном}}$, $x_{i,\text{гр}}$, w_i та коефіцієнти моделі тренду визначаються індивідуально. Відповідно, порівнювати значення $K_{\text{тс}}$ різних двигунів коректно лише за однакового складу вектора параметрів і узгодженої процедури визначення ваг. Це узгоджується з даними стендових випробувань двох однотипних дизелів (табл. 3), базові значення параметрів яких помітно різняться.

Невизначеність прогнозу залишкового ресурсу. Оцінки (9), (10) є точковими і за малої кількості вимірювань (5-7) мають значну невизначеність, зумовлену похибкою оцінювання коефіцієнтів a і b та вибором виду регресійної залежності. Тому прогнозний наробіток до граничного стану доцільно подавати разом із довірчим інтервалом, розрахованим за стандартними похибками коефіцієнтів регресії, і уточнювати після кожного нового вимірювання [19].

Принципово важливо, що числові значення $K_{\text{тс}}$, COV, CII та прогнозного ресурсу за (9), (10) не можуть бути наведені без масиву натурних вимірювань на реальних одиницях обладнання (індикаторних діаграм, вібросигналів, результатів аналізу проб оливи). Наведення таких чисел без експериментального підтвердження суперечило б вимогам достовірності наукового дослідження, тому стаття обмежується структурою методики та умовами її коректного застосування.

Висновки

Обґрунтовано доцільність переходу до обслуговування суднових дизелів за фактичним технічним станом на основі комплексної чисельної діагностики, що поєднує прямі (індиціювання) і непрямі (вібраційні, трибологічні, теплотехнічні) методи контролю. Систематизовано технічні

характеристики головного двигуна Wärtsilä 8R22HF-D та дизель-генератора Volvo Penta TAD121CHC, що визначають перелік доступних діагностичних параметрів.

Розроблено методичний апарат чисельної оцінки технічного стану, що включає вектор діагностичних параметрів із шести груп, процедуру нормування різнорідних параметрів, інтегральний критерій $K_{\text{тс}}$ з попередньою шкалою якісної інтерпретації, що потребує експериментальної верифікації, критерії циклової нерівномірності COV і CII, вібродіагностичний критерій, модель тренду деградації та алгоритм застосування. Структуру апарату сформовано як інваріантну щодо функціонального призначення досліджуваних двигунів, тоді як числові параметри потребують індивідуального визначення за натурними вимірюваннями.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в розробленні структури комплексного методичного апарату оцінювання технічного стану суднових дизельних двигунів різного функціонального призначення, який інтегрує нормовані параметричні, віброакустичні, теплотехнічні, трибологічні та експлуатаційні показники з незалежними критеріями критичного стану та моделлю прогнозування деградації. Окремі методи, що входять до апарату (нормування, адитивна згортка, критерії COV і CII, спектральний аналіз, регресійна екстраполяція, метод попарних порівнянь), є відомими; внесок роботи полягає в їх структурній інтеграції, у межах якої:

запропоновано структуру інтегрального показника технічного стану K_{mc} на основі адитивної згортки нормованих відхилень параметрів різної фізичної природи (індикаторних, віброакустичних, теплотехнічних, трибологічних, енергетичних), сформовану для суднових дизелів різного функціонального призначення;

уточнено процедуру нормування діагностичних параметрів за рахунок єдиного виразу для параметрів, що зростають і спадають під час погіршення стану, та правила, за яким вихід будь-якого параметра за граничнодопустиме значення визначає граничний стан незалежно від значення $K_{\text{тс}}$;

адаптовано відомий підхід [4] до оцінювання стану паливної апаратури та циліндр поршневої групи за критеріями циклової нерівномірності COV і CII як незалежними від $K_{\text{тс}}$ чисельними ознаками;

застосовано відому схему регресійного прогнозування [19] у формі моделі тренду деградації параметрів у функції наробітку з аналітичними виразами для оцінки наробітку до граничного стану та вимогами до мінімальної кількості вимірювань.

Практичне значення одержаних результатів полягає в можливості отримання єдиної, порівнянної в часі кількісної характеристики технічного стану двигуна, придатної для планування обслуговування за фактичним станом, обґрунтування термінів ремонту та прогнозування залишкового ресурсу.

Подальші дослідження доцільно зосередити на експериментальній апробації методики на реальних масивах експлуатаційних даних головного двигуна Wärtsilä 8R22HF-D і дизель-генератора Volvo Penta TAD121CHC, визначенні вагових коефіцієнтів w_i, верифікації порогових значень шкали технічного стану та побудові нейромережевих або нечітко-логічних моделей прогнозування залишкового ресурсу.

Обмеження дослідження

Дослідження обмежене відсутністю поточних експлуатаційних вимірювань на конкретних одиницях обладнання (для головного двигуна наявні лише базові значення за результатами стендових випробувань 1986 р. [17]), попереднім характером порогових значень шкали (табл. 4) та експертним характером вагових коефіцієнтів. Для застосування методики потрібні точні номінальні значення параметрів кожної одиниці обладнання та щонайменше 5-7 вимірювань у часі для побудови статистично значущої моделі тренду.

Номінальні потужність і частота обертання дизель-генератора Volvo Penta TAD121CHC потребують уточнення за паспортною табличкою агрегату.

Фінансування

Це дослідження не отримало конкретної фінансової підтримки.

Конкуруючі інтереси

Автори заявляють, що у них немає конфлікту інтересів.

Використання штучного інтелекту

Мовне редагування, переклад, технічна перевірка тексту та бібліографічних даних.

Список використаних джерел

1. Jardine A. K. S., Lin D., Banjevic D. A review on machinery diagnostics and prognostics implementing condition-based maintenance. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2006. Vol. 20, No. 7. P. 1483-1510. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2005.09.012
2. Karatuğ Ç., Arslanoğlu Y. Development of condition-based maintenance strategy for fault diagnosis for ship engine systems. *Ocean Engineering*. 2022. Vol. 256. Article 111515. DOI: https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.111515
3. ISO 17359:2018. Condition monitoring and diagnostics of machines – General guidelines. Geneva : International Organization for Standardization, 2018. 29 p.
4. Варбанець Р. А., Мінчев Д. С., Кучеренко Ю. М., Залож В. І. Параметрична діагностика суднових дизельних двигунів в режимі реального часу. *Двигуни внутрішнього згоряння*. 2024. № 1. С. 69-75. DOI: https://doi.org/10.20998/0419-8719.2024.1.09
5. Varbanets R., Minchev D., Kucherenko Y., Zalozh V., Kyrylash O., Tarasenko T. Methods of real-time parametric diagnostics for marine diesel engines. *Polish Maritime Research*. 2024. Vol. 31, No. 3. P. 71-84. DOI: https://doi.org/10.2478/pomr-2024-0037
6. Чишкала П., Мешков Д., Божко Е. Визначення поточного технічного стану дизельного двигуна методами безрозбірної діагностики за параметрами паливної апаратури. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування*. 2021. № 2. С. 15-19. DOI: https://doi.org/10.20998/2078-774X.2021.02.03
7. Білоусов Є. В., Марченко А. П., Рибальченко М. Є., Савчук В. П., Тулученко Г. Я. Розробка методів оцінки технічного стану двигунів за результатами індиціювання робочого процесу на режимах відмінних від номінальних. *Двигуни внутрішнього згоряння*. 2022. № 1. С. 51-59. DOI: https://doi.org/10.20998/0419-8719.2022.1.07
8. Іващенко І. І., Приймаков О. Г., Шунайлов А. Г. Розробка інтегральних показників діагностування технічного стану дизельних двигунів. *Двигуни внутрішнього згоряння*. 2003. № 1-2. С. 57-61.
9. Lamaris V. T., Hountalas D. T. A general purpose diagnostic technique for marine diesel engines – Application on the main propulsion and auxiliary diesel units of a marine vessel. *Energy Conversion and Management*. 2010. Vol. 51, No. 4. P. 740–753. DOI: https://doi.org/10.1016/j.enconman.2009.10.031
10. Radić J., Šarić M., Rubić A. Spectral-based fault detection method in marine diesel engine operation. *Sensors*. 2025. Vol. 25, No. 18. Article 5669. DOI: https://doi.org/10.3390/s25185669
11. Xie Z., Mo C., Jia B. Marine diesel engine reliable intelligent fault diagnosis method based on the generalized multi-source information fusion. *iScience*. 2025. Vol. 29, No. 1. Article 114345. DOI: https://doi.org/10.1016/j.isci.2025.114345

12. Tsitsilonis K.-M., Theotokatos G., Patil C., Coraddu A. Health assessment framework of marine engines enabled by digital twins. *International Journal of Engine Research*. 2023. Vol. 24. P. 3264-3281. DOI: https://doi.org/10.1177/14680874221146835
13. Сараєва І. Ю., Хрулєв О. Е., Воробйов О. М. Експертна оцінка технічного стану циліндро-поршневої групи двигуна автомобіля. *Вісник машинобудування та транспорту*. 2021. Т. 13, № 1. С. 133-139. DOI: https://doi.org/10.31649/2413-4503-2021-13-1-133-139
14. Сараєва І., Хрулєв О., Воробйов О. Розробка математичних критеріїв оцінки якості діагностування циліндро-поршневої групи двигуна автомобіля. *Автомобіль і електроніка. Сучасні технології*. 2022. № 22. С. 92-103. DOI: https://doi.org/10.30977/VEIT.2022.22.0.10
15. Wärtsilä Vasa 22 Engine Operation Manual: Main characteristics, operational specification and engine arrangement. Vaasa : Wärtsilä Corporation, [б. р.].
16. Workshop Manual. Marine diesel engines TMD100C, TMD121C, TAMD121C. Industrial diesel engines TD100G, TID100K, TD121G, TD120HPP, TID120HPP, TID121FG. Publ. nr 5333. Göteborg : AB Volvo Penta, 1984.
17. Сертифікат Регістра СРСР № 86.5184.260 від 04.12.1986 на дизель 8R22HF-D заводський № 3890 ; Описання стендових випробувань, звіт про заміри та регулювальні значення дизелів 8R22 № 3889 і № 3890. Ваasa : Wärtsilä Diesel, 1986. [Архівні документи].
18. Saaty T. L. Decision making with the analytic hierarchy process. *International Journal of Services Sciences*. 2008. Vol. 1, No. 1. P. 83-98. DOI: https://doi.org/10.1504/IJSSCI.2008.017590
19. Lei Y., Li N., Guo L., Li N., Yan T., Lin J. Machinery health prognostics: A systematic review from data acquisition to RUL prediction. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2018. Vol. 104. P. 799-834. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2017.11.016

References

1. Jardine, A. K. S., Lin, D., & Banjevic, D. (2006). A review on machinery diagnostics and prognostics implementing condition-based maintenance. *Mechanical Systems and Signal Processing, 20*(7), 1483-1510. https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2005.09.012
2. Karatuğ, Ç., & Arslanoğlu, Y. (2022). Development of condition-based maintenance strategy for fault diagnosis for ship engine systems. *Ocean Engineering, 256*, Article 111515. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.111515
3. International Organization for Standardization. (2018). *Condition monitoring and diagnostics of machines - General guidelines* (ISO Standard No. 17359:2018).
4. Varbanets, R. A., Minchev, D. S., Kucherenko, Yu. M., & Zalozh, V. I. (2024). Parametrychna diahnostyka sudnovykh dyzelnykh dvyhuniv v rezhymi realnoho chasu [Real-time parametric diagnostics of marine diesel engines]. *Internal Combustion Engines*, (1), 69–75. https://doi.org/10.20998/0419-8719.2024.1.09
5. Varbanets, R., Minchev, D., Kucherenko, Y., Zalozh, V., Kyrylash, O., & Tarasenko, T. (2024). Methods of real-time parametric diagnostics for marine diesel engines. *Polish Maritime Research, 31*(3), 71-84. https://doi.org/10.2478/pomr-2024-0037
6. Chyshkala, P., Meshkov, D., & Bozhko, E. (2021). Vyznachennia potochnoho tekhnichnoho stanu dyzelnoho dvyhuna metodamy bezrozbirnoi diahnostyky za parametramy palyvnoi aparatury [Determination of the current technical condition of a diesel engine by non-disassembly diagnostic methods based on fuel equipment parameters]. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Power and Heat Engineering Processes and Equipment*, (2), 15-19. https://doi.org/10.20998/2078-774X.2021.02.03
7. Bilousov, Ye. V., Marchenko, A. P., Rybalchenko, M. Ye., Savchuk, V. P., & Tuluchenko, H. Ya. (2022). Rozrobka metodiv otsinky tekhnichnoho stanu dvyhuniv za rezultatamy indytsiiuvannia robochoho protsesu na rezhymakh vidminnykh vid nominalnykh

[Development of methods for assessing the technical condition of engines based on the results of working process indication at off-nominal modes]. *Internal Combustion Engines*, (1), 51-59. https://doi.org/10.20998/0419-8719.2022.1.07

8. Ivashchenko, I. I., Pryimakov, O. H., & Shunailov, A. H. (2003). Rozrobka intehralnykh pokaznykiv diahnostuvannia tekhnichnoho stanu dyzelnykh dvyhuniv [Development of integral indicators for diagnosing the technical condition of diesel engines]. *Internal Combustion Engines*, (1-2), 57-61.
9. Lamaris, V. T., & Hountalas, D. T. (2010). A general purpose diagnostic technique for marine diesel engines – Application on the main propulsion and auxiliary diesel units of a marine vessel. *Energy Conversion and Management, 51*(4), 740–753. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2009.10.031
10. Radić, J., Šarić, M., & Rubić, A. (2025). Spectral-based fault detection method in marine diesel engine operation. *Sensors, 25*(18), Article 5669. https://doi.org/10.3390/s25185669
11. Xie, Z., Mo, C., & Jia, B. (2025). Marine diesel engine reliable intelligent fault diagnosis method based on the generalized multi-source information fusion. *iScience, 29*(1), Article 114345. https://doi.org/10.1016/j.isci.2025.114345
12. Tsitsilonis, K.-M., Theotokatos, G., Patil, C., & Coraddu, A. (2023). Health assessment framework of marine engines enabled by digital twins. *International Journal of Engine Research, 24*, 3264-3281. https://doi.org/10.1177/14680874221146835
13. Saraieva, I. Yu., Khruliev, O. E., & Vorobiov, O. M. (2021). Ekspertna otsinka tekhnichnoho stanu tsylindro-porshnevoi hrupy dvyhuna avtomobilia [Expert assessment of the technical condition of the cylinder-piston group of a vehicle engine]. *Visnyk mashynobuduvannia ta transportu, 13*(1), 133-139. https://doi.org/10.31649/2413-4503-2021-13-1-133-139
14. Saraieva, I., Khruliev, O., & Vorobiov, O. (2022). Rozrobka matematychnykh kryteriiv otsinky yakosti diahnostuvannia tsylindro-porshnevoi hrupy dvyhuna avtomobilia [Development of mathematical criteria for assessing the quality of diagnosing the cylinder-piston group of a vehicle engine]. *Avtomobil i elektronika. Suchasni tekhnolohii*, (22), 92-103. https://doi.org/10.30977/VEIT.2022.22.0.10
15. Wärtsilä Corporation. (n.d.). *Wärtsilä Vasa 22 engine operation manual: Main characteristics, operational specification and engine arrangement*.
16. AB Volvo Penta. (1984). *Workshop manual: Marine diesel engines TMD100C, TMD121C, TAMD121C; Industrial diesel engines TD100G, TID100K, TD121G, TD120HPP, TID120HPP, TID121FG* (Publ. No. 5333).
17. USSR Register of Shipping, & Wärtsilä Diesel. (1986). *Certificate No. 86.5184.260 for diesel engine 8R22HF-D, serial No. 3890; bench test description, measurement reports and setting values for diesel engines 8R22 Nos. 3889 and 3890* [Unpublished archival documents].
18. Saaty, T. L. (2008). Decision making with the analytic hierarchy process. *International Journal of Services Sciences, 1*(1), 83-98. https://doi.org/10.1504/IJSSCI.2008.017590
19. Lei, Y., Li, N., Guo, L., Li, N., Yan, T., & Lin, J. (2018). Machinery health prognostics: A systematic review from data acquisition to RUL prediction. *Mechanical Systems and Signal Processing, 104*, 799-834. https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2017.11.016

This is an open access journal and all published articles are licensed under a Creative Commons «Attribution» 4.0.