

МЕТОДИ КІЛЬКІСНОЇ ОЦІНКИ ЕФЕКТИВНОСТІ СИСТЕМ ТЕХНІЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ ВАНТАЖНИХ СУДЕН

А.І. Головань

к.т.н., доцент кафедри судноводіння і морської безпеки,
Одеський національний морський університет, Одеса, Україна,
ORCID ID: 0000-0001-6589-4381

Анотація

Сучасні засоби водного транспорту, незалежно від їх призначення, характеризуються складністю та надмірністю суднових технічних засобів, що ускладнює системи технічного обслуговування суден. Тому стає суттєвим використання надійних методів оцінки ефективності систем технічного обслуговування. У статті розглянуто перспективні методи кількісної оцінки ефективності систем технічного обслуговування вантажних суден з метою розроблення ефективних алгоритмів та програм для оцінки і підвищення ефективності систем технічного обслуговування вантажних суден. Проведений аналіз вказує на недостатність універсальності наявних методів кількісної оцінки ефективності систем технічного обслуговування вантажних суден. **Метою** статті є синтез огляду методів кількісної оцінки ефективності систем технічного обслуговування вантажних суден та виклад основних підходів, що становлять основу дослідження систем технічного обслуговування для цих суден і суднових технічних засобів. **Результати.** Проаналізовано сучасні методи оцінки ефективності технічного обслуговування вантажних суден, розглянуто переваги і недоліки наявних методів, врахування яких дозволить розробляти ефективні алгоритми та програми для оцінки і підвищення ефективності систем технічного обслуговування вантажних суден, зокрема використовуючи інтелектуальні консультативні системи. **Висновки.** Для успішної кількісної оцінки ефективності систем технічного обслуговування вантажних суден потрібно врахувати такі аспекти: доступність та якість даних, вибір відповідного методу оцінки, розуміння системи технічного обслуговування, використання відповідних інструментів та технологій, аналіз та інтерпретація результатів. Успішна кількісна оцінка ефективності систем технічного обслуговування вантажних суден може сприяти досягненню сталого розвитку сфери водного транспорту та зміцненню позицій українського судноплавства на світовому ринку перевезень такими способами, як: підвищення ефективності, зменшення впливу на навколишнє середовище, покращення репутації, зниження витрат, забезпечення безпеки. Надійні системи технічного обслуговування можуть забезпечити безпеку суден та екіпажу, що є важливим фактором для сталого розвитку сфери водного транспорту.

Ключові слова: кількісна оцінка, ефективність, технічне обслуговування, вантажні судна, водний транспорт, безпека судноплавства, інтелектуально-консультативні системи.

METHODS FOR QUANTIFYING THE EFFICIENCY
OF CARGO SHIP MAINTENANCE SYSTEMS

A.I. Golovan

Ph.D. (Engineering), Associate Professor at the Department of Navigation
and Maritime Safety,
Odesa National Maritime University, Odesa, Ukraine,
ORCID ID: 0000-0001-6589-4381

Summary

Modern means of water transport, regardless of their purpose, are characterized by the complexity and redundancy of shipboard machinery, which in turn complicates ship maintenance systems. Therefore, it becomes essential to use reliable methods for assessing the effectiveness of maintenance systems. The article considers promising methods for quantifying the effectiveness of cargo ship maintenance systems to develop effective algorithms and programs for assessing and improving the effectiveness of cargo ship maintenance systems. The analysis shows a lack of universality of existing methods for quantifying the efficiency of cargo ship maintenance systems. **The purpose** of the article is to synthesize a review of existing methods for quantifying the efficiency of cargo ship maintenance systems and to present the main approaches that form the basis for the study of maintenance systems for these ships and ship equipment. **Results.** Modern methods for assessing the efficiency of cargo ship maintenance are analyzed, the advantages and disadvantages of existing methods are considered, the consideration of which will allow the development of effective algorithms and programs for assessing and improving the efficiency of cargo ship maintenance systems, using intelligent advisory systems. **Conclusions.** For a successful quantitative assessment of the efficiency of cargo ship maintenance systems, the following aspects should be considered: data availability and quality, selection of an appropriate assessment method, understanding of the maintenance system, use of appropriate tools and technologies, analysis and interpretation of the results. A successful quantitative assessment of the efficiency of cargo ship maintenance systems can contribute to the sustainable development of the water transport sector and strengthen the position of Ukrainian shipping in the global transportation market in the following ways: increased efficiency, reduced environmental impact, improved reputation, reduced costs, and safety. Reliable maintenance systems can ensure the safety of vessels and crew, which is an important factor for the sustainable development of the water transport sector.

Key words: quantitative assessment, efficiency, maintenance, cargo ships, water transport, navigation safety, intelligent advisory systems.

Вступ. Кількісна оцінка ефективності систем технічного обслуговування вантажних суден передбачає визначення їх умовних показників ефективності $P_i(t)$, що відображають ефективність системи в кожному її стані (i). Для здійснення кількісної оцінки рівнів ефективності такої системи можна використовувати декілька методів різного ступеня складності і вірогідності. Серед них зазначаються аналітична оцінка, статистична оцінка, експертне опитування та апроксимація рівня ефективності технічного обслуговування.

Вибір конкретного методу залежить від особливостей застосування системи технічного обслуговування вантажних суден, можливості одержання вхідних даних і необхідної вірогідності оцінок. Наприклад, аналітична оцінка може бути застосована, якщо вдається сформулювати аналітичні моделі, що описують взаємодію компонентів системи технічного обслуговування та їх вплив на ефективність. Статистична оцінка може бути використана, якщо доступні достатньо об'ємні і достовірні статистичні дані про функціонування системи.

Експертне опитування може бути корисним, коли здобути інформацію важко або неможливо через обмеження збору даних, і можуть залучитися експерти з великим досвідом. Апроксимація рівня ефективності технічного обслуговування використовується у випадках, коли точне оцінювання недоцільне, і можна використовувати спрощені моделі або наближені значення.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Стаття ґрунтується на дослідженнях сучасних методів кількісної оцінки ефективності систем технічного обслуговування вантажних суден, а також аналізі стану питання з оцінки і управління ефективністю систем технічного обслуговування [1–12]. Проаналізовано основні методи кількісної оцінки ефективності систем технічного обслуговування вантажних суден, що застосовуються на сучасному етапі, а також розглянуто підходи до узгодження кількісних показників ефективності та вибору раціональної повноти контролю технічного стану технічних засобів вантажних суден. Проведений аналіз вказує на недостатність універсальності наявних методів кількісної оцінки ефективності систем технічного обслуговування вантажних суден.

Постановка проблеми. У сучасному судноплаванні ефективність систем технічного обслуговування вантажних суден відіграє критичну роль у забезпеченні безперебійної роботи та надійності суден. Однак відсутність чіткого підходу до кількісної оцінки такої ефективності ускладнює процеси прийняття рішень та управління системами обслуговування. Хоча існує декілька методів для оцінки ефективності, вибір оптимального методу, який враховує особливості конкретної системи обслуговування, стає викликом. Тому необхідно дослідити сучасні методи оцінки, аналізувати їх переваги та обмеження, а також розробити узагальнений підхід до кількісної оцінки ефективності систем технічного обслуговування вантажних суден.

Формулювання цілей статті. Метою статті є синтез огляду наявних методів кількісної оцінки ефективності систем технічного обслуговування вантажних суден та виклад основних підходів, що становлять основу дослідження систем технічного обслуговування для цих суден і судових технічних засобів. Суттєва увага приділяється перевагам і недолікам наявних методів, врахування яких дозволить розробляти ефективні алгоритми та програми для оцінки і підвищення ефективності систем технічного обслуговування вантажних суден, зокрема використовуючи інтелектуальні консультативні системи.

Виклад основного матеріалу. *Метод аналітичної оцінки* є важливим підходом для визначення ефективності систем технічного обслуговування вантажних суден. Процес функціонування такої системи, спрямованої на досягнення визначених цілей, характеризується значеннями параметрів у кожному її стані (i). Ці параметри мають свою номенклатуру і кількість, залежні від способу вирішення

задачі, тобто від конкретного стану системи. Для кожного параметра системи технічного обслуговування вантажного судна встановлюють припустимі області. Знаходження параметрів в цих областях свідчить про працездатність системи, а це означає, що система функціонує з необхідною ефективністю.

Цей підхід до оцінки ефективності систем технічного обслуговування вантажних суден є основоположним, оскільки він дозволяє аналітично враховувати вплив більшості експлуатаційних факторів. Застосування методу аналітичної оцінки дає змогу ретельно розглядати взаємозв'язки між параметрами системи і вивчати їх вплив на функціонування системи технічного обслуговування. Відповідність параметрів припустимим областям забезпечує надійність і ефективність системи в процесі технічного обслуговування вантажних суден.

Метод статистичної оцінки ефективності систем технічного обслуговування вантажних суден базується на спостереженнях або експлуатаційних випробуваннях цих систем. Під час спостереження отримують числові значення $\beta(m)$, які характеризують результат визначеної операції системи технічного обслуговування вантажного судна:

$$\beta(m) = \begin{cases} 1, & \text{за умови виконання задачі} \\ 0, & \text{за умови невиконання задачі} \end{cases}, \quad (1)$$

де $m = \overline{1, M}$ – номер періоду експлуатації, який розглянуто.

По результатам спостережень формується ряд значень $\beta(1), \dots, \beta(m)$ за формулою (1). Середнє значення цих величин обчислюється за формулою (2).

$$\bar{\beta} = M^{-1} \cdot \sum_{m=1}^M \beta(m) = \frac{n}{M}. \quad (2)$$

Оцінка ефективності системи технічного обслуговування вантажного судна зводиться до визначення ймовірності виконання задачі P за допомогою статистичної оцінки P^* , яка обчислюється за формулою (2), де n – кількість випадків успішного виконання задачі.

При збільшенні числа спостережень ($n \rightarrow \infty$) оцінка P^* збігається з дійсним значенням ймовірності P . При малій кількості розглянутих періодів формула (2) дає лише деякі придатні оцінки умовної ефективності, для яких повинні визначатися довірчі інтервали [2].

Крім того, за допомогою формул математичної статистики може бути визначено необхідне число періодів (M), яке необхідно розглянути для забезпечення необхідної точності оцінок ефективності системи технічного обслуговування вантажних суден.

Результатом таких спостережень є ряд значень (x_m) вихідного (узагальнюючого) параметра системи технічного обслуговування (x) вантажного судна. За допомогою цих спостережень визначаються статистичні характеристики ефективності системи (формули 3, 4) [2]:

$$m_x^* = M^{-1} \cdot \sum_{m=1}^M x_m \quad (3)$$

$$\sigma_x^* = \sqrt{(M-1)^{-1} \cdot \sum_{m=1}^M x_m^2 - (m_x^*)^2} \quad (4)$$

Ці статистичні характеристики дозволяють оцінити ефективність системи технічного обслуговування вантажного судна та зробити висновки про її продуктивність та надійність. Здійснюючи аналіз результатів спостережень та обчислення статистичних параметрів, можна здійснити оцінку важливих характеристик системи технічного обслуговування, що є значущим у реалізації ефективної стратегії обслуговування вантажних суден.

У випадку, коли відома функція ефективності системи технічного обслуговування вантажного судна $E(x)$, показник ефективності системи технічного обслуговування вантажного судна знаходиться як середнє значення вихідного параметра системи (x_m) за результатами спостережень:

$$P^* = M^{-1} \cdot \sum_{m=1}^M E(x_m), \quad (5)$$

де x_m – значення вихідного параметра системи в спостереженні (m).

Метод експертного опитування є одним із підходів, який використовується для оцінки ефективності системи технічного обслуговування вантажних суден. Цей метод включає в себе декілька кроків, які можуть бути виконані для отримання експертних оцінок.

По-перше, необхідно визначити групу експертів, які мають достатні знання і досвід в галузі технічного обслуговування вантажних суден. Ця група експертів повинна бути представлена особами, які мають фахові знання про функціонування суднових технічних систем і комплексів. При цьому необхідно забезпечити незалежність висновків експертів.

По-друге, експертам слід надати докладну інформацію про систему технічного обслуговування вантажного судна, включаючи його параметри, функціональні вимоги та умови експлуатації. Це допоможе експертам краще розуміти характеристики системи і зробити обґрунтовані оцінки ефективності. Складається таблиця експертного опитування, яку повинні заповнити експерти. Даються пояснення до неї, що вказують, як треба заповнювати таблицю і які при цьому враховувати фактори.

По-третє, експерти повинні визначити критерії оцінки ефективності системи технічного обслуговування вантажного судна. Ці критерії можуть включати різні аспекти функціонування системи, такі як надійність, доступність, швидкість реакції на збої тощо.

По-четверте, експерти мають надати свої оцінки кожного з визначених критеріїв для системи технічного обслуговування вантажного судна. Це може бути зроблено за допомогою шкали оцінювання або числових значень, що відповідають рівню ефективності. Експерти заповнюють таблицю опитування, проставляючи кожному способу (s) рішення задачі ($s = \overline{1}, \overline{S}$) оцінки (G_s) в балах (наприклад, за стобальною шкалою). Один з (S) можливих способів рішення задачі приймається за базовий. Базовому показнику призначається деяке значення ($P_B < 1$) і дається найвища оцінка в балах (P_B).

По-п'яте, зібрані експертні оцінки піддаються аналізу та обробці. Можуть бути використані методи статистичного аналізу для визначення середніх значень оцінок, ступеня узгодженості між експертами та інших характеристик оцінок. Виконується статистична обробка результатів опитування:

1) за даними опитування кожного (g) експерта ($g = (\overline{1, G})$) знаходяться показники ефективності системи технічного обслуговування вантажного судна для кожного (s) способу рішення задачі:

$$P_{sg} = \frac{P_{Bg} R_{sg}}{R_{Bg}}; \quad (6)$$

2) розраховуються середні статистичні значення показників ефективності, розрахованих за формулою (6):

$$\bar{P}_s = G^{-1} \sum_{g=1}^G P_{sg}; \quad (7)$$

3) оцінюється ступінь надійності отриманих результатів (7) варіацією:

$$\gamma_s = \bar{P}_s^{-1} \sqrt{(G-1)^{-1} \cdot \sum_{g=1}^G (P_{sg} - \bar{P}_s)^2}. \quad (8)$$

За формулою (8) розраховується варіація, яка є мірою розкиду експертних оцінок і вказує на ступінь збіжності думок експертів щодо оцінюваної системи технічного обслуговування вантажного судна. Вважається, що варіація, що обчислюється за цією формулою, є задовільною, якщо вона менше 0.3 ($\gamma_s < 0.3$), і доброю, якщо вона менше 0.2 ($\gamma_s < 0.2$) [2].

У разі наявності досвіду експлуатації аналогічних систем технічного обслуговування вантажних суден, то як вагові коефіцієнти (R_{sg} , R_{Bg}) у формулі (6) можна підставляти відомі «ваги» характеристик ефективності систем технічного обслуговування вантажних суден, які вже знаходяться в експлуатації.

За умови, що яка-небудь з варіацій $\gamma_s > 0.3$, то результат оцінки (7) є незадовільним. В такому разі доцільно виявити причини ненадійності оцінок. Для виявлення експертних оцінок, які знижують надійність, необхідно виключити кожного (g) з (G) експертів по черзі і обчислити для експертів, що залишилися, за формулою (8) нові значення варіації (γ_s'). Якщо при виключенні оцінок, наданих експертом з номером (g), значення (γ_s') виявиться суттєво менше значення (γ_s), то це буде значити, що оцінки експерта за номером (g) викликають погане узгодження оцінок. Така процедура може повторюватися кілька разів.

Важливо враховувати, що навіть при майже повній узгодженості експертних оцінок ($\gamma_s \rightarrow 0$), результати опитування не можна вважати абсолютно достовірними. Це пояснюється тим, що навіть якщо більшість експертів збігаються у своїх оцінках, це не завжди означає, що їхнє рішення є правильними. Можливо, всі експерти можуть помилятися або надавати невірні оцінки з однієї і тієї ж причини.

Тому використання експертних оцінок слід розглядати як додатковий джерело інформації і використовувати їх лише в тому разі, коли неможливо отримати рішення більш об'єктивними методами. Наприклад, якщо інші методи оцінки ефективності системи технічного обслуговування вантажних суден не є доступними або не можуть бути застосовані через обмеження вхідних даних чи складність моделювання.

При використанні експертних оцінок слід бути обережним і враховувати можливі ризики асоційовані зі суб'єктивністю експертних думок. Для забезпечення

більш об'єктивних та достовірних результатів рекомендується комбінувати експертні оцінки з іншими методами та джерелами даних. Крім того, варто звертатися до експертів з відповідною експертною кваліфікацією і досвідом у відповідній галузі, щоб знизити вплив можливих помилок та забезпечити більш об'єктивний аналіз та рішення.

Метод апроксимації рівня ефективності системи технічного обслуговування вантажного судна заснований на оцінці множини показників (P_i), що характеризують ефективність системи. Ці показники можуть бути ранжовані таким чином, щоб вони залежали від номера способу рішення цільової задачі. Навіть якщо на практиці відома лише частина з показників ефективності системи технічного обслуговування вантажного судна, можна побудувати аналітичну залежність $P = (P_i)$, яка відображає вплив різних способів рішення задачі (i) на показник ефективності системи.

Залежність $P(i)$ може бути побудована, наприклад, за допомогою методу найменших квадратів [3]. Цей метод дозволяє знайти оптимальну апроксимацію залежності $P(i)$ на основі доступних даних про ефективність системи. Шляхом використання методу найменших квадратів можна отримати аналітичний вираз для $P(i)$, який дозволить здійснити оцінку невідомих показників ефективності системи за допомогою доступних даних. Наприклад, за допомогою аналітичної залежності $P_m = (P_m)$ можна знайти значення P_m , які відповідають способам рішення задачі з номером (i).

Цей метод дозволяє зробити апроксимацію ефективності системи на основі доступних даних і знаходити невідомі показники ефективності рішення задачі. Однак слід зазначити, що точність апроксимації залежить від кількості доступних даних та точності оцінювання. Тому при застосуванні цього методу необхідно уважно аналізувати його результати та враховувати можливу похибку, пов'язану з обмеженим обсягом даних.

Окрім основних принципів дослідження ефективності систем технічного обслуговування вантажних суден і судових технічних систем і комплексів, необхідно враховувати складний характер зміни інтенсивностей відмов і пошкоджень їхніх комплектуючих за напрацюванням.

Врахування динаміки інтенсивності відмов та пошкоджень їхніх комплектуючих є суттєвою складовою при дослідженні ефективності систем технічного обслуговування вантажних суден та судових технічних систем і комплексів. Зміна інтенсивності може відбуватися на різних етапах експлуатації, що потребує докладного аналізу для забезпечення надійного і оптимального технічного обслуговування.

Важливо розглядати істотні фактори, які впливають на зміну інтенсивності відмов і пошкоджень комплектуючих залежно від їхнього напрацювання. Такий підхід дозволить здійснювати більш точну і адаптивну оцінку ефективності систем технічного обслуговування, збільшуючи їхню надійність та ефективність в довгостроковій перспективі.

Для аналізу складності зміни інтенсивності відмов і пошкоджень комплектуючих можуть використовуватися різні методи та математичні моделі, які дозволяють прогнозувати тенденції змін у майбутньому. Важливо відзначити, що такі дослідження вимагають надійних технічних даних та аналізу статистичних даних

з довгострокового періоду, що дозволить зробити обґрунтовані висновки і рекомендації щодо оптимізації технічного обслуговування.

Отже, ураховуючи складний характер зміни інтенсивності відмов і пошкоджень комплектуючих залежно від напрацювання, дослідження ефективності систем технічного обслуговування вантажних суден та суднових технічних систем і комплексів має бути виконано з урахуванням комплексного підходу та математичного моделювання для забезпечення надійності та оптимальності процесів обслуговування.

У сучасному контексті експлуатації вантажних суден виявляється троїста класифікація граничних станів суднових технічних засобів, як це визначено в джерелах [4; 5]:

1. Граничний стан, обумовлений допустимим напрацюванням (ресурсом).
2. Граничний стан, що корелює з невиконанням своїх функцій (відмовою).
3. Граничний стан, що відповідає стану перед відмовою.

Ці категорії граничних станів становлять основу для трьох відповідних методів технічної експлуатації:

1. ТЕР – експлуатація на основі ресурсу – з відновленням або списанням після вироблення ресурсу.
2. ТЕВ – експлуатація до відмови – з відновленням або списанням після відмови;
3. ТЕП – експлуатація до стану перед відмовою – з відновленням при досягненні стану перед відмовою.

Методи технічної експлуатації до моменту відмови і до стану перед відмовою відносяться до категорії методів технічної експлуатації за станом. На сучасних вантажних суднах, починаючи з 2020 року закладки, за цими методами експлуатується близько 90% суднових технічних засобів [6]. Це зумовлено суттєвим збільшенням частки радіоелектронного і побутового обладнання в загальній номенклатурі технічних засобів цих вантажних суден, яке добре пристосовано до експлуатації за станом. При більш детальному аналізі методів експлуатації технічних засобів цих вантажних суден їхні системи технічного обслуговування треба віднести до комбінованих (комплексних). В рамках такої системи технічного обслуговування метод технічної експлуатації змінюється залежно від специфічних умов експлуатації конкретного екземпляра вантажного судна.

Широке впровадження методів експлуатації за станом дозволило провідним судноплавним компаніям світу уникнути зростання частки витрат на технічне обслуговування в загальних витратах на експлуатацію вантажних суден і знизити її до приблизно 15% у 2020 році у порівнянні з 2000 роком [6].

Висновки. Враховуючи викладене, можна зробити такі висновки:

- 1) кількісна оцінка ефективності систем технічного обслуговування вантажних суден вимагає визначення умовних показників ефективності, які відображають ефективність системи в кожному її стані;
- 2) вибір конкретного методу оцінки залежить від особливостей застосування системи, можливості отримання вхідних даних і необхідної вірогідності оцінок;
- 3) методи оцінки включають аналітичну оцінку, статистичну оцінку, експертне опитування та апроксимацію рівня ефективності;

4) під час дослідження методів кількісної оцінки ефективності систем технічного обслуговування вантажних суден важливо враховувати необхідну точність, обсяг і доступність даних, а також специфічні особливості системи;

5) методологія, описана в статті, може бути застосована не тільки для систем технічного обслуговування вантажних суден, але й для інших видів суден або технічних систем, де потрібна оцінка ефективності;

6) описані методи можуть бути використані для розробки інтелектуальних консультативних систем, які допоможуть в оцінці та підвищенні ефективності систем технічного обслуговування;

7) з розвитком технологій та збільшенням доступності даних методи, описані в статті, можуть надати більш точні та надійні оцінки ефективності систем технічного обслуговування;

8) описані методи можуть бути інтегровані з іншими методами аналізу даних та прогнозування для створення більш ефективних систем оцінки;

9) методологія, описана в статті, може бути використана в академічних та навчальних цілях для викладання студентам принципів оцінки ефективності систем технічного обслуговування.

ЛІТЕРАТУРА

1. Alhouli, Y. (2011). Development of Ship Maintenance Performance Measurement Framework to Assess the Decision Making Process to Optimise in Ship Maintenance Planning. In *[Thesis]. Manchester, UK: The University of Manchester; 2011*. URL: <https://ethos.bl.uk/OrderDetails.do?uin=uk.bl.ethos.532215>.
2. Mathematical Statistics with Applications in R. (2021). In *Elsevier eBooks*. URL: <https://doi.org/10.1016/c2018-0-02285-9>.
3. Ramachandran, B., & Lau, K. (1991). Functional equations in probability theory. In *Elsevier eBooks*. URL: <https://doi.org/10.1016/c2013-0-11048-3>.
4. Thoft-Christensen, P. (1992). Reliability and optimization of structural systems '91. In *Springer eBooks*. URL: <https://doi.org/10.1007/978-3-642-84753-0>.
5. Grabski, F. (2015). Semi-Markov Processes: Applications in System Reliability and Maintenance. In *Elsevier eBooks*. Elsevier BV. URL: <https://doi.org/10.1016/c2013-0-14260-2>.
6. Karatuğ, A., & Arslanoğlu, Y. (2022). Development of condition-based maintenance strategy for fault diagnosis for ship engine systems. *Ocean Engineering*, 256, 111515. URL: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.111515>.
7. Nikolaidis, E., Ghiocel, D. M., & Singhal, S. (2007). Reliability Assessment of Ships. *Engineering design reliability applications: For the Aerospace, Automotive and Ship Industries*. CRC Press.
8. Vamvoudakis, K. G., & Jagannathan, S. (2016). *Control of complex systems*. URL: <https://doi.org/10.1016/c2015-0-02422-4>.
9. Designing and managing complex systems. (2023). In *Elsevier eBooks*. URL: <https://doi.org/10.1016/c2020-0-03424-9>.
10. Park, J., & Oh, J. (2022). Analysis of collected data and establishment of an abnormal data detection algorithm using principal component analysis and

- K-Nearest neighbors for predictive maintenance of ship propulsion engine. *Processes*, 10(11), 2392. URL: <https://doi.org/10.3390/pr10112392>.
11. Hollnagel, E. (1998). Cognitive Reliability and Error Analysis Method (CREAM): Qualitative Performance Prediction. In Elsevier eBooks (pp. 216–233). Elsevier BV. URL: <https://doi.org/10.1016/b978-008042848-2/50008-7>.
 12. Daya, A., & Lazakis, I. (2023). Developing an advanced reliability analysis framework for marine systems operations and maintenance. *Ocean Engineering*, 272, 113766. URL: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.113766>.

REFERENCES

1. Alhouli, Y. (2011). Development of Ship Maintenance Performance Measurement Framework to Assess the Decision Making Process to Optimise in Ship Maintenance Planning. In *[Thesis]. Manchester, UK: The University of Manchester; 2011*. <https://ethos.bl.uk/OrderDetails.do?uin=uk.bl.ethos.532215>
2. Mathematical Statistics with Applications in R. (2021). In *Elsevier eBooks*. <https://doi.org/10.1016/c2018-0-02285-9>
3. Ramachandran, B., & Lau, K. (1991). Functional equations in probability theory. In *Elsevier eBooks*. <https://doi.org/10.1016/c2013-0-11048-3>
4. Thoft-Christensen, P. (1992). Reliability and optimization of structural systems '91. In *Springer eBooks*. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-84753-0>
5. Grabski, F. (2015). Semi-Markov Processes: Applications in System Reliability and Maintenance. In Elsevier eBooks. Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/c2013-0-14260-2>
6. Karatuğ, A., & Arslanoğlu, Y. (2022). Development of condition-based maintenance strategy for fault diagnosis for ship engine systems. *Ocean Engineering*, 256, 111515. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.111515>
7. Nikolaidis, E., Ghiocel, D. M., & Singhal, S. (2007). Reliability Assessment of Ships. *Engineering design reliability applications: For the Aerospace, Automotive and Ship Industries*. CRC Press.
8. Vamvoudakis, K. G., & Jagannathan, S. (2016). *Control of complex systems*. <https://doi.org/10.1016/c2015-0-02422-4>
9. Designing and managing complex systems. (2023). In *Elsevier eBooks*. <https://doi.org/10.1016/c2020-0-03424-9>
10. Park, J., & Oh, J. (2022). Analysis of collected data and establishment of an abnormal data detection algorithm using principal component analysis and K-Nearest neighbors for predictive maintenance of ship propulsion engine. *Processes*, 10(11), 2392. <https://doi.org/10.3390/pr10112392>
11. Hollnagel, E. (1998). Cognitive Reliability and Error Analysis Method (CREAM): Qualitative Performance Prediction. In Elsevier eBooks (pp. 216–233). Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/b978-008042848-2/50008-7>
12. Daya, A., & Lazakis, I. (2023). Developing an advanced reliability analysis framework for marine systems operations and maintenance. *Ocean Engineering*, 272, 113766. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.113766>