УДК 629.5.036:62-192.2 DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.2.1.36

В. І. ХОЛДЕНКО
старший викладач кафедри суднових енергетичних установок
та технічної експлуатації
Навчально-науковий інститут морського флоту
Одеського національного морського університету
ORCID: 0000-0003-0071-7055

АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ МЕТОДІВ ДІАГНОСТИКИ СУДНОВИХ НАСОСІВ

Надійність функціонування суднових допоміжних систем безпосередньо залежить від ефективності діагностики насосного обладнання, яке забезпечує циркуляцію рідин, охолодження, змащення, перекачування палива та інших технологічних процесів. Актуальність дослідження зумовлена впровадженням концепцій автономного судноплавства та потребою в предиктивному обслуговуванні. Метою статті є системний аналіз існуючих методів діагностики суднових насосів, визначення їх переваг та обмежень в умовах морської експлуатації, а також формування прикладних рекомендацій щодо підвищення ефективності технічного моніторингу насосного обладнання. Методологія проведення дослідження передбачала критичний огляд літератури із подальшою класифікацією та порівняльним аналізом методів діагностики за критеріями точності, оперативності, адаптивності та інтеграції у суднові системи. Розглянуто як традиційні (вібраційний, тепловий, параметричний контроль тощо), так і сучасні підходи, зокрема методи на основі використання технологій штучного інтелекту. Результати дослідження продемонстрували, що жоден із методів не є універсальним, а кожен з них має обмеження в точності або пристосованості до морських умов. Найбільш перспективним є комбінований підхід із застосуванням багатосенсорного моніторингу та адаптивних алгоритмів аналізу. Запропоновано впровадження безперервного контролю на базі IoT-технологій, розробку регламентів діагностики та формування баз даних діагностичних ознак, що дозволить підвищити рівень превентивного обслуговування. Практична цінність результатів полягає у можливості їх використання при розробці систем технічного обслуговування суден, модернізації флотських нормативів та підготовці суднових механіків. Наукова новизна статті полягає у цільовому фокусі на насосному обладнанні як об'єкті діагностики та у виявленні напрямів для стандартизації, інтеграції та інтелектуалізації систем моніторингу. Запропоновані підходи можуть бути покладені в основу подальших досліджень щодо створення цифрових моделей технічного стану насосів у складі суднових допоміжних установок.

Ключові слова: *сенсорний моніторинг, вібраційна діагностика, суднові системи, машинне навчання, надійність, адаптивні алгоритми.*

V. I. KHOLDENKO
Senior Lector at the Ship Power Plants and Technical Operation Department
Merchant Marine Institute of Odesa National Maritime University
ORCID: 0000-0003-0071-7055

ANALYSIS OF EXISTING METHODS FOR DIAGNOSTIC OF SHIP PUMPS

The reliability of the operation of ship auxiliary systems directly depends on the effectiveness of the diagnostics of pumping equipment, which provides fluid circulation, cooling, lubrication, fuel pumping and other technological processes. The relevance of the study is due to the implementation of autonomous shipping concepts and the need for predictive maintenance. The purpose of the article is a systematic analysis of existing methods for diagnosing ship pumps, determining their advantages and limitations in marine operation, as well as the formation of applied recommendations for increasing the efficiency of technical monitoring of pumping equipment. The research methodology provided for a critical review of the literature, classification and comparative analysis of diagnostic methods according to the criteria of accuracy, efficiency, adaptability and integration into ship systems. Both traditional (vibration, thermal, parametric control) and modern approaches were considered, in particular, artificial intelligence methods. The results of the study showed that none of the methods is universal: each has limitations in accuracy or adaptability to marine conditions. The most promising is a combined approach using multi-sensor monitoring and adaptive analysis algorithms. The implementation of continuous monitoring based on IoT technologies, the development of diagnostic regulations and the formation of databases of diagnostic features are proposed, which will allow for an increase in the level of preventive maintenance. The practical value of the results lies in the possibility of their use in the development of ship maintenance systems, the modernization of fleet standards and the training of ship mechanics. The scientific novelty of the article lies in the targeted focus on pumping equipment as an object of diagnostics and in identifying areas for standardization, integration and intellectualization of monitoring systems. The proposed approaches can be used as the basis for further research on the creation of digital models of the technical condition of pumps as part of ship auxiliary installations.

Key words: *sensor monitoring, vibration diagnostics, ship systems, machine learning, reliability, adaptive algorithms.*

Постановка проблеми

Надійна експлуатація суднових допоміжних систем є критичним чинником забезпечення безпеки судноплавства й ефективності функціонування суден загалом. Однією з ключових складових таких систем є суднові насоси, які виконують функції циркуляції охолоджувальної рідини, перекачування палива, мастила, стічних і баластних вод. З огляду на їх безперервну роботу в складних морських умовах, насоси піддаються інтенсивному зносу, а відтак потребують постійного моніторингу технічного стану та своєчасної діагностики.

Сучасна практика технічного обслуговування демонструє, що відмова насоса нерідко спричиняє каскадні збої в інших системах судна, особливо в енергетичних установках, що, у свою чергу, може призвести до аварійної зупинки судна або небезпечних інцидентів [1, с. 350–351]. Таким чином, розробка та впровадження ефективних методів діагностики суднових насосів є не лише технічною задачею, але і питанням загальної суднової безпеки.

Актуальність проблеми підсилюється розвитком концепцій автономного судноплавства та Інтернету речей (IoT), що зумовлює появу нових вимог до діагностичних систем, а саме, інтеграцію інтелектуальних сенсорів і програмного забезпечення на основі машинного навчання [2]. Однак і ці інноваційні підходи поки що недостатньо апробовані в реальних судноплавних умовах та не стандартизовані для використання на флоті.

Крім того, існуючі методи нерідко виявляють відмови вже на стадії критичного зниження працездатності агрегата, що зменшує ефективність превентивного обслуговування. Саме тому питання точності, своєчасності та адаптивності діагностичних систем залишається відкритим. Наприклад, зміна умов експлуатації суттєво впливає на характер зношування насосів і потребує адаптивних моделей аналізу [3]. У цьому контексті постає необхідність систематизації існуючих методів діагностики суднових насосів, критичної оцінки їх переваг та обмежень, а також визначення перспективних напрямів удосконалення засобів контролю технічного стану насосного обладнання на морських суднах.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

У вітчизняній і зарубіжній науковій літературі накопичено значний масив досліджень, присвячених питанням діагностики та надійності суднових технічних систем. Зокрема, С. Тараненко та С. Голубєва розглянули використання логіко-ймовірнісного підходу «дерева відмов» для аналізу надійності електродвигунів, які є складовими насосних агрегатів, проте не охоплюють увесь спектр характеристик насоса як об’єкта діагностики [4]. Подібний фокус зберігається і в подальших публікаціях даних авторів, де головна увага приділена загальним показникам надійності електричних систем [5], що свідчить про відсутність комплексного підходу до аналізу насосів як окремої групи допоміжного обладнання.

Важливою спробою зміни парадигми аналізу суднових систем є робота Д. Курносенка, який досліджує методи оцінки технічного стану елементів системи мащення та трибосполучень [6]. Варто зазначити, що запропоновані в публікації методи залишаються орієнтованими на вузьке коло двигунних систем і потребують подальшої валідації для насосного обладнання.

У межах системного аналізу функціонування суднових допоміжних установок варто згадати дослідження К. Діонісіу (K. Dionysiou), В. Болбот (V. Bolbot) та Г. Теотокатоса (G. Theotokatos), які розробили функціонально-модульну модель для оцінки надійності мастильної системи круїзного судна [7]. Застосування такої моделі може бути ефективним і для насосних систем, проте наразі бракує емпіричних даних щодо її масштабованості та універсальності.

Актуальним напрямом є інтелектуальні системи на основі математичних моделей і машинного навчання. У цьому аспекті заслуговують на увагу праці О. Шарка (O. Sharko) та А. Яненка (A. Yanenko), які моделюють програмне забезпечення діагностики на базі ланцюгів Маркова [8]. Також слід відзначити дослідження Ю. Янга (Y. Yang) та ін., які узагальнили сучасні підходи до діагностики гідравлічних насосів, виокремивши три ключові напрями: методи аналізу сигналів, моделі з машинним навчанням і гібридні системи [9]. Їхні висновки узгоджуються з дослідженням С. Сюй (X. Xu) та ін., які вказують на необхідність стандартизації методів *fault diagnosis* для морських систем [10].

Щодо прогресу в області використання *data science*, то М. Пайонк (M. Pająk) та ін. доводять високий потенціал машинного навчання у виявленні несправностей дизельних двигунів суден [11]. Проте автори самі підкреслюють обмеження таких моделей з огляду на складність розмітки тренувальних вибірок. Оригінальним напрямом досліджень є роботи Я. Гіртлера (J. Girtler) та Я. Рудницького (J. Rudnicki), які вводять поняття «квантовості» в діагностиці теплових машин, зокрема двигунів внутрішнього згоряння [12].

Отже, проведений аналіз засвідчує, що існує очевидна прогалина в дослідженнях, присвячених безпосередньо діагностиці суднових насосів як окремої технічної одиниці. Дослідження здебільшого або фокусуються на двигунах, або застосовують методи загального призначення без глибокого аналізу їхньої ефективності в умовах морського середовища. Крім того, спостерігається відсутність комплексних досліджень, що поєднували б фізичне моделювання, сенсорний моніторинг і штучний інтелект (далі ШІ).

Формулювання мети дослідження

Метою даного дослідження є системний аналіз існуючих методів діагностики суднових насосів і формування практичних рекомендацій щодо удосконалення підходів до технічного моніторингу насосного обладнання на суднах. Для досягнення поставленої мети в межах статті вирішуються такі основні завдання:

1. Дослідити типові методи діагностики, які застосовуються в практиці технічного обслуговування суднових насосів.
2. Проаналізувати переваги та недоліки методів діагностики судових насосів у контексті умов експлуатації на флоті, враховуючи критерії точності, оперативності, адаптивності та технологічної інтеграції.
3. Запропонувати рекомендації щодо вдосконалення діагностики суднових насосів для підвищення ефективності превентивного технічного обслуговування у складі суднових допоміжних систем.

Викладення основного матеріалу дослідження

Технічне обслуговування суднових насосів спирається на широкий спектр методів контролю їх стану. Зокрема, використовуються різноманітні сенсорні методи моніторингу параметрів, серед яких найпоширенішими є вібраційна діагностика, а також контроль температури, тиску, витрати робочого середовища тощо [9].

Вібраційний аналіз наразі визнаний ключовим інструментом для раннього виявлення механічних дефектів насосів (небаланс, знос підшипників тощо) та є найбільш розповсюдженим видом діагностики насосного агрегату. Це пояснюється тим, що при зародженні несправності внутрішніх частин насоса змінюються динамічні характеристики вузлів, що відображається у вібраційних сигналах. Обробляючи ці сигнали методами спектрального чи часово-частотного аналізу, можна виокремити ознаки дефекту та оцінити його розвиток. У таблиці 1 наведено узагальнену класифікацію типових методів діагностики суднових насосів, виявлених у науковій літературі.

Таблиця 1

Систематизація методів діагностики суднових насосів

Метод	Суть методу
Вібраційна діагностика	Аналіз коливань для виявлення механічних дефектів
Акустична діагностика	Виявлення кавітації та аномальних шумів
Тепловий контроль	Контроль температури вузлів для виявлення перегріву
Моніторинг тиску/витрати	Оцінка ефективності роботи за зміною параметрів подачі
Електрична сигнатура	Аналіз споживаного струму для виявлення змін у навантаженні
Аналіз робочої рідини	Виявлення зносу за домішками в мастилі чи рідині
Використання ШІ	Автоматичне розпізнавання дефектів на основі сенсорних даних

Джерело: узагальнено автором на основі аналізу [2; 3; 4; 9; 13; 14; 15].

Останніми роками з'явилися прототипи багатосенсорних систем діагностики, які об'єднують дані різних датчиків. Зокрема, в статті Дж. Лі [3] продемонстровано експериментальний стенд для масляного насоса, де паралельно збиралися дані тиску, витрати, температури, вібрацій і шуму. Такий комплексний підхід забезпечив формування розширеної бази даних діагностичних ознак для різних режимів і сценаріїв відмов. Таким чином, літературні джерела описують цілу низку методів, які можуть застосовуватися для діагностики насосів, але кожен з них має свої сильні сторони та обмеження, що потребує детальнішого аналізу в контексті експлуатації на флоті.

Для критичної оцінки розглянутих підходів проведено їх порівняння за ключовими критеріями ефективності, важливими в умовах експлуатації суден, а саме: точність виявлення несправностей, оперативність (своєчасність) діагностики, адаптивність і можливість інтеграції в існуючу суднову систему моніторингу. Результати такого порівняльного аналізу наведено у таблиці 2. Відзначимо, що оцінка носить якісний характер (висока/середня/низька) на основі узагальнення даних літератури та практичного досвіду.

Таблиця 2

Порівняння діагностичних методів за основними критеріями

Метод	Точність	Оперативність	Адаптивність	Інтеграція
Вібраційна діагностика	Висока	Середня	Помірна	Помірна
Акустична діагностика	Середня	Висока	Низька	Помірна
Тепловий контроль	Низька	Низька	Помірна	Висока
Контроль тиску/витрати	Середня	Середня	Низька	Висока
Електрична сигнатура	Помірна	Висока	Помірна	Висока
Аналіз робочої рідини	Середня	Низька	Низька	Низька
Модельно-аналітичний	Висока	Висока	Низька	Низька
Методи ШІ	Висока	Висока	Помірна	Помірна

Джерело: узагальнено автором на основі аналізу [2; 3; 4; 9; 13; 14; 15].

Жоден окремий метод не забезпечує одночасно максимум точності, швидкості й універсальності в умовах експлуатації на флоті. Вібраційна діагностика вирізняється високою чутливістю і достатньою оперативністю, проте вимагає стабільних режимів роботи та може давати хибні спрацьовування за наявності сторонніх вібрацій. Методи, що базуються на контролі експлуатаційних параметрів насоса (тиску, витрати), легко інтегруються у штатні системи судна, але вони найчастіше фіксують уже суттєве відхилення характеристик, коли несправність розвинута. Тепловий контроль простий у реалізації, однак служить запізнілим індикатором проблем (наприклад, підвищення температури підшипника відбувається вже при значному його зносі). Аналіз струмової споживаної потужності електропривода перспективний із точки зору реалізації у судновій електроніці, але точність його обмежена складністю виділення потрібних ознак із електричного сигналу (необхідне застосування фільтрів, трансформування сигналу в частотну площину тощо).

Адаптивність діагностичних засобів є особливо важливою для морських умов, оскільки режими роботи насосів на судні можуть змінюватися залежно від навантаження, стану моря, температури забортної води та інших чинників. Багато традиційних алгоритмів аналізу сигналів є недостатньо гнучкими, наприклад, методи прямої обробки тимчасового сигналу можуть давати збої при несталих режимах або сильно зашумлених даних [9].

Методи на основі ШІ частково вирішують цю проблему, дозволяючи перенавчати модель або застосовувати алгоритми, стійкі до змінних умов роботи. Однак і такі методи потребують достатнього обсягу репрезентативних даних для навчання та подальшого використання.

Додатково проаналізовано специфічні переваги й обмеження методів у контексті експлуатації на морі, що узагальнено в таблиці 3. При цьому було акцентовано прикладні аспекти, зокрема, враховано чинники суднової експлуатації (вібрація корпусу судна, рівень шуму, кваліфікація обслуговуючого персоналу, доступність обладнання тощо) та їхній вплив на ефективність кожного з методів.

Таблиця 3

Переваги та обмеження методів діагностики насосів у флотських умовах

Метод	Переваги	Обмеження
Вібраційна діагностика	Раннє виявлення механічних дефектів, дистанційний контроль	Чутливість до фонового шуму та вібрацій корпусу судна
Акустична діагностика	Швидка фіксація кавітації, ударів	Високий рівень шуму в машинному відділенні
Тепловий контроль	Простота реалізації; вже наявні сенсори	Пізнє реагування; залежність від зовнішньої температури
Контроль тиску/витрати	Безперервний штатний моніторинг	Неможливість точно локалізувати дефект
Електрична сигнатура	Інтегрується в систему управління двигуном	Потребує складної інтерпретації електричних сигналів
Аналіз робочої рідини	Виявляє знос за продуктами деградації	Потребує зупинки насоса, лабораторного аналізу
Модельно-аналітичний	Прогнозування стану; індивідуальне моделювання	Складність реалізації і високі вимоги до обчислювальних ресурсів
Методи ШІ	Автоматичне розпізнавання дефектів; працюють у реальному часі	Необхідність великих масивів даних і фахового супроводу

Джерело: авторська розробка.

Умови експлуатації на морі суттєво впливають на ефективність діагностичних методів. Зокрема, завадостійкість виходить на перший план, оскільки висока віброактивність та акустичний шум на діючому судні можуть маскувати прояви несправностей. Крім того, оперативність діагностики обмежується необхідністю зупинки насоса для проведення деяких видів контролю (наприклад, відбір мастила на аналіз або ручна віброметрія портативними приладами під час стоянки). Отже, методи, що потребують мінімального втручання в роботу обладнання і можуть працювати онлайн, мають перевагу з точки зору флотських умов. Водночас, такі методи повинні бути достатньо надійними та простими в інтеграції, аби екіпаж міг їм довіряти.

Враховуючи виявлені сильні та слабкі сторони означених методів, сформульовано рекомендації для підвищення ефективності діагностики суднових насосів. Вони спрямовані на комбінування методик із метою покриття сліпих зон кожної з них, підвищення своєчасності виявлення відмов та адаптації систем діагностики до умов експлуатації. Узагальнений перелік пропозицій викладено в таблиці 4.

Таблиця 4

Рекомендації щодо вдосконалення діагностики суднових насосів

Напрям	Опис
Комплексний моніторинг на основі кількох методів	Поєднання вібрації, тиску та температури для підвищення достовірності діагностики
Впровадження безперервного моніторингу (IoT)	Смарт-сенсори для збору та передачі даних у реальному часі
Розробка адаптивних алгоритмів діагностики (адаптивні алгоритми ШІ)	Самоналаштування під змінні режими роботи насоса
Інтеграція діагностики в систему техобслуговування	Регламенти, навчання екіпажу, створення бази діагностичних ознак

Джерело: авторська розробка.

Запропоновані заходи мають на меті створити більш надійну та проактивну систему контролю стану суднових насосів. Реалізація наведених рекомендацій сприятиме підвищенню надійності суднових допоміжних систем, мінімізації імовірності раптових відмов насосів і, як наслідок, зміцненню загальної безпеки й ефективності експлуатації флоту.

Висновки

Забезпечення надійної і безперервної роботи суднових насосів є критично важливою умовою стабільного функціонування допоміжних систем судна. Враховуючи високий ступінь зношування насосного обладнання в умовах експлуатації на флоті, актуальність дослідження методів їх діагностики не викликає сумнівів. Існуюча наукова та технічна база демонструє значну увагу до станового моніторингу головних енергетичних установок, натомість діагностика суднових насосів досі лишалася фрагментарною та недостатньо структурованою.

Надійність суднових насосів є ключовою умовою ефективної роботи допоміжних систем судна, що обумовлює актуальність пошуку оптимальних методів їх діагностики. Проведене дослідження дозволило систематизувати наявні підходи від вібраційної і теплової діагностики до методів на основі ШІ та цифрового моделювання. Встановлено, що кожен із методів має обмеження, а найефективнішим вбачається їх комбіноване застосування.

Отримані результати показали, що інтеграція сенсорного моніторингу, адаптивних алгоритмів і безперервного збору даних сприяє переходу до предиктивного обслуговування насосів. Запропоновані підходи та сформовані рекомендації можуть бути використані для вдосконалення регламентів техобслуговування, розробки суднових систем моніторингу та підготовки технічного персоналу.

Наукова новизна дослідження полягає у фокусі на суднових насосах як окремому об’єкті діагностики з урахуванням специфіки морських умов. Подальші дослідження доцільно спрямувати на створення репрезентативних датасетів і стандартизацію комбінованих діагностичних рішень для суден різних класів.

Список використаної літератури

1. Мельник О., Сорока В. Вібродіагностика головної енергетичної установки суден: вдосконалення та інтеграція методів. *Вісник Приазовського Державного Технічного Університету. Серія: Технічні науки*. 2023. № 47. С. 349–359. URL: https://doi.org/10.31498/2225-6733.47.2023.300121 (дата звернення: 20.05.2025).

2. Cabuk A. Experimental IoT study on fault detection and preventive apparatus using Node-RED ship’s main engine cooling water pump motor. *Engineering Failure Analysis*. 2022. Vol. 138. Article 106310. URL: https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2022.106310 (дата звернення: 20.05.2025).

3. Investigation of failure causes of oil pump based on operating conditions / J.-J. Lee et al. *Applied Sciences*. 2023. Vol. 13. No. 7. Article 4308. URL: https://doi.org/10.3390/app13074308 (дата звернення: 20.05.2025).

4. Тараненко С., Голубєва С. Використання «дерева відмов» як логіко-ймовірнісного методу аналізу суднових електродвигунів. *Транспортні системи і технології*. 2022. № 40. С. 149–158. URL: https://doi.org/10.32703/2617-9040-2022-40-13 (дата звернення: 20.05.2025).

5. Тараненко С., Голубєва С. Аналіз показників надійності суднових електродвигунів, що використовуються у сучасному судновому обладнанні. *Водний транспорт: Збірник наукових праць*. 2021. № 2(33). С. 5–12. URL: https://vt.duit.in.ua/index.php/home/article/view/165/129 (дата звернення: 20.05.2025).

6. Курносенко Д. Методи дослідження параметрів працездатності елементів системи мащення та трибосполучень суднових двигунів внутрішнього згоряння. *II Міжнародна науково-практична морська конференція кафедри СЕУ і ТЕ Одеського національного морського університету (MPP&O-2020 (Marine Power Plants and Operation), квітень 2020): матеріали*. Одеса: Одеський національний морський університет, 2020. С. 151–155. URL: https://doi.org/10.13140/RG.2.2.19286.40006 (дата звернення: 20.05.2025).

7. Dionysiou K., Bolbo, V., Theotokatos G. A functional model-based approach for ship systems safety and reliability analysis: Application to a cruise ship lubricating oil system. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment*. 2022. Vol. 236. No. 1. P. 228–244. URL: https://doi.org/10.1177/14750902211004204 (дата звернення: 20.05.2025).

8. Sharko O., Yanenko A. Modeling of intelligent software for the diagnosis and monitoring of ship power plant components using Markov chains. *Science-intensive technologies*. 2023. Vol. 3. No. 59. P. 251–261. URL: https://doi.org/10.18372/2310-5461.59.17946 (дата звернення: 20.05.2025).

9. Current status and applications for hydraulic pump fault diagnosis: A review / Y. Yang et al. *Sensors*. 2022. Vol. 22. No. 24. Article 9714. URL: https://doi.org/10.3390/s22249714 (дата звернення: 20.05.2025).

10. Review of condition monitoring and fault diagnosis for marine power systems / X. Xu et al. *Transportation Safety and Environment*. 2021. Vol. 3. No. 2. P. 85–102. URL: https://doi.org/10.1093/tse/tdab005 (дата звернення: 20.05.2025).

11. Ship diesel engine fault diagnosis using data science and machine learning / M. Pająk et al. *Electronics*. 2023. Vol. 12. No. 18. Article 3860. URL: https://doi.org/10.3390/electronics12183860 (дата звернення: 20.05.2025).

12. Girtler J., Rudnicki J. Quantumness in diagnostics of marine internal combustion engines and other ship power plant machines. *Polish Maritime Research*. 2023. No. 4. P. 110–119. URL: https://doi.org/10.2478/pomr-2023-0064 (дата звернення: 20.05.2025).

13. Adamkiewicz A., Nikończuk P. An attempt at applying machine learning in diagnosing marine ship engine turbochargers. *Eksploatacja i Niezawodność*. 2022. Vol. 24. No. 4. P. 795–804. URL: http://doi.org/10.17531/ein.2022.4.19 (дата звернення: 20.05.2025).

14. Кононенко А., Слабко В. Реалізація неперервної освіти в процесі формування професійної компетентності майбутніх суднових механіків. *Науковий часопис. Серія 5. Педагогічні науки: реалії та перспективи*. 2024. № 101. С. 20–25. URL: https://doi.org/10.31392/UDU-nc.series5.2024.101.04 (дата звернення: 20.05.2025).

15. Чимшир В. Сучасні підходи до високоефективного використання засобів транспорту: колективна монографія. Ізмаїл : ДІ НУ «ОМА», 2020. 472 с. URL: https://dinuoma.com.ua/wp-content/uploads/2021/04/monografia2020.pdf (дата звернення: 20.05.2025).

References

1. Melnyk, O., & Soroka, V. (2023). Vibrodiahnostyka holovnoi enerhetychnoi ustanovky suden: vdoskonalennia ta intehratsiia metodiv. [Vibration diagnostics of ship main power plants: improvement and integration of methods]. *Visnyk Pryazovskoho Derzhavnoho Tekhnichnoho Universytetu. Seriia: Tekhnichni nauky – Bulletin of the Azov State Technical University. Series: Technical Sciences*, no. 47, pp. 349–359. Retrieved from https://doi.org/10.31498/2225-6733.47.2023.300121 [in Ukrainian].

2. Cabuk, A. (2022). Experimental IoT study on fault detection and preventive apparatus using Node-RED ship's main engine cooling water pump motor. *Engineering Failure Analysis*, vol. 138, article 106310. Retrieved from https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2022.106310

3. Lee, J.-J., Kim, Y., Lee, T., Kim, M.-S., Kim, J.-H., Tak, H.-J., Park, J.-W., & Oh, D. (2023). Investigation of failure causes of oil pump based on operating conditions. *Applied Sciences*, vol. 13, no. 7, article 4308. Retrieved from https://doi.org/10.3390/app13074308

4. Taranenko, S., & Holubeva, S. (2022). Vykorystannia «dereva vidmov» yak lohiko-ymovirnisnoho metodu analizu sudnovykh elektrodyhunikiv. [Use of «fault tree» as a logical-probabilistic method for analyzing ship electric motors]. *Transportni systemy i tekhnolohii – Transport Systems and Technologies*, no. 40, pp. 149–158. Retrieved from https://doi.org/10.32703/2617-9040-2022-40-13 [in Ukrainian].

5. Taranenko, S., & Holubeva, S. (2021). Analiz pokaznykiv nadiinosti sudnovykh elektrodyhunikiv, shcho vykorystovuiutsia u suchasnomu sudnovomu obladnanni. [Analysis of reliability indicators of ship electric motors used in modern ship equipment]. *Vodnyi transport: Brink naukovykh prats – Water Transport: Collection of Scientific Papers*, no. 2 (33), pp. 5–12. Retrieved from https://vt.duit.in.ua/index.php/home/article/view/165/129 [in Ukrainian].

6. Kurnosenko, D. (2020). Metody doslidzhennia parametriv pratsiezdatnosti elementiv systemy mashchennia ta trybospoluchen sudnovykh dvhunikiv vnutrishnoho zhorannia. [Methods for studying the performance parameters of marine diesel engine lubrication systems and tribocouplings]. *Materialy II Mizhnarodnoyi naukovo-praktychnoyi morskoyi konferentsiyi kafedry SEU i TE ONMU, kviten 2020. Odesa: ONMU – Materials of the II International Scientific and Practical Maritime Conference of the Department of SEU and TE of ONMU, April 2020. Odesa: ONMU*, pp. 151–155. Retrieved from https://doi.org/10.13140/RG.2.2.19286.40006 [in Ukrainian].

7. Dionysiou, K., Bolbot, V., & Theotokatos, G. (2022). A functional model-based approach for ship systems safety and reliability analysis: Application to a cruise ship lubricating oil system. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment*, vol. 236, no. 1, pp. 228–244. Retrieved from https://doi.org/10.1177/14750902211004204

8. Sharko, O., & Yanenko, A. (2023). Modeling of intelligent software for the diagnosis and monitoring of ship power plant components using Markov chains. *Science-intensive technologies*, vol. 3, no. 59, pp. 251–261. Retrieved from https://doi.org/10.18372/2310-5461.59.17946

9. Yang, Y., Ding, L., Xiao, J., Fang, G., & Li, J. (2022). Current status and applications for hydraulic pump fault diagnosis: A review. *Sensors*, vol. 22, no. 24, article 9714. Retrieved from https://doi.org/10.3390/s22249714

10. Xu, X., Yan, X., Yang, K., Zhao, J., Sheng, C., & Yuan, C. (2021). Review of condition monitoring and fault diagnosis for marine power systems. *Transportation Safety and Environment*, vol. 3, no. 2, pp. 85–102. Retrieved from https://doi.org/10.1093/tse/tdab005

11. Pająk, M., Kluczyk, M., Muślewski, Ł., Lisjak, D., & Kolar, D. (2023). Ship diesel engine fault diagnosis using data science and machine learning. *Electronics*, vol. 12, no. 18, article 3860. Retrieved from https://doi.org/10.3390/electronics12183860

12. Girtler, J., & Rudnicki, J. (2023). Quantumness in diagnostics of marine internal combustion engines and other ship power plant machines. *Polish Maritime Research*, vol. 4, pp. 110–119. Retrieved from https://doi.org/10.2478/pomr-2023-0064

13. Adamkiewicz, A., & Nikończuk, P. (2022). An attempt at applying machine learning in diagnosing marine ship engine turbochargers. *Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability*, vol. 24, no. 4, pp. 795–804. Retrieved from https://doi.org/10.17531/ein.2022.4.19

14. Kononenko, A., & Slabko, V. (2024). Realizatsiia neperervnoi osvity v protsesi formuvannia profesiinoi kompetentnosti maibutnikh sudnovykh mekhanikiv. [Implementation of lifelong learning in the process of developing professional competence of future ship engineers]. *Naukovyi chasopys. Seriia 5. Pedahohichni nauky: realii ta perspektyvy – Scientific Journal. Series 5. Pedagogical Sciences: Realities and Perspectives*, no. 101, pp. 20–25. Retrieved from https://doi.org/10.31392/UDU-nc.series5.2024.101.04 [in Ukrainian].

15. Chymshyr, V. (2020). Suchasni pidkhody do vysokoeffektyvnoho vykorystannia zasobiv transportu: kolektyvna monohrafiia. [Modern approaches to the efficient use of transport means: collective monograph]. Izmayil: DI NU "OMA" – Izmail: DINU "OMA". Retrieved from https://dinuoma.com.ua/wp-content/uploads/2021/04/monografia2020.pdf [in Ukrainian].