МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ОДЕСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ МОРСЬКИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АВТОМОБІЛЬНО-ДОРОЖНІЙ УНІВЕРСИТЕТ

Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису

Головань Андрій Ігорович

УДК 629.5.078:656.075

ДИСЕРТАЦІЯ

КОНЦЕПЦІЯ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ СИСТЕМ ТЕХНІЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ ВАНТАЖНИХ СУДЕН НА ОСНОВІ ЦИФРОВИХ СТРАТЕГІЙ

Спеціальність 05.22.20 – «Експлуатація та ремонт засобів транспорту»

Галузь знань 27 Транспорт

Подається на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень.

Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело _____ А.І. Головань

Одеса – 2024

АНОТАЦІЯ

Головань А.І. Концепція підвищення ефективності систем технічного обслуговування вантажних суден на основі цифрових стратегій. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.22.20 «Експлуатація та ремонт засобів транспорту» (271 – Морський та внутрішній водний транспорт) – Одеський національний морський університет МОН України, Одеса, Харківський національний автомобільно-дорожній університет МОН України, Харків, 2024.

Дисертація присвячена узагальненню та розвитку існуючих сучасних інформаційних технологій на водному транспорті в умовах інтелектуальних транспортних систем та розробці науково-обґрунтованої методики управління системою технічного обслуговування вантажних суден з використанням цифрових стратегій адаптивізації її параметрів до змінних експлуатаційних умов.

Розроблена концепція підвищення ефективності систем технічного обслуговування вантажних суден в умовах експлуатації на основі цифрових стратегій, в основу якої покладено інформаційну складову на основі відомостей про технічний стан суднових технічних засобів і конструкцій та показники ефективності систем технічного обслуговування на різних етапах експлуатації.

Запропоновано метод формування інформаційної моделі предметної області на основі системи моніторингу, діагностування і прогнозування параметрів системи ТО та технічного стану СТЗіК.

Запропоновано інформаційну систему оцінювання способів підвищення ефективності систем технічного обслуговування вантажних суден в умовах експлуатації з можливостями прогнозування параметрів технічного стану та параметрів системи технічного обслуговування у складі системи КПТОВС.

Запропоновано загальну методологію формування та оцінювання способів підвищення ефективності систем ТО вантажних суден в умовах експлуатації на основі цифрових стратегій у складі системи КПТОВС.

Запропоновано сукупність математичних моделей системи КПТОВС для оцінювання ефективності управління параметрами системи технічного обслуговування в залежності від обраної стратегії і умов експлуатації.

Розроблено метод дослідження ефективності системи ТО вантажних суден в процесі експлуатації.

Створено загальний метод адаптивізації параметрів системи технічного обслуговування для підвищення ефективності систем технічного обслуговування вантажних суден в умовах експлуатації.

Удосконалено метод оцінювання характеристик цифрових стратегій на підвищення ефективності систем технічного обслуговування вантажних суден в умовах експлуатації.

Дістали подальший розвиток теорія управління процесами технічного обслуговування вантажних суден, що забезпечує надійне використання вантажного судна, ефективність використання ресурсів та динамічне коригування термінів ТО вантажних суден та прикладні аспекти прескриптивної теорії технічного обслуговування засобів транспорту, шляхом створення класифікації цифрових стратегій технічного обслуговування для використання їх в змінних умовах експлуатації вантажних суден.

Узагальнено схему механізму підвищення ефективності систем ТО вантажних суден за рахунок системи КПТОВС на основі цифрових стратегій і самі цифрові стратегії.

Формалізовано системний підхід та загальний метод адаптивізації параметрів системи технічного обслуговування шляхом застосування цифрових стратегій для підвищення ефективності систем технічного обслуговування вантажних суден в умовах експлуатації.

Сформовано методики і моделі для оцінювання впливу характеристик цифрових стратегій на підвищення ефективності систем технічного обслуговування вантажних суден в умовах експлуатації.

Запропоновано алгоритм системної взаємодії і синтезу системи прескриптивного технічного обслуговування вантажних суден в умовах експлуатації.

Сформована методика формування циклу підвищення ефективності систем технічного обслуговування вантажних суден в умовах експлуатації.

Розроблена інформаційна система оцінювання способів підвищення ефективності систем ТО вантажних суден в умовах експлуатації з можливостями прогнозування їх технічного стану на основі бортового комплексу ACMS та хмарної системи ShipDiMRO.

Сформована принципова схема, складові, методика формування і алгоритм функціонування системи КПТОВС.

Розроблено підхід, методи функціонування, використання та системної взаємодії систем ACMS і ShipDiMRO в межах віртуальної судноплавної компанії «shipmonitoring.org» – підприємства, яке займається експлуатацією водного транспорту.

Ключові слова: вантажне судно, ефективність, система, технічне обслуговування, прескриптивне обслуговування, адаптивізація, стратегія, цифрова стратегія, управління, інтелектуальні системи, експлуатація, надійність, технічний стан, прогнозування.

Список публікацій здобувача

*Наукові праці, у фахових виданнях **категорії «Б» 271** – Морський та внутрішній водний транспорт, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації*:

1. Головань А.І., Грицук І.В. (2023). Основні принципи дослідження ефективності технічного обслуговування судна. *Розвиток Транспорту*, 1(16), 47–60. https://doi.org/10.33082/td.2023.1-16.04 (фахове видання **категорія «Б» 271** – Морський та внутрішній водний транспорт)

2. Головань А.І. (2024). Дослідження впливу комплексної прескриптивної системи та цифрових стратегій на ефективність системи технічного обслуговування вантажних суден. *Водний транспорт*, 1(39), 112-123. https://doi.org/10.33298/2226-8553.2024.1.39.11 (фахове видання **категорія «Б» 271** – Морський та внутрішній водний транспорт)

3. Головань А.І. (2024). Особливості оцінювання ефективності систем технічного обслуговування вантажних суден. *Системи управління, навігації та*

зв'язку. Збірник наукових праць, 1(75), 5-10. https://doi.org/10.26906/SUNZ.2024.1.005 (фахове видання **категорія «Б» 271** – Морський та внутрішній водний транспорт)

4. Головань, А. (2023). Формування оптимальних параметрів системи технічного обслуговування вантажних суден за рахунок цифрових стратегій. *Вісник Приазовського Державного Технічного Університету. Серія: Технічні науки*, (47), 297–305. https://doi.org/10.31498/2225-6733.47.2023.300116 (фахове видання **категорія «Б» 271** – Морський та внутрішній водний транспорт)

5. Головань А.І. (2023). Перспективні напрямки та інноваційні підходи управління системою технічного обслуговування вантажних суден. *Розвиток транспорту*, 2(17), 42-55. https://doi.org/10.33082/td.2023.2-17.04 (фахове видання **категорія «Б» 271** – Морський та внутрішній водний транспорт)

6. Головань А.І. (2023). Методи кількісної оцінки ефективності систем технічного обслуговування вантажних суден. *Розвиток транспорту*, 3(18), 113-122. https://doi.org/10.33082/td.2023.3-18.09 (фахове видання **категорія «Б» 271** – Морський та внутрішній водний транспорт)

7. Головань А.І. (2023). Концептуальна модель планування та оптимізації графіків технічного обслуговування вантажних суден. *Водний транспорт*, 1(37), 107-115. https://doi.org/10.33298/2226-8553.2023.1.37.12 (фахове видання **категорія «Б» 271** – Морський та внутрішній водний транспорт)

8. Головань, А. (2023). Особливості моделювання процесів зміни технічного стану з складовою випадковості. *Вісник Одеського національного морського університету*, (70), 71-83. https://doi.org/10.47049/2226-1893-2023-3-71-83 (фахове видання **категорія «Б» 271** – Морський та внутрішній водний транспорт)

9. Головань, А. (2023). Формування цифрових стратегій для вирішення задач підвищення ефективності систем технічного обслуговування вантажних суден. *Вісник Приазовського Державного Технічного Університету. Серія: Технічні науки*, (46), 149–158. https://doi.org/10.31498/2225-6733.46.2023.288184 (фахове видання **категорія «Б» 271** – Морський та внутрішній водний транспорт)

10. Головань, А. (2023). Оптимізація технічного обслуговування вантажних суден – моделювання нелінійних процесів зміни технічного стану суднових технічних

засобів. *Вісник Одеського національного морського університету*, 4 (71), 140-151. https://doi.org/10.47049/2226-1893-2023-4-140-151 (фахове видання **категорія «Б» 271** – Морський та внутрішній водний транспорт)

11. Головань А.І. (2023). Особливості методики моделювання та інформаційної системи моніторингу показників ефективності системи технічного обслуговування вантажних суден. *Водний транспорт*, 2(38), 27-37. https://doi.org/10.33298/2226-8553.2023.2.38.03 (фахове видання **категорія «Б» 271** – Морський та внутрішній водний транспорт)

12. Головань А.І. (2024). Дослідження процесів адаптивізації системи технічного обслуговування за результатами зміни стану суднових технічних засобів. *Системи управління, навігації та зв'язку. Збірник наукових праць*, 2(76), 18-23. https://doi.org/10.26906/SUNZ.2024.2.018 (фахове видання **категорія «Б» 271** – Морський та внутрішній водний транспорт)

13. Golovan, A., Honcharuk, I., Voloshyn, A., Shumylo, O., Nykyforov, Y., & Shamov, O. (2023). Дослідження шляхів зменшення забруднення повітря від судноплавства. *Розвиток транспорту*, 4(15), 15-23. https://doi.org/10.33082/td.2022.4-15.02 (фахове видання **категорія «Б» 271** – Морський та внутрішній водний транспорт)

Наукові праці, у наукових періодичних виданнях інших держав із напряму, з якого підготовлено дисертацію, зокрема індексовані в ***SCOPUS або Web of Science****, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації*:

14. Golovan, A., Honcharuk, I., Deli, O., Kostenko, O., & Nykyforov, Y. (2021). System of Water Vehicle Power Plant Remote Condition Monitoring. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, 1199(1), 012049. https://doi.org/10.1088/1757-899x/1199/1/012049 (**ISSN: 1757-8981**, **E-ISSN: 1757-899X**, **іноземне фахове видання**)

15. Golovan, A., Gritsuk, I., Popeliuk, V. et al., "Features of Mathematical Modeling in the Problems of Determining the Power of a Turbocharged Engine According to the Characteristics of the Turbocharger," *SAE Int. J. Engines* 13(1):2020, https://doi.org/10.4271/03-13-01-0001 (**ISSN: 1946-3936**, **E-ISSN: 1946-3944**, індексація в **SCOPUS Q1 та WoS**)

16. Golovan, A., Gritsuk, I., and Honcharuk, I., “Reliable Ship Emergency Power Source: A Monte Carlo Simulation Approach to Optimize Remaining Capacity Measurement Frequency for Lead-Acid Battery Maintenance,” *SAE Int. J. Elect. Veh.* 13(2):2024, doi:10.4271/14-13-02-0009 https://doi.org/10.4271/14-13-02-0009 (**ISSN: 2691-3747**, **E-ISSN: 2691-3755**, індексація в **SCOPUS Q3 та WoS**)

17. Golovan, A., Rudenko, S., Gritsuk, I., Shakhov, A. et al., “Improving the Process of Vehicle Units Diagnosis by Applying Harmonic Analysis to the Processing of Discrete Signals,” *SAE Technical Paper* 2018-01-1774, 2018, doi:10.4271/2018-01-1774 (**ISSN: 0148-7191**, **E-ISSN: 2688-3627**, індексація в **SCOPUS Q2**)

18. Vychuzhanin, V., Rudnichenko, N., Gritsuk, I., Golovan, A. et al., “Cognitive Model of the Internal Combustion Engine,” *SAE Technical Paper* 2018-01-1738, 2018, doi:10.4271/2018-01-1738 (**ISSN: 0148-7191**, **E-ISSN: 2688-3627**, індексація в **SCOPUS Q2**)

19. Gritsuk, I.V., Zenkin E.Y., E., Bulgakov, N., Golovan, A. et al., “The Complex Application of Monitoring and Express Diagnosing for Searching Failures on Common Rail System Units,” *SAE Technical Paper* 2018-01-1773, 2018, doi:10.4271/2018-01-1773 (**ISSN: 0148-7191**, **E-ISSN: 2688-3627**, індексація в **SCOPUS Q2**)

20. V Vychuzhanin, N Rudnichenko, Z Sagova, M Smieszek, V Cherniavskyi, A Golovan, M Volodarets (2020). Analysis and structuring diagnostic large volume data of technical condition of complex equipment in transport. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 776 012049 doi:10.1088/1757-899X/776/1/012049 (**ISSN: 1757-8981**, **E-ISSN: 1757-899X,** індексація в **SCOPUS Q2**)

21. Golovan, A., Gritsuk, I., Kurtsev, M., Ischuka, O., & Vrublevskyi, R. (2020). Aspects of remote monitoring of the transport vessel under operating conditions. *In Lecture notes in intelligent transportation and infrastructure*. https://doi.org/10.1007/978-3-030-39688-6_37 (**ISSN: 2523-3440**, **E-ISSN: 2523-3459** індексація в **SCOPUS Q3**)

22. Golovan, A., Gritsuk, I., Honcharuk, I. (2023). Principles of transport means maintenance optimization: equipment cost calculation. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, (5), 077 – 084. https://doi.org/10.33271/nvngu/2023-5/077 (**ISSN: 2071-2227**, **E-ISSN: 2223-2362**, індексація в **SCOPUS Q3**)

Монографії, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

23. Сучасні технології і методи моделювання інформаційних процесів в галузі водного транспорту з оглядом на морську безпеку : монографія / А.І. Головань, Є.В. Калініченко, І.П. Гончарук, та ін. – Одеса : НУ «ОМА», 2023. – 244 с. ISBN 978-617-7857-26-5

24. Стратегії і техніки управління ризиками в морській безпеці : монографія / І.П. Гончарук, А.І. Головань, Є.В. Калініченко та ін. – Одеса: НУ «ОМА», 2023. – 208 с. ISBN 978-617-7857-25-8

Наукові праці, які додатково відображають наукові результати дисертації:

25. Очеретяний, Ю.О., Головань, А. і Федорова, Ю. 2020. Оптимізація експлуатації суднових систем комфортного кондиціонування повітря за рахунок використання програмованих логічних контролерів. *Automation of technological and business processes*. 12, 1 (Бер 2020), 55-67. DOI: https://doi.org/10.15673/atbp.v12i1.1704 (фахове видання **категорія «Б» 122, 123, 151**)

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

26. Головань А.І. (2023) Особливості моделювання та побудови інформаційної системи моніторингу показників ефективності технічного обслуговування вантажних суден, IV Міжнародна науково-практична конференція «ДНІПРОВСЬКІ ЧИТАННЯ-2023», Київ, Україна

27. Головань А.І. (2022) Штучний інтелект як ключовий елемент цифрової трансформації процесу технічного обслуговування водного транспорту, Міжнародна наукова конференція «Інтелектуальні Транспортні Системи: Екологія, Безпека, Якість, Комфорт». – К.: НТУ, 2022, м. Київ

28. Головань А.І. (2019) Застосування спектрального аналізу в процесах діагностики вузлів транспортного засобу, Міжнародна науково-практична конференція «Сучасні енергетичні установки на транспорті, технології та обладнання для їх обслуговування СЕУТТОО-2019», 12 – 13 вересня 2019 року, м. Херсон

29. Golovan, A., Gritsuk, I., Rudenko, S., Saravas, V., Shakhov, A., & Shumylo, O. (2019). Aspects of Forming the Information V2I Model of the Transport Vessel. *In 2019 IEEE International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES)*.

https://doi.org/10.1109/mees.2019.8896595 (**ISBN:** 978-1-7281-2569-5, індексація в **SCOPUS Q2 та WoS**)

30. Грицук І.В., Головань А.І., Гончарук І.П. (2024) Метод оптимізації плану технічного обслуговування для підвищення ефективності експлуатації суднових термоелектричних генераторів, Міжнародна науково-практична конференція «Енергетичні установки та альтернативні джерела енергії» (ESAES – 2024), 11-12 березня 2024 року, Харків, Україна

31. Головань А.І., Варгатюк С.О. (2023) Аналіз впливу умов праці на ефективність несення вахти членами екіпажу морських суден, Міжнародна науково-практична конференція «Сучасні енергетичні установки на транспорті, технології та обладнання для їх обслуговування СЕУТТОО-2023», м. Одеса

32. Honcharuk I., Golovan, A. (2023) Peculiarities of development of modern mooring systems: innovations in control systems, International scientific conference “Features of innovative development in the field of technology: the comparative experience of Ukraine and the European Union”, Wloclawek, the Republic of Poland, September 6–7, 2023 https://doi.org/10.30525/978-9934-26-340-8-15

33. Головань А.І., Гончарук І.П. (2022) Формування інтелектуальної системи технічного обслуговування та ремонту засобів водного транспорту, ІІ Міжнародна науково-практична конференція Проблеми сталого розвитку морської галузі (PSDMI-2022), Херсон, Україна

34. Головань А.І., Борисенко С.М. (2022) Постановка задачі вибору оптимального закону управління ефективністю експлуатації морських суден з гвинтами регульованого кроку, ІІ Міжнародна науково-практична конференція Проблеми сталого розвитку морської галузі (PSDMI-2022), Херсон, Україна

35. Головань А.І., Гончарук І.П. (2022) Удосконалення методу розрахунку параметрів і управління технічним станом обладнання засобів транспорту, Міжнародна науково-практична конференція «Сучасні енергетичні установки на транспорті, технології та обладнання для їх обслуговування СЕУТТОО-2022», м. Одеса

36. Руденко С.В., Головань А.І. (2021) Місце і роль штучного інтелекту в

процесі експлуатації засобів водного транспорту, Перша міжнародна науково-технічна конференція «Прогресивні технології засобів транспорту», м. Харків.

37. Руденко С.В., Головань А.І., Гончарук І.П. (2021) Комплексне застосування безперервного контролю технічного стану та оперативної діагностики суднового роторного обладнання, Перша міжнародна науково-технічна конференція «Прогресивні технології засобів транспорту», м. Харків.

38. Головань А.І., Гончарук І.П. (2021) Методологічні аспекти контролю та прогнозування технічного стану суднoремонтної транспортної техніки, Міжнародна науково-практична конференція «Сучасні енергетичні установки на транспорті, технології та обладнання для їх обслуговування СЕУТТОО-2021», м. Херсон

39. Головань А.І., Гончарук І.П. (2021) Напрямки підвищення ефективності контролю технічного стану суднопіднімальних гідротехнічних споруд, Дванадцята Міжнародна науково-практична конференція «Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті MINTT-2021» м. Херсон

40. Костенко О.А., Головань А.І. (2020) Застосування інтегрованої системи управління для контролю шкідливих викидів транспортного судна, Міжнародна науково-практична конференція «Сучасні енергетичні установки на транспорті, технології та обладнання для їх обслуговування СЕУТТОО-2020», м. Херсон

41. Zaharchuk, V., Gritsuk, I., Golovan, A. et al. (2018) The Choice of a Rational Type of Fuel for Technological Vehicles, *Proceedings of International Power trains, Fuels and Lubricants (IPF&L) Meeting 2018*, Heidelberg, Germany

42. Костенко О.А., Головань А.І. (2020) Розв’язання задачі пошуку оптимальних моделей контролю системи очищення від оксидів азоту вихлопних газів транспортного судна, Одинадцята Міжнародна науково-практична конференція «Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті MINTT-2020» 27 – 29 травня 2020 року м. Херсон

43. Костенко О.А., Головань А.І. (2020) Рішення задачі пошуку оптимальних режимів роботи системи очищення від оксидів азоту вихлопних газів транспортного судна, ІІ Міжнародна науково-практична морська конференція кафедри СЕУ і ТЕ Одеського Національного Морського Університету 24-28 квітня 2020 року.

ABSTRACT

Holovan A.I. The concept for improving the efficiency of cargo ship maintenance systems through digital strategies. – Manuscript.

Dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences in specialty 05.22.20 “Maintenance and Repair of Transport Means” (271 – Maritime and inland water transport) – Odesa National Maritime University, Odesa, Kharkiv National Automobile and Highway University of the Ministry of Education and Science of Ukraine, Kharkiv, 2024.

The dissertation focuses on generalizing and developing modern information technologies in water transport within the context of intelligent transport systems. It also aims to develop a scientifically based methodology for managing the maintenance system of cargo ships using digital strategies to adapt parameters to changing operating conditions.

The concept of improving the efficiency of cargo ship maintenance systems in operation based on digital strategies is developed, which is based on the information component based on information about the technical condition of ship equipment and structures and performance indicators of the maintenance system at different stages of operation.

A method for forming an information model of the subject area based on a system for monitoring, diagnosing, and forecasting the parameters of the maintenance system and the technical condition of the ship’s machinery and equipment is proposed.

An information system for evaluating ways to improve the efficiency of cargo ship maintenance systems in operation with the ability to predict the parameters of the technical condition and parameters of the maintenance system as part of an integrated prescriptive maintenance system is proposed.

A general methodology for the formation and evaluation of ways to improve the efficiency of the cargo ship maintenance system in operating conditions based on digital strategies as part of the "Integrated Prescriptive Ship Maintenance" system is proposed.

A set of mathematical models of the "Complex Prescriptive Ship Maintenance" system is proposed to evaluate the effectiveness of managing the parameters of the maintenance system depending on the chosen strategy and operating conditions.

A method for studying the efficiency of the cargo ship maintenance system in the process of operation has been developed.

A general method of adaptation of the maintenance system parameters to improve the efficiency of the cargo ship maintenance system in operation was created.

The method for evaluating the characteristics of digital strategies to improve the efficiency of the cargo ship maintenance system in operation has been improved.

The theory of management of cargo ship maintenance processes, which ensures reliable use of the cargo ship, resource efficiency and dynamic adjustment of cargo ship maintenance terms, and applied aspects of the prescriptive theory of vehicle maintenance have been further developed by creating a classification of digital maintenance strategies for use in variable conditions of cargo ship operation.

The scheme of the mechanism for improving the efficiency of the cargo ship maintenance system through an integrated system of prescriptive ship maintenance based on digital strategies and the digital strategies themselves are generalized.

A systematic approach and a general method of adaptation of the parameters of the maintenance system by applying digital strategies to improve the efficiency of the cargo ship maintenance system in operation are formalized.

Methods and models for assessing the impact of the characteristics of digital strategies on improving the efficiency of the cargo ship maintenance system in operation are formed.

An algorithm for system interaction and synthesis of the system of prescriptive maintenance of a cargo ship in operation is proposed.

A methodology for forming a cycle of improving the efficiency of the cargo ship maintenance system in operation has been developed.

An information system for evaluating ways to improve the efficiency of the cargo ship maintenance system in operation with the ability to predict their technical condition based on the onboard ACMS complex and the ShipDiMRO cloud system was developed.

The schematic diagram, components, methodology of formation and algorithm of functioning of the complex system of prescriptive maintenance of cargo ships are formed.

The approach, methods of functioning, use and system interaction of ACMS and ShipDiMRO systems within the virtual shipping company "shipmonitoring.org" - an enterprise engaged in the operation of water transport - have been developed.

Keywords: cargo vessel, efficiency, system, maintenance, prescriptive maintenance, adaptation, strategy, digital strategy, management, intelligent systems, operation, reliability, technical condition, forecasting.

List of publications

Scientific papers in professional journals of category "B" 271 - Sea and inland water transport, in which the main scientific results of the dissertation are published:

1. Golovan, A., & Gritsuk, I. (2023). The main principles of assessing the efficiency of ship maintenance. *Transport Development*, 1(16), 47–60. https://doi.org/10.33082/td.2023.1-16.04

2. Golovan, A. (2024). Impact of a Complex Prescriptive System and Digital Strategies on the Efficiency of the Cargo Ship Maintenance System. Water Transport: Collection of scientific works, 1(39), 112-123. https://doi.org/10.33298/2226-8553.2024.1.39.11

3. Golovan, A. (2024). Features of evaluating the efficiency of cargo vessel maintenance systems. *Control, Navigation and Communication Systems. Academic Journal*, *1*(75), 5-10. https://doi.org/10.26906/SUNZ.2024.1.005

4. Golovan, A. (2023). Formation of optimal parameters of the cargo ship maintenance system through digital strategies. *Reporter of the Priazovskyi State Technical University. Section: Technical Sciences*, (47), 297–305. https://doi.org/10.31498/2225-6733.47.2023.300116

5. Golovan, A. (2023). Prospective Directions and Innovative Approaches to Managing the Cargo Vessel Maintenance System. *Transport Development*, 2(17), 42-55. https://doi.org/10.33082/td.2023.2-17.04

6. Golovan, A. (2023). Methods for Quantifying the Efficiency of Cargo Ship Maintenance Systems. *Transport Development*, 3(18), 113-122. https://doi.org/10.33082/td.2023.3-18.09

7. Golovan, A. (2023). Conceptual Model of Planning and Optimization of Cargo

Vessel Maintenance Schedules. Water Transport: Collection of scientific works, 1(37), 107-115. https://doi.org/10.33298/2226-8553.2023.1.37.12

8. Golovan, A. (2023). Peculiarities of modeling processes of technical condition change with a component of randomness. *Herald of the Odessa National Maritime University*, 70, 71-83. https://doi.org/10.47049/2226-1893-2023-3-71-83

9. Golovan, A. (2023). Formation of digital strategies for solving problems of increasing the efficiency of cargo ship maintenance systems. *Reporter of the Priazovskyi State Technical University. Section: Technical Sciences*, 46, 149–158. https://doi.org/10.31498/2225-6733.46.2023.288184

10. Golovan, A. (2023). Optimization of cargo ship maintenance – modeling of nonlinear processes of changes in the technical condition of ship`s machinery. *Herald of the Odessa National Maritime University*, 71, 140-151. https://doi.org/10.47049/2226-1893-2023-4-140-151

11. Golovan, A. (2023). Features of the Modeling Methodology and Information System for Monitoring the Efficiency of the Cargo Ship Maintenance System. Water Transport: Collection of scientific works, 2(38), 27-37. https://doi.org/10.33298/2226-8553.2023.2.38.03

12. Golovan, A. (2024). Study of the processes of adaptation of the maintenance system based on the results of changes in the condition of ship's machinery. *Control, Navigation and Communication Systems. Academic Journal*, 2(76), 18-23. https://doi.org/10.26906/SUNZ.2024.2.018

14. Golovan, A., Honcharuk, I., Voloshyn, A., Shumylo, O., Nykyforov, Y., & Shamov, O. (2023). Research of Ways to Reduce Air Pollution from Shipping. *Transport Development*, 4(15), 15-23. https://doi.org/10.33082/td.2022.4-15.02

Scientific papers published in scientific periodicals of other countries in the field of the dissertation, in particular those indexed in SCOPUS or Web of Science, in which the main scientific results of the dissertation are published:

15. Golovan, A., Honcharuk, I., Deli, O., Kostenko, O., & Nykyforov, Y. (2021). System of Water Vehicle Power Plant Remote Condition Monitoring. IOP Conference Series, 1199(1), 012049. https://doi.org/10.1088/1757-899x/1199/1/012049

16. Golovan, A., Gritsuk, I., Popeliuk, V. et al., "Features of Mathematical Modeling in the Problems of Determining the Power of a Turbocharged Engine According to the Characteristics of the Turbocharger," SAE Int. J. Engines 13(1):2020, https://doi.org/10.4271/03-13-01-0001

17. Golovan, A., Gritsuk, I., and Honcharuk, I., "Reliable Ship Emergency Power Source: A Monte Carlo Simulation Approach to Optimize Remaining Capacity Measurement Frequency for Lead-Acid Battery Maintenance," SAE Int. J. Elect. Veh. 13(2):2024, doi:10.4271/14-13-02-0009 https://doi.org/10.4271/14-13-02-0009

18. Golovan, A., Rudenko, S., Gritsuk, I., Shakhov, A. et al., "Improving the Process of Vehicle Units Diagnosis by Applying Harmonic Analysis to the Processing of Discrete Signals," SAE Technical Paper 2018-01-1774, 2018, doi:10.4271/2018-01-1774

19. Vychuzhanin, V., Rudnichenko, N., Gritsuk, I., Golovan, A. et al., "Cognitive Model of the Internal Combustion Engine," SAE Technical Paper 2018-01-1738, 2018, doi:10.4271/2018-01-1738

20. Gritsuk, I.V., Zenkin E.Y., E., Bulgakov, N., Golovan, A. et al., "The Complex Application of Monitoring and Express Diagnosing for Searching Failures on Common Rail System Units," SAE Technical Paper 2018-01-1773, 2018, doi:10.4271/2018-01-1773

21. V Vychuzhanin, N Rudnichenko, Z Sagova, M Smieszek, V Cherniavskyi, A Golovan, M Volodarets "Analysis and structuring diagnostic large volume data of technical condition of complex equipment in transport" 2020 IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 776 012049 doi:10.1088/1757-899X/776/1/012049

22. Golovan, A., Gritsuk, I., Kurtsev, M., Ischuka, O., & Vrublevskyi, R. (2020). Aspects of remote monitoring of the transport vessel under operating conditions. In Lecture notes in intelligent transportation and infrastructure. https://doi.org/10.1007/978-3-030-39688-6_37

23. Golovan, A., Gritsuk, I., Honcharuk, I. (2023). Principles of transport means maintenance optimization: equipment cost calculation. Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu, (5), 077 – 084. https://doi.org/10.33271/nvngu/2023-5/077

Monographs in which the main scientific results of the dissertation are published:

24. Modern technologies and methods of modeling information processes in the field of water transport with a view to maritime safety: monograph / Golovan, A., Kalinichenko, Y., Honcharuk I., et al. – Odesa: NU «OMA», 2023. – 244 p. ISBN 978-617-7857-26-5

25. Strategies and techniques of risk management in maritime security: monograph / Honcharuk I., Golovan, A., Kalinichenko, Y., et al. – Odesa: NU «OMA», 2023. – 208 p. ISBN 978-617-7857-25-8

Scientific works that additionally reflect the scientific results of the dissertation:

26. Ocheretyany Y., Golovan, A. i Fedorova, Y. 2020. Ships air condition system operation optimization through the use of programmable logic controllers. *Automation of Technological and Business Processes*, *12*(1), 55-67. DOI: https://doi.org/10.15673/atbp.v12i1.1704

Scientific papers confirming the approbation of the dissertation materials:

27. Golovan, A. (2023) Features of modeling and construction of an information system for monitoring the performance indicators of cargo vessel maintenance, IV International Scientific and Practical Conference "DNEPR CHITNEYS-2023", Kyiv, Ukraine

28. Golovan, A. (2022) Artificial intelligence as a key element of digital transformation of the water transport maintenance process, International Scientific Conference "Intelligent Transport Systems: Ecology, Safety, Quality, Comfort." – K.: NTU, 2022, Kyiv

29. Golovan, A. (2019) Application of spectral analysis in the processes of diagnostics of vehicle components, International Scientific and Practical Conference "Modern Power Plants on Transport, Technologies and Equipment for their Maintenance SEUTTOO-2019", September 12-13, 2019, Kherson

30. Golovan, A., Gritsuk, I., Rudenko, S., Saravas, V., Shakhov, A., & Shumylo, O. (2019). Aspects of Forming the Information V2I Model of the Transport Vessel. In 2019 IEEE International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES). https://doi.org/10.1109/mees.2019.8896595

31. Gritsuk I., Golovan, A., Honcharuk I. (2024) Method for optimization of maintenance plan to improve the efficiency of shipboard thermoelectric generators, International Scientific and Practical Conference "Power Plants and Alternative Energy Sources" (ESAES - 2024), March 11-12, 2024, Kharkiv, Ukraine

32. Golovan, A., Vargatiuk, S. (2023) Analysis of the influence of working conditions on the effectiveness of watchkeeping by crew members of ships, International Scientific and Practical Conference "Modern Power Plants on Transport, Technologies and Equipment for their Maintenance SEUTTOO-2023", Odesa

33. Honcharuk I., Golovan, A. (2023) Peculiarities of development of modern mooring systems: innovations in control systems, International scientific conference “Features of innovative development in the field of technology: the comparative experience of Ukraine and the European Union”, Wloclawek, the Republic of Poland, September 6–7, 2023 https://doi.org/10.30525/978-9934-26-340-8-15

34. Golovan, A., Honcharuk I. (2022) Formation of an intelligent system for the maintenance and repair of water transport means, II International Scientific and Practical Conference Problems of Sustainable Development of the Maritime Industry (PSDMI-2022), Kherson, Ukraine

35. Golovan, A., Borysenko, S. (2022) Formulation of the problem of choosing the optimal control law for the efficiency of operation of ships with adjustable pitch propellers, II International Scientific and Practical Conference Problems of Sustainable Development of the Maritime Industry (PSDMI-2022), Kherson, Ukraine

36. Golovan, A., Honcharuk, I. (2022) Improvement of the method of calculation of parameters and management of the technical condition of transport equipment, International Scientific and Practical Conference "Modern Power Plants on Transport, Technologies and Equipment for their Maintenance SEUTTOO-2022", Odesa

37. Rudenko, S., Golovan, A. (2021) The place and role of artificial intelligence in the operation of water transport means, First International Scientific and Technical Conference "Progressive Technologies of Transport Means", Kharkiv.

38. Rudenko, S., Golovan, A., Honcharuk, I. (2021) Integrated application of continuous monitoring of the technical condition and operational diagnostics of ship’s rotary

equipment, First International Scientific and Technical Conference "Progressive Technologies of Transport Means", Kharkiv.

39. Golovan, A., Honcharuk, I. (2021) Methodological aspects of control and forecasting of the technical condition of ship repair transport equipment, International Scientific and Practical Conference "Modern Power Plants on Transport, Technologies and Equipment for their Maintenance SEUTTOO-2021", Kherson

40. Golovan, A., Honcharuk, I. (2021) Directions for improving the efficiency of controlling the technical condition of ship-lifting hydraulic structures, Twelfth International Scientific and Practical Conference "Modern Information and Innovative Technologies in Transport MINTT-2021", Kherson. Kherson

41. Kostenko, O., Golovan, A. (2020) Application of an integrated control system for the control of harmful emissions of a transport vessel, International Scientific and Practical Conference "Modern Power Plants on Transport, Technologies and Equipment for their Maintenance SEUTTOO-2020", Kherson

42. Zaharchuk, V., Gritsuk, I., Golovan, A. et al. (2018) The Choice of a Rational Type of Fuel for Technological Vehicles, *Proceedings of International Power trains, Fuels and Lubricants (IPF&L) Meeting 2018*, Heidelberg, Germany

43. Kostenko, O., Golovan, A. (2020) Solving the problem of finding optimal control models for the system of nitrogen oxides purification of exhaust gases of a transport vessel, Eleventh International Scientific and Practical Conference "Modern Information and Innovative Technologies in Transport MINTT-2020" May 27-29, 2020, Kherson

44. Kostenko, O., Golovan, A. (2020) Solving the problem of finding the optimal operating modes of the system for cleaning exhaust gases from nitrogen oxides of a transport vessel, II International Scientific and Practical Marine Conference of the Department of SPP and TO of the Educational and Research Institute of the Merchant Fleet of Odesa National Maritime University, April 24-28, 2019

ЗМІСТ

Перелік умовних позначень 26

Вступ 27

Розділ 1 Характеристика проблеми підвищення ефективності систем технічного обслуговування вантажних суден 37

1.1 Аналіз стану технічного обслуговування вантажних суден 37

1.2 Актуальність проблеми підвищення ефективності систем технічного обслуговування вантажних суден 40

1.3 Загальні положення і аналіз показників ефективності систем технічного обслуговування вантажних суден 43

1.4 Існуючі методи кількісної оцінки ефективності систем технічного обслуговування вантажних суден 45

1.5 Аналіз залежностей інтенсивності відмов, пошкоджень та станів суднових технічних засобів вантажних суден 46

1.6 Перспективи адаптивізації параметрів систем технічного обслуговування вантажних суден 47

Висновки по розділу 1 52

Розділ 2 Методологія розробки комплексних способів підвищення ефективності систем технічного обслуговування вантажних суден 55

2.1 Наукові основи підвищення ефективності систем технічного обслуговування вантажних суден на основі цифрових стратегій 57

2.1.1 Формування систем технічного обслуговування вантажних суден за рахунок інформаційного моніторингу їх фактичних параметрів і цифрових стратегій технічного обслуговування 58

2.1.2 Ефект управління операцією технічного обслуговування 63

2.1.3 Ефективність використання ресурсів в операціях технічного обслуговування 65

2.1.4 Гарантування підвищення ефективності системи технічного обслуговування вантажних суден на основі цифрових стратегій 66

2.2 Структура формування і вирішення проблеми управління процесом підвищення ефективності систем технічного обслуговування вантажних суден на основі цифрових стратегій 71

2.3 Основні стратегічні напрямки вирішення науково-технічної проблеми підвищення ефективності систем ТО вантажних суден на основі системи КПТОВС 79

2.4 Формування схеми системи КПТОВС для гарантування підвищення ефективності систем технічного обслуговування вантажних суден та принцип її функціонування 83

2.5 Загальні підходи до побудови комплексної математичної моделі дослідження ефективності системи КПТОВС в умовах експлуатації..... 87

Висновки до розділу 2..... 94

Розділ 3 Розробка і формування інформаційної системи оцінювання способів підвищення ефективності систем технічного обслуговування вантажних суден в умовах експлуатації..... 95

3.1 Призначення, структура і склад інформаційної системи оцінювання способів підвищення ефективності систем ТО вантажних суден у складі КПТОВС..... 95

3.1.1 Розробка і формування структури систем моніторингу СТЗ і К у складі КПТОВС на основі автоматизованого бортового комплексу ACMS 98

3.1.2 Розробка і формування структури систем моніторингу показників ефективності системи ТО у складі КПТОВС на основі аналітичного центру ShipDiMRO.... 104

3.1.3 Розробка і формування структури інформаційної взаємодії між елементами ITS системи КПТОВС в процесах моніторингу ВС 110

3.2 Особливості предметної області інформаційної системи оцінювання способів підвищення ефективності систем ТО вантажних суден у складі системи КПТОВС в умовах експлуатації..... 112

3.2.1 Структура моделі та інформаційного забезпечення системи моніторингу системи КПТОВС в умовах інтелектуальних транспортних систем..... 112

3.2.2 Моделі бази даних інформаційної системи моніторингу показників ефективності системи ТО та параметрів СТЗ і К для використання в системи КПТОВС..... 118

3.2.2.1 Опис інформаційної моделі предметної області системи КПТОВС 118

3.2.2.2 Формування та аналіз предметної області системи ТО та СТЗ і К вантажного судна за складовими множинами 122

3.3 Формування алгоритмів моніторингу, діагностування та оцінювання способів підвищення ефективності систем ТО вантажних суден з можливістю прогнозування показників ефективності системи ТО та параметрів технічного стану СТЗ і К130

3.3.1 Формування процесів збору даних про показники ефективності системи ТО та параметри технічного стану СТЗ і К..... 130

3.3.2 Особливості процесу діагностування ефективності системи ТО і визначення статусу несправностей СТЗ і К у складі системи КПТОВС 132

3.3.3 Розробка алгоритмів оцінювання способів підвищення ефективності системи ТО з можливістю прогнозування показників ефективності системи ТО та параметрів технічного стану СТЗ і К в умовах експлуатації..... 135

Висновки до розділу 3..... 137

Розділ 4 Загальна методологія формування та оцінювання способів підвищення ефективності системи технічного обслуговування вантажного судна..... 139

4.1 Логічна організація процесу оцінювання та вибору способу підвищення ефективності системи технічного обслуговування вантажного судна..... 145

4.1.1 Фактори, що визначають ефективність операцій системи КПТОВС..... 145

4.1.2 Загальна схема досліджень ефективності операцій технічного обслуговування 151

4.1.3 Критерії ефективності системи технічного обслуговування..... 153

4.1.4 Критерії оптимальності вибору цифрової стратегії підвищення ефективності системи технічного обслуговування вантажного судна..... 156

4.1.5 Концепція адаптивізації функціонування системи КПТОВС 158

4.2 Системний підхід до підвищення ефективності системи технічного обслуговування вантажного судна в умовах експлуатації..... 161

4.2.1 Формування системи КПТОВС 161

4.2.2 Систематизація цифрових стратегій системи КПТОВС 167

4.2.2.1 Цифрова стратегія прогнозування термінів попереджувальної профілактики 170

4.2.2.2 Цифрова мінімаксна стратегія прогнозування термінів попереджувальної профілактики..... 172

4.2.2.3 Цифрова стратегія адаптивного призначення попереджувальних профілактичних робіт 174

4.2.2.4 Цифрова стратегія профілактики за відомого середнього напрацювання технічних засобів вантажних суден..... 177

4.2.2.5 Цифрова стратегія вибору оптимальних термінів проведення робіт технічного обслуговування за повної інформації (цифровий двійник) 178

4.2.2.6 Цифрова стратегія вибору оптимальних термінів проведення робіт технічного обслуговування за неповної інформації (цифрова модель, цифрова тінь)..... 179

4.3 Методика формування циклу підвищення ефективності системи технічного обслуговування вантажного судна з використанням цифрових стратегій..... 181

4.3.1 Методика прийняття рішень за векторним показником 181

4.3.2 Методика визначення ефективних стратегії..... 185

Висновки по розділу 4 190

Розділ 5 Математичне моделювання процесів системи КПТОВС..... 192

5.1 Основні припущення, обмеження і положення моделювання процесів системи КПТОВС 195

5.2 Моделювання процесів зміни технічного стану з врахуванням складника випадковості..... 203

5.2.1 Марківські моделі для опису процесів технічного обслуговування вантажних суден 204

5.2.2 Модель зміни технічного стану з випадковою складовою 209

5.3 Моделювання процесів нелінійної зміни технічного стану суднових технічних засобів..... 216

5.4 Моделювання процесів технічного обслуговування суднових технічних засобів методом статистичних випробувань 221

5.5 Моделювання процесів оцінювання ефективності переходу на КПТОВС. 225

5.6 Моделювання процесу оцінювання економічної ефективності прийнятих рішень під час управління системою технічного обслуговування вантажних суден ... 235

5.7 Моделювання процесу оцінювання стану системи технічного обслуговування з використанням критеріїв впорядкованої мінімізації ризику 240

5.8 Перевірка адекватності критерію ефективності використання ресурсів та математичних моделей і системи КПТОВС 245

Висновки по розділу 5 245

Розділ 6 Експериментальні дослідження процесів підвищення ефективності систем технічного обслуговування вантажних суден на основі цифрової стратегії технічного обслуговування суднових технічних засобів 248

6.1 Мета і програма експериментальних досліджень..... 248

6.2 Об’єкти і методики експериментальних досліджень 249

6.3 Експериментальні установки 249

6.4 Особливості оцінювання технічного стану суднових технічних засобів в процесах підвищення ефективності системи технічного обслуговування вантажного судна 249

6.4.1 Результати дослідження процесів автоматичного оцінювання технічного стану суднових технічних засобів на основі методів машинного навчання для аналізу великих обсягів інформації з бази даних..... 249

6.4.2 Результати дослідження процесів автоматичного оцінювання технічного стану на основі прескриптивного аналізу режимних параметрів суднових технічних засобів 260

6.5 Підвищення ефективності системи технічного обслуговування вантажного судна у складі цифрової стратегії 270

6.5.1 Результати дослідження процесів адаптивізації параметрів системи технічного обслуговування за результатами одного процесу зміни технічного стану 271

6.5.2 Результати дослідження процесів адаптивізації параметрів системи технічного обслуговування за результатами одночасного аналізу двох процесів зміни технічного стану 275

6.5.3 Результати дослідження процесів динамічного корегування термінів технічного обслуговування вантажних суден 284

Висновки по розділу 6 291

Розділ 7 Дослідження на математичних моделях підвищення ефективності систем технічного обслуговування вантажних суден 294

7.1 Розробка загального методу адаптивізації параметрів системи технічного обслуговування шляхом застосування цифрових стратегій для підвищення ефективності системи технічного обслуговування вантажного судна 294

7.2 Результати використання запропонованих методик при проведенні адаптивізації параметрів системи технічного обслуговування за максимальним коефіцієнтом технічного використання, ефективністю використання ресурсів і за періодичністю технічного обслуговування в процесі формування цифрової стратегії 299

7.2.1 Адаптивне формування параметрів системи технічного обслуговування за максимальним коефіцієнтом технічного використання 299

7.2.2 Адаптивне формування параметрів системи технічного обслуговування за ефективністю використання ресурсів 300

7.2.3 Результати адаптивізації періодичності перевірок і операцій технічного обслуговування суднового аварійного джерела енергії 305

7.3 Моніторинг і прогнозування технічних параметрів стану суднових технічних засобів в умовах експлуатації 312

7.3.1 Практичні рекомендації з моніторингу стану суднових технічних засобів вантажних суден 312

7.3.2 Результати розроблення системи моніторингу стану технічних засобів вантажних суден 314

7.4 Оцінювання параметрів системи технічного обслуговування деяких суднових технічних засобів судна інтегрованого в цифрову стратегію 319

7.5 Результати дослідження впливу цифрової стратегії на зміну параметрів системи технічного обслуговування 327

7.6 Оцінювання ефективності прийнятих рішень у частині адаптивізації параметрів системи КПТОВС 334

7.6.1 Результати оцінювання ефективності прийнятих рішень у частині вдосконалення системи технічного обслуговування вантажного судна 337

7.6.2 Результати підвищення ефективності системи технічного обслуговування шляхом обґрунтованого впровадження об'єктів системи КПТОВС 343

7.6.3 Результати адаптивізації параметрів системи КПТОВС 349

Висновки по розділу 7 355

Висновки 358

Список використаних джерел 364

Додаток А Список опублікованих праць за темою дисертації 415

Додаток Б Термінологія, яка використана в дисертаційній роботі 420

Додаток В Формальний опис, мовою програмування SQL, алгоритму створення інформаційної моделі предметної області підсистеми моніторингу показників ефективності системи ТО і умов експлуатації вантажного судна 428

Додаток Г Формальний опис, мовою програмування SQL, алгоритму створення інформаційної моделі предметної області підсистеми моніторингу технічного стану СТЗ і К, пристроїв моніторингу і умов експлуатації вантажного судна 431

Додаток Ґ Формальний опис алгоритму програми на мові програмування С++, який використовує метод Монте-Карло для генерації випадкових прирощень у заданому діапазоні 433

Додаток Д Ілюстрації до процесу обслуговування суднового головного розподільчого щита (ГРЩ) 434

Додаток Е Ілюстрації до процесу обслуговування суднового допоміжного двигуна (дизель-генератора) 453

Додаток Є Фотографічні матеріали та ілюстрації до процесу обслуговування суднового баластного насосу 461

Додаток Ж Результати перевірки критерію ефективності використання ресурсів та математичних моделей і системи КПТОВС 463

Додаток З Результати відпрацювання параметрів системи технічного обслуговування в умовах експлуатації 473

Додаток И Довірчі границі, ймовірності, коефіцієнти розподілу, що використовуються в процесі динамічного коригування термінів технічного обслуговування вантажних суден 474

Додаток І Неприпустимі ризики для різних вантажних суден 475

Додаток Ї Страхові вимоги та ризики за елементами головних двигунів вантажних суден 478

Додаток Й Орієнтовна таблиця параметрів технічного стану, контрольованих у процесі технічного обслуговування 479

Додаток К Аналіз методів технічного обслуговування вантажних суден 480

Додаток Л Таблиці типізації даних і аналітичні формули основних інформаційнійних елементів системи КПТОВС 481

Додаток М Основні принципи, описи процедур, схем, підсистем, факторів, класифікації, особливості процесів 488

Додаток Н Перелік науково-дослідних робіт і акти впровадження результатів дослідження 595

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

ТО – технічне обслуговування; ВС – вантажне судно; КПТОВС - комплексне прескриптивне технічне обслуговування вантажних суден; СТЗ – судновий технічний засіб; СТЗіК – суднові технічні засоби і конструкції; ЕВР – ефективність використання ресурсів; КНД – керівний нормативний документ; ACMS – Automated Condition Monitoring System (Автоматизована система моніторингу стану); ShipDiMRO – Digital Strategies for Ship Maintenance, Repair, and Overhaul (цифрові стратегії технічного обслуговування, ремонту та капітального ремонту суден); RBC – Useful Remaining Battery Capacity (залишковий заряд акумулятора); RBCIS – Remaining Battery Capacity Indication System (система індикації залишкового заряду акумулятора); EOL – End-of-Life (кінець терміну експлуатації); EOP – End-of-Prediction (кінець прогнозування); MT – Maintenance Thresholds (граничний час технічного обслуговування); OSA-CBM – Open System Architecture for Condition-Based Maintenance (відкрита системна архітектура технічного обслуговування на основі стану); PA – Prognostic Accuracy (точність прогнозування); SSE – Sum of Squared Errors (сума квадратів помилок); SVC – Ship’s Voyage Cycles (Рейсовий цикл судна); SMP – Ship Maintenance Plan (План технічного обслуговування судна); AAI – Applied Artificial Intelligence (Прикладний штучний інтелект).

ВСТУП

Актуальність теми дослідження. Розв’язання проблеми управління процесами технічного обслуговування (ТО) і ремонту вантажного судна відповідно до міжнародних стандартів якості та впровадження їх результатів в систему управління безпекою (СУБ) вимагає формування науково обґрунтованого зв’язку між аналізованим результатом функціонування системи та змінами конфігурації системи ТО. Відповідно до норм КНД 31.2.007–96 «Положення про технічну експлуатацію морських і річкових суден» [436] та КНД 31.2.002.01–96 «Правил технічної експлуатації морських і річкових суден» [435], що діють з 1997 року визначено механізм організації безпечного утримання морських і річкових суден в процесі їх технічної експлуатації та високий рівень системи управління ТО суден. Однак, низка сучасних іноземних керівництв і стандартів, що з’явились в попередні два десятиліття та описують принципи формування систем управління ТО, встановлюють зворотний зв’язок «Об’єкт ТО» - «Конфігурація системи ТО» на основі аналізу експлуатаційних даних про відмови. Водночас наявними керівними нормативними документами не передбачено використання результатів ТО для зміни системи ТО за відсутності відмов, а науково-обґрунтована сторона розв’язання проблеми не розкривається. З огляду на профілактичні властивості системи ТО, відмова є рідкісною подією що звужує інформаційну базу прийнятих рішень, тому існує потреба в пошуку шляхів застосування результатів ТО.

Раціональне управління процесами ТО і ремонту, що забезпечують необхідний рівень безпеки, вимагає єдиної системи оцінювання наслідків прийнятих управлінських рішень, тому рекомендована ІМО формальна оцінка безпеки має стати найважливішим компонентом технології управління ТО. Розв’язання цього завдання дає змогу сформувати на сучасному науковому рівні необхідні зв’язки управління ТО з СУБ судна і судноплавної компанії та вплив прийнятих рішень, на конкурентоспроможність судна і судноплавної компанії. Інший аспект актуальності проблеми вдосконалення управління процесами ТО вантажних суден полягає в застосуванні сучасних цифрових технологій (стратегій), під час використання яких здійснюється перехід від планового прийняття рішень до прийняття рішень за

результатами ймовірнісного аналізу наслідків з використанням науково-обґрунтованих алгоритмів. Такий підхід забезпечить мінімізацію впливу "людського ресурсу" в управлінні процесами ТО.

Розробці методів оцінювання та способів підвищення ефективності систем ТО вантажних суден в умовах експлуатації у складі інформаційної системи технічного обслуговування, що дозволяє прогнозувати та враховувати відмови суднових технічних засобів і наслідки прийнятих рішень для підвищення експлуатаційної ефективності вантажних суден в умовах експлуатації і присвячена дисертаційна робота.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Подана дисертаційна робота становить частину досліджень які проводяться в Одеському національному морському університеті і спрямовані на подальше вдосконалення систем технічного обслуговування і ремонту вантажних суден.

Дисертаційне дослідження здійснювалось в рамках наступних прикладних науково-дослідних робіт кафедри судноводіння і морської безпеки, Одеського національного морського університету, керівником яких був автор: «Розроблення програмного забезпечення інформаційно-аналітичної системи контроля і прогнозування рівня надійності суднових технічних систем і комплексів вантажного судна на основі цифрових двійників» (0123U102142), 01.2020-12.2020 рр. «Розроблення автоматизованої системи розпізнавання несправностей та інформаційного забезпечення процесу технічної експлуатації суднових технічних комплексів вантажного судна» (0123U102178), 01.2021-06.2021 рр. «Розроблення автоматизованої інформаційної системи обґрунтування раціональної програми і управління технічним обслуговуванням вантажних суден» (0123U102204), 07.2021-12.2021 рр. «Розроблення комплексної автоматизованої системи контроля і прогнозування показників надійності засобів морського транспорту» (0123U102241), 01.2022-06.2022 рр. «Розроблення комплексної системи інформаційного забезпечення процесу технічної експлуатації суднових технічних систем: автоматизований пошук несправностей і підтримка прийняття рішень» (0123U102286), 07.2022-12.2022 рр. «Розроблення систем інформаційного забезпечення підтримки технічної придатності

суден торгового флоту України на основі цифрових двійників і аналізу даних в реальному часі» (0123U102159), 01.2023-12.2023 рр.

Мета і завдання дослідження. *Метою дослідження* є теоретичне узагальнення та розв'язання важливої науково-прикладної проблеми – підвищення ефективності систем технічного обслуговування вантажних суден та її реалізація шляхом формування та впровадження інформаційної системи технічного обслуговування, що дозволяє прогнозувати та враховувати відмови суднових технічних засобів і наслідки прийнятих рішень для підвищення експлуатаційної ефективності вантажних суден в умовах експлуатації.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

1. розробити концепцію підвищення ефективності систем технічного обслуговування вантажних суден в умовах експлуатації на основі цифрових стратегій, в основу якої покладено інформаційну складову на основі відомостей про технічний стан суднових технічних засобів і конструкцій та показники ефективності системи технічного обслуговування на різних етапах експлуатації;

2. розробити інформаційну систему оцінювання способів підвищення ефективності систем технічного обслуговування вантажних суден в умовах експлуатації з можливістю прогнозування параметрів технічного стану та параметрів системи технічного обслуговування у складі системи комплексного прескриптивного технічного обслуговування вантажного судна (КПТОВС);

3. розробити загальну методологію формування та оцінювання способів підвищення ефективності системи технічного обслуговування вантажних суден в умовах експлуатації на основі цифрових стратегій у складі системи КПТОВС;

4. розробити математичні моделі системи КПТОВС для оцінювання ефективності управління параметрами системи технічного обслуговування в залежності від обраної стратегії і умов експлуатації;

5. розробити метод дослідження ефективності систем технічного обслуговування вантажних суден в процесі експлуатації;

6. розробити автоматизований бортовий інформаційний комплекс ACMS та Web-сервіс ShipDiMRO для підтвердження розробленої концепції та проведення

експериментальних випробувань суднових технічних засобів у складі системи КПТОВС;

7. провести експериментальні дослідження ефективності процесів автоматичного оцінювання технічного стану суднових технічних засобів та адаптивізації параметрів системи технічного обслуговування в умовах експлуатації у складі цифрової стратегії;

8. оцінити вплив характеристик цифрових стратегій на підвищення ефективності систем технічного обслуговування вантажних суден в умовах експлуатації;

9. розробити загальний метод адаптивізації параметрів системи технічного обслуговування шляхом застосування цифрових стратегій для підвищення ефективності систем технічного обслуговування вантажних суден в умовах експлуатації та узагальнити результати досліджень;

10. розробити рекомендації щодо використання результатів дослідження для підвищення ефективності системи технічного обслуговування вантажних суден в умовах експлуатації.

Об’єктом дослідження є процес експлуатації, який надає можливість підвищення ефективності систем технічного обслуговування вантажних суден в умовах експлуатації.

Предметом дослідження є визначення шляхів і методів реалізації підвищення ефективності систем технічного обслуговування вантажних суден в умовах експлуатації.

Методи дослідження. Дослідження, проведені в рамках дисертаційної роботи, ґрунтуються на теоретичних основах, включаючи теорію ефективності, теорію надійності, теорію ймовірностей, теорію безпеки, теорію масового обслуговування, предиктивну та прескриптивну теорії, а також використовують методи машинного навчання, математичне програмування, математичну статистику, теорію графів та їхнє застосування у задачах планування і управління. Адекватність математичних моделей до реальних систем була перевірена за допомогою методу параметричної ідентифікації та шляхом порівняння розрахункових даних із експериментальними

результатами. Комплекс експериментальних досліджень реалізовувався через використання методології планування експериментів та статистичної обробки зібраних даних, опираючись на теорію оцінки похибок та невизначеності вимірювань. Методологічну основу дисертації становить застосування системного підходу.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в узагальненні та розвитку існуючих сучасних інформаційних технологій на водному транспорті в умовах інтелектуальних транспортних систем та розробці науково-обґрунтованої методики управління системою технічного обслуговування вантажних суден з використанням цифрових стратегій адаптивізації її параметрів до змінних експлуатаційних умов, яка покладена в основу розв'язання важливої науково-прикладної проблеми підвищення ефективності систем технічного обслуговування вантажних суден.

При цьому *вперше*:

- запропоновано концепцію підвищення ефективності систем технічного обслуговування вантажних суден в умовах експлуатації на основі цифрових стратегій, в основу якої покладено інформаційну складову на основі відомостей про технічний стан суднових технічних засобів і конструкцій та показники ефективності системи технічного обслуговування на різних етапах експлуатації;
- запропоновано метод формування інформаційної моделі предметної області на основі системи моніторингу, діагностування і прогнозування параметрів системи ТО та технічного стану СТЗіК, який характеризується наявністю двох окремих підсистем: система ТО та умови експлуатації і СТЗіК та пристроїв моніторингу, що дозволяє сполучати інформацію про технічний стан окремих елементів на судні з їхнім функціонуванням у певних умовах експлуатації та допомагає забезпечувати основу ефективного технічного обслуговування та контролю за ефективності системи ТО;
- запропоновано інформаційну систему оцінювання способів підвищення ефективності систем технічного обслуговування вантажних суден в умовах експлуатації з можливостями прогнозування параметрів технічного стану та параметрів системи технічного обслуговування у складі системи КПТОВС, яка

ґрунтується на предметній області системи технічного обслуговування та СТЗіК вантажного судна;

- запропоновано загальну методологію формування та оцінювання способів підвищення ефективності систем ТО вантажних суден в умовах експлуатації на основі цифрових стратегій у складі системи КПТОВС, що базується на показниках якості системи ТО та концепції адаптивізації функціонування системи ТО;
- запропоновано сукупність математичних моделей системи КПТОВС для оцінювання ефективності управління параметрами системи технічного обслуговування в залежності від обраної стратегії і умов експлуатації, яка характеризується виділенням основних процесів технічного обслуговування, оцінювання стану та ефективності системи ТО, зміни технічного стану СТЗіК і умов експлуатації;
- розроблено метод дослідження ефективності систем ТО вантажних суден в процесі експлуатації, який ґрунтується на урахуванні економічної ефективності прийнятих рішень під час управління системою ТО, а також на оцінюванні стану системи технічного обслуговування та ефективності переходу на КПТОВС;
- створено загальний метод адаптивізації параметрів системи технічного обслуговування для підвищення ефективності систем технічного обслуговування вантажних суден в умовах експлуатації, що ґрунтується на застосуванні цифрових стратегій.

Удосконалено:

- метод обробки інформації в інформаційній системі ShipDiMRO, одержуваної від обладнання системи ACMS, що, на відміну від існуючих, передбачає можливість прогнозування параметрів та показників ефективності систем ТО та технічного стану СТЗіК;
- метод оцінювання впливу характеристик цифрових стратегій на підвищення ефективності систем технічного обслуговування вантажних суден в умовах експлуатації, що на відміну від існуючих базується на одночасному визначенні рівня та категорії прогнозованого ризику для всіх СТЗіК вантажного судна та встановленні

зв’язку між рівнями, категоріями ризику та прийнятими рішеннями з управління системою ТО.

Дістали подальший розвиток:

- теорія управління процесами технічного обслуговування вантажних суден, що забезпечує надійне використання вантажного судна, ефективність використання ресурсів та динамічне коригування термінів ТО вантажних суден;
- прикладні аспекти прескриптивної теорії технічного обслуговування засобів транспорту, шляхом створення класифікації цифрових стратегій технічного обслуговування для використання їх в змінних умовах експлуатації вантажних суден;
- методи функціонування і системної взаємодії обладнання ACMS і ShipDiMRO в межах віртуального підприємства з експлуатації водного транспорту, шляхом розробки і використання в умовах інтелектуальних транспортних систем Web-сервісу віртуального підприємства «shipmonitoring.org».

Практичне значення одержаних результатів складають:

- узагальнена схема механізму підвищення ефективності систем ТО вантажних суден за рахунок системи КПТОВС на основі цифрових стратегій і самі цифрові стратегії;
- системний підхід та загальний метод адаптивізації параметрів систем технічного обслуговування шляхом застосування цифрових стратегій для підвищення ефективності систем технічного обслуговування вантажних суден в умовах експлуатації;
- методи і моделі для оцінювання впливу характеристик цифрових стратегій на підвищення ефективності систем технічного обслуговування вантажних суден в умовах експлуатації;
- алгоритм системної взаємодії і синтезу системи КПТОВС в умовах експлуатації;
- метод формування циклу підвищення ефективності систем ТО вантажних суден в умовах експлуатації;

- інформаційна система оцінювання способів підвищення ефективності систем ТО вантажних суден в умовах експлуатації з можливостями прогнозування їх технічного стану на основі бортового комплексу ACMS та хмарної системи ShipDiMRO;
- принципова схема, складові, методика формування і алгоритм функціонування системи КПТОВС;
- підхід, методи функціонування, використання та системної взаємодії систем ACMS і ShipDiMRO в межах віртуальної судноплавної компанії «shipmonitoring.org» – підприємства, яке займається експлуатацією водного транспорту.

Основні висновки і рекомендації, отримані в роботі, використані при створенні програмного і апаратного забезпечення автоматизованих систем ACMS та ShipDiMRO, в розробці яких безпосередню участь приймав автор. Наукові положення та результати дослідження впроваджено в виробничу діяльність компаній PRESTIGE SHIPMANAGEMENT LTD, ТОВ «АКСОН ПОРТ СЕРВІС», НПП «ЛЕПТОН» і ТОВ «ОДЕСЬКИЙ АВІАЦІЙНИЙ ЗАВОД», а методичні розробки, схеми та алгоритми упроваджено в навчальний процес Одеського національного морського університету МОН України.

Особистий внесок здобувача. Всі наукові положення, розробки і результати, що виносяться на захист, отримані автором самостійно і викладені в роботах, опублікованих без співавторів [2-12, 26-28] та у співавторстві [1, 13-25, 29-43]. У спільних роботах [1, 13, 15, 17, 18, 19, 30, 40] авторові належить визначення взаємозв’язків між параметрами системи технічного обслуговування та умов експлуатації і стану технічних засобів судна; [14, 33, 34] – обґрунтування методичного підходу дослідження ефективності технічного обслуговування судна; [16, 36] – формування параметрів системи ТО, визначення показників ефективності, взаємозв’язку між ними та критеріїв їх оцінювання; [20, 37, 38] – обґрунтування процесу підготовки, моніторингу та оцінки технічного стану вантажного судна в умовах експлуатації; [21, 31, 32] – обґрунтування методичного підходу до розрахунку вартості обладнання, що використовується для технічного обслуговування засобів

транспорту, з метою сприяння покращенню ефективності обслуговування і зниження витрат; [22, 35] – обґрунтування математичної моделі прогнозування стану технічних засобів та формування системи моніторингу вантажних суден в умовах експлуатації; [29, 41, 43] – обґрунтування інформаційної моделі оцінювання ефективності, моніторингу стану судна і умов експлуатації. У колективній монографії [23] автором підготовлені глави 3 та 4 і підрозділи 6.5 та 6.7, а також взято участь в написанні розділу 5; у монографії [24] автором підготовлені розділи 7 та 9, а також взято участь в написанні підрозділів 8.1, 9.2, 10.2; [25, 39, 42] – обґрунтування методичного підходу до використання програмованих логічних контролерів в процесі експлуатації технічних засобів вантажних суден.

Автор вдячний д.т.н. професору Грицуку І.В. за консультування, допомогу та підтримку під час виконання дисертаційного дослідження.

Апробація результатів дисертації. Основні результати теоретичних і експериментальних досліджень дисертаційної роботи доповідались на наукових конференціях: International Power trains, Fuels and Lubricants (IPF&L) Meeting 2018, Heidelberg, Germany; IV Міжнародна науково-практична конференція «ДНІПРОВСЬКІ ЧИТАННЯ-2023», Київ, Україна; “Features of innovative development in the field of technology: the comparative experience of Ukraine and the European Union”, Wloclawek, the Republic of Poland, September 6–7, 2023; II Міжнародна науково-практична конференція Проблеми сталого розвитку морської галузі (PSDMI-2022), Херсон, Україна; Міжнародна науково-практична конференція «Енергетичні установки та альтернативні джерела енергії» (ESAES-2024), 11-12 березня 2024 року, Харків, Україна; Міжнародна наукова конференція «Інтелектуальні Транспортні Системи: Екологія, Безпека, Якість, Комфорт». – К.: НТУ, 2022, м. Київ; Міжнародна науково-практична конференція «Сучасні енергетичні установки на транспорті, технології та обладнання для їх обслуговування СЕУТТОО-2022», м. Одеса; Перша міжнародна науково-технічна конференція «Прогресивні технології засобів транспорту»; Міжнародна науково-практична конференція «Сучасні енергетичні установки на транспорті, технології та обладнання для їх обслуговування СЕУТТОО-2021», м. Херсон; Дванадцята Міжнародна науково-практична конференція «Сучасні

інформаційні та інноваційні технології на транспорті MINTT-2021» м. Херсон; Міжнародна науково-практична конференція «Сучасні енергетичні установки на транспорті, технології та обладнання для їх обслуговування СЕУТТОО-2020», м. Херсон; Одинадцята Міжнародна науково-практична конференція «Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті MINTT-2020» 27 – 29 травня 2020 року м. Херсон; ІІ Міжнародна науково-практична морська конференція кафедри СЕУ і ТЕ ОНМУ 24-28 квітня 2020 року; Міжнародна науково-практична конференція «Сучасні енергетичні установки на транспорті, технології та обладнання для їх обслуговування СЕУТТОО-2019», 12 – 13 вересня 2019 року, м. Херсон.

Публікації. Основні результати дисертаційної роботи висвітлені у 43 опублікованих наукових працях, з яких 14 написані без співавторів. 14 статей у наукових фахових виданнях України, 1 стаття у науковому періодичному виданні іншої держави із напряму, з якого підготовлено дисертацію, 8 статей у виданнях, що індексуються у БД Scopus або Web of Science (відповідно до класифікації SCImago Journal and Country Rank: Q1 – 1 стаття, Q2 – 4 статті, Q3 – 3 статті), 2 монографії, 18 тез у збірниках доповідей на міжнародних наукових конференціях.

Структура та обсяг роботи. Дисертаційна робота складається зі вступу, семи розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків. Загальний обсяг дисертації становить 600 сторінок, включаючи 337 сторінок основного тексту, 38 таблиць, 136 рисунків, список використаних джерел з 442 найменувань та 18 додатків.

РОЗДІЛ 1
ХАРАКТЕРИСТИКА ПРОБЛЕМИ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ СИСТЕМ ТЕХНІЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ ВАНТАЖНИХ СУДЕН

1.1 Аналіз стану технічного обслуговування вантажних суден

Вантажні судна відіграють важливу роль у світовій торгівлі, виконуючи перевезення мільйонів тонн товарів по всьому світу. Щоб забезпечити безперебійну та ефективну роботу цих суден у вимогливих умовах експлуатації, виробники та оператори суден впроваджують різноманітні стратегії технічного обслуговування.

На Рисунку 1.1 зображено процес еволюції методів (стратегій) технічного обслуговування вантажних суден від реактивного підходу до передових прескриптивних систем, одному із можливих варіантів яких присвячена ця дисертаційна робота. Від виникнення перших концепцій технічного обслуговування до використання передових технологій прогнозування та аналізу даних - кожен етап в цьому розвитку відображає стрімку еволюцію та постійний пошук ефективних та інноваційних підходів до забезпечення надійності та безпеки експлуатації засобів водного транспорту.

Приголомшлива кількість факторів, що впливають на ефективність експлуатації вантажних суден – від погодних умов до зносу матеріалів – вимагає постійного удосконалення процесів технічного обслуговування. Розгляд цих стратегій у хронологічному контексті дозволить нам краще зрозуміти, як сучасні підходи до технічного обслуговування виникли та розвивалися, а також як вони впливають на сучасну морську індустрію.

Реактивне обслуговування (Breakdown Maintenance): Ця стратегія є найпростішою і виникла в період початкового розвитку засобів водного транспорту, коли виробники та оператори суден реагували на поломки лише тоді, коли вони виникали.

Профілактичне обслуговування (Preventive Maintenance): Започатковане приблизно в середині 20-го століття, це підходить до регулярного технічного обслуговування технічних засобів або систем вантажних суден для запобігання можливих поломок.



Рисунок 1.1 – Еволюція методів (стратегій) технічного обслуговування вантажних суден

Обслуговування за станом (Condition-Based Maintenance): Розвиток сенсорної технології та аналізу даних дозволив з’явитися цьому підходу, який дозволяє проводити моніторинг стану суднового обладнання та реагувати на його зміни.

Прогнозування відмов (Predictive Maintenance): Ця стратегія з’явилася на базі обслуговування за станом, але з більшим акцентом на використанні аналітики та прогнозуванні часу виникнення поломок.

Прескриптивне обслуговування (Prescriptive Maintenance): Ця стратегія використовує аналітичні моделі для передбачення оптимального часу та виду обслуговування, щоб максимізувати ресурси та ефективність. Вона базується на великих обсягах даних, машинному навчанні та штучному інтелекті для прийняття рішень щодо планування обслуговування.

Методи технічного обслуговування розвиваються синхронно з викликами, що стоять перед транспортною галуззю. Наприклад, спочатку виробництву потрібні були ефективні засоби боротьби з аваріями. Так, реактивне обслуговування перетворилося на профілактичне.

Пізніше фокус змістився на моніторинг стану СТЗіК. Це дало змогу скоротити витрати на обслуговування за рахунок зменшення кількості перевірок. Допомогло автоматизувати процес і поширення рішень на базі Industrial Internet of Things (IIoT). Вони ж знизили роль людського фактора в організації ТО вантажних суден.

Розширений аналіз даних вивів технічне обслуговування на наступний щабель розвитку - Predictive Maintenance. Предиктивне обслуговування націлене на виявлення закономірностей і прогнозування ризиків. Ця стратегія не тільки допомогла боротися з відмовами, які ще не сталися, а й змінила наше уявлення про ефективне використання активів.

Сьогодні перед індустрією стоять нові виклики, пов’язані з дефіцитом ресурсів та енергоносіїв, перебудовою звичних ланцюжків поставок і впровадженням нових бізнес-моделей. Це означає, що і принципи технічного обслуговування знову змінюватимуться.

Дослідження стану технічного обслуговування вантажних суден торгівельного флоту, оцінка загальних показників ефективності систем технічного обслуговування таких суден, а також аналіз сучасних методів управління цими системами виявили, що у багатьох випадках управління системами технічного обслуговування, як для флоту однотипних суден, так і для окремо взятих суден, здійснюється виключно на основі економічних міркувань у контексті технічної експлуатації морських транспортних засобів [10, 212]. Такий підхід не дозволяє в достатній мірі визначити причини зниження ефективності використання флоту вантажних суден, а також потенціал для підвищення продуктивності в судноплавній компанії.

Складна економічна ситуація, яка склалася в Україні, а також відсутність відповідних методологій та інструментів для розрахунку та аналізу показників ефективності систем технічного обслуговування, часто призводить до прийняття

рішень про поліпшення ситуації в судноплавній компанії на основі невмотивованої зміни параметрів систем технічного обслуговування суден [415].

Вихідні дані аналізу стану технічного обслуговування вантажних суден наведено у Додатку М1.

1.2 Актуальність проблеми підвищення ефективності систем технічного обслуговування вантажних суден

Щоб досягти більшої успішності у вирішенні проблем водного транспорту в Україні, національним судноплавним компаніям необхідно підтримувати тісний зв’язок з науково-дослідними центрами та співпрацювати з ними. Українські наукові організації здатні розробляти інноваційні технології та рішення, які можуть підвищити ефективність судноплавства на внутрішніх і зовнішніх водних шляхах.

Для забезпечення сталого розвитку сфери водного транспорту в Україні необхідно врахувати глобальні тенденції та використовувати світовий досвід. Наприклад, цифрові технології, такі як Інтернет речей (IoT), машинне навчання та штучний інтелект, можуть допомогти оптимізувати процеси управління, планування та експлуатації суден.

Врахування глобальних тенденцій, співпраця з науково-дослідними організаціями та впровадження інноваційних технологій стануть важливими кроками для подолання викликів, які стоять перед українською судноплавною індустрією. Це також вимагатиме від керівництва судноплавних компаній розуміння важливості інвестування у вдосконалення програмних комплексів та підтримки національних наукових розробок.

Відповідне фінансування, політика сприяння інноваціям, а також сприйняття технічних та організаційних змін у керівництві компаній, можуть сприяти сталому розвитку сфери водного транспорту в Україні. Забезпечення належного рівня підготовки та навчання персоналу, який використовує нові технології, також буде ключовим фактором для досягнення цієї мети [370].

Одночасно, судноплавні компанії повинні активно співпрацювати з міжнародними партнерами, обмінюватися досвідом та враховувати глобальні стандарти та регулятивні вимоги. Важливо підтримувати високий рівень безпеки

судноплавства та екологічної стійкості, адже це відіграє важливу роль у забезпеченні сталого розвитку сфери водного транспорту на довготривалій перспективі [215].

У подальшому, розвиток судноплавної галузі в Україні вимагатиме інтеграції цифрових стратегій в різні аспекти діяльності компаній. Це допоможе забезпечити оптимальне планування, координацію та аналіз даних, а також покращити загальну ефективність і конкурентоспроможність української судноплавної галузі на міжнародному рівні.

Успішний розвиток судноплавної галузі в Україні потребує підтримки з боку державних органів, які мають забезпечити створення сприятливого законодавчого та регулятивного середовища [186]. Зокрема, це стосується заохочення науково-технічної співпраці, розвитку національних інфраструктурних проектів та підтримки діяльності судноплавних компаній [304].

Співпраця з університетами та освітніми установами також має відіграти важливу роль у підготовці висококваліфікованих фахівців, які зможуть ефективно використовувати нові технології та інноваційні рішення [157]. Навчання та підвищення кваліфікації персоналу мають бути орієнтовані на вивчення передових підходів та міжнародних стандартів [105].

Залучення інвестицій та створення сприятливих умов для приватного бізнесу також можуть сприяти розвитку судноплавної галузі в Україні [238]. Прозорість та стабільність економічної політики, сприятливі умови для приватних інвестицій, а також заохочення та підтримка інноваційних проектів – все це може сприяти прискореному розвитку судноплавства [2].

У підсумку, для досягнення сталого розвитку сфери водного транспорту в Україні необхідно забезпечити гармонійне поєднання інноваційних технологій, наукової співпраці, фінансової підтримки та освіти. Це допоможе підвищити ефективність судноплавних компаній, забезпечити їх конкурентоспроможність на міжнародному рівні та створити основу для сталого розвитку судноплавної індустрії в Україні.

Для досягнення цієї мети, важливо підтримувати активний діалог між державними структурами, приватним сектором та науковою спільнотою. Разом вони

мають розробляти та впроваджувати інтегровані стратегії розвитку судноплавства, які враховують глобальні виклики та потреби внутрішнього ринку.

Створення спеціалізованих науково-дослідних центрів та інноваційних кластерів у галузі судноплавства може стати потужним каталізатором розвитку та впровадження передових технологій [168]. Такі центри можуть сприяти формуванню нових підходів та ідей, які забезпечать прогрес в галузі судноплавства, а також підготовку молодих та талановитих фахівців.

Застосування передових технологій в експлуатації суден, таких як автоматизовані системи управління, цифрові інструменти для моніторингу та аналізу даних, а також енергоефективні та екологічно чисті рішення, допоможе зменшити вплив на навколишнє середовище та підвищить загальну безпеку судноплавства [338].

Враховуючи викладене, можна зробити висновок, що для успішного розвитку судноплавної галузі в Україні потрібно забезпечити гармонійне співіснування технологій, науки, освіти та державної підтримки. Це сприятиме досягненню сталого розвитку сфери водного транспорту та зміцненню позицій українського судноплавства на світовому ринку перевезень [415].

В цьому розділі висвітлено основні етапи розвитку систем технічного обслуговування вантажних суден і надана класифікація показників їхньої ефективності, які зараз застосовують в практиці управління виробничим процесом в судноплавних компаніях.

Розглянута методика узгодження основних показників ефективності систем технічного обслуговування та вдосконалена методика вибору раціональної повноти контролю технічного стану функціональних систем вантажних суден.

Проведений аналіз стану питання з оцінки і управління ефективністю систем технічного обслуговування вантажних суден і їх технічних засобів показав доцільність досліджень в напрямку пошуку розробки загальної методики управління цими процесами з метою побудови підґрунтя для більш детального вивчення процесів, які відбуваються під час технічного обслуговування вантажних суден та

створення методології формування в судноплавних компаніях цифрових стратегій технічного обслуговування.

Застосування науково-обґрунтованих підходів до аналізу систем технічного обслуговування та технічної експлуатації вантажних суден може допомогти виявити причини зниження ефективності флоту, а також розробити ефективні стратегії для їх подолання. Таким чином, інтеграція наукових методів у практику управління системами технічного обслуговування вантажних суден може сприяти підвищенню як рівня безпеки судноплавства так і ефективності морського транспорту та сталому розвитку судноплавних компаній.

1.3 Загальні положення і аналіз показників ефективності систем технічного обслуговування вантажних суден

Комплексні способи гарантування (КСГ) необхідної ефективності систем технічного обслуговування вантажних суден складаються з сукупності заходів щодо оцінки, підвищення і контролю надійності, точності, працездатності, якості функціонування та інших експлуатаційних характеристик вантажних суден та наявних суднових технічних засобів. КСГ реалізуються як у сфері розробки і виробництва вантажних суден, так і безпосередньо в процесі їх експлуатації судноплавною компанією. Комплексне використання методів підвищення ефективності систем технічного обслуговування вантажних суден відкриває шляхи для суттєвого підвищення надійності і якості роботи функціональних систем вантажного судна. Основу цих методів складає кількісна оцінка ефективності систем технічного обслуговування - інструмент, що дозволяє оцінити ефективність виконаних дій щодо забезпечення необхідної надійності і якості роботи засобів морського транспорту.

Під ефективністю системи технічного обслуговування прийнято розуміти сукупність ознак системи технічного обслуговування, які характеризують співвідношення між матеріальними, часовими або трудовими витратами на підтримку і відновлення працездатності засобів морського транспорту і ефектом, що досягається. Ефективність систем технічного обслуговування суттєво залежить від таких системних властивостей засобів морського транспорту як: безвідмовність,

ремонтопридатність і довговічність, а також від ймовірності результатів і тривалості експлуатаційного контролю.

Але існує суттєва розбіжність між показниками ефективності систем технічного обслуговування засобів морського транспорту що визначені в науковій літературі і тими, що використовуються в судноплавних компаніях. До перших найбільш часто відносять наступні показники ймовірності і тривалості експлуатаційного контролю, безвідмовності, ремонтопридатності і довговічності засобів морського транспорту, а саме:

$F(t)$ – функція яка характеризує напрацювання до відмови;

t_r – тривалість відновлювальних робіт;

M – середній ресурс;

$\gamma(t)$ і $\mu(t)$ – умовні ймовірності «помилкової відмови» і «невиявленої відмови» при контролі технічного стану в момент t;

t_c –тривалість контролю технічного стану.

Класичні та сучасні публікацій в області математичного моделювання процесів технічного обслуговування вантажних суден наведено у Додатку М2.

Розглянуто найбільш характерні з опублікованих математичних моделей технічного обслуговування з періодичним контролем технічного стану. Загальна риса представлених у цьому розділі математичних моделей технічного обслуговування полягає в тому що в них не враховується структура засобів морського транспорту.

Поданий короткий аналіз найбільш характерних математичних моделей технічного обслуговування вказує на відсутність єдиного методологічного підходу визначення показників ефективності систем технічного обслуговування засобів морського транспорту, який би надавав можливість враховувати структуру і періодичність технічного обслуговування, вид експлуатаційного контролю, глибину відновлення і зовнішній прояв відмов. Сучасні методи оцінки ефективності систем технічного обслуговування вантажних суден мають ряд суттєвих недоліків і обмежень, які знижують ефективність розроблених і проведених заходів. Вказаний факт лежить в основі того, що реальні показники ефективності багатьох систем

технічного обслуговування в процесі експлуатації часто нижче від розрахункових значень і не задовольняють вимогам нормативних документів, СУБ судна і судноплавної компанії та суттєво впливають на конкурентоспроможність судна і судноплавної компанії. Така ситуація обумовлена наступними основними причинами:

По-перше, для нормування і оцінки ефективності систем технічного обслуговування вантажних суден, як правило, використовуються показники, запозичені з теорій надійності і експлуатації простих систем. Ці показники враховують лише факт зміни ефективності елементів системи технічного обслуговування, але не висвітлюють вплив окремих факторів на підсумковий результат функціонування систем технічного обслуговування і розглядають вантажні судна як складні технічні системи, а не як комерційні засоби транспорту.

По-друге, зараз практично відсутні науково-обґрунтовані методи оцінки ефективності систем технічного обслуговування і оцінки її впливу на ефективність функціонування вантажних суден.

По-третє, важливою особливістю сучасних вантажних суден є функціональна надлишковість більшості їхніх функціональних систем, що дозволяє вирішувати, різними способами, задачі з технічного обслуговування поставлені перед судноплавною компанією. В свою чергу, ці способи характеризуються властивим рівнем ефективності систем технічного обслуговування.

Виходячи із зазначеного, кількісна оцінка рівнів ефективності систем технічного обслуговування є важливим елементом у схемі розрахунку ефективності використання вантажних суден як комерційних транспортних засобів метою експлуатації яких є отримання максимальних прибутків при заданих високих рівнях безпеки і регулярності використання.

1.4 Існуючі методи кількісної оцінки ефективності систем технічного обслуговування вантажних суден

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 [414].

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.

При виборі методу оцінки варто враховувати необхідну точність, обсяг і доступність даних, а також специфічні особливості системи технічного обслуговування вантажних суден [160]. Істотним є також забезпечення надійності та обґрунтованості отриманих результатів оцінки.

Існуючі методи кількісної оцінки ефективності систем технічного обслуговування вантажних суден наведено у Додатку М3.

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

1.5 Аналіз залежностей інтенсивності відмов, пошкоджень та станів суднових технічних засобів вантажних суден

Врахування динаміки інтенсивності відмов суднових технічних засобів та пошкоджень їхніх комплектуючих є суттєвою складовою при дослідженні

ефективності систем технічного обслуговування вантажних суден та суднових технічних систем і комплексів [172]. 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 [387]. 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 [70]. 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.

Вихідні дані аналізу залежностей інтенсивності відмов, пошкоджень та станів суднових технічних засобів вантажних суден наведено у Додатку М4.

1.6 Перспективи адаптивізації параметрів систем технічного обслуговування вантажних суден

Проблема адаптивного управління технічним обслуговуванням вантажних суден становить частину загальної проблеми оптимізації технічної експлуатації та, відповідно, експлуатації вантажного судна. Згідно з визначенням, технічне обслуговування є процесом підтримання технічного стану [174]. Таким чином, оптимальне управління системою технічного обслуговування є ефективним

управлінням процесами зміни технічного стану та подіями, що зафіксовують переходи до різних станів, таких як відмови та відновлення суднових технічних засобів і конструкцій.

Порівняння різних стратегій керуючих впливів на процес технічного обслуговування має здійснюватися за наступними ключовими показниками:

- витратами, спрямованими безпосередньо на технічне обслуговування;
- загальними витратами на експлуатацію судна;
- отримуваними та неотримуваними доходами судна;
- відносною кількістю непередбачених операцій технічного обслуговування;
- ефективністю використання індивідуального ресурсу суднових технічних засобів і конструкцій;
- рівнем охоплення управлінням системи різних процесів зміни технічного стану;
- наявністю додаткових умов, необхідних для реалізації цього керівного впливу, таких як інформаційне забезпечення, прилади, рівень кваліфікації тощо;
- фактичною тривалістю експлуатаційного циклу.

На сьогоднішній день оцінка якості технічного управління судном або групою суден зазвичай базується на аналізі рівня витрат на технічну експлуатацію та тривалості експлуатаційного періоду [383], залишаючи без уваги ефективність системи технічного обслуговування для окремих механізмів або пристроїв. Це пояснюється відсутністю методики для проведення такого аналізу, при цьому судновий персонал змушений дотримуватися існуючого плану-графіку технічного обслуговування, який містить основну інформацію про конфігурацію системи технічного обслуговування для конкретного механізму. Додатковою причиною є обтяжений роботою персонал, який може виконати такий аналіз (наприклад, старший або другий механік), а тенденції збільшення обсягів робіт свідчать про те, що ситуація лише погіршується.

Вбачається актуальним створення пакета прикладних програм для проведення такого аналізу і формуванню відповідних рекомендацій. Ці програми повинні бути невід’ємною складовою суднової інформаційної системи технічного обслуговування (наприклад через поєднання систем ACMS та ShipDiMRO) і забезпечувати

технічному відділу судноплавної компанії або судновому персоналу можливість приймати коригувальні рішення щодо обсягу, періодичності технічного обслуговування, контролю технічного стану тощо, у відповідності до положень, що діють у компанії (пов’язані з узгодженням, виконанням коригувальних заходів тощо) [415].

Основні принципи, які можуть бути в основі методики аналізу ефективності системи технічного обслуговування та прийняття оптимальних коригувальних рішень з метою зменшення витрат, потребують опису.

Постановка завдання оптимізації включає такі основні етапи:

- вибір параметрів, що визначають якість функціонування системи технічного обслуговування;
- визначення джерел інформації для визначення цих параметрів та розроблення методики їх визначення;
- визначення системи параметрів, які підлягають оптимізації, та критеріїв оптимізації;
- визначення системи параметрів, які описують конфігурацію системи технічного обслуговування, які будуть змінені для досягнення бажаного результату.

У процесі формулювання та вирішення поставленої задачі необхідно враховувати, що в багатьох випадках коригувальні дії зміни конфігурації системи технічного обслуговування можуть призвести до неоднозначного прояву процесів зміни технічного стану обладнання. Іншими словами, потрібно усвідомлювати, що процеси зміни технічного стану мають випадковий характер, і в такому випадку результат впливу має враховувати принаймні два можливі варіанти (наприклад, зміна періодичності технічного обслуговування може призвести до зміни обсягу непланових робіт, а може й не призвести).

Під час створення послідовностей коригувальних заходів необхідно, де це важливо, враховувати остаточну ймовірність різних варіантів (результатів) таких впливів. Отже, в рамках завдань оптимізації можна виділити два типи задач:

- з чітко визначеним результатом (детерміновані);

- з різними можливими результатами (стохастичні).

Розглянемо принципи постановки та вирішення цих завдань.

Щодо конкретного технічного засобу судна, система технічного обслуговування характеризується такими аспектами:

- наявність планово-попереджувального підходу та визначення методу технічного обслуговування, який застосовується;
- визначення видів технічного обслуговування, передбачених для даного технічного засобу судна;
- зміст робіт, що включаються в операцію технічного обслуговування, його технологічні аспекти, планові витрати праці, замінні компоненти, матеріали;
- періодичність виконання технічного обслуговування відповідного виду;
- категорії технічного стану та їх статус для даного технічного засобу судна і його складових елементів;
- види контролю технічного стану передбаченого для даного технічного засобу судна, їх зміст, технологічні аспекти, необхідне обладнання, методи аналізу результатів тощо;
- виконавці технічного обслуговування та контролю технічного стану;
- інформація, що реєструється під час технічного обслуговування;
- інформація, що фіксується під час контролю технічного стану;
- звітність про виконане технічне обслуговування та контроль технічного стану.

Наразі у планах-графіках технічного обслуговування не відділяють в окремий вид робіт з технічного обслуговування ті, які передбачають превентивну заміну ключових компонентів (наприклад, багатошарових підшипників ДВЗ). За думкою автора, такі роботи мають важливий статус і потребують особливого уваги при перегляді параметрів цих робіт. Це питання буде розглянуто у розділі аналізу параметрів та процедур формування системи технічного обслуговування.

Зазвичай традиційні плани технічного обслуговування для більшості суднових технічних засобів, особливо для допоміжного обладнання, включають два типи робіт з технічного обслуговування – огляд і ревізію.

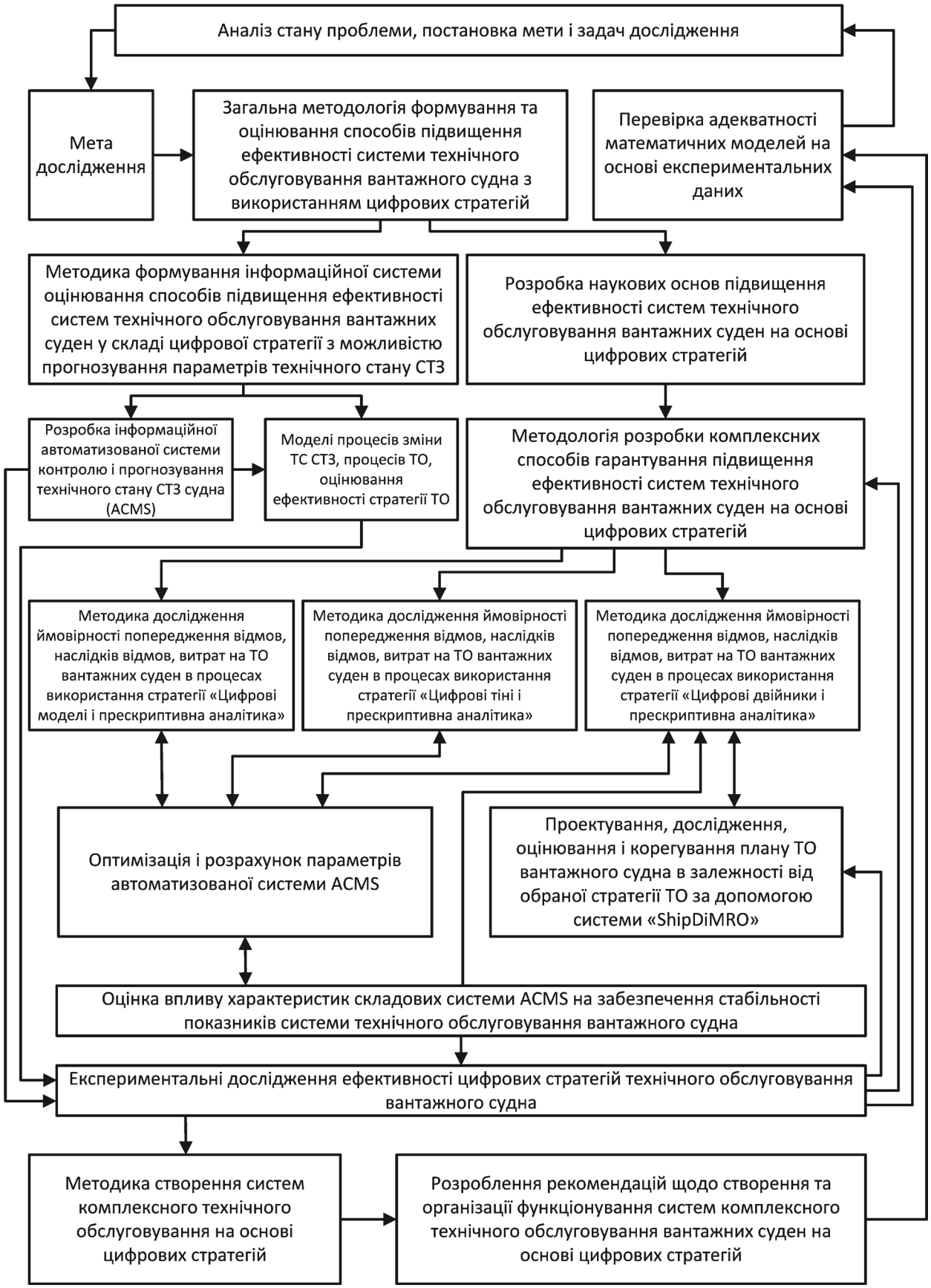


Рисунок 1.2 – Структурно-логічна схема вирішення проблеми підвищення ефективності систем технічного обслуговування вантажних суден на основі цифрових стратегій

Ревізія може бути запланована за часовим графіком або проведена як наслідок незадовільних результатів огляду. У зв’язку з цим план технічного обслуговування не може повністю вважатися застосуванням регламентного методу технічного обслуговування, але, скоріше, як поєднання двох методів – за станом та за графіком, тобто комплексний метод технічного обслуговування.

Вибір конкретного методу пов’язаний з такими факторами: природою еволюції процесів зміни технічного стану; можливістю ефективного контролю за технічним станом; та потенційними наслідками випадкових відмов.

З метою досягнення визначеної в роботі мети та поставлених завдань, визначені основні етапи вирішення проблеми, як показано на Рисунку 1.2.

Для цього сформульовані загальні положення щодо систем технічного обслуговування вантажних суден в умовах експлуатації. Визначені основні характеристики і вимоги до параметрів системи технічного обслуговування в умовах експлуатації. Сформульовано основні принципи які покладені в основу методики управління ефективністю системи технічного обслуговування та прийняття оптимальних коригувальних рішень з метою дотримання високого рівня ефективності використання ресурсів.

У процесі формулювання та вирішення поставленої задачі необхідно враховувати, що в багатьох випадках коригувальні дії зміни конфігурації системи технічного обслуговування можуть призвести до неоднозначного прояву процесів зміни технічного стану обладнання. Іншими словами, потрібно усвідомлювати, що процеси зміни технічного стану мають випадковий характер, і в такому випадку результат впливу має враховувати якомога більше можливих варіантів. Під час створення послідовностей коригувальних заходів необхідно, де це важливо, враховувати остаточну ймовірність різних варіантів (результатів) таких впливів.

Висновки по розділу 1

1. Аналіз представлених вище даних дозволяє дійти висновку про те, що в процесі управління технічним обслуговуванням вантажних суден торгівельного флоту в умовах експлуатації виявляються загальні проблеми.

2. Проведений аналіз стану питання з оцінки і управління ефективністю систем технічного обслуговування вантажних суден і їх технічних засобів показав актуальність та доцільність досліджень в напрямку пошуку і розробки загальної методики управління цими процесами з метою побудови підґрунтя для більш детального вивчення процесів, які відбуваються під час технічного обслуговування вантажних суден та створення методології формування в судноплавних компаніях цифрових стратегій технічного обслуговування.

3. Проведений аналіз загальних положень і показників ефективності систем технічного обслуговування вантажних суден вказує на відсутність єдиного методологічного підходу визначення показників ефективності систем технічного обслуговування засобів морського транспорту, який би надавав можливість враховувати структуру і періодичність технічного обслуговування, вид експлуатаційного контролю, глибину відновлення і зовнішній прояв відмов. Сучасні методи оцінки ефективності систем технічного обслуговування вантажних суден мають ряд суттєвих недоліків і обмежень, які знижують ефективність розроблених і проведених заходів. Вказаний факт лежить в основі того, що реальні показники ефективності багатьох систем технічного обслуговування в процесі експлуатації часто нижче від розрахункових значень і не задовольняють вимогам нормативних документів, СУБ судна і судноплавної компанії та суттєво впливають на конкурентоспроможність як окремого судна так і судноплавної компанії.

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. Кількісна оцінка ефективності систем технічного обслуговування вантажних суден вимагає визначення умовних показників ефективності, які відображають ефективність системи в кожному її стані. Вибір конкретного методу та критерію оцінки залежить від особливостей застосування системи, можливості отримання вхідних даних і необхідної ймовірності оцінок.

5. В процесі аналізу залежностей інтенсивності відмов, пошкоджень та станів суднових технічних засобів вантажних суден встановлено, що для аналізу

характеру зміни інтенсивності відмов і пошкоджень комплектуючих можуть використовуватися методи та математичні моделі, які дозволяють прогнозувати тенденції змін у майбутньому. Такі дослідження вимагають надійних оперативних даних та аналізу статистичних даних з довгострокового періоду, що дозволить зробити обґрунтовані висновки і рекомендації щодо оптимізації технічного обслуговування. 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 системного підходу до забезпечення надійності та оптимальності процесів обслуговування.

6. Проведене дослідження перспектив адаптивізації параметрів систем технічного обслуговування вантажних суден показало, що на сьогоднішній день оцінка якості технічного управління судном або групою суден зазвичай базується на аналізі рівня витрат на технічну експлуатацію та тривалості експлуатаційного періоду. Однак цей аналіз залишає поза увагою ефективність системи технічного обслуговування для окремих механізмів або пристроїв через відсутність відповідної методики. Судновий персонал, такий як старший або другий механік, змушений дотримуватися стандартного плану-графіку технічного обслуговування, що містить загальну інформацію про конфігурацію системи технічного обслуговування для конкретного механізму. Загроза збільшення обсягу робіт свідчить про погіршення ситуації. У цьому контексті стає наочним необхідність створення пакету прикладних програм для проведення такого аналізу та формування відповідних рекомендацій. Ці програми повинні стати невід’ємною складовою суднової інформаційної системи технічного обслуговування, наприклад, через поєднання систем ACMS та ShipDiMRO. Вони мають забезпечувати технічному відділу судноплавної компанії або судновому персоналу можливість приймати коригувальні рішення щодо обсягу, періодичності технічного обслуговування, контролю технічного стану тощо відповідно до внутрішніх положень компанії щодо узгодження та виконання коригувальних заходів.

Матеріали розділу 1 опубліковано в джерелах [410, 412, 413, 414, 415, 440, 441].

РОЗДІЛ 2
МЕТОДОЛОГІЯ РОЗРОБКИ КОМПЛЕКСНИХ СПОСОБІВ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ СИСТЕМ ТЕХНІЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ ВАНТАЖНИХ СУДЕН

Під системою технічного обслуговування (ТО) вантажних суден слід розуміти сукупність взаємозв'язаних елементів: об'єкта ТО (судна), засобів ТО, виконавців ТО, документації (план ТО) необхідних для підтримки і відновлювання якості суднових технічних засобів і конструкцій (або їх елементів), які взаємодіють з метою забезпечення необхідних рівнів надійності і готовності об'єкта ТО до технічного використання (плавання) [95].

Цифрові стратегії – це планові та організовані підходи до використання цифрових технологій з метою досягнення конкретних цілей або розв'язання конкретних завдань [431]. Це може включати, але не обмежується:

1. Діджиталізація процесів – перехід від ручних методів до автоматизованих, що залучає цифрові технології [368];

2. Використання аналітики – збір та аналіз великих обсягів даних для підтримки прийняття рішень [182];

3. Моделювання та симуляція – використання цифрових двійників, цифрових тіней або інших цифрових моделей для прогнозування та оптимізації [377];

4. Цифрова взаємодія із стейкхолдерами – використання онлайн платформ, мобільних додатків тощо для покращення досвіду стейкхолдерів [233];

5. Інтеграція технологій – з'єднання різних систем та платформ для створення цілісних рішень [386].

Метою даного розділу є детальний аналіз задачі технічного обслуговування вантажних суден та виклад основних підходів, що становлять основу дослідження систем технічного обслуговування для цих суден і суднових технічних засобів. Основна увага приділяється розгляду та обґрунтуванню можливих допущень, які дозволяють розробляти ефективні алгоритми та програми для оцінки і підвищення ефективності систем технічного обслуговування вантажних суден, зокрема використовуючи цифрові стратегії.

Основним критерієм успішності таких алгоритмів та програм є їх швидкість і точність, що дозволяє використовувати їх у пошуку оптимальних (або субоптимальних) рішень для типових експлуатаційних задач в галузі технічного обслуговування вантажних суден. Важливо використовувати цифрові стратегії, які здатні забезпечувати аналіз великих обсягів даних та приймати обґрунтовані рішення на основі наукових принципів.

Зазначений підхід до дослідження технічного обслуговування вантажних суден передбачає системний підхід до проблеми, враховуючи інтеграцію різних складових частин системи. Аналіз взаємозв'язків та впливу різних факторів на ефективність обслуговування дозволяє забезпечити оптимальний рівень ресурсного, часового та вартісного забезпечення технічного обслуговування вантажних суден.

Таким чином, застосування цифрових стратегій та системного підходу у дослідженні технічного обслуговування вантажних суден забезпечує високу ефективність та оптимальність обслуговування, що є важливими аспектами для успішної експлуатації і довготривалого функціонування вантажних суден [431].

Метод технічного обслуговування та ремонту – це сукупність технологічних та організаційних правил виконання технічного обслуговування та ремонту, а також правил щодо визначення обсягів та періодичності робіт, які забезпечують підтримку необхідного рівня технічного стану та надійності об'єкта [283]. Залежно від характеру інформації про надійність та технічний стан об'єктів, що використовується для призначення періодичності та обсягу технічного обслуговування та ремонту, розрізняють наступні методи технічного обслуговування та ремонту техніки:

1. Регламентований,
2. За відмовами з контролем рівня надійності;
3. За станом з періодичним контролем технічного стану;
4. За станом з неперервним контролем параметрів.

На практиці частіше за все використовуються комбінації методів, і значно рідше вказані методи в чистому вигляді. Найбільш поширеним варіантом комбінованого методу є застосування послідовності оглядів та ревізій, коли фактично встановлюється крайній термін виконання ревізії, який не може бути пізніше, а за

результатами проміжного огляду може бути прийнято рішення про позапланову ревізію або внесені зміни в режим використання об’єкта.

2.1 Наукові основи підвищення ефективності систем технічного обслуговування вантажних суден на основі цифрових стратегій

В сучасних умовах і викликах функціонування морського транспорту виникає загострена потреба в оптимізації систем технічного обслуговування вантажних суден для забезпечення їх надійності, ефективності та безпеки плавання [153]. Наявність низки факторів, таких як непланові поломки, затримки постачання, великі витрати та недостатнє використання сучасних технологій, ставить під загрозу нормальний режим експлуатації суден та призводить до серйозних економічних втрат [81].

Ключові аспекти проблеми:

1. Відсутність ефективної системи передбачення поломок та недостатнє планування ремонтів спричиняють нестабільність у роботі суден та незаплановані зупинки [162];

2. Значні витрати на технічне обслуговування та ремонт, а також недостатньо оптимізоване використання ресурсів, призводять до непереборних фінансових втрат [202];

3. Відсутність сучасних стратегій, застарілі системи моніторингу та управління призводять до обмеженої можливості вчасно виявляти несправності та реагувати на них [220];

4. Ризики для безпеки плавання та навколишнього середовища зростають через неконтрольовані поломки та можливість витоків [304];

5. Недостатня інтеграція та координація між різними аспектами обслуговування суден вимагає впровадження нових підходів для оптимізації процесів [223].

Ефективне технічне обслуговування вантажних суден є критичним для підтримання їх операційної діяльності, конкурентоспроможності та безпеки. Впровадження цифрових стратегій та оптимізованої структурно-логічної схеми може вирішити наведені вище проблеми та забезпечити більш плавний режим роботи суден, зниження витрат та покращення якості обслуговування.

2.1.1 Формування систем технічного обслуговування вантажних суден за рахунок інформаційного моніторингу їх фактичних параметрів і цифрових стратегій технічного обслуговування

Формування науково-технічної проблеми підвищення ефективності систем технічного обслуговування вантажних суден на основі цифрових стратегій технічного обслуговування за допомогою інформаційної автоматизованої системи «ACMS» і прескриптивного обслуговування у складі автоматичної інформаційної системи «ShipDiMRO» доводить перспективність масового впровадження цих методів і технологій для підвищення ефективності операцій з експлуатації вантажних суден та їх функціональних систем. Таке застосування визначає шляхи подальших досліджень та розроблення комплексних підходів до забезпечення безпеки водного транспорту, включаючи аспекти безпеки транспортних засобів, екологічної безпеки та інші аспекти.

Подальший розвиток інтелектуальних стратегій технічного обслуговування, базуючись на системах «ACMS» та «ShipDiMRO», забезпечує можливість підвищення ефективності контролю за технічним станом суднових технічних засобів, конструкцій і суден в цілому. Це дозволяє виявляти закономірності змін параметрів стану в процесі експлуатації, розробляти методи та засоби діагностування та прогнозування технічного стану суднових технічних засобів вантажних суден, сприяючи високій ефективності їх технічного використання [419].

З метою задоволення вимог процесу перевезень вантажів та пасажирів, важливо, щоб сучасні вантажні судна, їх технічні засоби і конструкції, як складні системи ергатичних та інженерно-технічних систем, відповідали сукупності високих стандартів, що стосуються якості експлуатації, безпеки використання, надійності, безвідмовності, ефективності та функціональності. Серед цих вимог вагоме місце займають неодмінно властивості технічної придатності, економічності, технічної справності, надійності, адаптації до різних умов експлуатації, безпеки використання, екологічної безпеки, комфортності, ергономічності тощо. Всі перераховані системні властивості вантажних суден, в більшості, залежать від поточної системи технічного

обслуговування, в умовах експлуатації, суднових технічних засобів, конструкцій і судна в цілому з урахуванням житлових і службових приміщень.

Концепція підвищення ефективності систем технічного обслуговування вантажних суден, ґрунтована на використанні цифрових стратегій технічного обслуговування, представляє собою складний та багатофакторний системний підхід. Серед ключових компонентів зазначеної концепції слід виокремити наступні складові: інформаційну і управлінську (виконавчу), які функціонують у взаємодії в системному контексті. В існуючих дослідженнях раніше не розглядався підхід до формування структури вирішення проблеми підвищення ефективності систем технічного обслуговування вантажних суден на основі цифрових стратегій технічного обслуговування в умовах ITS, з врахуванням аналізу параметрів технічного стану суден на всіх етапах їх життєвого циклу, включаючи як стадію проектування, так і стадію реальної експлуатації в різних умовах.

Інформаційна складова процесу підвищення ефективності систем технічного обслуговування вантажних суден на основі цифрових стратегій базується на процесах, методах і засобах інформаційного дистанційного моніторингу параметрів фактичного технічного стану суднових технічних засобів, конструкцій і показників ефективності системи ТО вантажного судна в умовах експлуатації, здійснення дистанційної ідентифікації, моніторингу, діагностування і прогнозування параметрів технічного стану суднових технічних засобів і показників ефективності системи ТО від сучасної інформаційної автоматизованої системи «ACMS» в умовах ITS [120, 415].

Управлінська (виконавча) складова процесу підвищення ефективності систем технічного обслуговування вантажних суден формується з процесів складових елементів цифрових стратегій на основі прескриптивної аналітики, що застосовується на різних етапах функціонування вантажного судна у життєвому циклі. Серед цифрових технологій управлінського забезпечення виділяємо прескриптивну аналітику у поєднанні із цифровими моделями, цифровими тінями і цифровими двійниками з метою оптимізації параметрів системи ТО [413].

Вихідні дані аналізу параметрів системи ТО вантажного судна наведено у Додатку М5.

Для більш наочного представлення параметрів системи ТО їх було проаналізовано за методом 5W1H (Рисунок 2.1):



Рисунок 2.1 – Аналіз параметрів системи ТО вантажного судна методом Кіплінга (5W1H)

Who (Хто). Відповідальні особи – хто відповідає за планування, виконання та контроль ТО? Виконавці – хто безпосередньо виконує роботи по ТО?

What (Що). Обсяг робіт – які конкретно завдання і процедури входять у ТО? Ресурси – що необхідно для проведення ТО (запасні частини, обладнання, інструменти)?

When (Коли). Частота – як часто проводять ТО? Терміни – у яких часових рамках проводяться планові та непланові роботи?

Where (Де). Локація – де фізично проводяться роботи по ТО? Майстерня/База – де зберігаються матеріали та інструменти для ТО?

Why (Чому). Цілі – для яких цілей проводиться ТО (підтримка функціональності, безпеки, ефективності)? Показники ефективності – за якими критеріями оцінюється успішність ТО?

How (Як). Процедури – яким чином проводяться роботи по ТО (інструкції, стандарти)? Контроль – як здійснюється контроль якості та ефективності робіт?

Для забезпечення управлінської (виконавчої) складової процесу підвищення ефективності систем технічного обслуговування вантажних суден прийнято повноту різних станів балансу, за допомогою дослідження яких існує можливість виявити невикористані «резерви» в системі організації технічного обслуговування.

Концепція гарантування підвищення ефективності систем технічного обслуговування вантажних суден на основі цифрових стратегій передбачає уточнення для суднових технічних засобів, конструкцій і судна в цілому, в умовах ITS, наступних понять:

- інформації про фактичний технічний стан суднових технічних засобів, конструкцій і судна в цілому, методів і засобів її реалізації, а саме її дистанційне збирання в умовах експлуатації, оцінку, перевірку відповідності тощо;

- інформації про оптимальні параметри системи ТО, засоби для їх забезпечення, критерії оцінювання характеристик і показників ефективності системи ТО та визначення взаємозв’язку між ними, на основі яких формуються шляхи, методи і засоби їх реалізації при вирішенні конкретних науково-технічних задач.

Крім цього концепція передбачає, для вирішення проблем і поставлених задач, формування і застосування цифрових стратегій на основі «ACMS» і «ShipDiMRO» для підвищення ефективності експлуатації вантажних суден та їх функціональних систем в умовах експлуатації.

Сучасні підходи, які використовуються при управлінні системами технічного обслуговування вантажних суден та їх суднових технічних засобів, потребують чіткої класифікації показників ефективності систем ТО. В даний час наявний широкий спектр таких показників, і важливо виділити основні, допоміжні та уточнюючі групи показників. Основні показники характеризують систему ТО як складну ергатичну систему, в той час як допоміжні показники концентруються на діяльності окремих

компонентів системи ТО. Уточнюючі показники використовуються для точного визначення напрямків подальшого розвитку конкретних стратегій підвищення ефективності системи ТО вантажних суден. Подібна групова класифікація показників дозволяє більш обґрунтовано впроваджувати їх на практиці та раціонально зменшувати обсяг звітної документації, що надсилається до судноплавної компанії.

Задачу гарантування підвищення ефективності системи технічного обслуговування на основі інформації про фактичні показники ефективності системи ТО вантажного судна можливо виразити як максимізацію оптимізаційної функції (2.3). Ця функція буде залежати від різних показників ефективності, які входять в розширену класифікацію показників системи ТО.

Функція для моніторингу і діагностування:

$$F_{mon} = \omega_1 \cdot P_{main} + \omega_2 \cdot P_{aux} + \omega_3 \cdot P_{clarify}\ , \tag{2.1}$$

де F_{mon} – функція моніторингу і діагностування ефективності системи ТО; P_{main} – основні показники ефективності; P_{aux} – допоміжні показники ефективності; $P_{clarify}$ – уточнюючі показники ефективності; ω – вагові коефіцієнти.

Функція для прогнозування:

$$F_f = \alpha \cdot H + \beta \cdot E\ , \tag{2.2}$$

де F_f – функція прогнозування ефективності системи ТО; H – історичні данні показників ефективності; E – зовнішні фактори, що впливають на ефективність; α, β – вагові коефіцієнти.

Загальна оптимізаційна функція:

$$F_{total} = \gamma \cdot F_{mon} + (1 - \gamma) \cdot F_f\ , \tag{2.3}$$

де F_{total} – загальна функція ефективності системи ТО; γ – ваговий коефіцієнт між моніторингом і прогнозуванням.

Мета гарантування підвищення ефективності системи технічного обслуговування на основі інформації про фактичні показники ефективності системи ТО вантажного судна полягає в максимізації функції (2.3) через налагодження параметрів системи ТО, вибір стратегій, ресурсів, періодичності тощо.

2.1.2 Ефект управління операцією технічного обслуговування

Для того щоб отримати уявлення про управління операціями технічного обслуговування, побудуємо загальну динамічну характеристику процесу перетворення ресурсів $fc(t)$ як суму потоків споживання ресурсів $fb(t)$ та видачі ресурсів $fd(t)$, представлених у вартісних величинах (Рисунок 2.2).

Загальний потік $fc(t)$ операції технічного обслуговування можна представити у вигляді двох потоків: потоку пов'язаних ресурсів $fb(t)$ і потоку $fd(t)$ (Рисунок 2.2), який визначимо як цільовий потік. При цьому потік $fb(t)$ є закритим потоком (площа його може бути визначена), а цільовий потік $fd(t)$ – відкритим потоком (відкритий потік нескінченний).

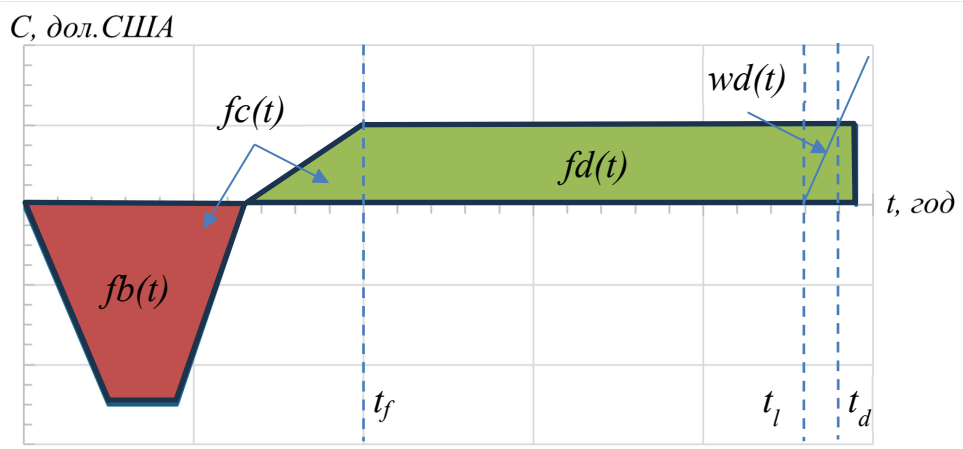


Рисунок 2.2 – Щодо визначення абсолютного потенційного ефекту операції технічного обслуговування

Поточна величина потоку пов'язаних ресурсів визначається виразом:

$$wb(t) = \int_0^t |fb(v)|dv.$$

Поточна величина цільового потоку ресурсів визначається виразом:

$$wd(t) = \int_0^t |fd(v)|dv.$$

Поточна величина потоків – це добуток ($C \cdot$ Час).

Прийнято вважати, що технологічна операція технічного обслуговування завершується в момент рівності вхідних і відповідних їм вихідних продуктів умовної

декомпозиції. Насправді цей момент часу можна охарактеризувати тільки як момент "фізичного" завершення операції технічного обслуговування. Логічно операцію технічного обслуговування можна вважати завершеною тільки в тому разі, коли поточне значення величини цільового потоку $wd(t)$ стане рівним поточній величині потоку пов'язаних ресурсів $wb(t)$.

Момент логічного завершення операції технічного обслуговування визначає час компенсації потоку споживання ресурсів потоком видачі ресурсів. Однак, ця компенсація здійснюється тільки за величиною. Добре видно при розгляді потоку пов'язаних ресурсів $fb(t)$ та результативного потоку $fd(t)$ (Рисунок 2.2) ці потоки рознесені в часі, а отже, часові втрати непоправні. Визначає величину зміщення потоків споживання і віддачі ресурсів в часі функція часової неузгодженості.

Величина ресурсоємності операції технічного обслуговування кількісно дорівнює тричі інтегрованій різниці абсолютних значень сигналів реєстрації величин вхідних і вихідних продуктів процесу технічного обслуговування в порівнянних вартісних величинах на інтервалі від початку технологічної операції до моменту її логічного завершення, причому момент логічного завершення технологічної операції визначається моментом рівності двічі інтегрованих абсолютних значень вартісних величин вхідних і вихідних продуктів процесу технічного обслуговування.

Ефект управління операцією технічного обслуговування забезпечується цільовим потоком $fd(t)$ з визначеним моментом завершенням операції, отже, величина результативного потоку ресурсовидачі операції технічного обслуговування визначається функцією $wd(t)$ (Рисунок 2.3).

$$wd(t) = \int_{v_l}^{v} \left[\int_0^{\varepsilon} fp(\tau)d\tau - \int_0^{\varepsilon} fr(\tau)d\tau \right] d\varepsilon.$$

Абсолютний ефект операції визначимо як інтегральну величину різниці поточних величин потоків видачі та споживання ресурсів. Оскільки $wd(t)$ безперервно наростає, визначимо для будь-якої операції технічного обслуговування момент часу t_d , відносно моменту логічного завершення операції технічного

обслуговування, по відношенню до якого і визначається величина потенційної ресурсовіддачі - абсолютний потенційний ефект (A), визначаємо залежністю:

$$A = \int_{t_l}^{t_d} \left[\int_{v_l}^{v} \left(\int_0^{\varepsilon} |r(\tau)| d\tau \right) d\varepsilon - \int_{v_l}^{v} \left(\int_0^{\varepsilon} |p(\tau)| d\tau \right) d\varepsilon \right] dv,$$

$$v \in [t_l, t_d], \varepsilon \in [0, t_d].$$

де $r(\tau)$ – інформація про ресурси що споживаються, $p(\tau)$ – інформація про ресурси що віддаються, t_d – момент завершення визначення абсолютного потенційного ефекту.

Величина абсолютного потенційного ефекту узгодженої операції технічного обслуговування визначається інтегральною величиною, на інтервалі від моменту логічного завершення технічного обслуговування до встановленого моменту визначення абсолютного потенційного ефекту. Різниці інтегральних величин потоків віддачі та споживання ресурсів, визначених на інтервалі від моменту логічного завершення операції технічного обслуговування до встановленого моменту визначення абсолютного потенційного ефекту, причому поточні величини потоків віддачі і споживання ресурсів, визначені на інтервалі від моменту логічного завершення операції технічного обслуговування до встановленого моменту визначення абсолютного потенційного ефекту.

2.1.3 Ефективність використання ресурсів в операціях технічного обслуговування

Ефективність управління визначається як відношення ефекту технологічного процесу до ресурсоємності процесів, що забезпечили цей ефект [343]. Спираючись на це концептуальне визначення, складемо вираз для визначення ефективності використання ресурсів (ЕВР), у вигляді:

$$E = \frac{\int_{t_l}^{t_d} \left[\int_{v_l}^{v} \left(\int_0^{\varepsilon} |r(\tau)| d\tau \right) d\varepsilon - \int_{v_l}^{v} \left(\int_0^{\varepsilon} |p(\tau)| d\tau \right) d\varepsilon \right] dv}{\int_0^{t_l} \left[\int_{v_l}^{v} \left(\int_0^{\varepsilon} |r(\tau)| d\tau \right) d\varepsilon - \int_{v_l}^{v} \left(\int_0^{\varepsilon} |p(\tau)| d\tau \right) d\varepsilon \right] dv}.$$

Величина ЕВР узгодженої операції технічного обслуговування вантажного судна дорівнює відношенню ефекту операції технічного обслуговування до її ресурсоємності.

Для сфокусованих операцій аналітичний вираз визначення ЕВР має вигляд:

$$E = \frac{(p-r)^2 \cdot (n_d - n_l)^2}{p \cdot r \cdot \left(n_p - n_r\right)^2}.$$

З огляду на те, що $(n_d - n_l) = 1$, рівняння набуде вигляду:

$$E = \frac{(p-r)^2}{p \cdot r \cdot \left(n_p - n_r\right)^2}.$$

Ефективність використання ресурсів (E) операцій технічного обслуговування можна визначити як відношення квадрата різниці сигналів реєстрації вихідних і вхідних продуктів технічного обслуговування у співставних величинах, до добутку квадрата різниці моментів їх реєстрації на добуток сигналів реєстрації вихідних і вхідних продуктів технічного обслуговування у співставних величинах.

2.1.4 Гарантування підвищення ефективності системи технічного обслуговування вантажних суден на основі цифрових стратегій

Базуючись на аналізі різноманітних технічних та експлуатаційних проблем, що систематично виникають під час технічного обслуговування суднових технічних засобів і конструкцій вантажних суден [431], було вирішено забезпечувати підвищення ефективності системи технічного обслуговування не тільки з точки зору максимізації прибутків в експлуатації, а й з обов'язковим гарантуванням знаходження вантажних суден в стані технічної придатності до використання в процесі їх експлуатації.

У контексті технічного обслуговування вантажних суден, цифрові стратегії включають використання цифрових моделей, цифрових тіней, цифрових двійників [243] (Рисунок 2.3) у поєднанні із аналітикою даних (Рисунок 2.4, Рисунок 2.5) для підвищення ефективності технічного обслуговування, прогнозування потреб та визначення оптимальних програм обслуговування та ремонту.

Цифрова модель – автоматизований обмін даними між двома структурами відсутній. Внесення даних для синхронізації здійснюється вручну [243].

Цифрова тінь – існує лише односторонній потік даних від фізичного об'єкта до цифрового аналога. Дані, що надходять від фізичного об'єкта, оновлюють цифровий

об’єкт, але не навпаки. Це вимагає взаємодію між фізичним об’єктом і цифровою моделлю за принципом "людина в циклі" (Human-in-the-loop, HITL) [243].

Цифровий двійник – повністю інтегрований потік даних доступний там, де встановлено двосторонній автоматизований канал передачі даних [243]. Обидва об’єкти перебувають у синхронізованому стані в режимі реального часу, і фізичний об’єкт може автоматично впливати на цифровий об’єкт [377].

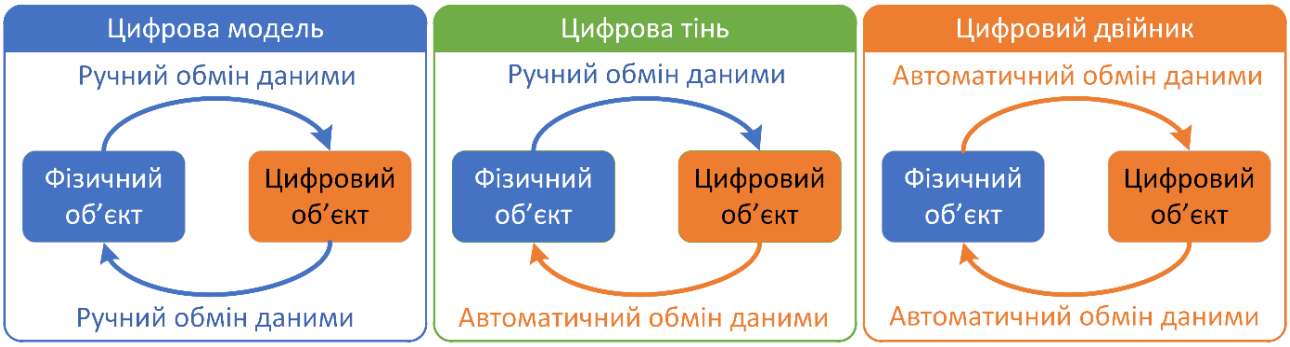


Рисунок 2.3 – Відмінності в топології даних між цифровою моделлю, цифровою тінню та цифровим двійником.

Під час проведення дослідження було розроблено "Класифікацію методів предиктивної (прогностичної) аналітики" зображену на Рисунку 2.4 та опис якої наведено у Додатку М6. Вказана класифікація включає в себе три основні категорії методів: "Машинне навчання / Інтелектуальний аналіз даних", "Ймовірнісні моделі" та "Статистичний аналіз".

Розроблена "Класифікація методів предиктивної (прогностичної) аналітики" є важливим внеском у галузь технічного обслуговування вантажних суден. Вона допоможе науковцям та практикам обирати та застосовувати ефективні методи передбачення подій на основі їх характеристик та специфіки.

Під час проведення дослідження також було розроблено "Класифікацію методів прескриптивної (рекомендаційної) аналітики" зображену на Рисунку 2.5 та опис якої наведено у Додатку М7, яка включає шість основних категорій методів.

Розроблена класифікація (Рисунок 2.5) є важливим інструментом для структурування та розуміння різних підходів до прескриптивної аналітики. Вона

допомагає систематизувати різноманітні методи та вибирати найбільш відповідні для вирішення конкретних завдань.

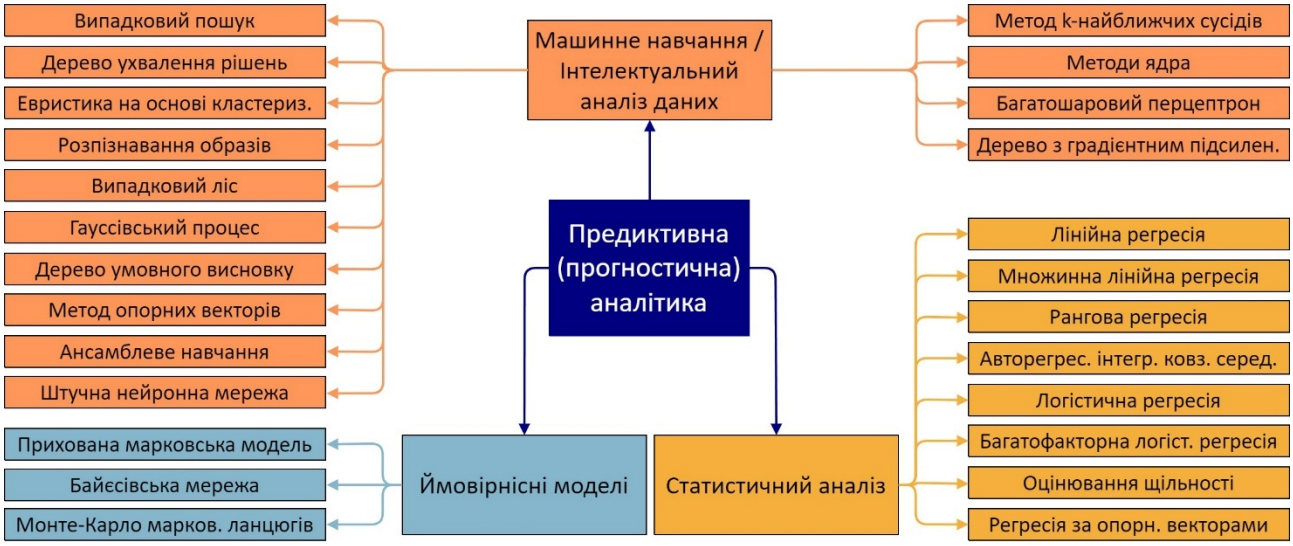


Рисунок 2.4 – Класифікація методів предиктивної (прогностичної) аналітики



Рисунок 2.5 – Класифікація методів прескриптивної (рекомендаційної) аналітики

Класифікація (Рисунок 2.5) має великий потенціал в галузі технічного обслуговування вантажних суден. Вона допоможе дослідникам та практикам вибирати та застосовувати ефективні методи прийняття рішень для оптимізації обслуговування суден та підвищення їхньої ефективності.

На наступному етапі дослідження було виділено ключові аспекти, які мають важливе значення під час розробки та впровадження цифрових стратегій у системи технічного обслуговування. До таких аспектів відносяться точність датчиків та засобів моніторингу, адаптація алгоритмів передбачення поломок до конкретних умов, раціональний розподіл ресурсів для забезпечення оптимального планування обслуговування.

Після цього було здійснено порівняння двох класифікацій (Рисунок 2.4 і Рисунок 2.5). Основною метою цього порівняння було встановлення рівня відповідності цілям та завданням при розробці "Схеми реалізації ідеї і підходу гарантування підвищення ефективності систем технічного обслуговування вантажних суден за допомогою «ACMS» і «ShipDiMRO» на основі цифрових стратегій" яка зображена на Рисунку 2.6.

Проведений аналіз показав, що найбільший рівень доцільності має "Класифікація методів прескриптивної (рекомендаційної) аналітики". Це рішення було прийняте на підставі його відповідності дослідницьким цілям, специфіці задачі підвищення ефективності технічного обслуговування вантажних суден та застосуванням цифрових стратегій. Ця класифікація надає структурований підхід до надання рекомендацій та прийняття рішень у відповідності з різними видами аналітичних методів.

Відповідно до отриманих висновків, ця класифікація є найбільш пристосованою для вирішення проблеми підвищення ефективності систем технічного обслуговування вантажних суден на основі цифрових стратегій.

Обираючи класифікацію (Рисунок 2.5), автор звертаєте увагу на рекомендаційний характер аналітики та висновків, що можуть бути важливими для підвищення ефективності технічного обслуговування вантажних суден. Такий підхід може відігравати важливу роль у вдосконаленні стратегій та прийнятті оптимальних рішень, спрямованих на забезпечення безперебійної та ефективної роботи суден. Отже, на підставі проведеного аналізу автор визнав, що "Класифікація методів прескриптивної (рекомендаційної) аналітики" найкраще відповідає меті створення "Схеми реалізації ідеї і підходу гарантування підвищення ефективності систем

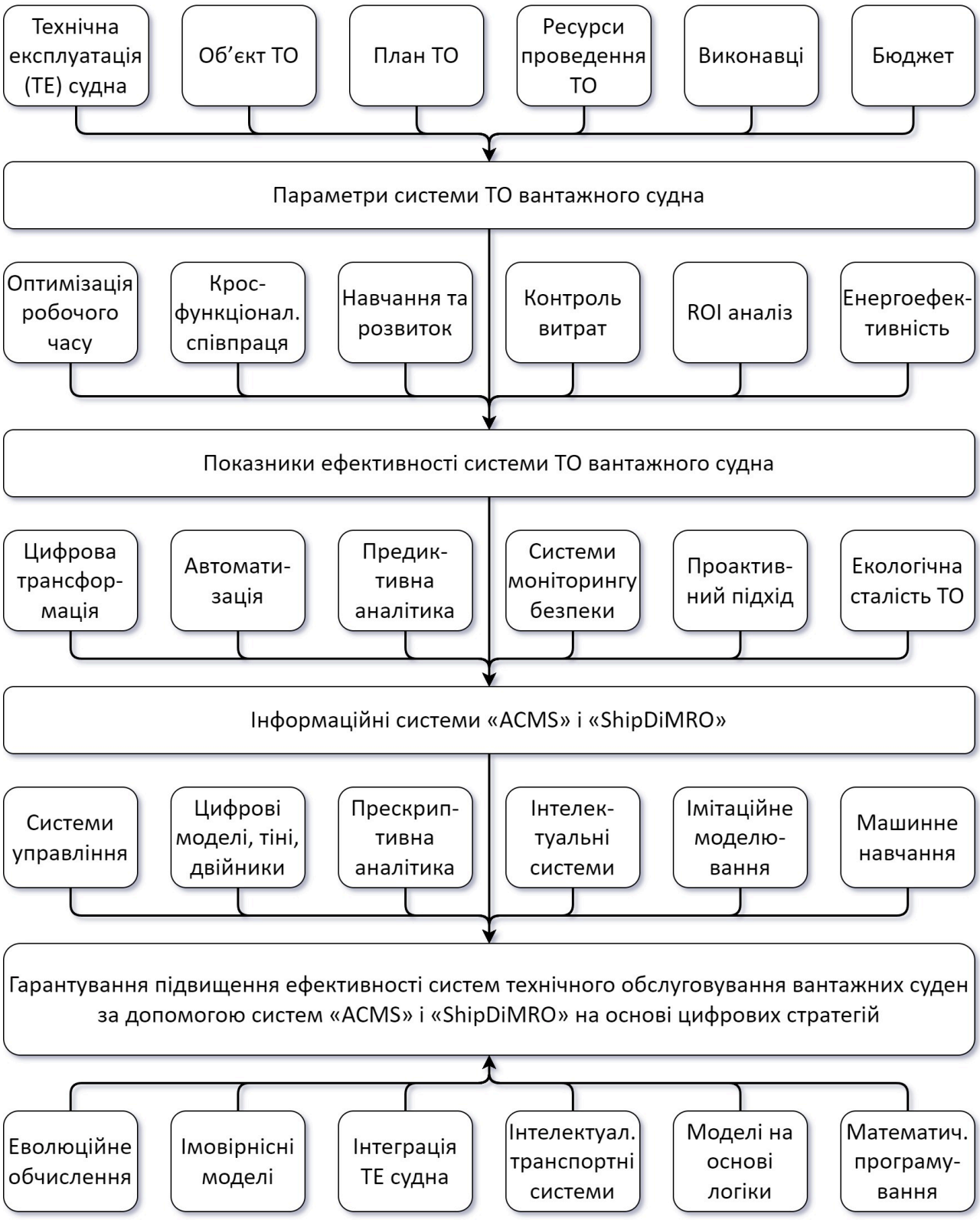


Рисунок 2.6 - Схема реалізації ідеї і підходу гарантування підвищення ефективності систем технічного обслуговування вантажних суден за допомогою «ACMS» і «ShipDiMRO» на основі цифрових стратегій

технічного обслуговування вантажних суден за допомогою «ACMS» і «ShipDiMRO» на основі цифрових стратегій".

На наступному етапі, на основі аналізу та визначення ключових аспектів, було розроблено структурно-логічну схему для впровадження цифрових стратегій у системи технічного обслуговування вантажних суден (Рисунок 2.6).

Схема включає кроки моніторингу параметрів системи ТО, аналізу даних, оптимізації ресурсів та передбачення поломок.

Автор докладно розглянув потенційні переваги та вигоди, які можуть випливати з впровадження розробленої структурної схеми. Серед них – зменшення витрат на неплановий ремонт, підвищення надійності та безпеки суден, збільшення ефективності використання ресурсів.

В завершенні дослідження було розглянуто практичні аспекти впровадження розробленої схеми в реальних умовах експлуатації вантажних суден, а також вказано на можливості подальших досліджень у цій галузі, таких як розробка більш точних алгоритмів передбачення поломок та врахування специфіки різних типів суден.

З врахуванням проведеного аналізу, автор впевнений, що розроблена структурно-логічна схема може послужити основою для реалізації ефективних цифрових стратегій в системах технічного обслуговування вантажних суден, що сприятиме покращенню ефективності, зниженню витрат та забезпеченню безпеки плавання.

2.2 Структура формування і вирішення проблеми управління процесом підвищення ефективності систем технічного обслуговування вантажних суден на основі цифрових стратегій

Питання підвищення ефективності систем технічного обслуговування вантажних суден має високу актуальність, як на етапі їх проектування, так і під час їхнього експлуатаційного періоду. Ця актуальність відображена у ряді наукових досліджень [30, 102, 122, 123, 212, 221, 358, 419]. На Рисунку 2.3 наведена концептуальна схема системної взаємодії, яка стоїть в основі підвищення ефективності систем технічного обслуговування вантажних суден шляхом впровадження цифрових стратегій. Останні визначають підхід до системного

вирішення завдань управління процесом підвищення ефективності систем технічного обслуговування вантажних суден.

Обирання конкретної цифрової стратегії управління системою технічного обслуговування вантажних суден передбачає прийняття рішення щодо вибору та впровадження певних комбінацій цифрових технологій. Цей процес включає коригування плану технічного обслуговування згідно з обраною цифровою стратегією. В даному контексті використовується сучасна інтегрована система «ShipDiMRO» для формування управлінських рішень.

Розгляд варіантів застосування різних цифрових стратегій технічного обслуговування вантажних суден відбувається з урахуванням етапу життєвого циклу судна [333]. Вибір конкретної стратегії базується на підходах до досягнення оптимальних параметрів системи технічного обслуговування, які відображаються у управлінських процесах, здійснюваних в рамках системи технічного обслуговування вантажних суден [394]. Варіативність рішень стосовно оптимізації параметрів системи технічного обслуговування обумовлюється відсутністю єдиної універсальної відповіді [4]. Вибір найбільш підходящого підходу до оптимізації вимагає аналізу з різних точок зору та з використанням різних методологій, що дає можливість обрати оптимальний спосіб дії у конкретних обставинах [57].

З аналізу представленої системи (зображеної на Рисунку 2.7) стає очевидним, що в рамках управління забезпеченням оптимальних параметрів системи технічного обслуговування вантажних суден, використовуючи цифрові стратегії, можна виділити дві важливі взаємодіючі складові цього процесу – інформаційну та управлінську (виконавчу). Інформаційна складова охоплює в собі дистанційне забезпечення процесів ідентифікації, моніторингу, діагностування та прогнозування як показників ефективності системи ТО, так і параметрів технічного стану суднових технічних засобів, конструкцій і вантажних суден в умовах інтелектуальних транспортних систем (ITS). З іншого боку, управлінська (виконавча) складова включає у себе створення та реалізацію цифрових процесів, які сприяють забезпеченню оптимальних параметрів системи ТО вантажних суден в умовах експлуатації.

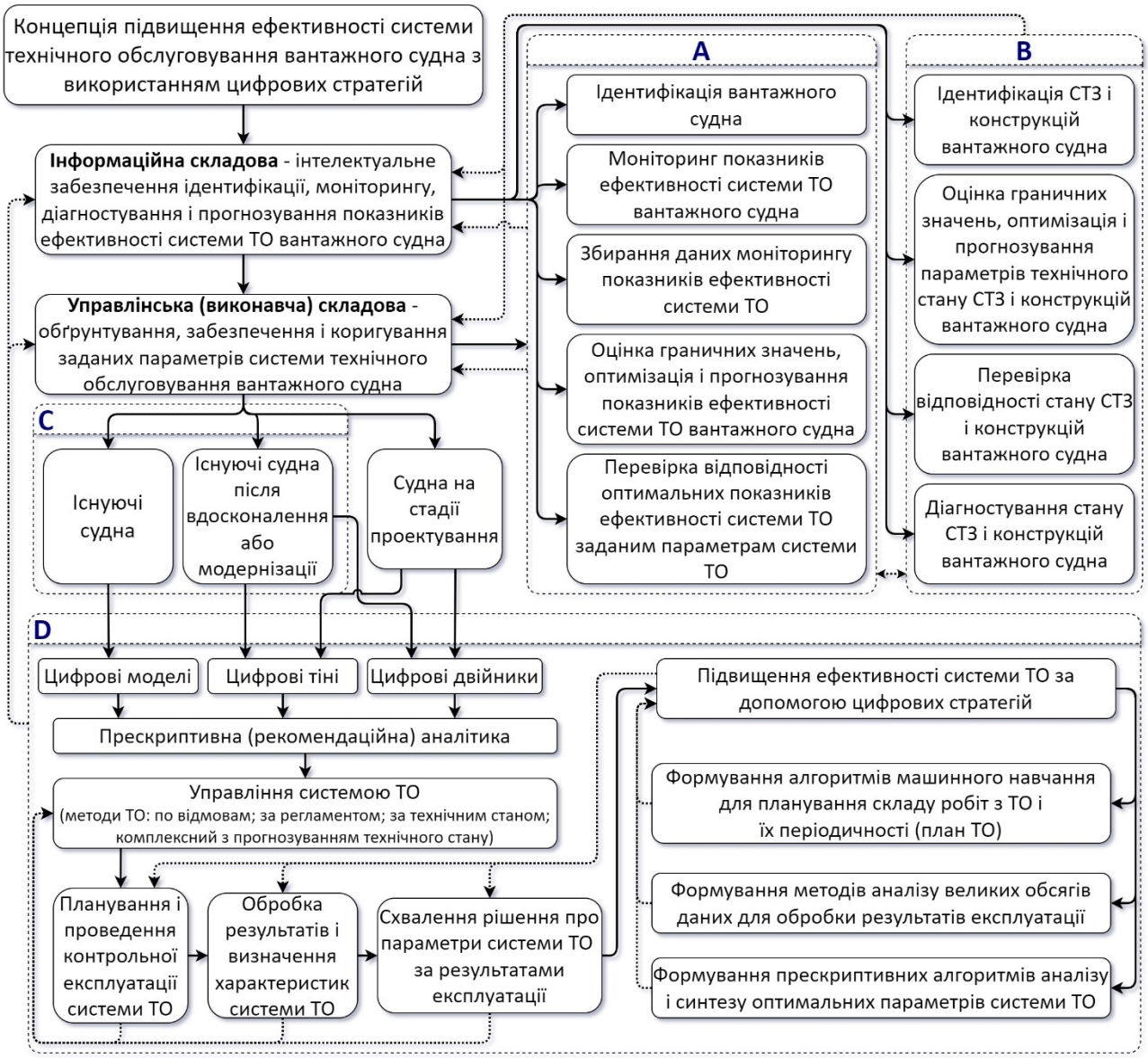


Рисунок 2.7 – Схема системної взаємодії при підвищенні ефективності систем технічного обслуговування вантажних суден на основі цифрових стратегій

Характеристики інформаційної взаємодії, що виявляються в рамках процесів забезпечення заданих показників ефективності системи ТО вантажного судна подано на Рисунку 2.7 (сегменти **A** та **B**). Процеси управлінського (виконавчого) забезпечення заданих параметрів системи ТО вантажного судна (сегменти **C** та **D**) базуються на інформації, яка є відображенням фактичного технічного стану суднових технічних засобів, конструкцій і показників ефективності системи ТО вантажного судна в процесах здійснення їх ідентифікації, моніторингу, діагностування та прогнозування параметрів стану (сегменти **A** та **B**). Процеси ідентифікації параметрів технічного стану суднових технічних засобів, конструкцій і показників ефективності

системи ТО вантажного судна передбачають використання автоматизованої системи контролю і прогнозування технічного стану суднових технічних засобів і конструкцій (ACMS) у поєднанні з системою «ShipDiMRO», яка функціонує в рамках ITS. Зазначені процеси відзначаються збором даних під час моніторингу, здійсненням оцінки граничних значень, а також оптимізацією параметрів технічного стану суднових технічних засобів, конструкцій і показників ефективності системи ТО вантажного судна впродовж тривалого часу. В кінцевій стадії сегмента **A** відбувається перевірка відповідності забезпечення заданих показників ефективності системи ТО вантажного судна заданим параметрам системи ТО цього судна.

Інформаційна складова процесу забезпечення заданих показників ефективності технічного обслуговування вантажного судна, що виконується в сегменті **B**, на додачу до описаних вище можливостей, включає в себе широкий спектр функцій. Серед цих функцій можна виокремити оцінку граничних значень параметрів, оптимізацію та прогнозування параметрів технічного стану суднових технічних засобів, конструкцій та вантажного судна в цілому. Додатково, інформаційна складова реалізує перевірку відповідності визначених параметрів поточного технічного стану заданим параметрам системи ТО і вимогам виробника або власника судна. Однак, крім зазначеного, також відзначається важлива здатність до діагностування стану, використовуючи отримані параметри.

Відповідно до накопиченої інформації у сегменті **A** починає здійснюватися управління параметрами системи технічного обслуговування, як існуючих вантажних суден (сегмент **C**), так і тих, які перебувають на стадії проектування. У сегменті **D** розпочинається формування цифрової стратегії, спрямованої на підвищення ефективності системи ТО, в залежності від того, які цифрові технології доступні для застосування на конкретному етапі життєвого циклу судна. Серед наявних цифрових технологій слід виділити такі: цифрові моделі, цифрові тіні, цифрові двійники, прескриптивна (рекомендаційна) аналітика. Шляхом комбінування цих технологій починає формуватися відповідна цифрова стратегія підвищення ефективності системи ТО, яка згодом впроваджується у конкретний процес управління даною системою [122, 123, 419].

Під управлінням системою ТО вантажного судна розуміється цілеспрямована діяльність, що включає аналіз, обґрунтування, забезпечення і коригування параметрів системи ТО, необхідних для виконання вимог до показників надійності суднових технічних засобів, конструкцій і вантажного судна в цілому. Управління системою ТО здійснюється в незалежності від того, чи застосовано комплексний метод ТО з прогнозуванням технічного стану, чи методи ТО по відмовам, за регламентом або за технічним станом [195].

Процес управління системою ТО включає в себе тріаду характерних послідовних етапів, які відображаються наступним чином: планування і проведення контрольної експлуатації системи ТО [37]; обробка результатів і визначення характеристик системи ТО [268]; схвалення рішення про параметри системи ТО за результатами проведеної експлуатації [83]. На початковому етапі, а саме плануванні і проведенні експлуатації системи ТО, здійснюється прийом вхідних параметрів, які визначають базову або модифіковану систему ТО вантажного судна. Завершивши період контрольної експлуатації, починається наступний етап, в рамках якого виконується обробка отриманих результатів і оцінка сукупності характеристик системи ТО. За результатами цієї оцінки формується сукупність вихідних параметрів системи ТО вантажного судна. Ефективність оцінки параметрів визначається рівнем виконання або якістю програмного забезпечення, застосованими сучасними математичними методами, а також розробленими на цій основі алгоритмами та програмами [324]. На третьому етапі здійснюється обґрунтування відповідності досягнутих параметрів системи ТО вантажного судна вимогам. У випадку відхилень між параметрами системи ТО, виявленими під час контрольної експлуатації, та необхідними параметрами, приймається рішення щодо корекції параметрів. Ця корекція може враховувати організаційні заходи у судноплавній компанії, або може здійснюватися шляхом конструктивних або виробничих змін в технічних засобах судна за допомогою виробника технічних засобів. Наявність зворотного зв’язку, на кожному з трьох етапів процесу управління системою ТО, дозволяє в процесі контрольної експлуатації управляти параметрами системи ТО вантажного судна [211], доводячи їх до необхідних значень або корегуючи для забезпечення необхідних

значень показників надійності суднових технічних засобів. У випадку виконання вимог до параметрів системи ТО вантажного судна, ця система приймається як базова для відповідного екземпляра вантажного судна. Ця ініціатива у свою чергу лягає в основу завершального етапу формування цифрової стратегії, що спрямована безпосередньо на підвищення ефективності системи технічного обслуговування вантажного судна.

Під час синтезу системи ТО за результатами експлуатації важливо виконати оцінку параметрів системи ТО та перевірити їх відповідність вимогам і забезпеченню заданих показників надійності суднових технічних засобів і вантажного судна [256]. У випадку, коли задані вимоги не виконуються, необхідно прийняти рішення щодо конструктивного вдосконалення вантажного судна, або покращення організаційних аспектів та технологій проведення різних видів ТО, або внесення коригувань до параметрів системи ТО з подальшим аналізом оптимальності цих параметрів.

Ціль системи ТО вантажного судна, відповідно до поставлених завдань, полягає у забезпеченні найбільшого можливого періоду перебування судна в стані технічної придатності до використання, з дотриманням строгих вимог до безпеки та регулярності рейсів, та це має відбуватися з мінімальними витратами на ТО [255]. У такому контексті оптимальність параметрів системи ТО може бути оцінена рішенням одного з двох варіантів задач.

Перша задача (2.4) полягає в забезпеченні необхідного значення ймовірності знаходження в стані технічної придатності $\left(P_{ready}\right)$ до використання при максимізації прибутків (g) в експлуатації.

Друга задача (2.5) передбачає досягнення визначених прибутків (g) за максимальної ймовірності знаходження в стані технічної придатності $\left(P_{ready}\right)$ до використання.

Постановки означених задач записують у такому вигляді:

$$max: g(X); P_{ready}(X) \geq P_{ready}^{req}\ ;\ \forall x \in G; \forall P_{ready}^{req} \in [0 \div 1], \tag{2.4}$$

$$max: P_{ready}(X); g(X) \geq C^{lim}\ ;\ \forall x \in G; \forall C^{lim} \in [0 \div \infty], \tag{2.5}$$

де X – вектор параметрів системи технічного обслуговування вантажного судна; P_{ready}^{req} – необхідне значення показника технічної придатності вантажного судна; G – множина припустимих значень параметрів x; C^{lim} – встановлені обмеження на витрати.

У випадку, коли розглядаємо ці задачі (2.4) і (2.5) як параметричні, то множина рішень обох задач еквівалентна, тобто ми можемо вирішувати лише одну з цих задач. Проте, в непараметричному варіанті (з фіксованими обмеженнями), з урахуванням обраного рівня показника технічної придатності, необхідно знайти економічно найвигідніший спосіб її забезпечення. Це пояснюється тим, що при недостатньо обґрунтованих обмеженнях на витрати можна отримати максимальне значення показника технічної придатності, яке не відповідає необхідному рівню. Таким чином, технічну придатність, яка є більш суттєвим показником, слід розглядати як обмеження, в той час як витрати, що є менш суттєвим показником, розглядаються як цільова функція. У подальших розділах буде зосереджено увагу на першому (2.4) варіанті задачі.

Для вирішення задачі умовної оптимізації (2.4) як задачу безумовної оптимізації її потрібно розглядати у такому вигляді:

$$max: g(X);\ \forall x \in \check{G}, \tag{2.6}$$

де $\check{G}$ – множина можливих значень параметрів x, які забезпечують необхідний рівень P_{ready}^{req}.

Аналіз можливих станів вантажного судна в процесі експлуатації показує, що можна виділити з них характерні множини: S^{pros} – множина сприятливих станів, ймовірності яких бажано мати як можна більшими; S^{cons} – множина несприятливих станів, ймовірності яких бажано мати як можна меншими. В такому разі, задачу (2.4) можна представити в різних варіантах, які залежать від обмежень. Так, наприклад, можна націлитись на виконання обмежень ймовірностей знаходження в окремих станах, які входять у множини S^{pros} і S^{cons}:

$$max: g(X); P_i(X) \geq P_i^{req}; i \in S^{pros}; P_i(X) \geq P_i^{req}; i \in S^{cons}; x \in G_{S^{pros}}, \tag{2.7}$$

Або у сумі сприятливих та несприятливих станів:

$$max: g(X); \sum_{i \in S^{pros}} P_i(X) \geq P_{S^{pros}}^{req}; \sum_{i \in S^{cons}} P_i(X) \geq P_{S^{cons}}^{req}; \forall x \in G_{S^{cons}}, \quad (2.8)$$

Показники, на які можна накладати обмеження, не вичерпуються лише переліченими, а також обмеження можна накладати і на інші показники.

Розглядаючи витрати, які потрібно мінімізувати, необхідно враховувати також і можливі обмеження на деякі з ресурсів (наприклад, на кількість обслуговуючого персоналу, або наявні змінно-запасні частини). В випадку таких обмежень, задача (2.4) має вигляд:

$$max: g(X); P_i(\bar{X}) \geq P_i^{req}; i \in S^{pros}; P_i(\bar{X}) \geq P_i^{req}; i \in S^{cons}; \forall x \in G; \quad g_{res}(\bar{X}) \leq g_{res}^{req}, \quad (2.9)$$

де g_{res}^{req} – обмеження на витрати ресурсів, $res = \overline{1, R}$ – види обмежених ресурсів.

Всі варіанти задач (2.7) – (2.9) або їхніх комбінацій можуть бути записані в наступному узагальненому виді:

$$max: g(X); C_m(X) \geq 0; m = \overline{1, M}; \forall x \in G, \quad (2.10)$$

де M – загальна кількість обмежень задачі.

Підвищення ефективності системи технічного обслуговування означає збільшення результативності та оптимізацію процесів, пов’язаних з технічним обслуговуванням та підтримкою технічної придатності вантажного судна [60]. Це може включати зменшення часу зупинок для ремонту, зменшення витрат на запасні частини, підвищення тривалості експлуатаційного періоду обладнання тощо. Усі ці зміни допомагають забезпечити більш якісне та ефективне функціонування судна та знизити витрати на його утримання.

Результативність - це показник того, наскільки ефективно досягаються поставлені цілі або завдання [213]. Це поняття відображає, наскільки успішно досягнуті результати відповідають запланованим або очікуваним результатам. У контексті технічного обслуговування судна, результативність може оцінюватися, наприклад, за кількістю годин ефективної роботи судна між зупинками для технічного обслуговування, витратами на ремонт у порівнянні з бюджетом, зниженням часу зупинок на ремонт тощо. Результативна система технічного

обслуговування досягає максимальних можливих результатів при мінімальних затратах [218].

З метою оцінки ефективності системи ТО вантажного судна, що відбувається на різних етапах її вдосконалення в судноплавній компанії, здійснюється використання розглянутих у Розділі 1 та 3 показників ефективності системи ТО. В якості доповнення до розглянутого матеріалу першого розділу може бути наведений комплексний показник ефективності системи ТО вантажного судна – узагальнений індекс надійності (УІН) [419]. Для розрахунку даного УІН використовуються вже наявні аналітичні моделі, побудовані на основі методів теорії матриць, логіко-ймовірнісних підходів, а також використання байєсівських і мінімаксних оцінок [187].

Для досягнення підвищення ефективності системи ТО важливим є постійний процес удосконалення компонентів, що входять до сукупності параметрів системи ТО. В одному з напрямів підвищення ефективності системи ТО, через застосування цифрових стратегії (сегмент **D**) є вдосконалення коригувальних ланок кожного з трьох етапів процесу управління системою ТО. Це вдосконалення (сегмент **D**) виражається наприклад через розробку і впровадження в практику судноплавних компаній алгоритмів машинного навчання для планування складу робіт з ТО і їх періодичності (план ТО) на першому етапі, методів аналізу великих обсягів даних для обробки результатів експлуатації на другому етапі, прескриптивних алгоритмів аналізу і синтезу оптимальних параметрів системи ТО на третьому етапі (Рисунок 2.7). Результати вдосконалення, через зворотні зв’язки передаються у інформаційну та управлінську (виконавчу) складові процесу забезпечення заданих параметрів і показників ефективності системи технічного обслуговування вантажного судна.

2.3 Основні стратегічні напрямки вирішення науково-технічної проблеми підвищення ефективності систем ТО вантажних суден на основі системи КПТОВС

Розроблення ефективних, безпечних, надійних, екологічних технологій технічного обслуговування, з використанням автоматизованих і автоматичних технологій контролю, прогнозування і управління системами ТО в умовах

експлуатації є основними стратегічними напрямками для вирішення науково-технічної проблеми підвищення ефективності систем технічного обслуговування вантажних суден на основі цифрових стратегій. Ці стратегічні напрямки представлені на Рисунку 2.8 і Рисунку 2.9 для кращого їх уявлення.

Перший напрямок – забезпечення процесу автоматизованого контролю і прогнозування параметрів технічного стану СТЗ і судна в цілому з метою формування оптимального стану технічної придатності до використання в процесі їх експлуатації для підтримання проектного рівня безпеки, енергоефективності і екологічної сталості (Рисунок 2.8), дозволяє вирішити проблеми підвищення ефективності контролю і прогнозування технічного стану СТЗ і судна в цілому і усуває з практики експлуатації вантажних суден рутинні роботи екіпажу по перевірці параметрів технічного стану СТЗ і К, а також використання деяких індивідуальних видів випробувань СТЗ і судна, які додатково забруднюють оточуюче середовище [120, 440].

Другий напрямок – забезпечення процесу автоматичного контролю і прогнозування показників ефективності системи ТО вантажного судна для обґрунтування, забезпечення і коригування заданих параметрів цієї системи ТО (Рисунок 2.8). Надає можливість вирішити проблеми дослідження якості і надійності вантажних суден і їх технічних засобів на стадіях проектування конструкцій і технологій, виробництва й експлуатації. На цьому етапі також вирішуються і деякі проблеми удосконалення тактико-технічних і експлуатаційних характеристик засобів транспорту за рахунок оптимізації параметрів системи ТО [441]. Також, на цьому етапі, відбувається підвищення ефективності використання вантажних суден та надійності роботи СТЗ за рахунок забезпечення оптимізації складу робіт з ТО і їх періодичності.

Третій напрямок - формування оптимальних параметрів системи технічного обслуговування вантажних суден за допомогою відповідних елементів і програмних комплексів для реалізації цифрових стратегій планування, аналізу і синтезу оптимальних параметрів системи ТО з метою підвищення ефективності цієї системи ТО, а також інтелектуалізації процесу управління системою ТО за результатами експлуатації (Рисунок 2.8). Цей напрямок дозволяє вирішити проблеми розроблення

нових і вдосконалення наявних науково-обґрунтованих стратегій, режимів і програм технічного обслуговування та ремонту засобів транспорту, а також вирішити проблеми формування параметрів системи технічного обслуговування вантажних суден на основі цифрових стратегій технічного обслуговування в умовах експлуатації з використанням засобів ITS, для чого потрібно здійснити розробку і формування технічного і програмного забезпечення системи моніторингу, діагностування і можливості прогнозування показників ефективності системи ТО, технічних параметрів стану СТЗ і судна в цілому, а також автоматичної системи корегування заданих параметрів системи ТО, що дозволяють в повному обсязі здійснювати управління системою ТО для підвищення її ефективності [413].

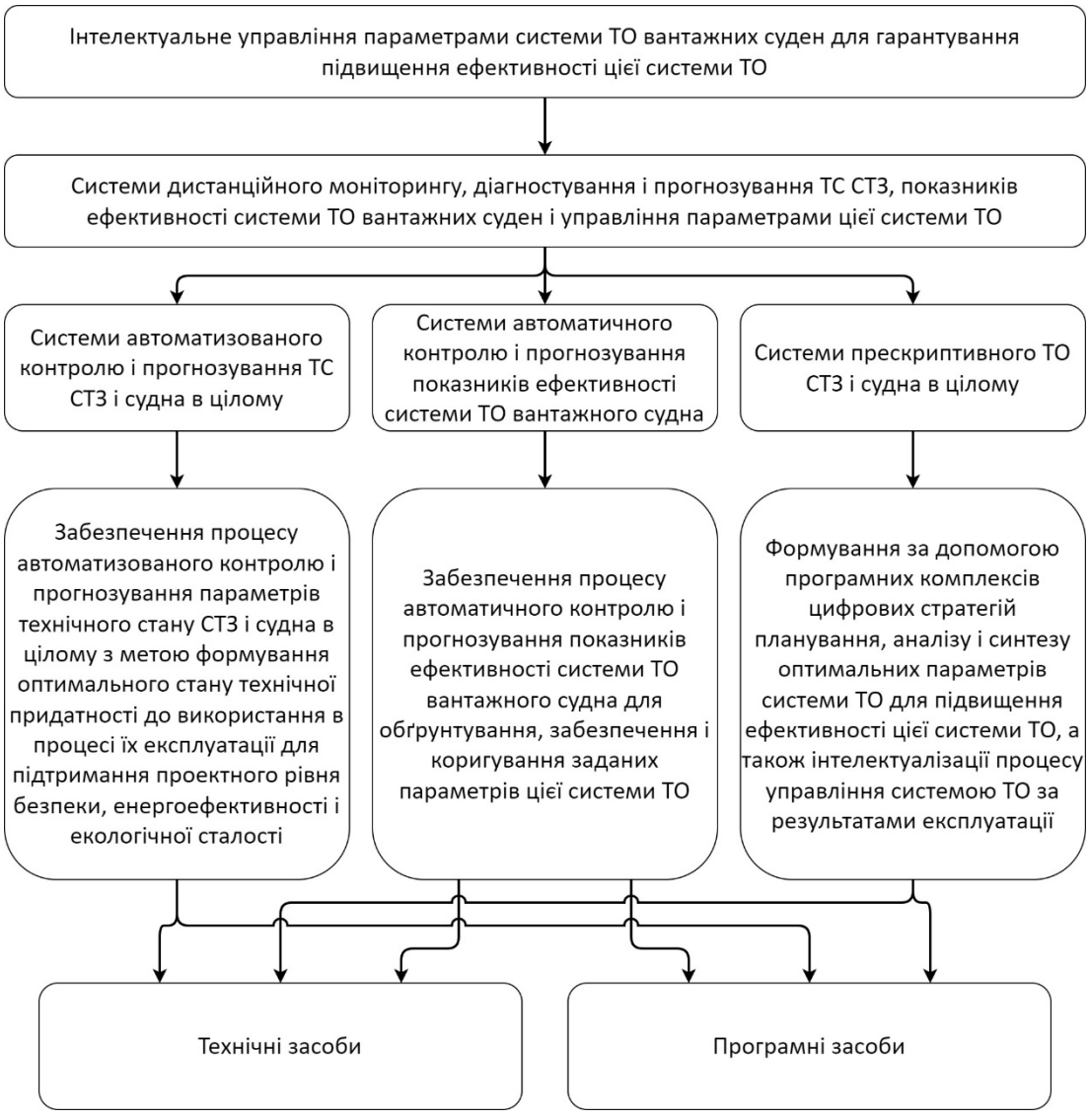


Рисунок 2.8 – Використання системи КПТОВС для гарантування підвищення ефективності цієї системи ТО

Схема процесу формування і дослідження системи КПТОВС для гарантування підвищення ефективності цієї системи ТО, показана на Рисунку 2.9. Вона включає в себе п’ять основних послідовних етапів, які дозволяють здійснювати оптимізацію формування варіантів цифрових стратегій ТО і перевірку відповідності розроблених варіантів цифрових стратегій ТО до встановлених вимог щодо конструкції і технології використання СТЗ і суден в цілому та їх відповідності до умов експлуатації [67, 359]. Широкомасштабне використання методів і засобів підвищення ефективності систем ТО вантажних суден на цифрових стратегій в умовах ITS на основі використання систем «ACMS» і «ShipDiMRO» є одним з перспективних методів підвищення ефективності експлуатації вантажних суден та їхніх функціональних систем.



Рисунок 2.9 – Схема процесу формування і дослідження системи КПТОВС для гарантування підвищення ефективності цієї системи ТО

Крім цього, подальший розвиток стратегій ТО на основі цифрових технологій в умовах ITS за допомогою системи КПТОВС дозволяє підвищити ефективність

контролю технічного стану транспортної техніки, встановлює закономірності змінювання параметрів стану в процесі експлуатації, впроваджує методи і засоби діагностування та можливості прогнозування технічного стану засобів транспорту, що забезпечують високу ефективність їх використання [123].

Актуальність науково-технічної проблеми комплексного підвищення ефективності системи ТО вантажних суден підтверджується вимогами, викладеними в державних стандартах, міжнародних нормативних актах і нормативних актах України, що регулюють відносини у сфері технічного обслуговування вантажних суден, СТЗ та їхніх функціональних систем [435, 436, 437, 439].

2.4 Формування схеми системи КПТОВС для гарантування підвищення ефективності систем технічного обслуговування вантажних суден та принцип її функціонування

В попередньому Розділі 2.3 на Рисунку 2.8 і Рисунку 2.9 показані основні етапи формування системи КПТОВС на основі інтелектуального управління параметрами системи ТО. Для гарантування підвищення ефективності систем технічного обслуговування вантажних суден формуємо схему і складові системи КПТОВС.

Системи КПТОВС з використанням цифрових стратегій для підвищення ефективності системи технічного обслуговування складається з наступних компонентів та процесів:

1. Джерела даних, до яких належать засоби контролю параметрів ТС СТЗіК, що розташовані на судні. Виконують завдання моніторингу усіх суднових технічних засобів і конструкцій. До зовнішніх джерел даних належать гідрометеорологічні дані, сигнали GPS, AIS, Inmarsat та інші зовнішні джерела інформації.

2. Центр обробки даних, який об’єднує локальні суднові сервери, що виконують збирання та обробку даних на борту судна. Хмарні сховища, в яких зберігаються дані і які надають доступ до даних в хмарі. Невід’ємною частиною центру обробки даних є модулі безпеки.

3. Аналітичний центр, який містить в собі алгоритми машинного навчання для планування робіт і періодичності ТО, прескриптивні алгоритми для планування робіт з ТО, модулі машинного навчання для прогнозування. Також цей компонент виконує

аналіз та прогнозування даних для прескриптивного ТО, виконує прескриптивні алгоритми та розробляє стратегії та рекомендації для ТО.

4. Планувальник ТО включає в себе алгоритми оптимізації ресурсів для оптимізації ресурсів та планування ТО. Виконує управління запасами і логістикою.

5. Цифрова панель управління призначена для моніторингу стану системи ТО та управління процесами ТО через інтерфейс для моніторингу всіх систем судна в реальному часі. Виробляє рекомендації для екіпажу, відправляє інструкцій та рекомендацій для ТО екіпажу судна.

6. Модуль комунікації призначений для забезпечення зв'язку між різними відділами екіпажу та між судном та берегом. А також забезпечення зв'язку з береговими службами та іншими суднами для координації дій.

7. Процеси. Збір даних – Збір, обробка, та передача даних з різних джерел до центру обробки даних. Аналіз та прогнозування – використання моделей машинного навчання для аналізу даних та прогнозування стану обладнання. Планування та виконання ТО – створення плану ТО на основі аналізу даних та прогнозів, та його виконання екіпажем судна. Моніторинг та звітність – постійний моніторинг стану обладнання та звітність про виконане ТО. Зворотний зв'язок та оптимізація – збір даних про виконання ТО та їх аналіз для подальшого вдосконалення моделей та алгоритмів. Резервне копіювання даних – для забезпечення безперебійної роботи всієї системи.

Кожен з цих компонентів та процесів взаємодіє та співпрацює з іншими для забезпечення ефективного та оптимізованого прескриптивного технічного обслуговування вантажних суден. На Рисунку 2.10 представлена формалізована схема об'єкту дослідження – системи КПТОВС з взаємодією основних управлінських рішень та їх перетворенням від входу до виходу системи. Дослідження ефективності системи КПТОВС включає: вивчення вартості впровадження та експлуатації системи; оцінка зекономленого часу та ресурсів; розрахунок прибутковості та вивчення корисності в довгостроковій перспективі; оцінка якості та достовірності зібраних даних; аналіз вхідних та вихідних даних для виявлення шаблонів та тенденцій; вивчення взаємозв'язків та кореляцій між різними типами даних;

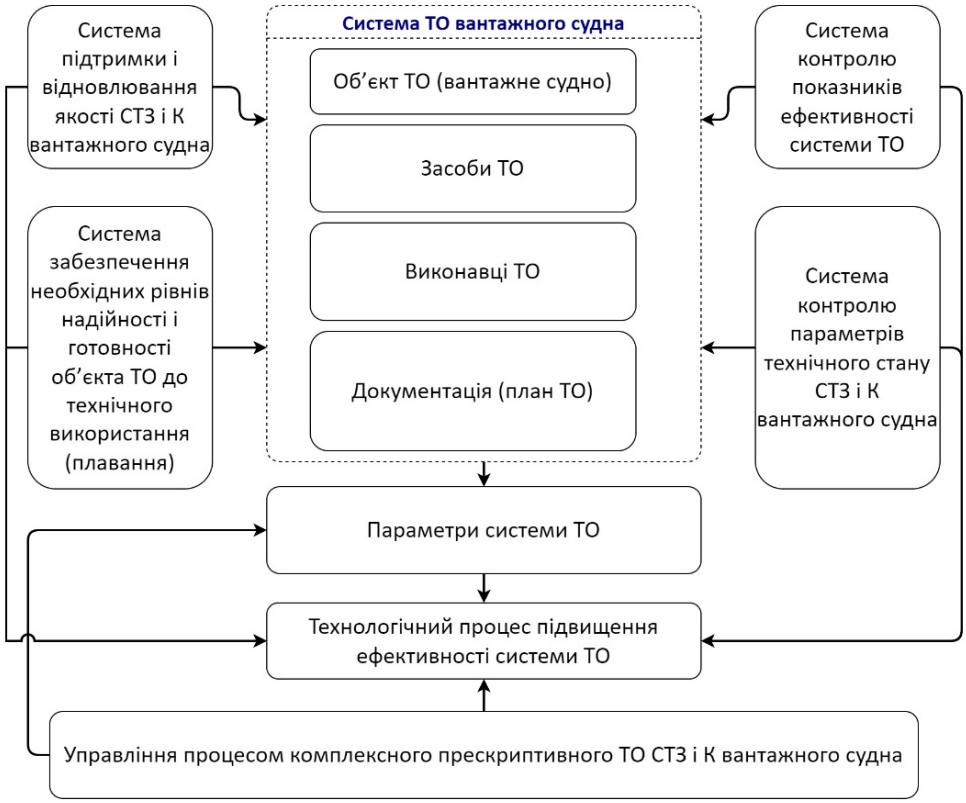


Рисунок 2.10 – Формалізована схема системи КПТОВС з взаємодією основних управлінських рішень

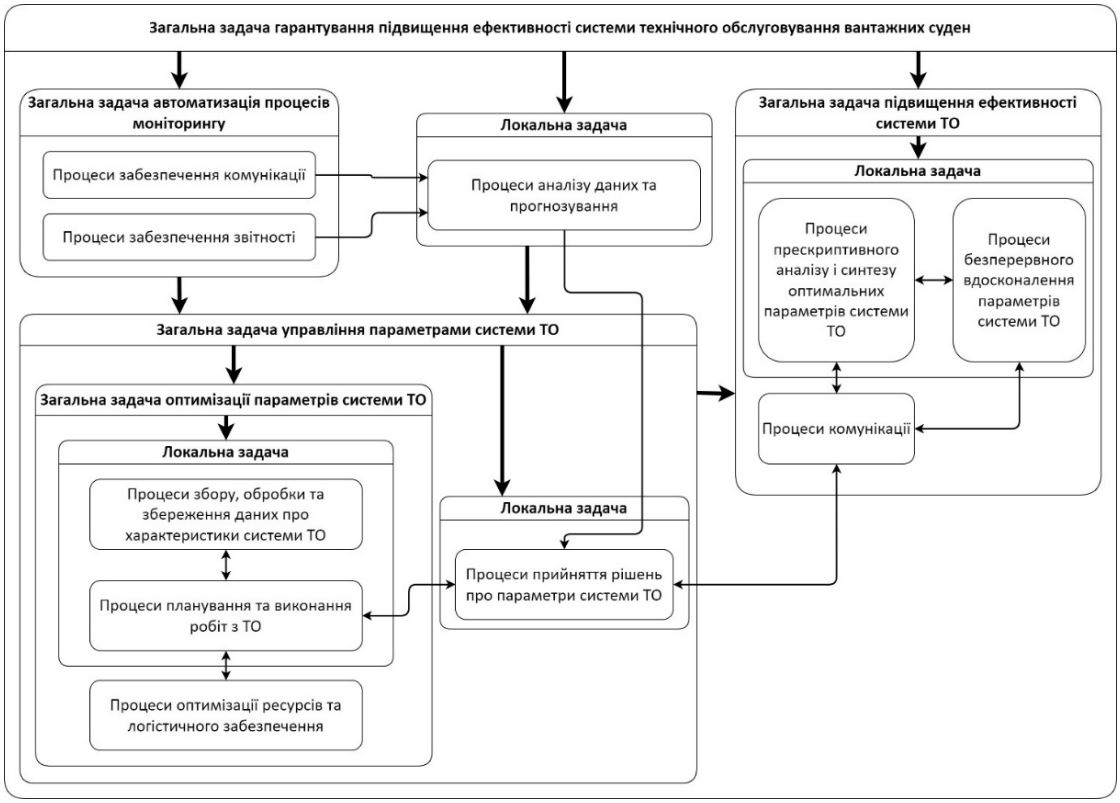


Рисунок 2.11 – Співвідношення загальних і локальних задач в процесі формування системи КПТОВС для підвищення ефективності системи ТО ВС

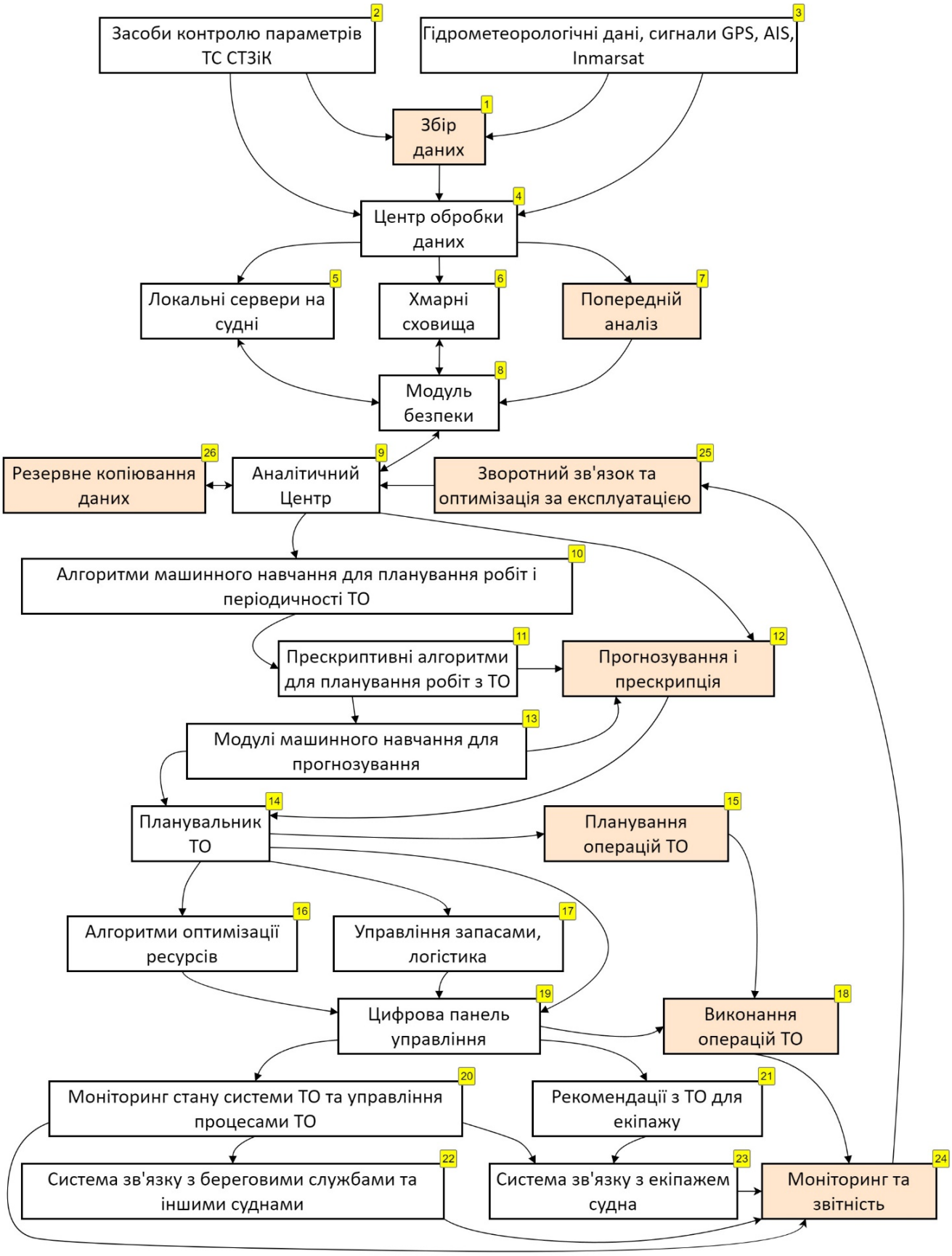


Рисунок 2.12 – Схема системи КПТОВС

регулярний моніторинг та аналіз результатів діяльності системи; створення звітів про ефективність та результативність системи; вивчення впливу системи на загальну ефективність технічного обслуговування судна; аналіз змін в робочих процесах; оцінка впливу системи на продуктивність та ефективність екіпажу; оцінка впливу на інші оперативні процеси на судні; опитування та інтерв'ювання користувачів системи; аналіз відгуків та зворотного зв'язку від користувачів; оцінка задоволеність екіпажу та інших зацікавлених сторін; аналіз процесу адаптації користувачів до нової системи; оцінка ефективності навчальних програм та матеріалів; вивчення скорості та якості адаптації та освоєння системи користувачами; ідентифікація областей для подальшого вдосконалення та оптимізації; розробка та тестування нововведень та удосконалень; аналіз результатів впровадження вдосконалень та оптимізації; аналіз ризиків, пов'язаних із впровадженням та експлуатацією системи; оцінка заходів забезпечення безпеки та захисту даних; вивчення наслідків відмов та збоїв системи; залучення зовнішніх експертів для оцінки ефективності системи; проведення аудитів та інших форм перевірки результатів; отримання зовнішніх рекомендацій та оцінок. Співвідношення загальних і локальних задач в процесі формування схеми системи КПТОВС для підвищення ефективності системи технічного обслуговування вантажних суден показана на Рисунку 2.11. Схема наочно представляє взаємодію локальних задач прескрипції за необхідними секторами впливу в системі ТО за варіантами і їх поєднання в єдину задачу гарантування підвищення ефективності системи ТО вантажних суден за допомогою системи КПТОВС. Реалізація системи КПТОВС суднових технічних засобів вантажних суден показана на Рисунку 2.12 опис якої наведено у Додатку М8.

Система КПТОВС може бути ефективно використана в різних сферах морської промисловості та інших галузях, де присутні схожі вимоги та потреби.

2.5 Загальні підходи до побудови комплексної математичної моделі дослідження ефективності системи КПТОВС в умовах експлуатації

Згідно з викладеними основними етапами формування системи КПТОВС, складеного співвідношення загальних і локальних задач, схеми системи КПТОВС, з метою вивчення їхньої ефективності, було виконано системний аналіз процесу

підвищення ефективності системи ТО вантажних суден в умовах їх експлуатації на всіх відповідних етапах життєвого циклу, як об’єкта комп’ютерного моделювання. Цей аналіз виконувався відповідно до принципів та методик, викладених у джерелах [16, 89, 200, 286, 300] спеціалізованих для розгляду складних процесів.

Під час аналізу етапів життєвого циклу суднових технічних засобів і конструкцій вантажних суден відповідні етапи розглядалися як цілеспрямовані сукупності інформаційно-обчислювальних процесів, моделей і зовнішніх інформаційних систем. Ці процеси та системи забезпечують обробку вхідної інформації на етапах проектування, експлуатації та модернізації суднових технічних засобів і конструкцій вантажних суден, перетворюючи її у проміжну і кінцеву інформацію. При цьому важливим аспектом є спільна обробка різноманітної інформації на вказаних етапах життєвого циклу з метою забезпечення ефективної функціональності всієї системи [133].

Визначальні стратегії вирішення завдання об’єднання експлуатаційної інформації (умови експлуатації), яка стосується показників ефективності системи технічного обслуговування та параметрів технічного стану суднових технічних засобів і конструкцій, за допомогою дистанційного моніторингу з вирішенням проблеми підвищення ефективності системи ТО вантажних суден [123] втілюють принципи індивідуальної і спільної обробки даних вимірювань, з можливістю прогнозування стану та оптимізації параметрів системи ТО в єдину задачу. Алгоритми об’єднання даних спостережень реалізовані в багатьох комплексах засобів автоматизації складних технічних систем [123].

У той же час існують підходи, де методи і алгоритми об’єднання інформації базуються лише на координатних параметрах об’єктів спостереження, що не відповідає принципам спільної обробки різнорідної інформації та може призвести до зниження ефективності цього об’єднання [343].

У відповідності до розвитку математичного та програмного забезпечення інформаційної підсистеми моніторингу суднових технічних засобів і конструкцій, зокрема, розробки методів і алгоритмів об’єднання експлуатаційної інформації з системою оцінювання показників ефективності системи технічного обслуговування,

необхідно провести моделювання процесу просторово-часового об’єднання необхідної експлуатаційної інформації [15].

Комплексна математична модель [29] є теоретичним фундаментом загального завдання підвищення ефективності системи ТО вантажних суден у процесах виконання ТО суднових технічних засобів. Ця модель об’єднує інформацію про параметри технічного стану та управлінські програми, спрямовані на безпосереднє підвищення ефективності системи ТО вантажних суден на основі отриманої інформації. Вона повинна включати наступні компоненти:

1. Інформаційні моделі бортового комплексу ITS суднових технічних засобів:

- Загальну структуру інформаційної автоматизованої системи «ACMS» для моніторингу суднових технічних засобів і конструкцій.
- Моделі інформаційної взаємодії між складовими частинами ITS під час моніторингу суднових технічних засобів і конструкцій.

2. Узагальнену аналітичну, теоретико-графову модель предметної області інформаційної системи оцінювання характеристик системи ТО вантажних суден:

- Здатність прогнозувати показники ефективності системи ТО в умовах їхньої експлуатації, розглядаючи її як складну систему.

3. Математичні моделі для збору і обробки даних:

- Отримання та процес збору даних про технічний стан системи.
- Моніторинг і прогнозування показників ефективності системи ТО.
- Моніторинг і прогнозування параметрів технічного стану суднових технічних засобів і конструкцій.
- Діагностування стану та виявлення несправностей у складі розробленої інформаційної системи.
- Алгоритми прогнозування значень контрольованих параметрів в умовах експлуатації.

4. Математичні моделі управління системою ТО в різних режимах експлуатації вантажного судна.

5. Математичні моделі цифрових стратегій ТО вантажних суден.

6. Узагальнену математичну модель для підвищення ефективності системи ТО з використанням цифрових стратегій в умовах експлуатації.

Під терміном "вхідна інформація" в контексті цієї моделі розуміються важливі дані, які включають у себе:

1. Дані з технічного завдання на проектування або модернізацію, які визначають ключові технічні вимоги та специфікації для системи.
2. Технологічний регламент, який описує послідовність дій та процедур для виконання технічного обслуговування.
3. Нормативно-технічну, проектну, експлуатаційну та ремонтну документацію, яка містить інформацію про технічні параметри, структуру та процедури обслуговування та ремонту системи.
4. Дані, які надходять з зовнішніх інформаційних систем моніторингу, що можуть містити інформацію про поточний стан технічних засобів та конструкцій.

Ця вхідна інформація є основою для аналізу та обробки в рамках моделі та використовується для подальших обчислень та прийняття рішень у сфері технічного обслуговування [16, 89, 123, 200, 286, 300, 343].

Схема комплексної математичної моделі підвищення ефективності системи технічного обслуговування вантажного судна в умовах експлуатації показана на Рисунку 2.12.

Комплексна математична модель для підвищення ефективності системи технічного обслуговування вантажного судна в умовах експлуатації включає два основних блоки моделей, які адаптовані до відповідних етапів життєвого циклу вантажного судна і інтегровані в єдину інформаційну структуру. Ця модель створена з метою формування комплексного підходу до підвищення ефективності системи технічного обслуговування вантажного судна. Вона відіграє ключову роль у вирішенні складних інженерно-технічних та організаційно-управлінських завдань, пов’язаних з технічною експлуатацією вантажного судна на різних етапах його життєвого циклу, включаючи проектування, експлуатацію і модернізацію.

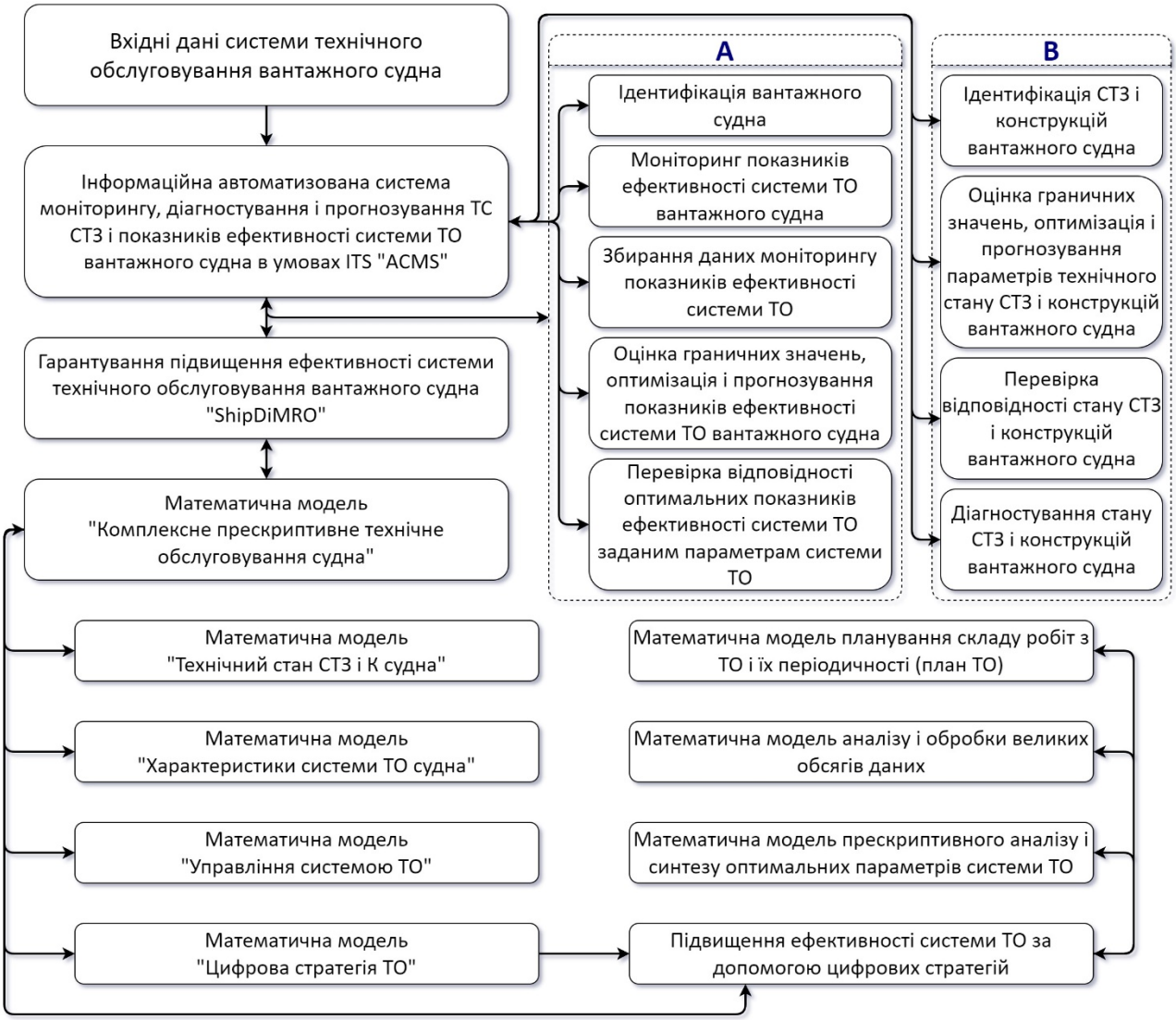


Рисунок 2.12 – Схема комплексної математичної моделі підвищення ефективності системи технічного обслуговування вантажного судна в умовах експлуатації

У даному контексті, створені вихідні модулі можуть ітеративно покращуватися та розширюватися у вигляді моделей об’єкта (2.1, 2.2, 2.3), які використовуються для ефективного вирішення завдань підвищення ефективності системи технічного обслуговування вантажного судна на різних етапах його життєвого циклу [431].

Форма та зміст електронної інформації на вказаних етапах повинні бути представлені таким чином, щоб будь-який учасник процесу прийняття організаційно-управлінських та інженерно-технічних рішень міг виконувати необхідні завдання з високою вірогідністю та мінімальними витратами часу. Організація збору та обробки інформації про експлуатацію вантажних суден у вигляді єдиного структурованого комплексу має забезпечувати наочність та візуалізацію великих обсягів даних. При

цьому, що більше система прийняття рішень, створена відповідно до сформованої моделі, використовується, тим більше накопичується інформації щодо підвищення ефективності системи технічного обслуговування вантажного судна, і тим більше вона стає вигідною з економічної точки зору.

Організація взаємодії між блоками моделей відбувається відповідно до концепції єдиного інформаційного простору [286, 441] або - інтегрованого інформаційного середовища [286, 441]. Принципова блок-схема комплексної моделі (Рисунок 2.13) допускає можливість інформаційного забезпечення описаного процесу як у самостійному режимі, так і через інтеграцію з зовнішніми інформаційними системами. У цьому контексті обмін даними може відбуватися як в режимі імпорту та (або) моніторингу параметрів стану, так і в режимі експорту.

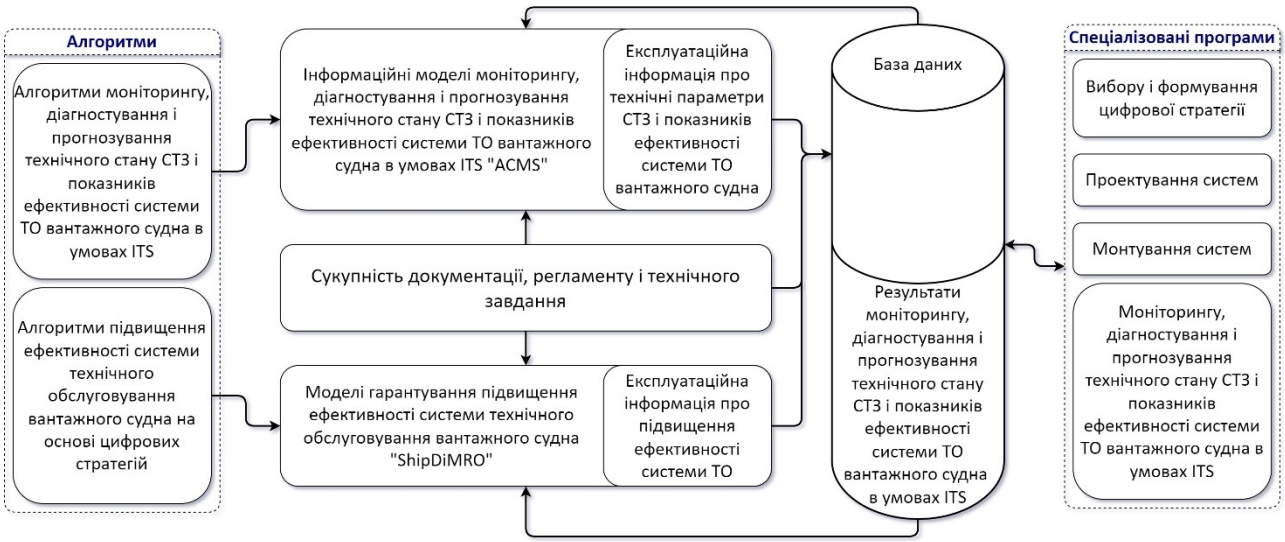


Рисунок 2.13 – Принципова блок-схема комплексної математичної моделі підвищення ефективності системи технічного обслуговування вантажного судна в умовах експлуатації

Розроблена комплексна математична модель підвищення ефективності системи технічного обслуговування вантажного судна відрізняється відзначенням концепцій системного підходу та складних взаємозв’язків між інформаційною моделлю та моделлю підвищення ефективності системи технічного обслуговування на різних етапах життєвого циклу, базою даних та зовнішніми інформаційними системами. Це дозволяє автоматизувати інтелектуальні процедури прийняття рішень, пов’язані з

підвищенням ефективності системи технічного обслуговування вантажних суден та забезпечити системні взаємозв'язки всіх складових системи КПТОВС в єдиному інформаційному просторі. Це забезпечує високу швидкість обміну даними та дозволяє якісно формувати систему технічного обслуговування вантажного судна з урахуванням умов експлуатації.

Подальше уточнення вхідних, вихідних і проміжних даних, а також моделей і алгоритмів підвищення ефективності системи технічного обслуговування вантажних суден буде здійснено на стадії деталізації комплексної моделі. Під час деталізації моделі застосовувався метод декомпозиції, завдяки якому комплексна модель (Рисунок 2.13) була розкладена на дві укрупнені математичні моделі: інформаційну модель і модель підвищення ефективності системи технічного обслуговування вантажних суден. Зазначені моделі докладно представлені в розділах 3 - 5 дисертаційної роботи і містять в собі наступне:

1. Інформаційні моделі моніторингу, діагностування та можливості прогнозування показників ефективності системи технічного обслуговування вантажного судна та показників технічного стану суднових технічних засобів і конструкцій в умовах ITS. Вони розроблялися з використанням методології функціонального моделювання і графічного представлення процесів [50], яка активно використовується у сфері інформаційної підтримки життєвого циклу складних систем на всіх їх стадіях [273, 282, 312]. Також вони базувалися на системному підході [48, 300] та концепції інформаційної підтримки прийняття рішень. Ці моделі докладно описані в розділі 3.

2. Моделі, що забезпечують гарантування підвищення ефективності системи технічного обслуговування вантажних суден, використовуючи передові цифрові технології та системний підхід [48, 300], а також концепцію інформаційної підтримки рішень [282]. Ці моделі докладно описані в розділі 4 і розділі 5.

Моделі мають здатність враховувати існуючі взаємозв'язки, які існують як всередині окремих процедур на кожному з етапів життєвого циклу вантажного судна, так і між цими процедурами на різних стадіях цього життєвого циклу. Це дозволяє систематизувати та автоматизувати процес підвищення ефективності системи технічного обслуговування вантажних суден, розглядаючи його як складний організаційно-технологічний процес.

Висновки до розділу 2

Розроблена і сформована загальна методологія розробки комплексних способів підвищення ефективності системи технічного обслуговування вантажних суден на основі цифрових стратегій, в рамках якої:

1. Створено наукові основи для формування систем технічного обслуговування вантажних суден на основі інформаційної автоматизованої системи «ACMS» і прескриптивного обслуговування у складі автоматичної інформаційної системи «ShipDiMRO» за рахунок інформаційного моніторингу фактичних параметрів системи і цифрових стратегій технічного обслуговування.

2. Створено наукові основи для забезпечення підвищення ефективності системи технічного обслуговування вантажних суден через використання цифрових моделей, цифрових тіней та цифрових двійників, поєднаних із прескриптивною аналітикою даних.

3. Розроблено підхід до системного вирішення проблеми підвищенні ефективності систем технічного обслуговування вантажних суден на основі цифрових стратегій як на етапах проектування, так і на етапах їх використання в умовах експлуатації.

4. Сформульовані основні стратегічні напрямки вирішення науково-технічної проблеми підвищення ефективності систем технічного обслуговування вантажних суден на основі цифрових стратегій за рахунок розроблення ефективних, безпечних, надійних, екологічних технологій технічного обслуговування. Важливою частиною є автоматизовані та автоматичні технології контролю, прогнозування та система КПТОВС в умовах експлуатації.

5. Розроблено формалізовану схему системи КПТОВС з взаємодією основних управлінських рішень. Проведена формалізація співвідношень основних загальних та локальних задач під час формування схеми системи КПТОВС з метою підвищення ефективності системи технічного обслуговування вантажних суден.

6. Реалізовано системну взаємодію між складовими частинами комплексної математичної моделі на різних етапах життєвого циклу судна, забезпечуючи цілісний підхід до вирішення проблеми підвищення ефективності системи технічного обслуговування вантажних суден.

Матеріали розділу 2 опубліковано в джерелах [120, 122, 123, 413, 415, 419, 430, 431, 440, 441].

РОЗДІЛ 3
РОЗРОБКА І ФОРМУВАННЯ ІНФОРМАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ ОЦІНЮВАННЯ СПОСОБІВ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ СИСТЕМ ТЕХНІЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ ВАНТАЖНИХ СУДЕН В УМОВАХ ЕКСПЛУАТАЦІЇ

3.1 Призначення, структура і склад інформаційної системи оцінювання способів підвищення ефективності систем ТО вантажних суден у складі КПТОВС

Системи моніторингу технічного стану суднових технічних засобів, конструкцій та експлуатаційних характеристик системи технічного обслуговування в умовах Інтелектуальних транспортних систем розроблені для забезпечення постійного автоматизованого контролю за технічними параметрами суднових технічних засобів, конструкцій, систем і комплексів вантажних суден. Вони призначені для виявлення відмовних станів і запобігання їх подальшому розвитку. Крім того, ці системи дозволяють налагоджувати системи КПТОВС з можливістю прогнозування технічного стану та обґрунтованого забезпечення оптимальних параметрів системи ТО [123, 413, 431, 441].

Зазвичай такі системи представляють собою складний комплекс бортових і стаціонарних технічних і програмних засобів [171, 361]. Розробка системи моніторингу технічного стану в автономному виконанні та системи моніторингу експлуатаційних характеристик системи ТО вимагає значних інтелектуальних, часових і матеріальних ресурсів [289, 364]. Кожне окреме вантажне судно, обладнане такою системою, потребує інвестувати фінансові ресурси в установку не лише бортових діагностичних комплексів, але й у пристрої обробки інформації, системи зв’язку та сигналізації для виявлення відмовних станів [210, 281].

Науковою та технічною оптимальністю для здійснення інтелектуального моніторингу технічного стану суднових технічних засобів і конструкцій, а також експлуатаційних характеристик системи технічного обслуговування є інтегрована система [123, 197]. Ця система включає в себе поєднання стандартного та додаткового обладнання для інформаційно-діагностичного моніторингу, яке програмно вбудовано

в навігаційно-зв’язковий комплекс судна та виконує функції, пов’язані з супутниковою навігацією.

З метою виконання моніторингу експлуатаційних характеристик системи технічного обслуговування, визначення технічного стану та ідентифікації несправностей в суднових технічних засобах, конструкціях та системах вантажних суден необхідно об’єднати навігаційно-зв’язкові та діагностичні компоненти [163]. Це об’єднання передбачає технологічний і програмний зв’язок між ними та створення розгалуженої системи контролю експлуатаційних характеристик системи технічного обслуговування, а також робочих параметрів окремих суднових технічних засобів, конструкцій, систем і комплексів вантажних суден [391]. При цьому інтеграція бортового навігаційного обладнання з основними технологічними компонентами системи моніторингу технічного стану суднових технічних засобів повинна відбуватися в рамках єдиної концепції мобільної інформаційно-діагностичної системи [102, 123, 431, 441].

Необхідність створення комплексної автоматизованої системи в контексті інформаційних умов Інтелектуальної транспортної системи випливає з необхідності вирішення низки складних завдань, які взаємодіють між собою та обмежені апаратно-програмними можливостями конкретної мікропроцесорної техніки суднових технічних засобів, конструкцій, систем і комплексів [217].

Процеси керування сучасних суднових технічних засобів, систем і комплексів базуються на використанні мікроконтролерів, які володіють розширеним набором засобів зв’язку [271]. Це дозволяє здійснювати збір інформації від стандартних датчиків суднових технічних засобів, систем і комплексів, проводити часткову обробку вимірюваних даних, формувати діагностичні повідомлення та передавати інформацію через діагностичні інтерфейси On-Board Diagnostics - Marine (OBD-M) [118, 120, 122, 123, 415]. Аналіз технологічних рішень, що використовуються на ринку обслуговування вантажних суден, виявив відсутність можливості забезпечення повноцінного аналізу не лише отриманих характеристик системи ТО і параметрів технічного стану суднових технічних засобів, систем і комплексів, а також

прогнозування їхнього стану, особливо в межах питань, що досліджуються у даній дисертаційній роботі.

Актуальність проблеми прогнозування технічного стану та ефективності системи технічного обслуговування вантажних суден у контексті сучасних вимог до систем керування судновими технічними засобами, системами та комплексами, які підлягають комплексному прескриптивному технічному обслуговуванню, беззаперечна. Важливо не лише перевіряти справність СТЗ та ефективність системи ТО на поточний момент (під час контролю), але й забезпечувати їх тривалу працездатність та постійне підвищення ефективності системи технічного обслуговування вантажних суден протягом передбачуваного часового інтервалу [260].

Сучасні інформаційні умови в контексті Інтелектуальної транспортної системи та присутність на ринку сучасних технологій дозволяють використовувати засоби та системи моніторингу та управління, які спроможні функціонувати в режимі реального часу під управлінням операційних систем [291]. Ці фактори надають можливість створити високотехнологічну автоматизовану інформаційну систему для оцінювання способів підвищення ефективності систем технічного обслуговування вантажних суден [52]. Ця система має базуватися на технології баз даних (БД) та використовувати системи управління базами даних (СУБД) [65]. Вона повинна забезпечувати хронологічний контроль позиції судна, моніторингу експлуатаційних характеристик системи технічного обслуговування, технічного стану суднових технічних засобів, систем та комплексів і прогнозування їхнього технічного стану під час експлуатації.

Слід враховувати, що не всі додаткові системи суднових технічних засобів, систем і комплексів включені в стандартну систему керування судновими технічними засобами, натомість вимагають індивідуального автоматизованого або автоматичного управління [148]. В сучасних суднових технічних засобах активно використовують вбудовані системи керування робочими процесами [118, 120, 351, 415]. Для їх ефективної роботи використовують операційні системи з розширеним графічним інтерфейсом, такі як Nucleus RTOS з Qt Application Framework, або інші операційні

системи реального часу, наприклад FreeRTOS [82]. Застосування таких операційних систем дозволяє розробникам створювати різноманітне прикладне програмне забезпечення, включаючи те, в якому використовують сучасні методи математичних обчислень і задачі обробки та прескриптивного аналізу даних. У випадку використання спеціалізованої версії операційної системи реального часу *RTOS, призначеної для інтегрованих платформ [118, 120, 152], розроблене інформаційне забезпечення системи прогнозування може мати структуру, яка аналогічна до тієї, що представлена в даній дисертаційній роботі.

Розроблена інформаційна система моніторингу та прогнозування показників ефективності системи технічного обслуговування вантажних суден виявляє себе універсальною і може бути впроваджена на всіх виду суден, включаючи ті, які не мають вбудованих роз'ємів OBD-M, судна, обладнані OBD-M роз'ємами, а також сучасні і перспективні судна, що використовують операційні системи реального часу (*RTOS), і мають компоненти або інтегровані системи управління судновими технічними засобами.

3.1.1 Розробка і формування структури систем моніторингу СТЗ і К у складі КПТОВС на основі автоматизованого бортового комплексу ACMS

Інтеграція інформаційних технологій у водний транспорт, як в Україні, так і у всьому світі, спільно з сучасними інтелектуальними транспортними системами, надає нові можливості для створення систем моніторингу, які не лише надають технічну інформацію про окремі судна, але й про характеристики їх систем технічного обслуговування [112]. Використання комп'ютерних технологій та мережі Інтернет дозволяє реалізувати інформаційні технології глобального позиціонування (Inmarsat, GPS, AIS, Starlink), радіочастотної ідентифікації, візуальної ідентифікації, мобільного зв'язку (GSM, LTE) та інші [119, 120, 122, 123, 152]. Сучасні інтелектуальні транспортні системи включають автономні бортові мікропроцесорні системи для автоматичного контролю та управління судновими технічними засобами, конструкціями, системами та комплексами, а також традиційні об'єкти суднової електроніки та інші компоненти [335].

Для забезпечення уніфікації підходу до моделювання та створення інформаційної системи моніторингу технічного стану різних суднових технічних засобів, конструкцій, систем і комплексів у контексті інтелектуальних транспортних систем, була розроблена загальна методика побудови такої системи. Ця методика включає в себе структуру системи моніторингу вантажного судна, включаючи комплексну систему прескриптивного технічного обслуговування.

Для створення системи, яка забезпечує підвищення ефективності технічного обслуговування, були визначені принципи та розроблена методика моделювання та побудови інформаційної системи моніторингу суднових технічних засобів, конструкцій, систем і комплексів, в рамках системи КПТОВС. Цей підхід базується на використанні автоматизованого бортового комплексу ACMS (див. Рисунок 3.1) та враховує результати досліджень [118, 119, 122, 123, 413, 440, 441]. Особливості формування структури систем моніторингу СТЗ і К наведено у Додатку М9.

Для впровадження описаних підходів у реальну практику водного транспорту та формування єдиної системи моніторингу суден у складі бортового комплексу інтелектуальних транспортних систем на борту судна, враховуючи раніше проведені наукові дослідження [209, 212, 413, 415, 431], рекомендується [120], в тому числі в комплексній системі прескриптивного технічного обслуговування, передбачити не тільки модуль телематики супутникової навігації та зв’язку, а і замкнути всі інформаційні системи судна: екіпаж, бортову систему контролю з накопиченням даних і засоби автоматичної ідентифікації судна, на виробничі інформаційні системи водного транспорту, геоінформаційні системи оцінювання рівня шкідливого забруднення середовища водних шляхів конкретних водних шляхів, тощо. Підходи до вирішення вказаної задачі для вже існуючих суден, які оснащені вбудованою мережею CANopen – можна знайти на Рисунку 3.2; для суден, що не оснащені вбудованою мережею CANopen – на Рисунку 3.3. Структура, що представлена на Рисунку 3.2, здійснює об’єднання всіх інформаційних потоків з суднових технічних засобів, конструкцій, систем і комплексів через використання вбудованої мережі CANopen судна [53]. В даному контексті застосовується бортова система моніторингу, що відповідає стандарту OBD-M (індустріальний контролер, планшет,

смартфон і інше), а також інтегрована система моніторингу і технічної діагностики, яка включає контролери-сканери-комунікатори (трекери) і, за необхідності, відповідні сенсори для контролю параметрів СТЗ і К.

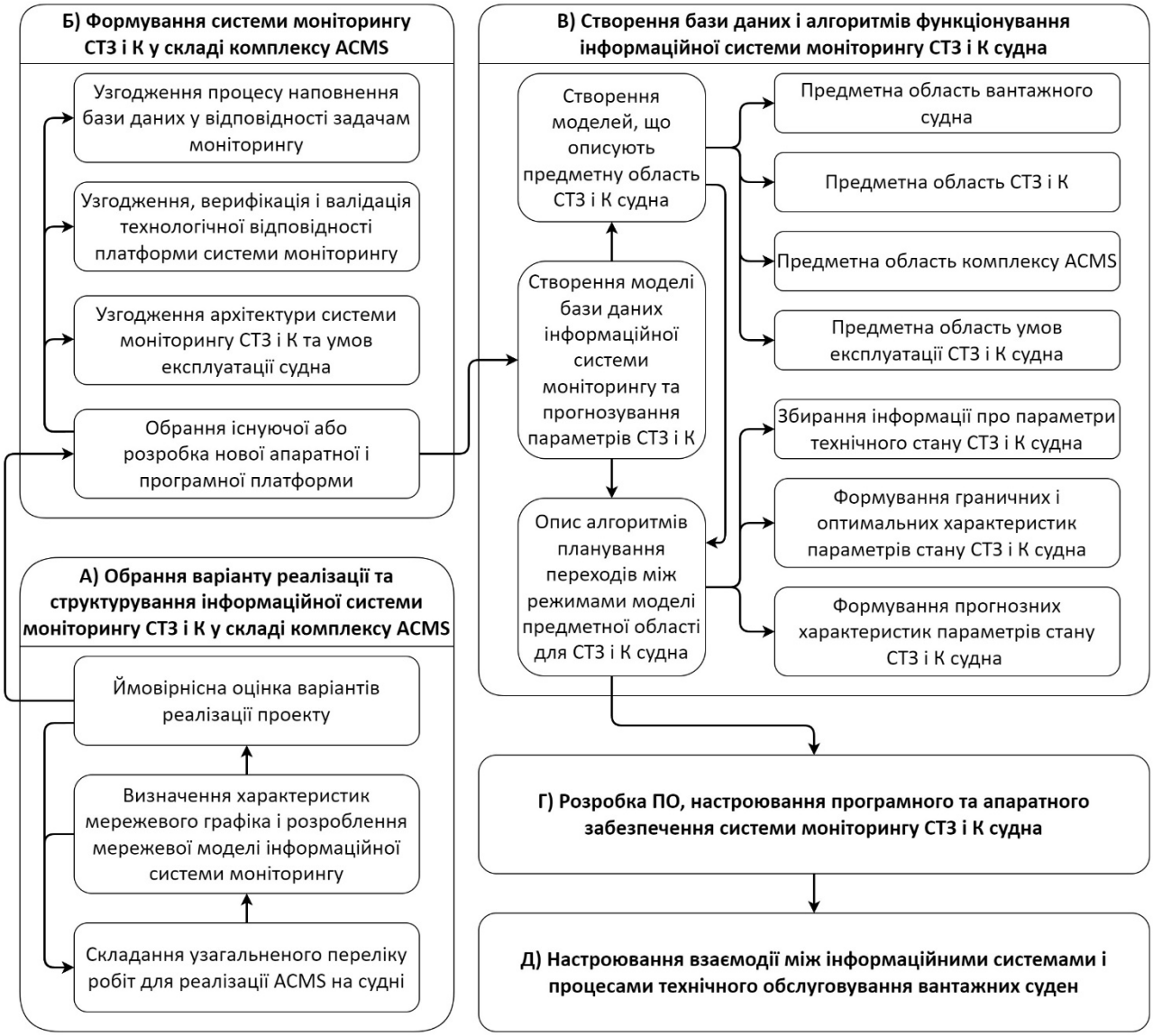


Рисунок 3.1 – Загальна методика моделювання та побудови інформаційної системи моніторингу СТЗ і К системи КПТОВС на основі автоматизованого бортового комплексу ACMS

Враховуючи взаємодію суден з іншими суднами в морських маршрутах, їх ідентифікацію в транспортному потоці можна здійснювати за допомогою системи AIS, яка встановлюється безпосередньо на суднах. Процес передачі інформаційних потоків із суден здійснюється постійно в процесі їх технічної експлуатації та включає в себе використання засобів Inmarsat, GPS, AIS, Internet, Intranet для передачі даних

до віртуальної судноплавної компанії «shipmonitoring.org» – підприємства, яке займається експлуатацією водного транспорту.

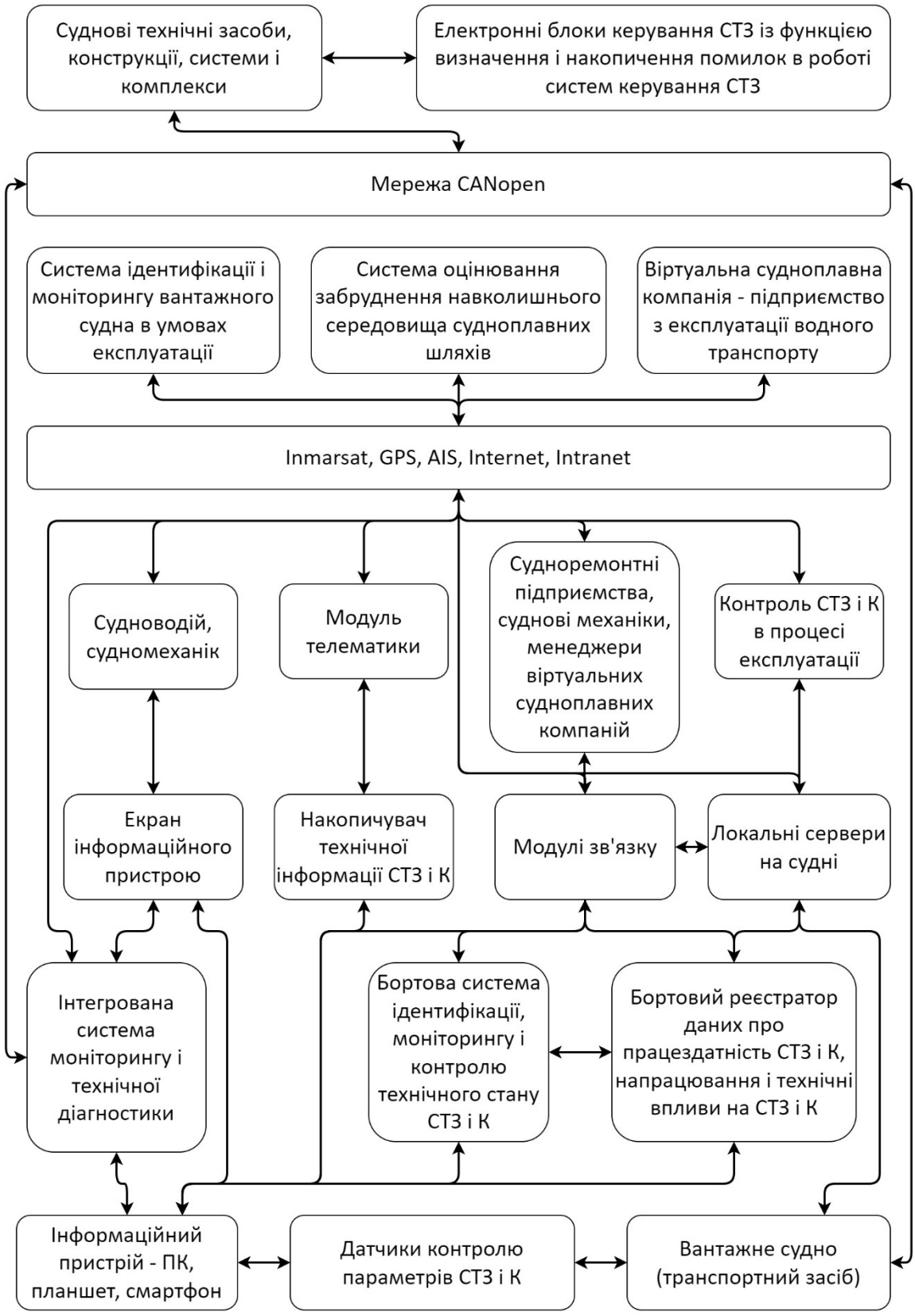


Рисунок 3.2 – Структура системи моніторингу вантажних суден, обладнаних вбудованою мережею CANopen

Особливістю структури, що представлено на Рисунку 3.3, є те, що об’єднання всіх інформаційних потоків відбувається шляхом використання уніфікованих промислових протоколів, які безпосередньо впроваджуються на судні. У цьому випадку для забезпечення функціонування системи використовуються ключові компоненти, такі як промислові контролери, контролери-сканери-комунікатори і відповідні сенсори для моніторингу параметрів суднових технічних засобів, конструкцій, систем і комплексів (за необхідності). Також можливо застосовувати планшети, смартфони і подібні пристрої для досягнення вказаної мети.

Структура судна має передбачати можливість використання модуля зв’язку, локальних серверів і засобів передачі інформаційних потоків із судна до єдиної системи моніторингу вантажних суден. Ця система функціонує аналогічно описаним вище компонентам бортового комплексу інтелектуальних транспортних систем на судні, які оснащені вбудованою мережею CANopen [53].

Процедура обґрунтування комплексу функцій інтелектуальних транспортних систем розроблена для того, щоб служити методичним інструментом для обґрунтування технічних вимог та завдань щодо розробки і створення систем моніторингу, призначених для отримання технічної інформації про окремі судна в транспортному потоці на водному транспорті у всьому світі.

Вирішення зазначеної проблеми, яка може виникнути на етапі створення нових суден (Рисунок 3.4), або експлуатації суден, оснащених сучасними сторонніми комплексними системами управління і (або) вбудованими системами керування судновими технічними засобами, конструкціями, системами і комплексами, які застосовують спеціалізовані версії операційної системи реального часу *RTOS, досягається за рахунок поєднання всіх інформаційних потоків з суднових технічних засобів, конструкцій, систем і комплексів.

Це включає в себе модуль телематики , який слугує для зв’язку з судноводіями та судномеханіками, а також для контролю судна під час взаємодії з транспортними потоками, при виконанні робіт технічного обслуговування, як на судні так і в умовах суднoремонтного підприємства та інші дії, які можуть бути об’єднані в єдину мережу CANopen.

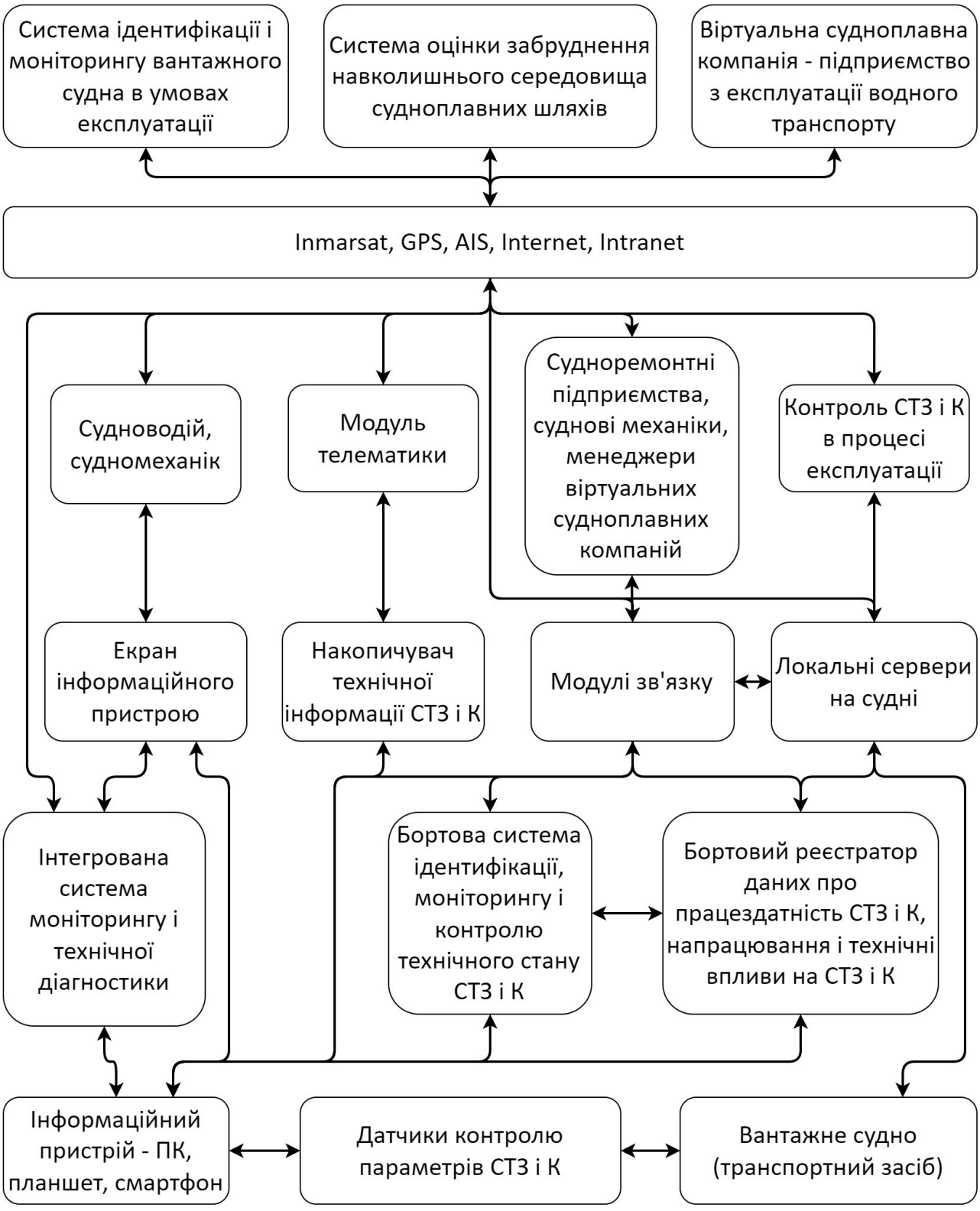


Рисунок 3.3 – Структура системи моніторингу вантажних суден, що не обладнані вбудованою мережею CANopen

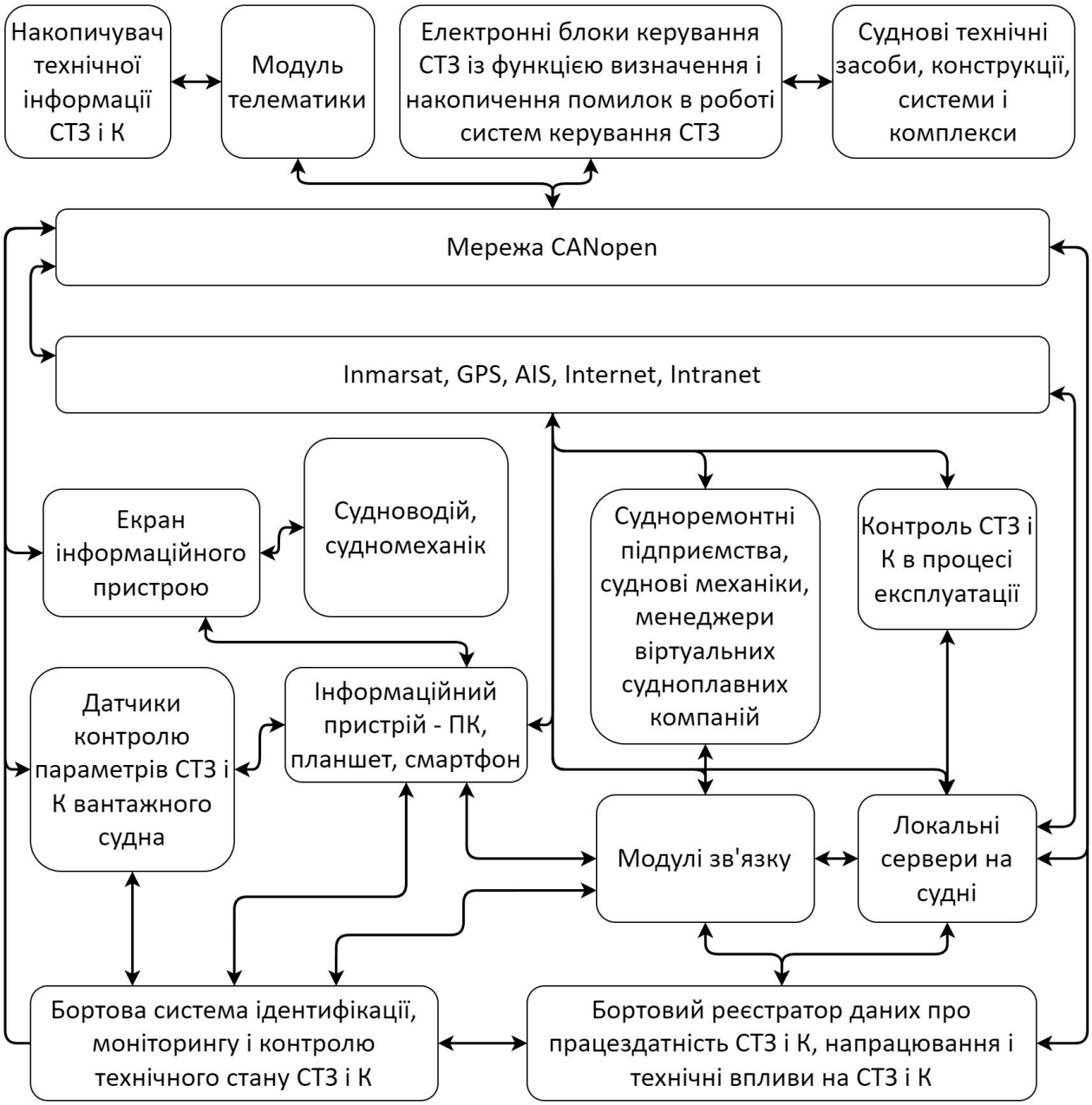


Рисунок 3.4 - Структура системи моніторингу вантажних суден (нових або в експлуатації), обладнаних комплексною системою управління судновими технічними засобами

3.1.2 Розробка і формування структури систем моніторингу показників ефективності системи ТО у складі КПТОВС на основі аналітичного центру ShipDiMRO

Управління параметрами системи технічного обслуговування будь-яких транспортних засобів можливо досягти за умови наявності комплексного підходу та використання передових цифрових технологій [47]. Для досягнення оптимальної

ефективності системи ТО у аналітичному центрі ShipDiMRO реалізовано такі процеси: інтеграція даних, моніторинг в реальному часі, аналітика та прогнозування, віддалене управління, структурування документації, участь екіпажу.

У процесі інтеграції даних забезпечується надходження інформації з різних джерел, включаючи сенсори, моніторингові системи, дистанційне зондування тощо, для забезпечення повної картини стану транспортного засобу [111].

У процесі моніторингу в реальному часі здійснюється постійний моніторинг параметрів судна, що дозволяє оперативно виявляти будь-які аномалії та вживати негайні заходи [274].

У процесі аналітики та прогнозування використовуються аналітичні методи та методи штучного інтелекту для обробки великих обсягів даних, а також для прогнозування змін у стані судна [230].

У процесі віддаленого управління забезпечується можливість віддаленого керування параметрами системи ТО та внесення коригувань для оптимізації роботи безпосередньо в експлуатації [384].

В процесі структурування документації забезпечується ведення актуальної та структурованої документації щодо історії обслуговування та ремонтів, що сприяє відслідковуванню та аналізу попередніх впливів [376].

Процес участі екіпажу визначає важливість навчання та підготовки екіпажу щодо користування технічними засобами системи ТО та швидкого реагування на проблеми, що виникли [26].

Тільки за умови такого комплексного підходу та інтеграції передових технологій системи ТО можна досягти високої ефективності та надійності транспортних засобів.

Забезпечення єдиного підходу до моделювання та побудови інформаційної системи моніторингу експлуатаційних характеристик системи ТО базуючись на яких виконується аналіз показників ефективності системи ТО в умовах інтелектуальних транспортних систем була розроблена загальна методика побудови та структури системи моніторингу показників ефективності системи ТО вантажного судна, включаючи комплексну систему прескриптивного технічного обслуговування. Для

створення системи КПТОВС, яка гарантує підвищення ефективності системи технічного обслуговування, були визначені принципи та запропонована методика моделювання та побудови інформаційної системи моніторингу показників ефективності системи ТО в контексті системи КПТОВС на основі аналітичного центру ShipDiMRO (Рисунок 3.5) по аналогії із методикою створення автоматизованого бортового комплексу ACMS [118, 122, 123, 413, 441, 440].

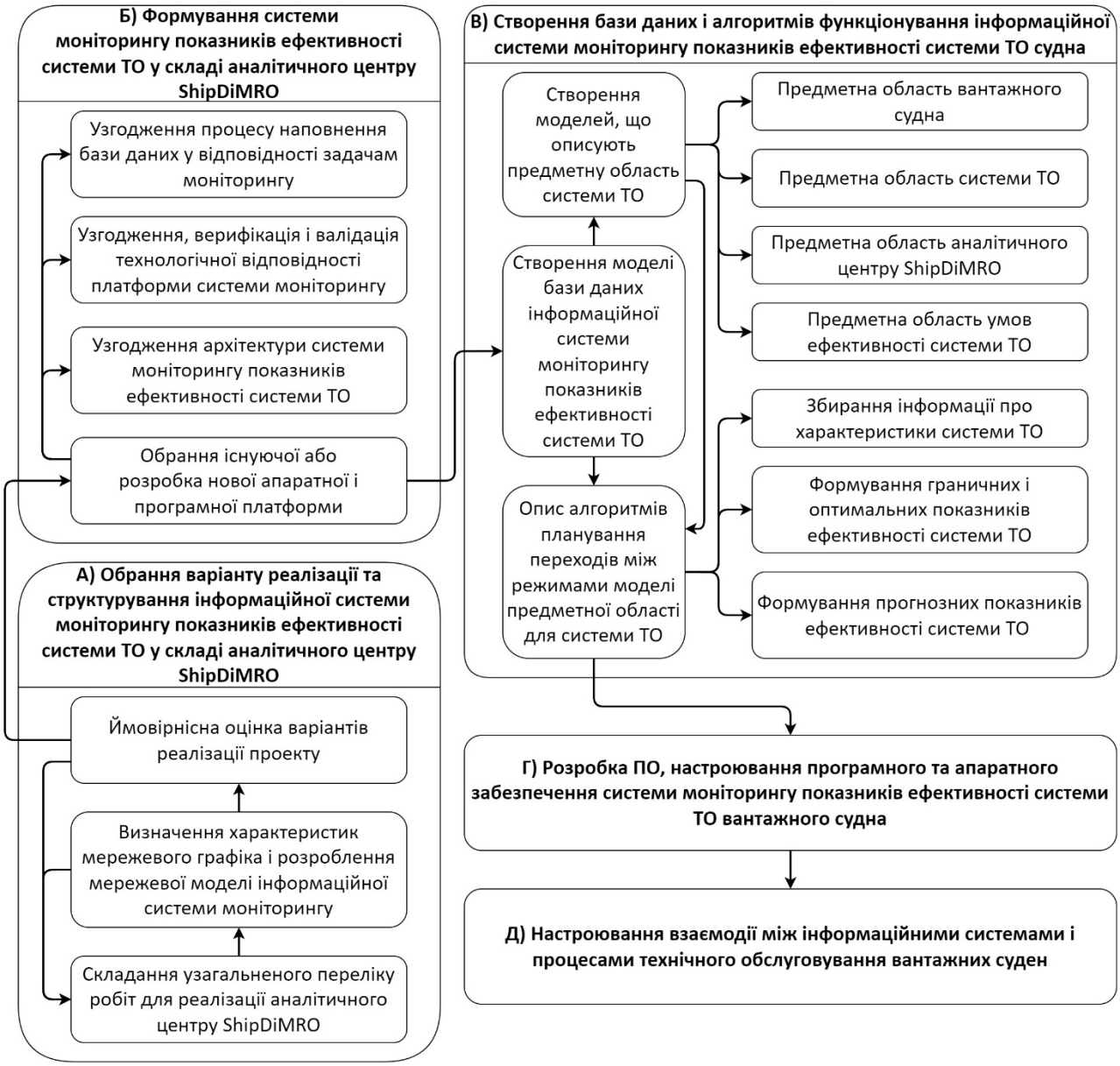


Рисунок 3.5 – Загальна методика моделювання та побудови інформаційної системи моніторингу показників ефективності системи ТО у складі системи КПТОВС на основі аналітичного центру ShipDiMRO [398]

У процесі розробки системи КПТОВС, інтеграції та уніфікації загального підходу до створення інформаційної системи моніторингу показників ефективності системи ТО вантажних суден в умовах інтелектуальних транспортних систем, для формування структури аналітичного центру ShipDiMRO з урахуванням його функціональних можливостей, аналогічно було проведено аналіз, узагальнення та порівняння існуючих даних з використання інтелектуальних транспортних систем у морському транспорті, з урахуванням важливості їх впровадження в сфері вантажних суден і загальної системи водного транспорту.

Особливості формування структури систем моніторингу показників ефективності системи ТО наведено у Додатку М10.

Для потенційного вирішення зазначеної проблеми, яка може виникнути на етапі створення нових суден (Рисунок 3.8), або експлуатації суден, оснащених сучасними сторонніми комплексними системами управління і (або) вбудованими комплексами моніторингу систем ТО, які застосовують спеціалізовані версії операційної системи реального часу *RTOS, необхідно поєднання всіх інформаційних потоків що містять інформацію про експлуатаційні характеристики системи ТО. Цей комплекс включає в себе модуль телематики , який слугує для зв’язку з судноводіями та судномеханіками, а також для контролю судна під час взаємодії з транспортними потоками, при виконанні прескриптивного технічного обслуговування, як на судні так і в умовах суднoремонтного підприємства та інші дії, які можуть бути об’єднані в єдину мережу CANopen [53]. Для забезпечення цього, конструкція судна має передбачити можливість використання модулів зв’язку, які можуть взаємодіяти не лише з внутрішньою бортовою системою ідентифікації, моніторингу експлуатаційних характеристик системи ТО, а також локальні сервери і системи зберігання даних про показники ефективності системи ТО, працездатність суднових технічних засобів, напрацювання і технічний стан механізмів.

Як підсумок, запропоновано системний підхід для вирішення завдання створення єдиної системи моніторингу показників ефективності системи ТО у складі системи КПТОВС, незалежно від їх статусу (нові або вже експлуатовані). Цей підхід передбачає створення структури інтелектуальних транспортних систем на основі

аналітичного центру ShipDiMRO та може бути використаний як методичний інструмент для обґрунтування технічних вимог при розробці та впровадженні систем моніторингу систем обслуговування вантажних суден по всьому світу.

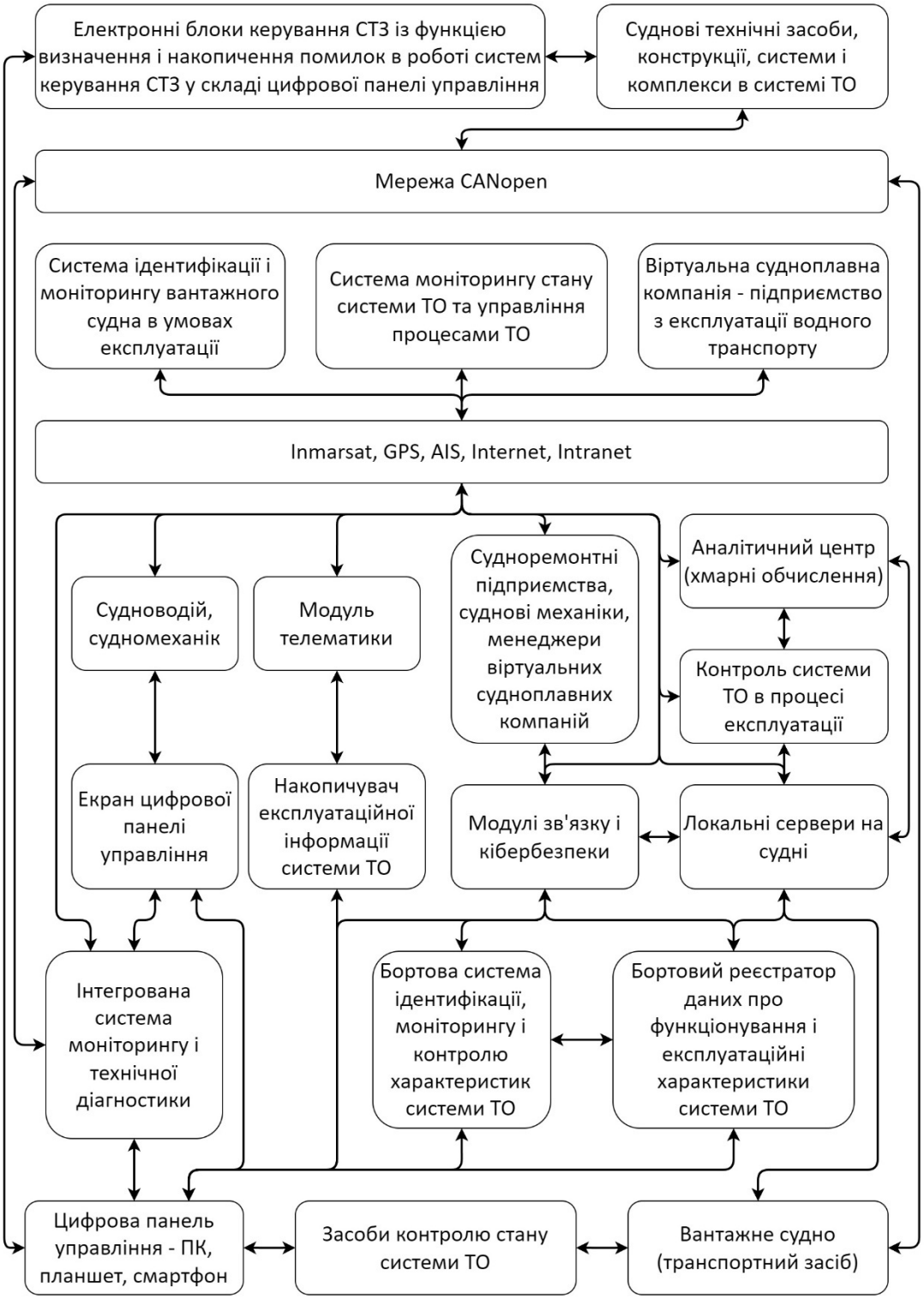


Рисунок 3.6 – Структура системи моніторингу експлуатаційних характеристик системи ТО вантажних суден, обладнаних вбудованою мережею CANopen [398]

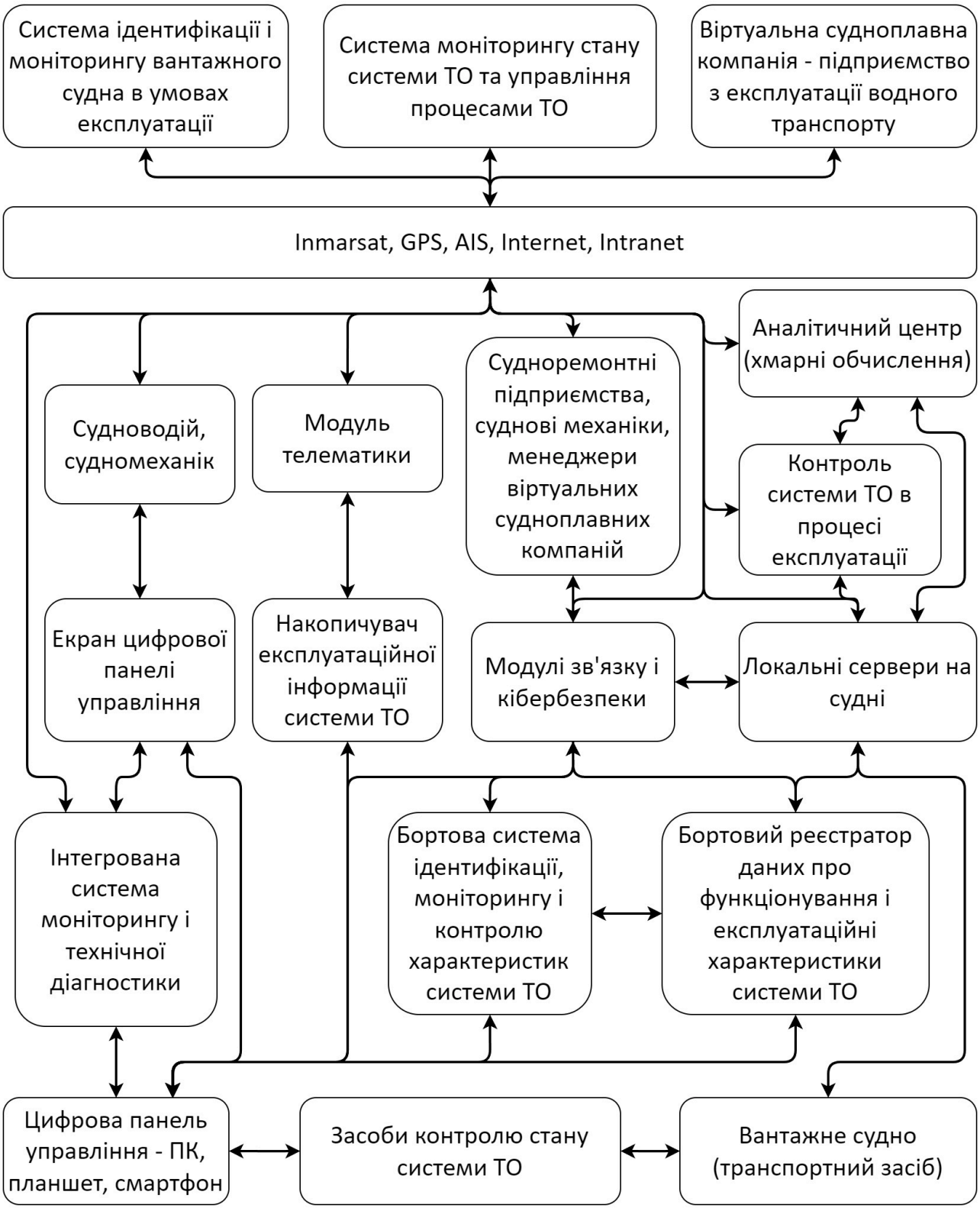


Рисунок 3.7 – Структура системи моніторингу експлуатаційних характеристик системи ТО вантажних суден, що не обладнані вбудованою мережею CANopen

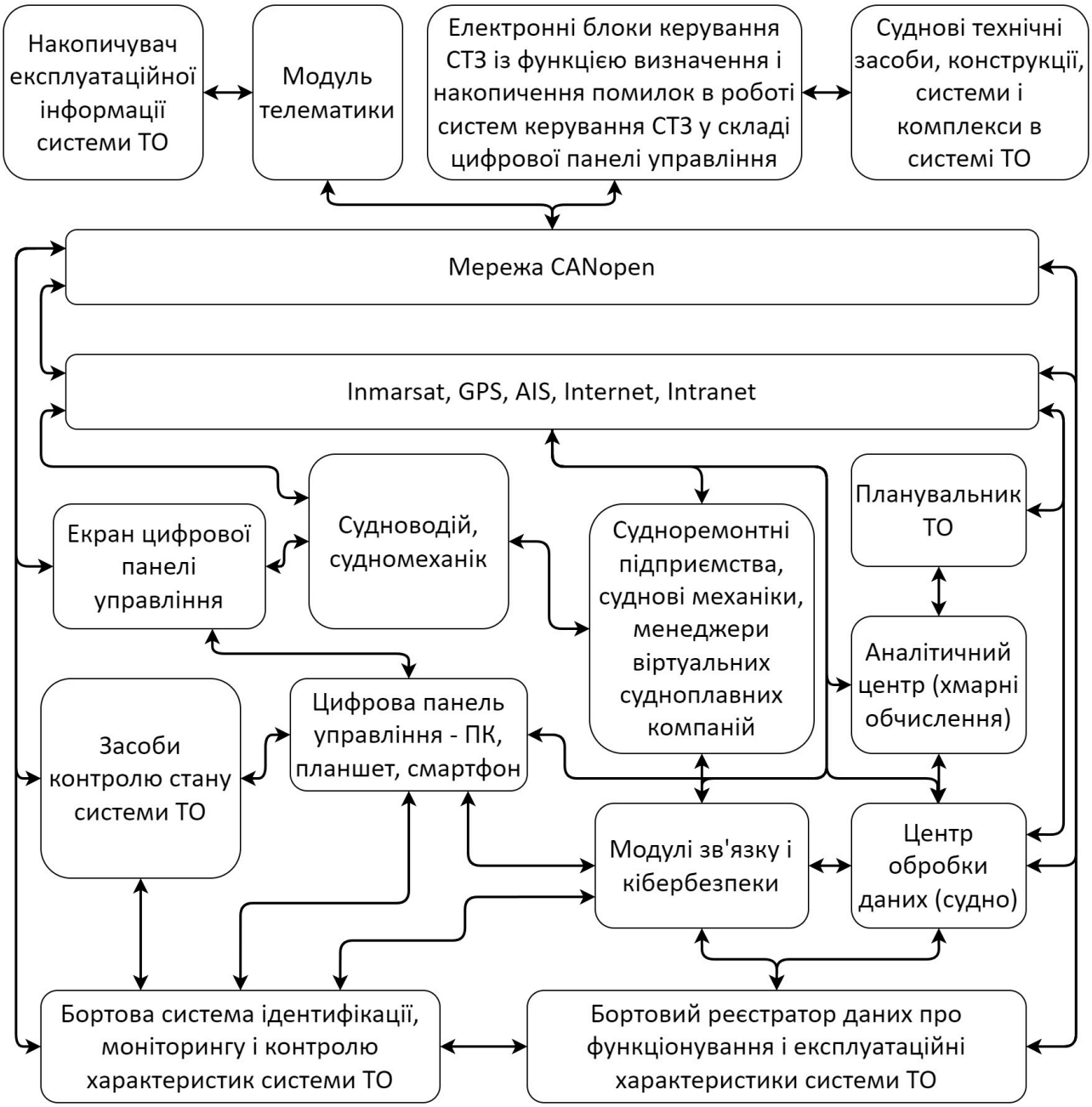


Рисунок 3.8 - Структура системи моніторингу системи ТО вантажних суден (нових або в експлуатації) у складі системи КПТОВС [398]

3.1.3 Розробка і формування структури інформаційної взаємодії між елементами ITS системи КПТОВС в процесах моніторингу ВС

Графічний опис схеми інформаційного обміну між елементами вимірювального комплексу для здійснення дистанційного дослідження ефективності системи ТО у складі системи КПТОВС, представлено на Рисунку 3.9 [122, 123, 413]. Подробиці та особливості процесу обміну інформацією під час виконання дистанційних

досліджень ефективності системи ТО були висвітлені в літературних джерелах [10, 16, 42, 50, 77, 82, 99, 118, 120, 122, 123, 138, 190, 351, 419, 415].

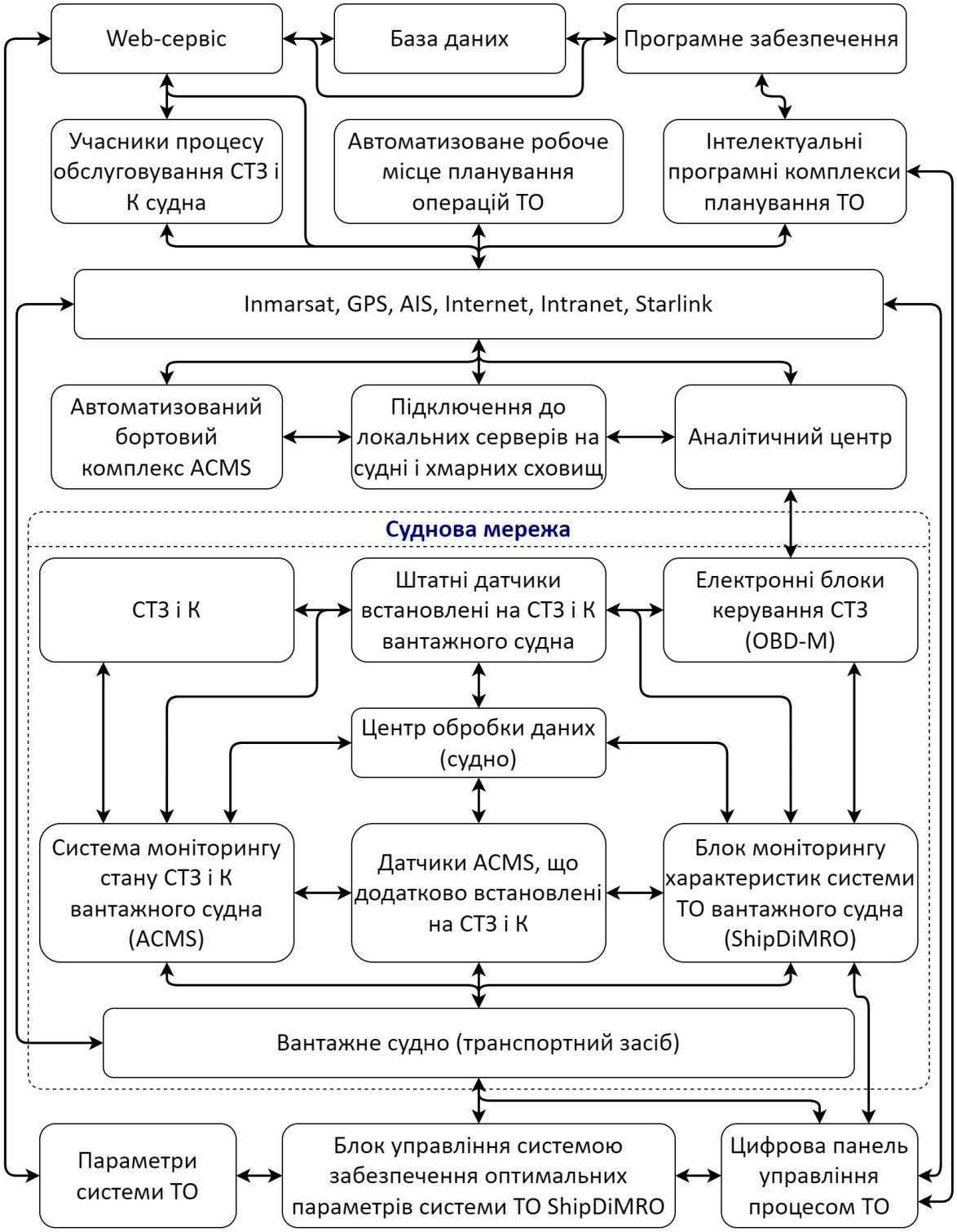


Рисунок 3.9 – Схема інформаційного обміну між елементами вимірювального комплексу для здійснення дистанційного дослідження ефективності системи ТО у складі системи КПТОВС

Для дистанційного відстеження параметрів робочих процесів суднових технічних засобів під час досліджень в режимі реального часу, була задіяна описана раніше інтелектуальна структура, що складає єдину систему моніторингу вантажного судна, як це було показано в літературних джерелах [16, 77, 123].

Схема обміну інформацією в процесі комплексного прескриптивного технічного обслуговування у межах віртуальної судноплавної компанії «shipmonitoring.org», яка спеціалізується на обслуговуванні водного транспорту [16, 77, 123], зображена на Рисунку 3.9 та її опис наведено у Додатку М11.

3.2 Особливості предметної області інформаційної системи оцінювання способів підвищення ефективності систем ТО вантажних суден у складі системи КПТОВС в умовах експлуатації

3.2.1 Структура моделі та інформаційного забезпечення системи моніторингу системи КПТОВС в умовах інтелектуальних транспортних систем

Для визначення предметної області підвищення ефективності систем технічного обслуговування вантажних суден та їх інтеграції в комплексну систему прескриптивного технічного обслуговування використовуються певні принципи. Ці принципи передбачають обробку та аналіз даних моніторингу, а також задоволення функціональних потреб обслуговуючого персоналу [42, 49].

Опис особливостей предметної області інформаційної системи оцінювання способів підвищення ефективності систем ТО наведено у Додатку М12.

Чітка і стисла взаємодія між усім персоналом має важливе значення для досягнення оптимальної продуктивності системи технічного обслуговування. Під час початкового аналізу, спрямованого на формування предметної області підвищення ефективності систем технічного обслуговування вантажних суден, було використано діаграму потоків даних (DFD) [390], яка проілюстрована на Рисунку 3.10. Об’єктивна і лаконічна DFD забезпечує логічну і причинно-наслідкову послідовність інформації, а технічні терміни чітко пояснюються при введенні. Формальна мова і точний вибір слів дозволяють уникнути упереджених або емоційних висловлювань.



Рисунок 3.10 – Діаграма інформаційної моделі підвищення ефективності систем ТО вантажного судна

Під час формування структури програмних комплексів моніторингу показників ефективності системи ТО і параметрів технічного стану СТЗ і К в умовах інтелектуальних транспортних систем, для формалізації основних процесів використовувалася методологія структурного аналізу та проектування SADT [139, 181, 343]. Згідно з методологією функціонального моделювання і графічного зображення процесів, а також розробленої моделі, основними джерелами даних для проведення моніторингу показників ефективності системи ТО і параметрів технічного стану СТЗ і К є інформація, отримана через Internet, Intranet, Inmarsat,

Starlink, GPS, AIS, ARPA безпосередньо з вантажного судна через Web-сервіс віртуальної судноплавної компанії «shipmonitoring.org» – підприємства, що спеціалізується на експлуатації водного транспорту [118]. Ця інформація потрапляє в інформаційні програмні комплекси «ShipDiMRO» і «ACMS», структуровану інформаційну модель яких показано на Рисунку 3.12 і Рисунку 3.13.

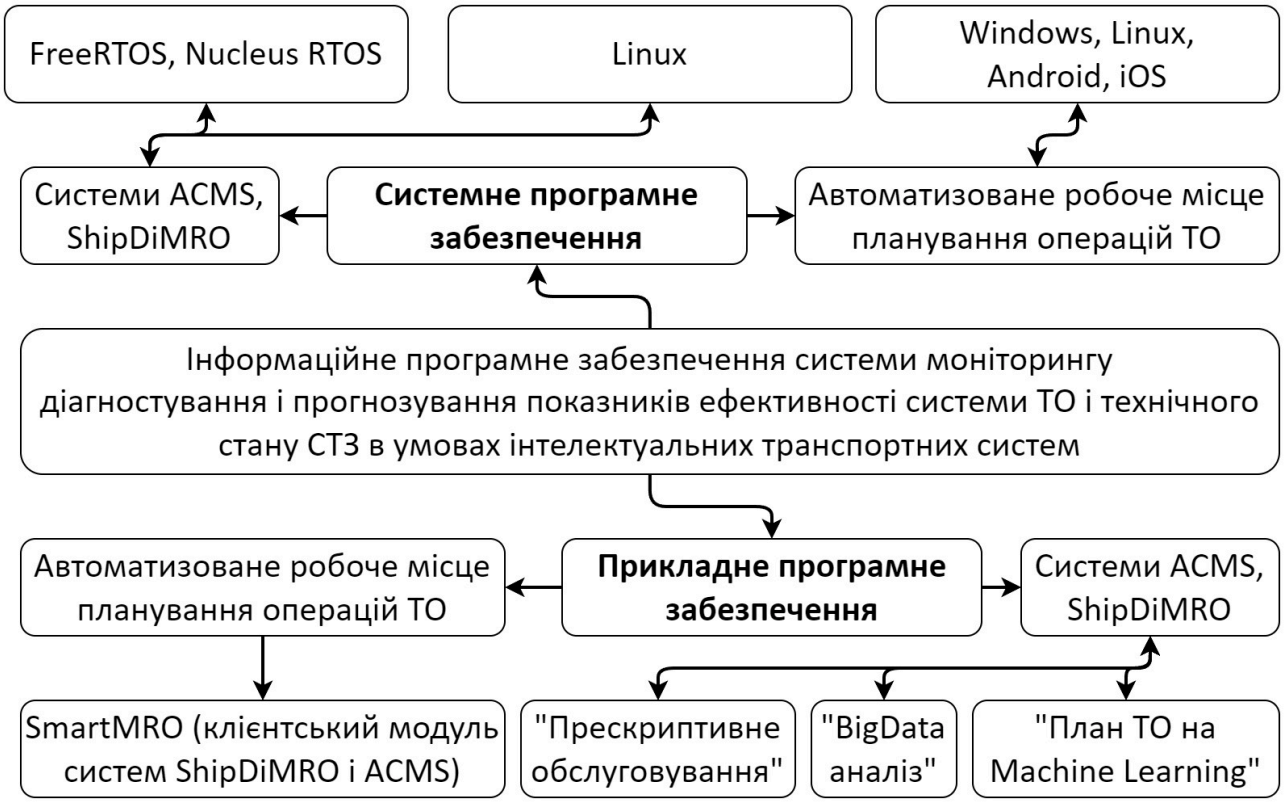


Рисунок 3.11 – Структура інформаційного програмного забезпечення системи моніторингу діагностування і прогнозування показників ефективності системи ТО і технічного стану СТЗ в умовах інтелектуальних транспортних систем

Мета можливого прогнозування параметрів системи ТО і параметрів СТЗ і К полягає у вивченні їх динаміки та виявленні можливих виходів за межі допустимих значень у майбутньому. Вибір горизонту (упередження) для прогнозування досліджуваних параметрів залежить від методу обслуговування, який застосовується, та режиму роботи СТЗ і К. У складних режимах експлуатації і виконання ТО СТЗ і К, дуже важливо прогнозувати значення параметрів на короткі терміни. Якщо СТЗ або К працює у періодичному режимі, необхідно забезпечити виконання вимірювань не менше одного разу протягом одного включення (запуску) СТЗ. Для задач

прогнозування параметрів, які змінюються мало в часі, застосовуються методи статистичного моделювання по одному параметру [363].

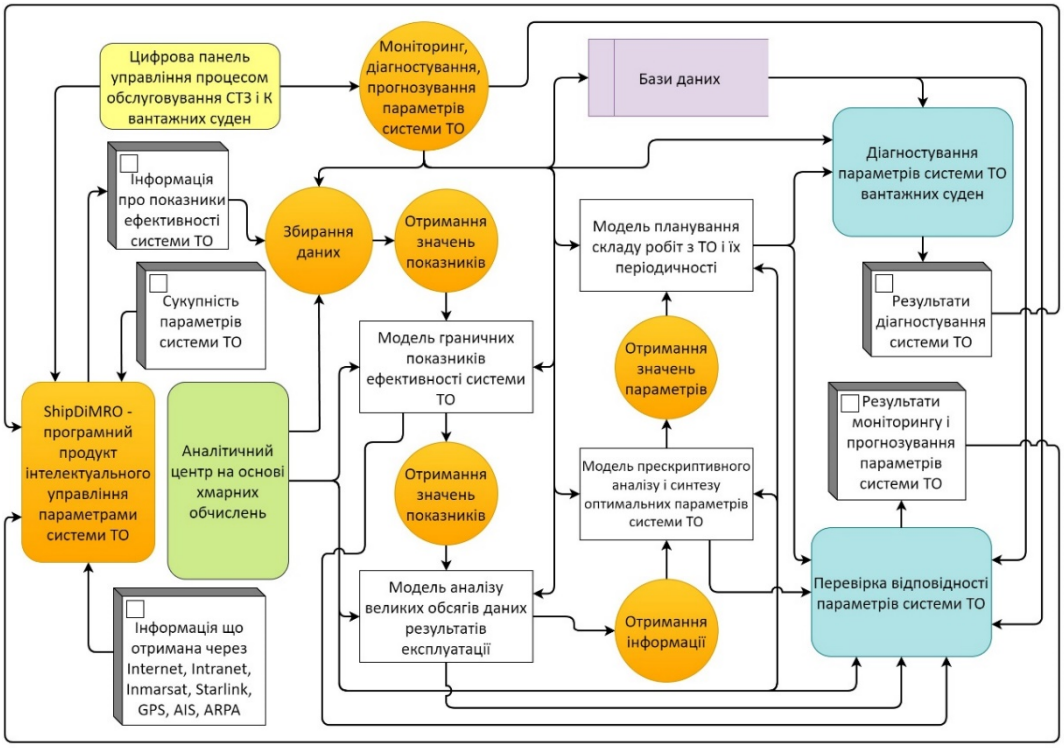


Рисунок 3.12 – Структурована інформаційна модель інтелектуального програмного комплексу ShipDiMRO

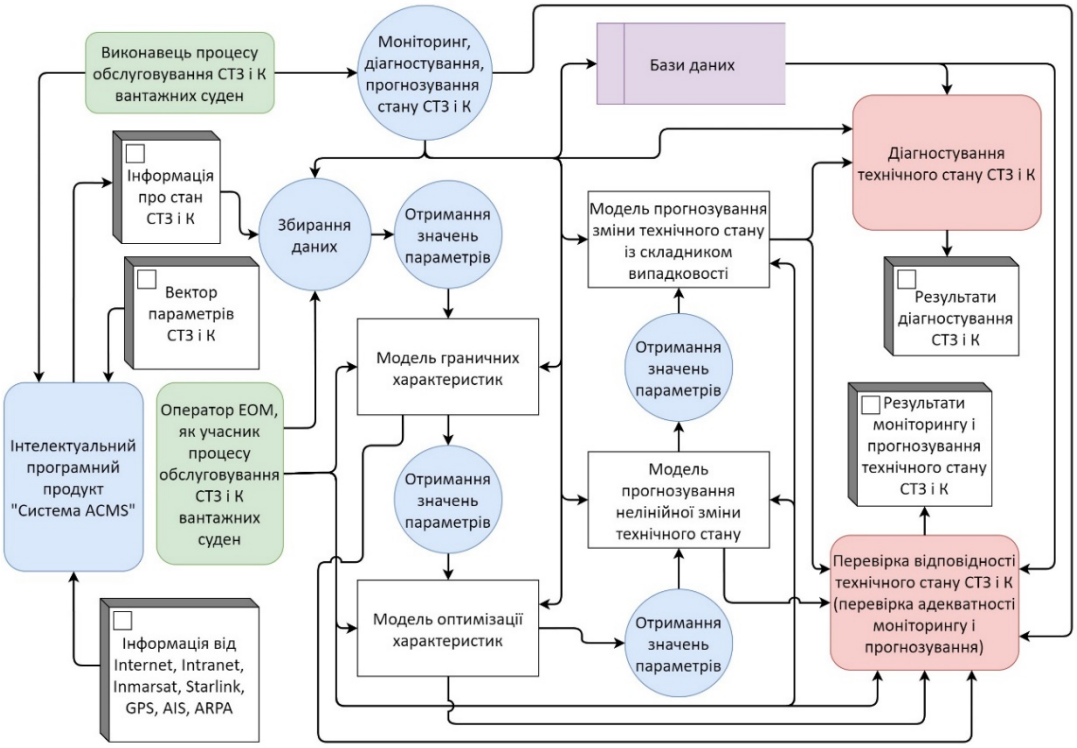


Рисунок 3.13 – Структурована інформаційна модель програмного комплексу ACMS

Для впровадження програмних комплексів ShipDiMRO і ACMS [419, 441] в структуру і процеси віртуального підприємства з технічного обслуговування вантажних суден, на прикладі «shipmonitoring.org» [120, 123, 419, 441], потрібно внести відповідні зміни у складові та елементи обох комплексів. Ці зміни впливають на конфігурацію апаратного забезпечення комплексу ACMS [123] і безпосередньо на програмне забезпечення комплексу ShipDiMRO [118]. На Рисунку 3.14 зображено функціональну структуру обміну інформацією та взаємодії програмних комплексів ShipDiMRO і ACMS з елементами віртуального підприємства «shipmonitoring.org».

У загальному програмному забезпеченні Web-сервісу «shipmonitoring.org» було додано наступні модулі, які розроблені автором:

- модуль аналізу і обробки великих обсягів даних, що стосуються результатів експлуатації СТЗ, К і судна в цілому [350];
- модуль машинного навчання для складання плану технічного обслуговування та його періодичності (план ТО) [365, 431];
- модуль прескриптивних алгоритмів для аналізу та синтезу оптимальних параметрів системи ТО [427];
- модуль створення структури бази даних про СТЗ в умовах експлуатації;
- модуль прогнозування стану СТЗ на відповідний прогнозований час [415];
- модуль діагностування стану СТЗ і К [118, 120, 123, 428];
- модуль перевірки відповідності стану системи ТО, СТЗ і К, що базується на проведеному моніторингу, діагностиці та прогнозуванні стану;
- модуль визначення параметра стану системи ТО вантажного судна з найменшим значенням прогнозного часу, за якого відбудеться вихід за допустимі межі.

Для обробки отриманих даних моніторингу в розробленому програмному комплексі використовується автоматизоване робоче місце планування операцій ТО (може бути використаний також Web-сервіс «shipmonitoring.org») [120]. Обробка отриманих вимірювань параметрів системи ТО, СТЗ і К відбувається через використання математичних інструментів і визначається рівнем застосування

математичних методів [119, 120]. Далі отримані результати піддаються аналізу, і формується звіт у вигляді встановленого протоколу.

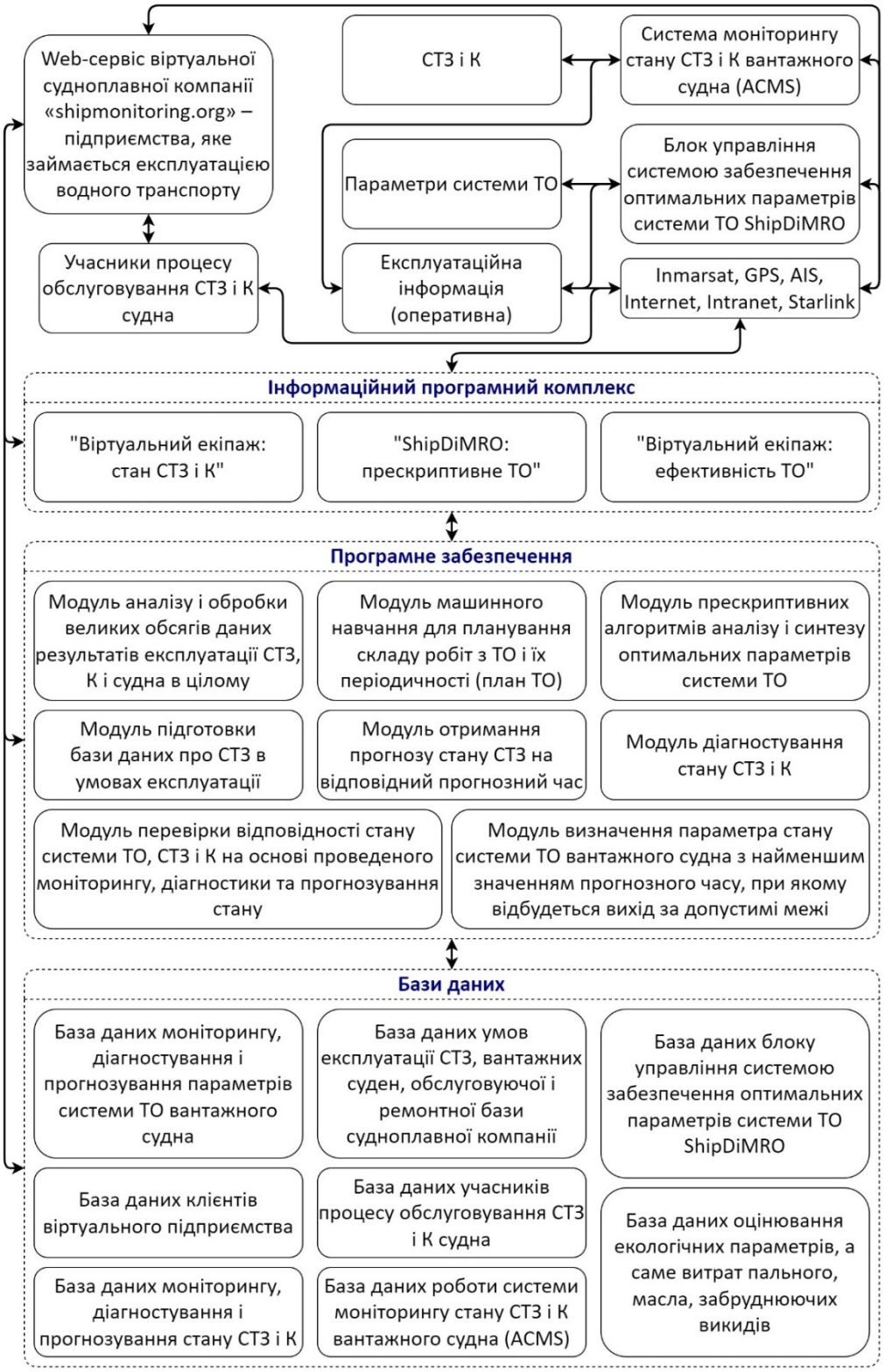


Рисунок 3.14 – Функціональна структура інформаційної взаємодії комплексів «ShipDiMRO» і «ACMS» з елементами віртуального підприємства «shipmonitoring.org»

3.2.2 Моделі бази даних інформаційної системи моніторингу показників ефективності системи ТО та параметрів СТЗ і К для використання в системи КПТОВС

3.2.2.1 Опис інформаційної моделі предметної області системи КПТОВС

Згідно з проектованою структурою системи моніторингу (Рисунок 3.2) в розробленій моделі бази інформаційної системи моніторингу показників ефективності системи технічного обслуговування та технічного стану СТЗ і К вантажного судна розрізняються 2 підсистеми (Рисунок 3.15) опис яких наведено у Додатку М13.

Модель предметної області для системи моніторингу параметрів представлена індивідуально для кожної з підсистем: показників ефективності системи ТО та СТЗ і К, обладнаних засобами моніторингу. Ця модель у вигляді різних множин для зазначених підсистем відображена через:

1. Система ТО та умови експлуатації (представлена на Рисунку 3.16)

2. СТЗ, К, пристроїв моніторингу та умови експлуатації (відображені на Рисунку 3.17) [100, 101, 102, 104, 441].

Ці множини включають об’єкти контролю, автоматизації, збирання та передачі інформації СТЗ і К, умов експлуатації СТЗ та вантажного судна в цілому, пристроїв моніторингу, інформаційних елементів СТЗ і судна, функції автоматизації, які виконуються системою моніторингу та прогнозування параметрів системи ТО та технічного стану СТЗ і К, а також завдання обробки даних. Ці множини також характеризують склад і кількість обслуговуючого персоналу, та взаємозв’язки між компонентами предметної області обох підсистем (див. Рисунок 3.16 і Рисунок 3.17).

Інформаційна модель зображена на Рисунку 3.16 описує взаємозв’язки предметної області системи моніторингу показників ефективності технічного обслуговування вантажного судна. Вона включає в себе необхідні таблиці, що забезпечують детальні дані про різні аспекти ТО та умови експлуатації судна.

Ці процеси допомагають не тільки відслідковувати ефективність системи ТО і технічного стану судна, а й ефективно планувати, виконувати та контролювати процеси технічного обслуговування для забезпечення безперебійної та безпечної

експлуатації вантажного судна. Формалізований опис алгоритму створення «підсистеми 1» наведено у Додатку В.



Рисунок 3.15 - Модель інформаційної системи моніторингу показників ефективності системи ТО та ТС СТЗ і К ВС у структурних елементах

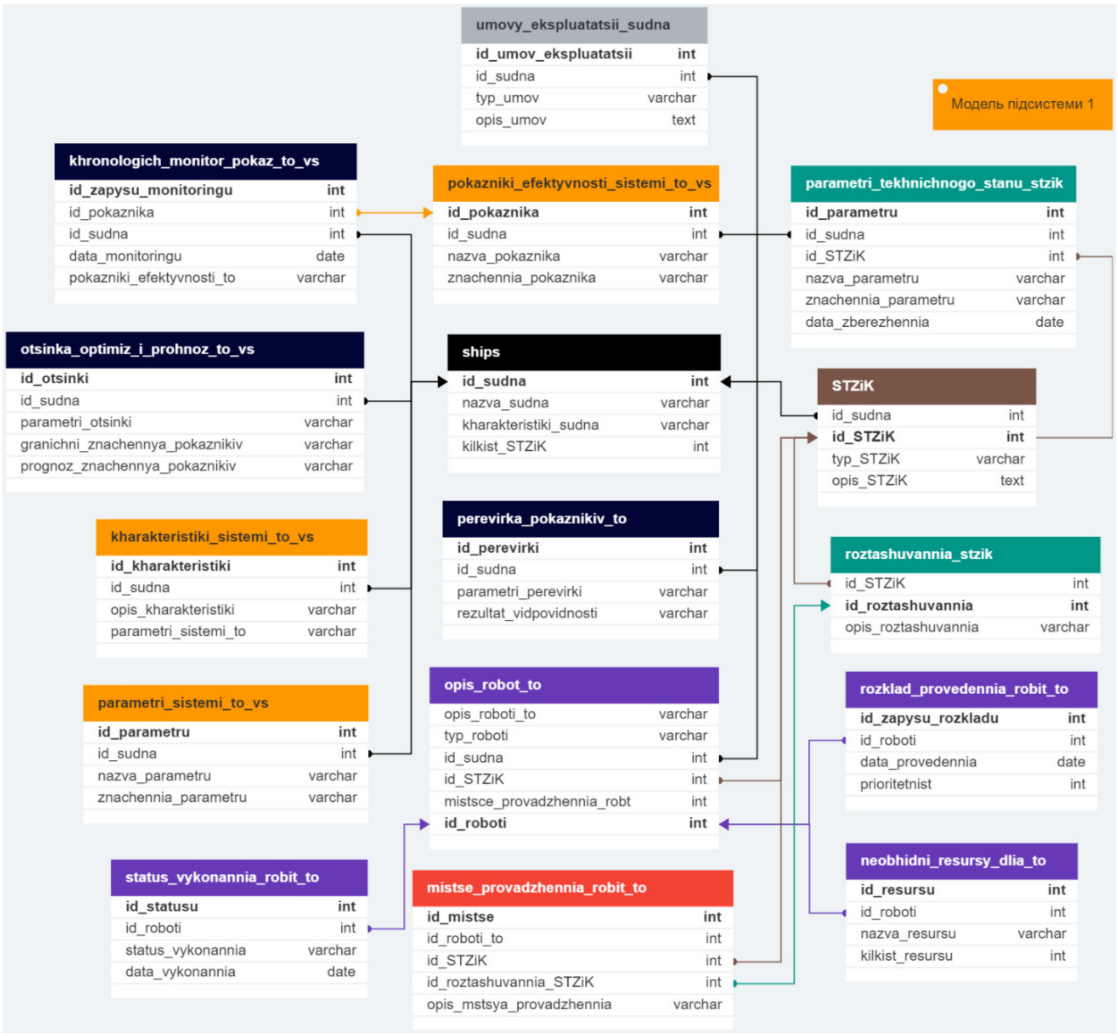


Рисунок 3.16 - Інформаційна модель предметної області підсистеми моніторингу показників ефективності системи ТО і умов експлуатації судна

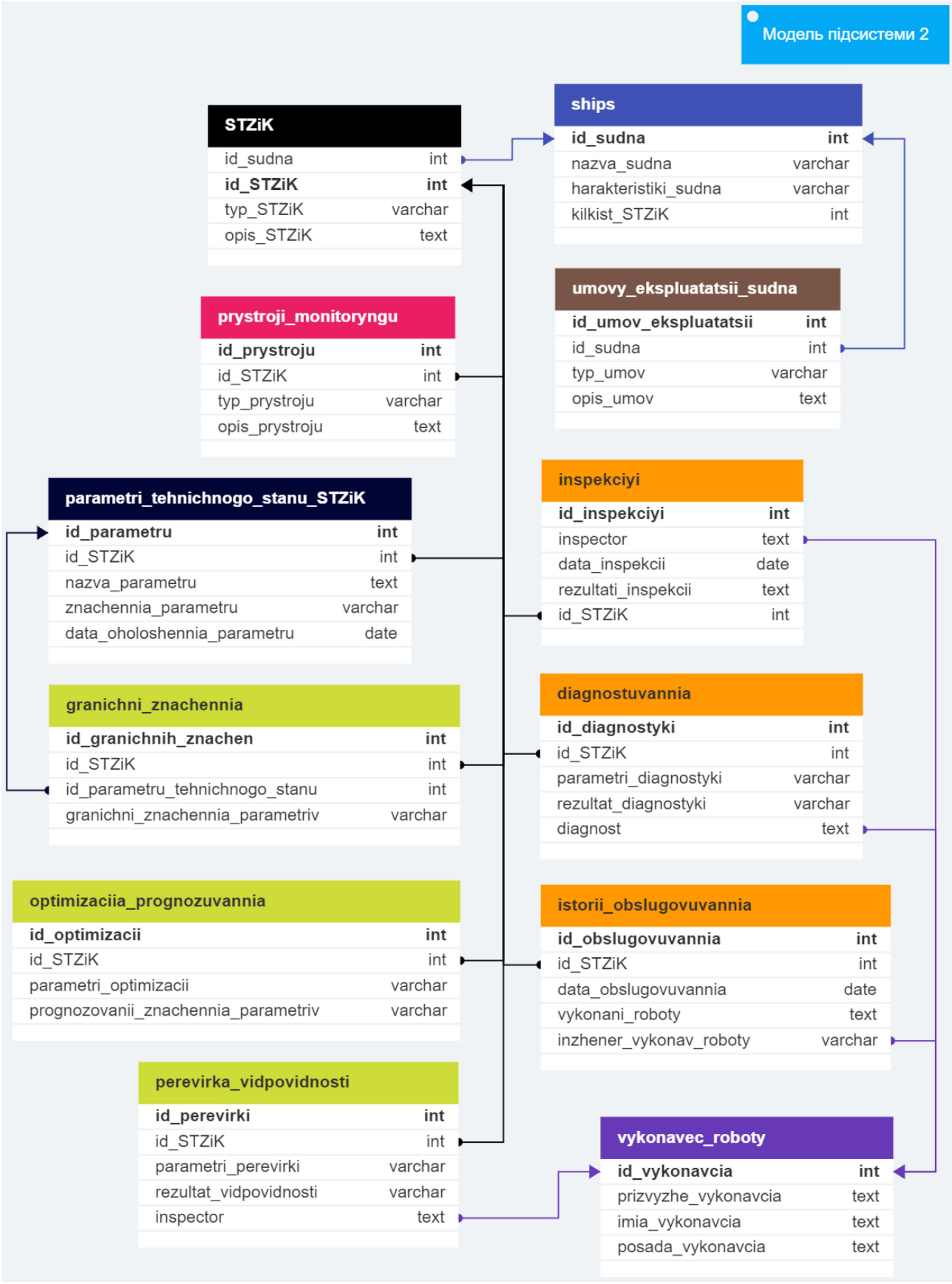


Рисунок 3.17 - Інформаційна модель предметної області підсистеми моніторингу ТС СТЗ і К, пристроїв моніторингу і умов експлуатації

Інформаційна модель «підсистеми 2» зображена на Рисунку 3.17 призначена для ведення моніторингу технічного стану суднових технічних засобів і конструкцій вантажного судна через інформаційну модель, яка включає в себе кілька ключових таблиць.

Інформаційні моделі предметної області системи моніторингу містять елементи що формують взаємозв'язок між підсистемами 1 і 2 моніторингу показників ефективності системи технічного обслуговування та умов експлуатації судна і підсистемою моніторингу технічного стану суднових технічних засобів і конструкцій, пристроїв моніторингу і умов експлуатації (Рисунок 3.18).

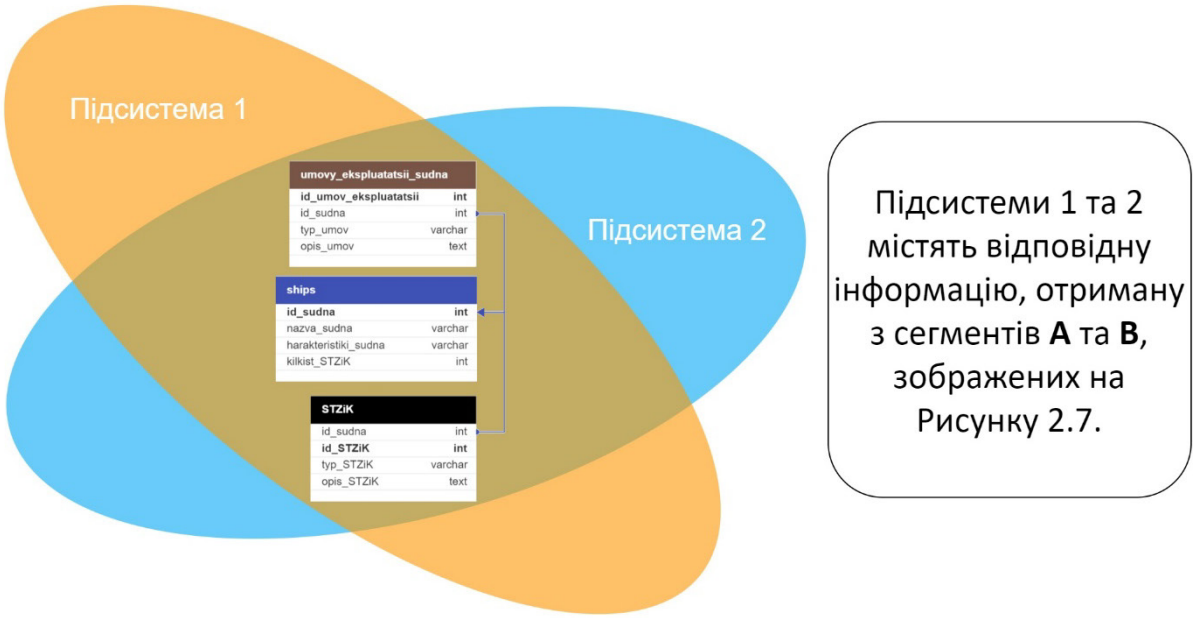


Рисунок 3.18 - Взаємозв'язок між підсистемами 1 і 2 інформаційної моделі предметної області системи технічного обслуговування вантажних суден

У підсистемах 1 і 2 таблиці «Судна» і «Умови експлуатації судна» слугують основними точками взаємозв'язку. «Судна» містять інформацію про саме судно, його характеристики та ідентифікатори, тоді як «Умови експлуатації судна» визначають умови та параметри експлуатації різних технічних засобів на судні. Таблиця «СТЗіК» забезпечує додатковий зв'язок між цими двома підсистемами, бо вона містить ідентифікатори технічних засобів і конструкцій на судні, а також пов'язана з «Суднами» через зовнішні ключі. Крім того, «Умови експлуатації судна» містять

відомості про умови, в яких експлуатуються конкретні технічні засоби і конструкції, що також можуть бути пов'язані з «СТЗіК».

Така структура підсистем дозволяє сполучати інформацію про технічний стан окремих елементів на судні з їхнім функціонуванням у певних умовах експлуатації, що допомагає забезпечувати основу ефективного технічного обслуговування та контролю за ефективності системи ТО. Формалізований опис алгоритму створення «підсистеми 2» наведено у Додатку Г.

3.2.2.2 Формування та аналіз предметної області системи ТО та СТЗ і К вантажного судна за складовими множинами

Для формування інформаційної моделі (множини) в частині об'єктів автоматизації системи ТО основною задачею є розподіл її на наступні об'єкти:

- для системи ТО і умов експлуатації в підсистемі 1: m_1 – блок збирання та архівації даних ТО; m_2 – блок збирання інформації про умови експлуатації судна; m_3 – блок збирання і обміну інформацією із вантажним судном;

- для СТЗ і К, пристроїв моніторингу і умов експлуатації в підсистемі 2: z_1 – блок моніторингу технічного стану СТЗ і К у кількості N одиниць; z_2 – блок збирання інформації про умови експлуатації судна і пристроїв моніторингу; z_3 – блок збирання і обміну інформацією із вантажним судном;

де N – кількість СТЗ і К вантажного судна, щодо яких виконується моніторинг технічного стану.

Множини об'єктів автоматизації підсистеми 1 представляємо наступним чином:

$$M = \{m_{n1}/n_1 = 1,3\}, \tag{3.1}$$

$$P(M) = 3, \tag{3.2}$$

де $P(M)$ – кількість елементів множини M об'єктів автоматизації.

Множини об'єктів автоматизації підсистеми 2 представляємо наступним чином:

$$Z = \{z_{n2}/n_2 = 1,3\}, \tag{3.3}$$

$$P(Z) = 3, \tag{3.4}$$

де $P(Z)$ – кількість елементів множини Z об'єктів автоматизації.

Загалом, сукупність об'єктів автоматизації для моніторингу параметрів системи ТО та СТЗ і К вантажного судна виглядає наступним чином:

$$O = M + Z = \{o_n / n = 1,6\}, \quad (3.5)$$

$$P(O) = 6, \quad (3.6)$$

Відповідно до встановленої задачі формування предметної області дослідження і залежно від наявних технічних можливостей та математичного забезпечення складових, модель повинна включати всі необхідні інформаційні компоненти, які стосуються кожного об'єкту автоматизації. Ця інформація представлена в Таблиці Л.1 для підсистеми 1 та в Таблиці Л.2 для підсистеми 2. Система диференційних рівнянь за якими визначаються параметри Таблиці Л.1 представлена у Додатку Л.

В процесі формування предметної області отримана повна множина інформаційних елементів представлена у Таблиці Л.1 і Таблиці Л.2 таким чином:

- для підсистеми 1 (Таблиця Л.1):

$$Q_1 = \{q_{a_1} / a_1 = 1,62\}, \quad (3.7)$$

$$P(Q_1) = 62, \quad (3.8)$$

- для підсистеми 2 (Таблиця Л.2):

$$Q_2 = \{q_{a_2} / a_2 = 1,23\}, \quad (3.9)$$

$$P(Q_2) = 23, \quad (3.10)$$

Отже, повна множина елементів для всієї інформаційної системи моніторингу та прогнозування параметрів системи ТО та СТЗ і К має вигляд:

$$Q = Q_1 + Q_2 = \{q_a / a = 1,85\}, \quad (3.11)$$

$$P(Q) = 85, \quad (3.12)$$

де $P(Q)$ – кількість елементів у множині Q інформаційної системи.

В межах кожної з представлених підсистем (Таблиця 3.1 для підсистеми 1 і Таблиця 3.2 для підсистеми 2) визначаємо функції автоматизації інформаційної системи моніторингу параметрів системи ТО та СТЗ і К вантажного судна, що повинні моделюватися комплексною системою прескриптивного технічного обслуговування:

- для підсистеми 1 (Таблиця 3.1):

$$A_1 = \{a_{i_1} / i_1 = 1,9\}, \quad (3.13)$$

$$P(A_1) = 9, \quad (3.14)$$

- для підсистеми 2 (Таблиця 3.2):

$$A_2 = \{a_{i_2} / i_2 = 1,9\}, \quad (3.15)$$

$$P(A_2) = 18, \quad (3.16)$$

Таблиця 3.1 – Функції автоматизації моніторингу параметрів системи ТО в підсистемі 1

№	Позна-чення	Найменування
1	a_1	Збирання даних параметрів системи ТО за інтервал часу Δt
2	a_2	Прогнозування значень параметрів системи ТО
3	a_3	Звітування за параметрами системи ТО
4	a_4	Збирання даних параметрів вантажного судна за інтервал часу Δt
5	a_5	Прогнозування значень параметрів вантажного судна
6	a_6	Звітування за параметрами вантажного судна
7	a_7	Збирання даних параметрів умов експлуатації вантажного судна за інтервал часу Δt
8	a_8	Прогнозування значень параметрів умов експлуатації вантажного судна
9	a_9	Звітування за параметрами умов експлуатації вантажного судна

Отже, повна сукупність елементів для інформаційної системи моніторингу і прогнозування параметрів системи ТО та СТЗ і К має вигляд:

$$A = A_1 + A_2 = \{q_i / i = 1,20\}, \quad (3.17)$$

$$P(A) = 20, \quad (3.18)$$

де $P(A)$ кількість елементів множини A функцій автоматизації.

В межах кожної з представлених підсистем (Таблиця 3.3 для підсистеми 1 і Таблиця 3.4 для підсистеми 2) визначаємо основні завдання (задачі, процедури) обробки даних системи моніторингу параметрів системи ТО та СТЗ і К вантажного судна:

- для підсистеми 1 (Таблиця 3.3):

$$T_1 = \{t_{j_1} / j_1 = 1,6\}, \quad (3.19)$$

$$P(T_1) = 6, \tag{3.20}$$

- для підсистеми 2 (Таблиця 3.4):

$$T_2 = \{t_{j_2}/j_2 = 1,6\}, \tag{3.21}$$

$$P(T_2) = 6, \tag{3.22}$$

Отже, повна сукупність елементів для всієї інформаційної системи моніторингу і прогнозування параметрів системи ТО та СТЗ і К має вигляд:

$$T = T_1 + T_2 = \{t_j/j = 1,12\}, \tag{3.23}$$

$$P(T) = 12, \tag{3.24}$$

де $P(T)$ кількість елементів множини T процедур обробки даних.

Таблиця 3.2 – Функції автоматизації системи моніторингу СТЗ і К, пристроїв моніторингу і умов експлуатації в підсистемі 2

№	Позна-чення	Найменування
1	a_{10}	Збирання даних параметрів N СТЗ і К за інтервал часу Δt
2	a_{11}	Прогнозування значень параметрів N СТЗ і К
3	a_{12}	Звітування за параметрами N СТЗ і К
4	a_{13}	Збирання даних параметрів вантажного судна і пристроїв моніторингу за інтервал часу Δt
5	a_{14}	Прогнозування значень параметрів вантажного судна і пристроїв моніторингу
6	a_{15}	Звітування за параметрами вантажного судна і пристроїв моніторингу
7	a_{16}	Збирання даних параметрів умов експлуатації вантажного судна і пристроїв моніторингу за інтервал часу Δt
8	a_{17}	Прогнозування значень параметрів умов експлуатації вантажного судна і пристроїв моніторингу
9	a_{18}	Звітування за параметрами умов експлуатації вантажного судна і пристроїв моніторингу

В межах підсистем, основні можливі варіанти зводимо в Таблиці 3.3 (для підсистеми 1) і Таблиці 3.4 (для підсистеми 2) формуємо множину значень, що характеризує кількість і склад персоналу, який забезпечує моніторинг параметрів системи ТО і N СТЗ і К.

Таблиця 3.3 – Основні процедури обробки даних моніторингу параметрів системи ТО в підсистемі 1

№	Позначення	Найменування
1	t_1	Актуалізація у базі даних параметрів системи ТО за інтервал часу Δt
2	t_2	Вибірка з бази даних значень параметрів системи ТО для їх аналізу і прогнозування
3	t_3	Актуалізація у базі даних параметрів вантажного судна за інтервал часу Δt
4	t_4	Вибірка з бази даних значень параметрів вантажного судна для їх аналізу і прогнозування
5	t_5	Актуалізація у базі даних параметрів умов експлуатації вантажного судна за інтервал часу Δt
6	t_6	Вибірка з бази даних значень параметрів умов експлуатації вантажного судна для їх аналізу і прогнозування

Таблиця 3.4 – Основні процедури обробки даних моніторингу СТЗ і К, пристроїв моніторингу і умов експлуатації в підсистемі 2

№	Позначення	Найменування
1	t_7	Актуалізація у базі даних параметрів N СТЗ і К за інтервал часу Δt
2	t_8	Вибірка з бази даних значень параметрів N СТЗ і К для їх аналізу і прогнозування
3	t_9	Актуалізація у базі даних параметрів вантажного судна і пристроїв моніторингу за інтервал часу Δt
4	t_{10}	Вибірка з бази даних значень параметрів вантажного судна і пристроїв моніторингу для їх аналізу і прогнозування
5	t_{11}	Актуалізація у базі даних параметрів умов експлуатації вантажного судна і пристроїв моніторингу за інтервал часу Δt
6	t_{12}	Вибірка з бази даних значень параметрів умов експлуатації вантажного судна і пристроїв моніторингу для їх аналізу і прогнозування

Таблиця 3.5 – Склад експлуатаційного персоналу, який забезпечує моніторинг параметрів системи ТО в підсистемі 1

№	Позначення	Найменування
1	s_1	Оператор автоматизованого робочого місця планування операцій технічного обслуговування
2	s_2	Представник оператора (судновласника) судна

Таблиця 3.6 – Склад експлуатаційного персоналу, який забезпечує моніторинг СТЗ і К, пристроїв моніторингу і умов експлуатації в підсистемі 2

№	Позна-чення	Найменування
3	s_3	Виконавець процесу обслуговування СТЗ і К вантажного судна
4	s_4	Представник оператора (судновласника) судна

Окремо для кожної підсистеми визначаємо множину користувачів (персоналу) системи моніторингу параметрів системи ТО і N СТЗ і К:

- для підсистеми 1 (Таблиця 3.5):

$$S_1 = \{s_{i_1} / i_1 = 1, 2\}, \tag{3.25}$$

$$P(S_1) = 2, \tag{3.26}$$

- для підсистеми 2 (Таблиця 3.6):

$$S_2 = \{s_{i_2} / i_2 = 1, 2\}, \tag{3.27}$$

$$P(S_2) = 2, \tag{3.28}$$

Отже, повна множина складу персоналу для всієї інформаційної системи моніторингу та прогнозування параметрів системи ТО та СТЗ і К має вигляд:

$$S = S_1 + S_2 = \{s_i / i = 1, 4\}, \tag{3.29}$$

$$P(S) = 4, \tag{3.30}$$

де $P(S)$ кількість елементів множини S значень, що характеризують кількість і склад персоналу.

Об’єкти автоматизації взаємозв’язані з інформаційними компонентами системи, які включають в себе вихідні і вхідні дані пристроїв або характеристики інших об’єктів у загальному контексті.

Таблиця 3.7 – Відповідність об’єктів автоматизації інформаційним елементам в підсистемі 1

Об’єкти автоматизації	Інформаційні елементи
m_1	$q_1 - q_{42}$
m_2	$q_{43} - q_{54}$
m_3	$q_{55} - q_{62}$

Таблиця 3.8 – Відповідність об’єктів автоматизації інформаційним елементам в підсистемі 2

Об’єкти автоматизації	Інформаційні елементи
z_1	$q_{63} - q_{69}$
z_2	$q_{70} - q_{76}$
z_3	$q_{77} - q_{85}$

Таблиця 3.9 – Відповідність елементів автоматизації і процедур обробки даних експлуатаційному персоналу у підсистемі 1

Експлуатаційний персонал	Функції автоматизації	Процедури обробки даних
s_1	$a_1 - a_9$	$t_1 - t_6$
s_2	$a_1 - a_9$	$t_1 - t_6$

Таблиця 3.10 – Відповідність елементів автоматизації і процедур обробки даних експлуатаційному персоналу у підсистемі 2

Експлуатаційний персонал	Функції автоматизації	Процедури обробки даних
s_3	$a_{10} - a_{18}$	$t_7 - t_{12}$
s_4	$a_{10} - a_{18}$	$t_7 - t_{12}$

Таблиця 3.11 – Відповідність елементів автоматизації і процедур обробки даних експлуатаційному персоналу у підсистемі 1

Функції автоматизації	Процедури обробки даних	Об’єкти автоматизації
a_1	t_1	m_1
a_2		
a_3	t_2	
a_4	t_3	m_3
a_5		
a_6	t_4	
a_7	t_5	m_2
a_8		
a_9	t_6	

Таблиця 3.12 – Відповідність елементів автоматизації і процедур обробки даних експлуатаційному персоналу у підсистемі 2

Функції автоматизації	Процедури обробки даних	Об’єкти автоматизації
a_{10}	t_7	z_1
a_{11}		
a_{12}	t_8	
a_{13}	t_9	z_3
a_{14}		
a_{15}	t_{10}	
a_{16}	t_{11}	z_2
a_{17}		
a_{18}	t_{12}	

Ці зв’язки і відношення можна знайти у Таблиці 3.7 для підсистеми 1 і Таблиці 3.8 для підсистеми 2.

Склад експлуатаційного персоналу відповідає за різноманітні функції автоматизації та загальні завдання обробки даних. У контексті інформаційної моделі предметної області системи ТО та СТЗ і К, ці відповідності можна знайти у Таблиці 3.9 для підсистеми 1 і Таблиці 3.10 для підсистеми 2.

Кожна функція автоматизації передбачає виконання різних завдань обробки даних, і цим завданням відповідають різні об’єкти автоматизації. У моделі предметної області системи ТО та СТЗ і К, ці відповідності можна знайти у Таблиці 3.11 для підсистеми 1 і Таблиці 3.12 для підсистеми 2.

Після розробки опису предметної області [122, 123, 415, 419] системи моніторингу параметрів системи ТО та СТЗ і К, а також створення інформаційної моделі, ми отримали наступні висновки для підсистем 1 і 2:

У першу чергу, ми встановили, що в системі не існує об’єктів, яким би не відповідав хоча б один інформаційний елемент. Це свідчить про те, що кожен об’єкт має свою відповідну інформаційну складову.

Другий важливий висновок полягає в тому, що не існує інформаційного елемента в системі, якому би не відповідав хоча б один об’єкт автоматизації. Це гарантує, що кожна інформаційна частина системи має свого відповідного оператора або обслуговуючий персонал.

Нарешті, ми визначили, що кожен інформаційний елемент системи моніторингу параметрів системи ТО та СТЗ і К належить тільки одному об’єкту автоматизації. Це вказує на відповідність між інформаційними компонентами та об’єктами автоматизації і гарантує їхню чітку взаємодію в системі.

3.3 Формування алгоритмів моніторингу, діагностування та оцінювання способів підвищення ефективності систем ТО вантажних суден з можливістю прогнозування показників ефективності системи ТО та параметрів технічного стану СТЗ і К

3.3.1 Формування процесів збору даних про показники ефективності системи ТО та параметри технічного стану СТЗ і К

Алгоритм збору даних (Рисунок 3.19) про параметри системи технічного обслуговування та технічного стану суднових технічних засобів і конструкцій в межах системи КПТОВС починається з ініціалізації збору даних. Цей крок включає запуск системи збору даних та встановлення необхідних параметрів, таких як часові інтервали, типи датчиків та області моніторингу. Далі відбувається автоматичний збір даних з різних датчиків на судні, таких як температура, тиск, вібрації, рівні зносу тощо [418]. Агрегація даних включає агрегацію даних у вигляді розрахунку середнього значення:

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^{n} x_i}{n}, \tag{3.31}$$

де $\bar{X}$ – середнє значення, x_i – значення вимірювання, n - кількість вимірювань.

Після збору даних відбувається їх первинна обробка та валідація, яка включає перевірку на наявність помилок або відхилень та виключення аномальних даних. Аналіз даних проводиться за допомогою статистичного аналізу для визначення тенденцій та закономірностей. Важливими інструментами в цьому процесі є формули для визначення стандартного відхилення або варіабельності:

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{X})^2}, \tag{3.32}$$

де s – стандартне відхилення, x_i – значення вимірювання, $\bar{X}$ – середнє значення, n - кількість вимірювань.

На наступному етапі виконується класифікація інформації про стан системи технічного обслуговування і технічний стан суднових технічних засобів. Формуються звіти на основі зібраних даних, які подаються у зрозумілому та структурованому

форматі для подальшого аналізу. Данні зберігаються на судновому сервері і передаються для інтеграції з аналітичним центром системи технічного обслуговування ShipDiMRO, де вони використовуються для планування технічного обслуговування та ремонтних робіт. На завершальному етапі прогнозуються параметри системи технічного обслуговування. Представлений алгоритм [418] забезпечує систематичний підхід до збору та аналізу даних, що є важливим для підтримання ефективності системи технічного обслуговування та забезпечення технічної безпеки судна.

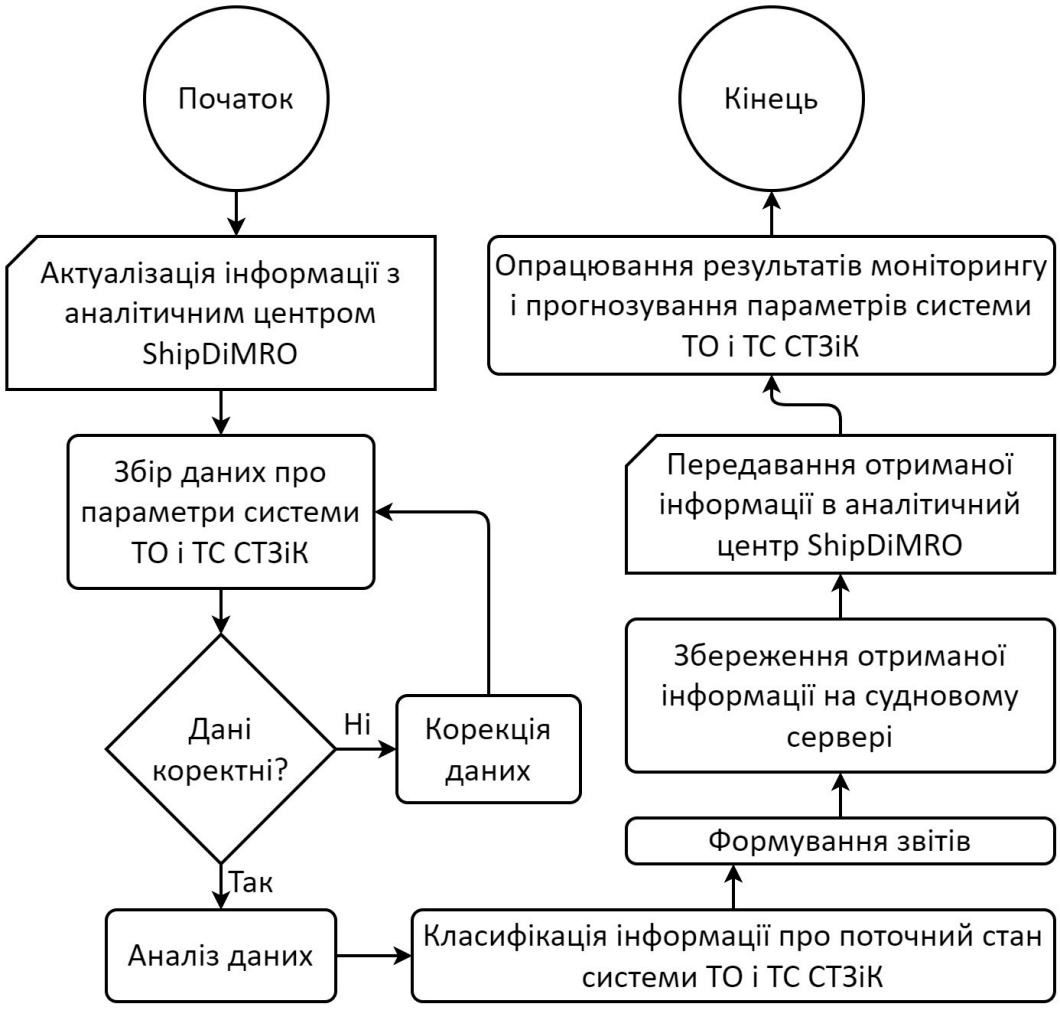


Рисунок 3.19 – Блок-схема алгоритму збору даних про параметри системи технічного обслуговування та технічного стану суднових технічних засобів і конструкцій в межах системи КПТОВС [418]

Алгоритм збору даних, представлений на Рисунку 3.19, є ключовим компонентом інформаційної моделі системи КПТОВС «ShipDiMRO» і спрямований

на збір даних про параметри системи технічного обслуговування і параметри суднових технічних засобів і конструкцій. Цей процес відіграє вирішальну роль у забезпеченні точності прогнозування параметрів системи технічного обслуговування і параметрів технічного стану суднових технічних засобів і конструкцій. Одним із найважливіших аспектів процесу є вибір часового інтервалу для отримання інформації. Зменшення цього інтервалу забезпечує вищу точність прогнозу, але одночасно збільшує час необхідний для обчислення прогнозних значень.

Необхідними для прогнозування є дані, які представляють собою послідовності впорядкованих в часі числових показників основних параметрів системи технічного обслуговування і параметрів технічного стану суднових технічних засобів і конструкцій. Ці дані формують повні інтервальні часові ряди, що є критично важливими для точного прогнозування. Паралельно зі збором даних про параметри системи технічного обслуговування і технічного стану суднових технічних засобів і конструкцій проводиться моніторинг та визначення їх потенційних несправностей.

Розроблені спеціалізовані алгоритми збору даних та розпізнавання стану несправностей, які є невід'ємною частиною процесу прогнозування параметрів системи технічного обслуговування. Ці алгоритми адаптовано до специфічних умов використання в межах віртуального підприємства «shipmonitoring.org». Визначним для алгоритму є інтервал часу Δt для зчитування інформації з датчиків та загальний період T, протягом якого відбувається збір інформації. В результаті, вихідними даними алгоритму є масив даних, який містить часові ряди значень параметрів. Ключові етапи та особливості процесу збору даних детально представлені на згаданому Рисунку 3.19.

3.3.2 Особливості процесу діагностування ефективності системи ТО і визначення статусу несправностей СТЗ і К у складі системи КПТОВС

Процес моніторингу (Рисунок 3.20) та визначення статусу несправностей системи технічного обслуговування вантажного судна, згідно з розробленим алгоритмом, розпочинається з актуалізації інформації з аналітичним центром ShipDiMRO. Це забезпечує актуальність даних у системі. Далі відбувається

ініціалізація системи технічного обслуговування, що включає активацію необхідних модулів для моніторингу та управління обладнанням. Після цього система проходить через етап самодіагностики, який визначає її готовність і функціональний стан. [418]

У разі виявлення зниження рівня технічної придатності судна, стандартне відхилення якого розраховується за формулою (3.33), система аналізує показники ефективності системи технічного обслуговування. Якщо ж технічна придатність не знизилася, здійснюється збір та аналіз даних безпосередньо з обладнання судна. Для цього використовується статистичний аналіз даних, наприклад, обчислення середніх значень, лінійна регресія (3.34) або аналіз трендів.

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(x_i - \mu)^2}, \tag{3.33}$$

де σ - стандартне відхилення, x_i – окремі вимірювання, μ – середнє значення, N – кількість вимірювань.

$$y = a \cdot x + b, \tag{3.34}$$

де y - залежна змінна, x – незалежна змінна, a, b – коефіцієнти регресії.

У разі виявлення зниження ефективності системи технічного обслуговування, здійснюються заходи для її підвищення. Це може включати зміни в робочих процедурах або оновлення режимів роботи обладнання. Паралельно проводиться аналіз (3.35) даних обладнання для виявлення аномалій і несправностей. У разі їх виявлення формуються рекомендації для їх усунення.

$$Z = \frac{(X - \mu)}{\sigma}, \tag{3.35}$$

де X – контрольована величина, σ - стандартне відхилення, μ – середнє значення.

Важливою частиною процесу є звітність та документування усіх виявлених даних та вжитих заходів. Завершується процес актуалізацією параметрів прескриптивної системи технічного обслуговування на основі отриманих результатів (3.36) за методом машинного навчання для оновлення параметрів на основі набору даних.

$$\theta_{new} = \theta_{old} - \alpha \cdot \nabla \mathrm{J}(\theta), \tag{3.36}$$

де θ – параметри моделі, α - швидкість навчання, $J(\theta)$ – функція втрат.

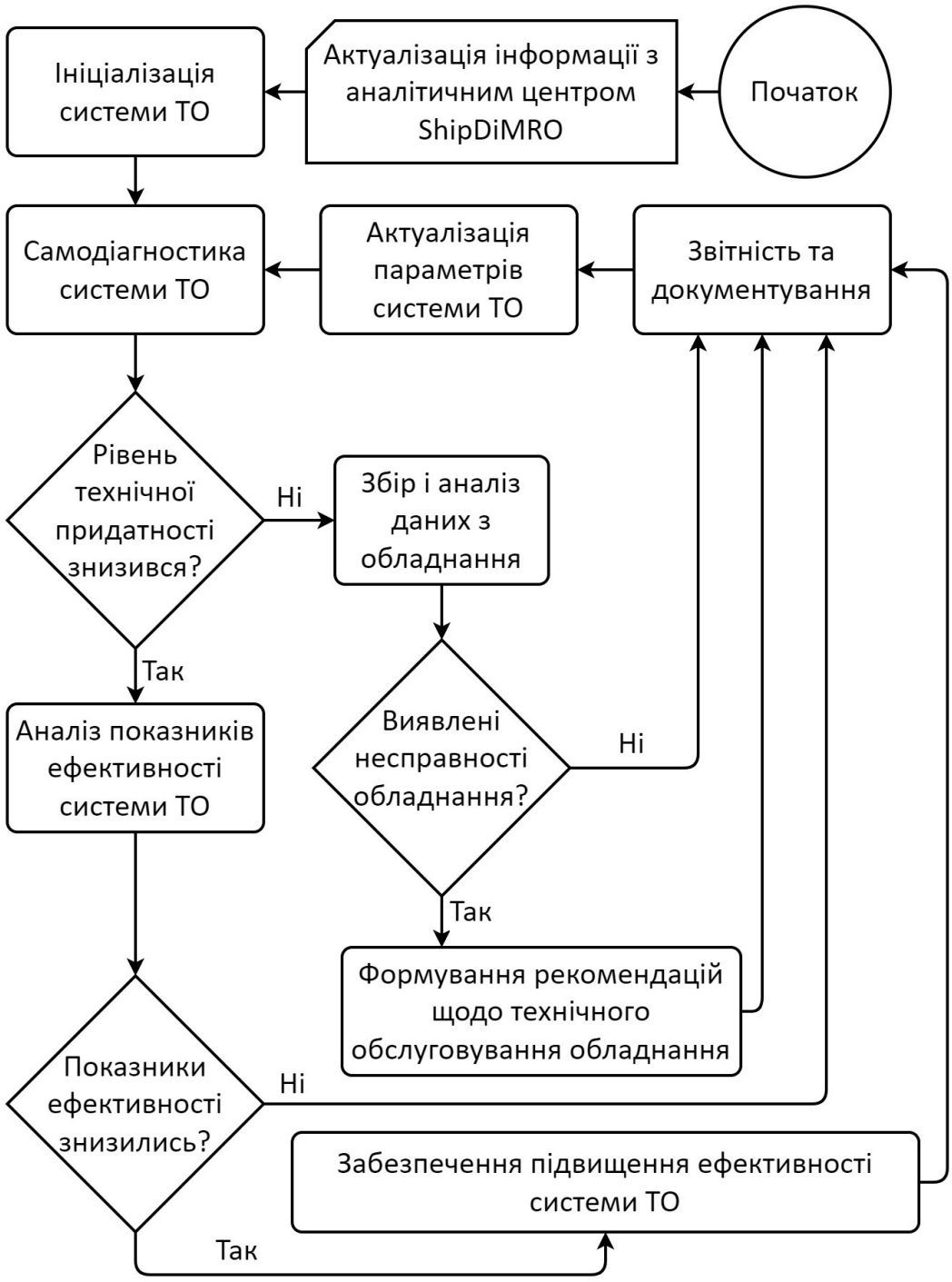


Рисунок 3.20 - Блок-схема алгоритму моніторингу і визначення статусу несправностей системи технічного обслуговування вантажного судна в межах системи КПТОВС [418]

Алгоритм (Рисунок 3.20) забезпечує комплексний підхід до моніторингу та управління станом технічного обслуговування вантажного судна, що включає виявлення та реагування на потенційні несправності, а також оптимізацію

ефективності системи. Блок-схема (Рисунок 3.20) містить в собі методики, які дозволяють об’єктивно оцінювати, аналізувати та оптимізувати процеси в системі технічного обслуговування, що сприяє підвищенню надійності, безпеки та ефективності обслуговування вантажного судна.

3.3.3 Розробка алгоритмів оцінювання способів підвищення ефективності системи ТО з можливістю прогнозування показників ефективності системи ТО та параметрів технічного стану СТЗ і К в умовах експлуатації

Алгоритм інформаційної системи (Рисунок 3.21), важливою задачею якого є оцінювання способів підвищення ефективності системи технічного обслуговування та включає прогнозування показників ефективності системи та параметрів технічного стану суднових технічних засобів, розпочинається з актуалізації інформації з аналітичним центром ShipDiMRO [418]. Далі відбувається збір і обробка даних, після чого вибирається метод апроксимації для аналізу даних (3.37). Застосування обраного методу апроксимації дозволяє оцінити якість отриманих апроксимацій (3.38) та визначити, чи знайдена оптимальна модель. Якщо модель вважається оптимальною, обирається результуючий ряд для подальшого аналізу [433]:

$$y = a_0 + a_1 x + a_1 x^2 + \cdots + + a_n x^n, \tag{3.37}$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_i (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_i (y_i - \bar{y}_i)^2} = 1 - \frac{SSE}{SST}, \tag{3.38}$$

На наступному етапі оцінюється адекватність та оптимальність структури моделі, виділяються статистичні характеристики моделі та розраховується сума квадратів відхилень. Це дозволяє коригувати структуру моделі в разі виявлення значних відхилень (3.39).

$$SSE = \sum_i (y_i - \hat{y}_i)^2, \tag{3.39}$$

Для прогнозування стану системи спочатку встановлюється глибина прогнозування і прогнозний часовий проміжок. Після цього застосовується модель для прогнозування, оцінюється достовірність прогнозу (3.40 – 3.43) та формується звіт прогнозу. У разі виявлення недостовірності прогнозу проводиться корекція моделі та повторний аналіз.

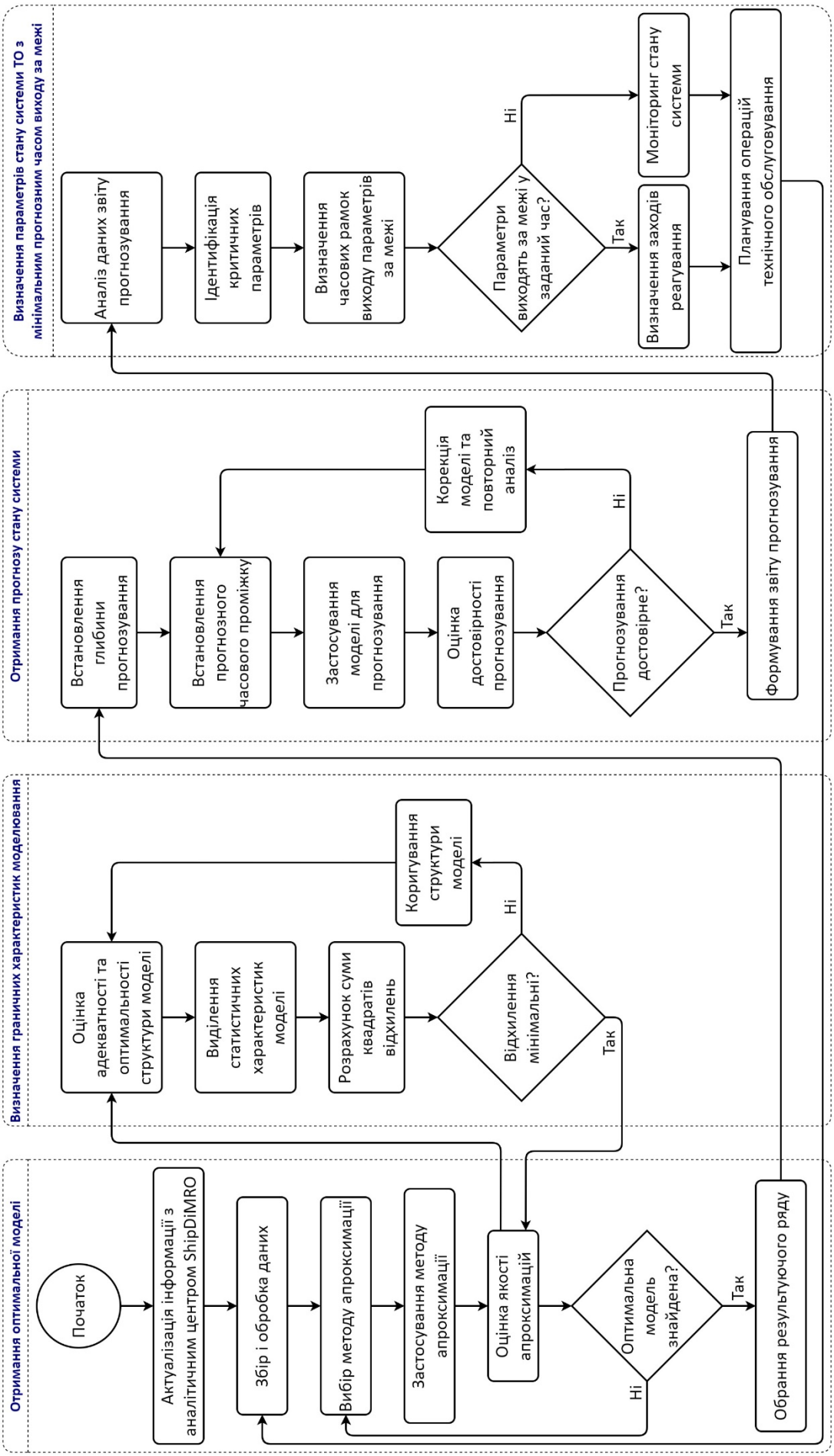


Рисунок 3.21 - Блок-схема алгоритму інформаційної системи оцінювання способів підвищення ефективності системи технічного обслуговування з можливістю прогнозування показників ефективності системи технічного обслуговування та параметрів технічного стану суднових технічних засобів і конструкцій в умовах експлуатації

За m кроків прогнозування розраховуються такі показники точності прогнозів:

- середня квадратична похибка:

$$MSE = \frac{\sum_{i=n-m+1}^{n}(y_i - \hat{y}_i)^2}{m}, \quad (3.40)$$

- корінь із середньоквадратичної похибки:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=n-m+1}^{n}(y_i - \hat{y}_i)^2}{m}}, \quad (3.41)$$

- середня абсолютна похибка:

$$MAE = \frac{\sum_{i=n-m+1}^{n}|y_i - \hat{y}_i|^2}{m}, \quad (3.42)$$

- середня абсолютна похибка у відсотках:

$$MAPE = \sum_{i=n-m+1}^{n} \frac{100 \cdot |y_i - \hat{y}_i|}{m|y_i|}, \quad (3.43)$$

Якість прогнозу тим вища, чим менше значення величин обчислених за формулами (3.40 – 3.43). Даний підхід дає якісні результати, якщо на періоді прогнозу не виникають принципово нові закономірності.

На останньому етапі аналізуються дані звіту прогнозування, ідентифікуються критичні параметри та визначаються часові рамки, протягом яких параметри можуть вийти за встановлені межі. Це дозволяє визначити необхідні заходи реагування та планувати технічне обслуговування. У разі відсутності критичних відхилень здійснюється моніторинг стану системи.

Алгоритм (Рисунок 3.21) забезпечує комплексний підхід до оцінювання ефективності системи технічного обслуговування та прогнозування стану технічних засобів, враховуючи поточні тенденції та можливі майбутні зміни [418].

Висновки до розділу 3

Було розроблено і сформовано інформаційну систему оцінювання способів підвищення ефективності систем ТО вантажних суден . Ця система включає в себе функції моніторингу параметрів системи ТО та параметрів технічного стану СТЗ і К, а також діагностування та прогнозування контрольованих величин в умовах експлуатації.

У рамках цього проекту були визначені та розроблені наступні ключові елементи:

1. Була створена загальна структура систем моніторингу для системи ТО вантажних суден, а також була визначена система взаємодії між компонентами інтелектуальних транспортних систем під час моніторингу параметрів системи ТО, яка входить в склад системи КПТОВС.

2. Була розроблена і сформована аналітична та об’єктна модель предметної області для оцінки можливих шляхів підвищення ефективності систем ТО вантажних суден. Ця модель включає в себе можливості прогнозування стану системи ТО під час її експлуатації як складної системи. Були визначені основні етапи створення цієї моделі, включаючи виділення структурних елементів та їх взаємозв’язків і докладно визначена структура бази даних для системи моніторингу, діагностики та прогнозування показників ефективності ТО та стану СТЗ і К.

3. Були розроблені алгоритми для збору даних про ефективність системи ТО та стан СТЗ і К, а також алгоритми діагностики стану та визначення несправностей у складі розробленої інформаційної системи. Також були розроблені алгоритми для прогнозування значень контрольованих параметрів в умовах експлуатації. На основі цієї інформаційної моделі і алгоритмів прогнозування були створені інформаційно-програмні комплекси "ShipDiMRO" і "ACMS" в рамках віртуального підприємства "shipmonitoring.org", яке займається технічним обслуговуванням вантажних суден.

Матеріали розділу 3 опубліковано в джерелах [118, 119, 120, 122, 123, 350, 365, 398, 413, 415, 418, 419, 427, 428, 431, 440, 441].

РОЗДІЛ 4
ЗАГАЛЬНА МЕТОДОЛОГІЯ ФОРМУВАННЯ ТА ОЦІНЮВАННЯ СПОСОБІВ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ СИСТЕМИ ТЕХНІЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ ВАНТАЖНОГО СУДНА

При детальному розгляді системи технічного обслуговування в її властивостях вбачаються всі ознаки складної ергатичної системи [45]. У теперішній час теорія дослідження складних ергатичних систем має досить розвинутий математичний апарат. Тому, для розробки методологічних основ аналізу і оцінки ефективності систем технічного обслуговування вантажних суден та наявних суднових технічних засобів доцільно використовувати саме теорію дослідження складних ергатичних систем. Особливості загальної методології формування та оцінювання способів підвищення ефективності систем ТО наведено у Додатку М14.

Розглянемо систему технічного обслуговування вантажного судна як комплекс, що складається із (M) компонентів (об'єкт технічного обслуговування, програма технічного обслуговування, судновий механік, фінансові можливості судноплавної компанії, та інші релевантні елементи). Відповідно, момент виникнення збійного стану в процесі функціонування будь-якого елемента (m) системи позначимо як (t). В результаті, стан системи технічного обслуговування вантажного судна можна визначити через випадковий вектор $\{t_m\}, m = \overline{1, M}$, який має деяку спільну M-вимірну щільність ймовірності $q(t_1, t_2, t_3, \dots, t_M, t)$. Очевидно, що умовний ефект від впровадження зазначеної системи технічного обслуговування вантажного судна, де збійні ситуації в її компонентах відбулись у відповідні моменти $t_1, t_2, t_3, \dots, t_M$, виступає як функція цих точок часу:

$$P(t) = P(t_1, t_2, t_3, \dots, t_M, \tau) \tag{4.1}$$

де τ – тривалість інтервалу часу від 0 до t, на якому застосовується система технічного обслуговування.

Умовний показник ефективності системи технічного обслуговування вантажного судна (4.1) в контексті специфічних задач, поставлених перед нею, може мати різну концептуальну наповненість. Показниками можуть бути рівень безпеки

судноплавства, рівень регулярності рейсів, рівень технічної придатності судна до використання за призначенням, оптимізація витрат на технічне обслуговування, мінімізація числа виконавців та інше (Таблиця Л.1).

Загалом, для всіх можливих станів системи технічного обслуговування вантажного судна індексом ефективності можна вважати математичне очікування функції випадкових аргументів:

$$E = M[P(t)] = \int_{-\infty_1}^{\infty} \dots \int_{-\infty_M}^{\infty} P(t_1, t_2, t_3, \dots, t_M) dt_1 \dots dt_M \qquad (4.2)$$

Математичне очікування (4.2) функції (4.1) характеризує процес функціонування системи технічного обслуговування вантажного судна в інтегральному відображенні для всіх можливих випадкових моментів часу виникнення збійних ситуацій, тоді як функція (4.1) характеризує цей процес лише в контексті визначених моментів часу t_m, за умови виникнення в них збійних ситуації.

Умовний показник ефективності системи технічного обслуговування вантажного судна (позначений як 4.1) є метрикою, що використовується для оцінки якості функціонування системи його технічного обслуговування в конкретному стані, що виникає при усуненні збійних ситуацій у визначені моменти часу. Враховуючи різні стани засобів водного транспорту, приводимо наступне визначення ефективності системи технічного обслуговування вантажного судна.

Використання статистичних методів та ймовірнісних показників дозволяє зробити оцінку більш об’єктивною, враховуючи непередбачені події та навіть стохастичні зміни в ході експлуатації судна. Такий підхід дозволяє реалістично оцінити ефективність системи технічного обслуговування вантажного судна, зробити правильні та збалансовані рішення для підвищення надійності та забезпечення безпеки плавання.

Тому ймовірність (позначена як 4.2) може бути розглянута як функція $E(t)$ випадкового аргументу t, яка застосовується на відрізку часу $[t_s, t_s + \tau]$. Значення функції розподілені з деякою сумісною щільністю ймовірності, відповідно до якої

визначаються час початку застосування системи технічного обслуговування вантажного судна і термін її дії, позначений як $q(t_s, \tau)$.

Тоді повну ймовірність виконання поставленої задачі перед даною системою технічного обслуговування можна знайти за допомогою формули математичного очікування:

$$\bar{E} = M[E(t_s, \tau)] = \int_s^{\infty} \int_s^{\infty} E(t_s, \tau) q(t_s, \tau) dt \tag{4.3}$$

Формула (4.3) дозволяє обчислити очікувану ймовірність успішного виконання задачі протягом відрізка часу $[t_s, t_s + \tau]$ з урахуванням розподілу часових параметрів початку дії та тривалості технічного обслуговування.

Такий підхід дозволяє узагальнити ймовірнісний показник ефективності технічного обслуговування вантажного судна на випадкові умови, що можуть виникати в реальних експлуатаційних умовах, і забезпечує більш точну та об’єктивну оцінку його функціонування.

Оскільки тривалість застосування систем технічного обслуговування вантажних суден є значною, а моменти внесення змін мають випадковий характер у широкому діапазоні можливих значень, оцінка ефективності за допомогою ймовірності (позначена як 4.2) виявляється у певній мірі суб’єктивною (невизначеною). З цього погляду, інтегральний критерій (позначений як 4.3) є більш об’єктивним, оскільки дозволяє враховувати можливі відхилення тривалості застосування системи технічного обслуговування вантажного судна від розрахункової.

Розсіювання можливих значень ймовірності E щодо її математичного очікування (позначеного як 4.3) оцінюється за допомогою відомої формули дисперсії функції випадкових аргументів [249]:

$$\sigma^2[E(t_s, \tau)] = \int_s^{\infty} \int_s^{\infty} [E(t_s, \tau) - \bar{E}]^2 q(t_s, \tau) dt_s d\tau \tag{4.4}$$

Такий підхід дозволяє ураховувати стохастичні зміни та варіації, що можуть виникати в експлуатаційних умовах, і дозволяє більш об’єктивно оцінювати

ефективність систем технічного обслуговування вантажних суден. Застосування статистичних методів і дисперсії дозволяє забезпечити більш точне та комплексне розуміння динаміки технічного обслуговування, а також зробити обґрунтовані висновки для підвищення надійності та безпеки вантажних суден.

Дисперсія (позначена як 4.4) є мірою варіації або розсіювання можливих значень ймовірності виконання задачі E відносно її математичного очікування. У випадку, коли дисперсія мала, ймовірність виконання задачі E демонструє невелике відхилення від свого середнього значення.

За допомогою функції $E(t_s, \tau)$ та відомої щільності ймовірності $q(t_s, \tau)$ отриманих з методів теорії ймовірностей [249], можна обчислити щільність ймовірності $V(E)$ можливих значень ймовірності E, які розподілені випадковим чином у межах від 0 до 1. Таким чином, дисперсія значень ймовірності E може бути визначена за такою формулою:

$$\sigma^2[E] = \int_0^1 (E - \bar{E}) V(E) dE \tag{4.5}$$

Обчислення дисперсії значень ймовірності E можна проводити за допомогою формул (4.4) та (4.5), і вони повинні давати однакові результати.

Довірча ймовірність того, що значення ймовірності виконання поставленої задачі E не менше заданого порогового значення E_d, визначається так:

$$P(E \geq E_d) = \int_{E_d}^1 V(E) dE \tag{4.6}$$

Ця довірча ймовірність є важливим критерієм для оцінки вірогідності успішного виконання задачі та надійності системи технічного обслуговування вантажних суден. Вона дозволяє зрозуміти, наскільки система може задовольняти вимогам та досягати запланованої ефективності в різних умовах експлуатації. Чим більше довірча ймовірність (позначена як 4.6), тим більше впевненості у тому, що дана система технічного обслуговування працює ефективно. Висока довірча

ймовірність свідчить про більш впевнений результат та більш надійну вірогідність успішного виконання поставленої задачі.

Визначення поняття збійної ситуації для складних систем, таких як система технічного обслуговування вантажних суден, є викликом через її здатність виконувати поставлені перед нею завдання навіть при порушенні організаційних, технічних та інформаційних компонентів. Для розв’язання цієї проблеми, одним із можливих підходів є встановлення вимог до рівня "спаду" ефективності, який задається у вигляді наступної умови:

$$E(t) < E_d \tag{4.7}$$

Цей підхід передбачає встановлення конкретних критеріїв або параметрів, які оцінюються в процесі функціонування системи технічного обслуговування. Вимоги до рівня "спаду" ефективності допомагають зрозуміти, як система повинна діяти у складних умовах та при можливих недоліках або відхиленнях. При задоволенні нерівності (позначеної як 4.7), система технічного обслуговування вантажного судна вважається неспроможною виконувати покладені на неї задачі. З рішення рівняння $E(t) = E$ знаходиться час функціонування системи технічного обслуговування вантажного судна без збійних ситуацій у виді зворотної функції:

$$\tau = \frac{E_d}{E} \tag{4.8}$$

Це рівняння дозволяє визначити той часовий проміжок, протягом якого система може працювати без збоїв і успішно виконувати свої завдання. Результатом розв’язання цього рівняння є встановлення оптимального часу функціонування системи, при якому вона забезпечує необхідний рівень ефективності та безпеки.

Вимоги до ефективності системи технічного обслуговування можуть значно відрізнятись залежно від специфіки застосування вантажного судна в конкретній судноплавній компанії. Таким чином, задане значення ймовірності E є випадковою величиною, оскільки вона піддається впливу різних випадкових факторів. Для оцінки часу функціонування системи технічного обслуговування вантажного судна без збійних ситуацій, використовується математичне очікування функції (позначене як 4.8):

$$\bar{\tau} = M\left[\frac{E_d}{E}\right] \tag{4.9}$$

Математичне очікування дозволяє визначити середнє значення часу, протягом якого система здатна працювати без збоїв та успішно виконувати свої функції. Воно слугує важливим критерієм для оцінки ефективності технічного обслуговування та допомагає виробникам суден і судноплавним компаніям приймати обґрунтовані рішення щодо оптимізації процесів обслуговування, забезпечення безпеки та надійності вантажних суден.

Особливістю розглянутих показників ефективності систем технічного обслуговування вантажних суден є їхня ймовірнісно-статистична природа. Однак, дослідження ефективності таких систем на основі загальної моделі (позначеної як 4.2), практично неможливо в силу труднощів знаходження підінтегральної функції (позначеної як 4.1) і повторного інтегрування. Це зумовлює необхідність введення ряду обмежень і допущень, які повинні бути коректними і достатніми:

1. Перше припущення передбачає, що обмеження, прийняті для моделі, не суперечать фізичній сутності реальних процесів функціонування систем технічного обслуговування [98]. Вони повинні бути відповідним чином обґрунтовані і відображати особливості дійсних умов експлуатації;
2. Друге припущення полягає у тому, що введені обмеження повинні забезпечувати достатню простоту рішення задачі оцінки ефективності, однак не за рахунок значної втрати його строгості [317]. Це дозволяє зберегти наукову обґрунтованість та адекватність отриманих результатів.

Розглянуті вхідні положення визначають основний зміст, напрямки і методологію дослідження ефективності систем технічного обслуговування вантажних суден і її окремих складових частин. Вони дозволяють виявити коло питань, які необхідно вирішувати при дослідженні ефективності систем технічного обслуговування на всіх етапах життєвого циклу вантажних суден. Такий науковий підхід допомагає забезпечити обґрунтованість та достовірність оцінок, а також підвищити ефективність функціонування систем обслуговування, що має важливе значення для судноплавної промисловості та безпеки на морі.

4.1 Логічна організація процесу оцінювання та вибору способу підвищення ефективності системи технічного обслуговування вантажного судна

Особливості логічної організації процесу оцінювання та вибору способу підвищення ефективності системи технічного обслуговування вантажного судна наведено у Додатку М15.

4.1.1 Фактори, що визначають ефективність операцій системи КПТОВС

У практиці оцінювання якості систем технічного обслуговування не завжди використовують у повному обсязі підхід, що ґрунтується на визначенні потенційної ефективності операції. Залежно від складності системи та мети дослідження доцільно введення кількох рівнів якості [87]. Емпірично встановлено рівні якості, які отримали назви: стійкість, стійкість до перешкод, керованість, спроможність, самоорганізація.

Опис факторів, що визначають ефективність операцій системи ТО наведено у Додатку М16.

На Рисунку 4.1 схематично показано якості систем технічного обслуговування, складність яких підвищується. Перераховані в порядку ускладнення *R, I, C, A, L*-якості, умовно зображені у вигляді системи вкладених прямокутників. Таке графічне представлення розглянутих якостей систем логічно означає таке: система, що має, наприклад, *C*-якість, має і всі інші простіші якості *I* і *R*-якості, але не має якостей вищого порядку *A* і *L*-якостей.

Схему факторів, що визначають ефективність систем технічного обслуговування, наведено на Рисунку 4.2.

Під час дослідження систем фактори відображають у вигляді змінних (числових і нечислових). Класифікацію чинників наведено на Рисунку 4.3.

З погляду інформованості дослідника про ці змінні фактори поділяють на визначені Λ_F і невизначені Λ_Ω. До визначених відносять змінні, значення яких відомі досліднику з необхідною точністю. Це різного роду задані параметри, відомі (регулярні) функції певних аргументів тощо. До визначених факторів також відносять контрольовані вхідні впливи, зокрема й керовані змінні.

До невизначених відносять змінні, про значення яких у реальному процесі дослідник обізнаний не повністю. Природа невизначеності цих змінних (факторів)

може бути різною. Зазвичай невизначені змінні поділяють на дві групи: випадкові змінні Λ_E і невизначені змінні нестохастичної природи Λ_J.

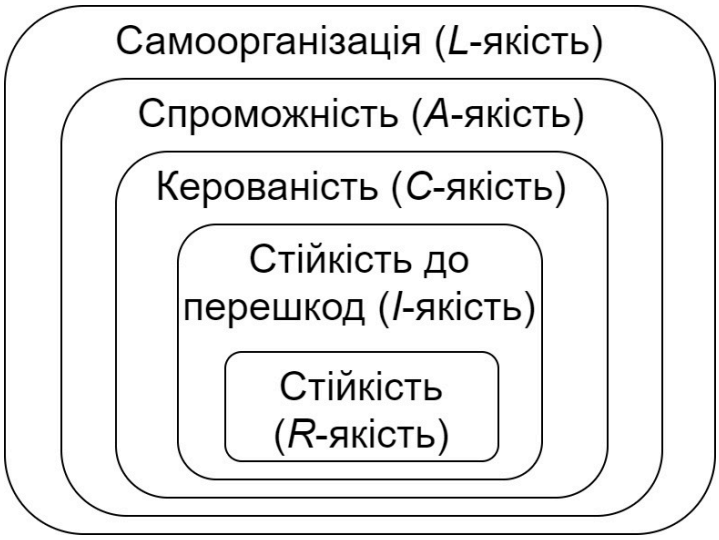


Рисунок 4.1 – Якості системи технічного обслуговування

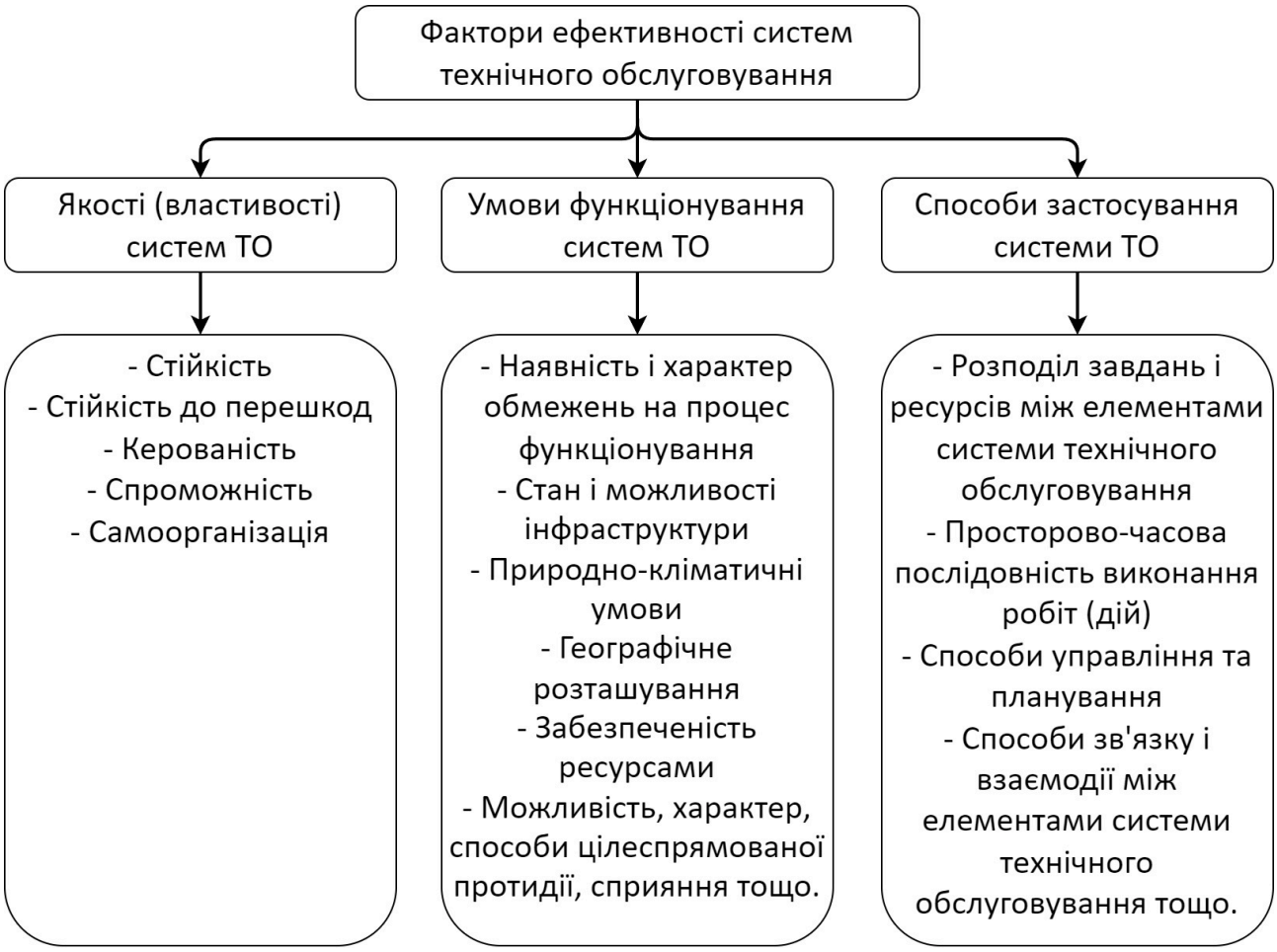


Рисунок 4.2 – Схема факторів, що визначають ефективність систем технічного обслуговування

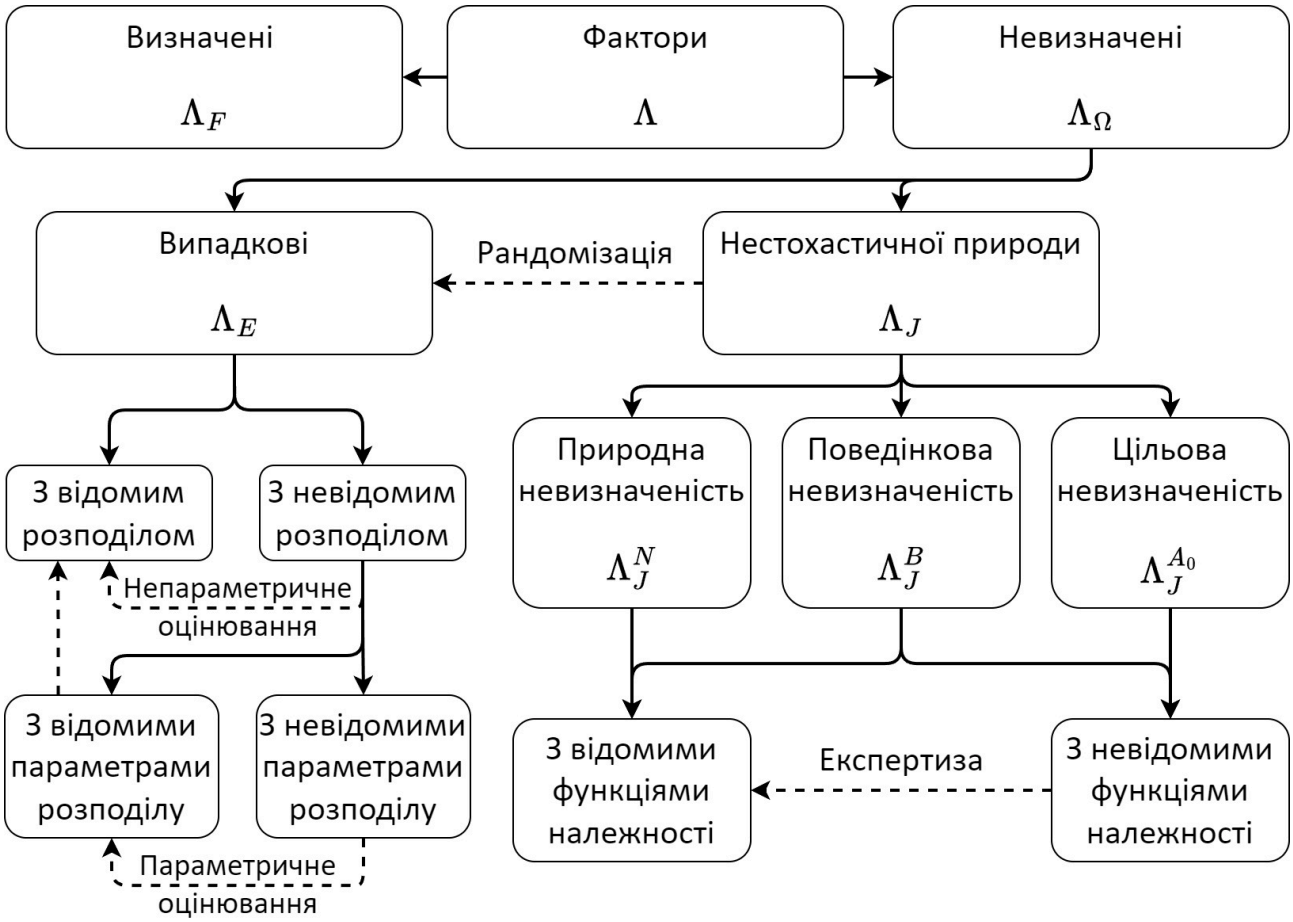


Рисунок 4.3 – Класифікація факторів, що впливають на ефективність систем технічного обслуговування

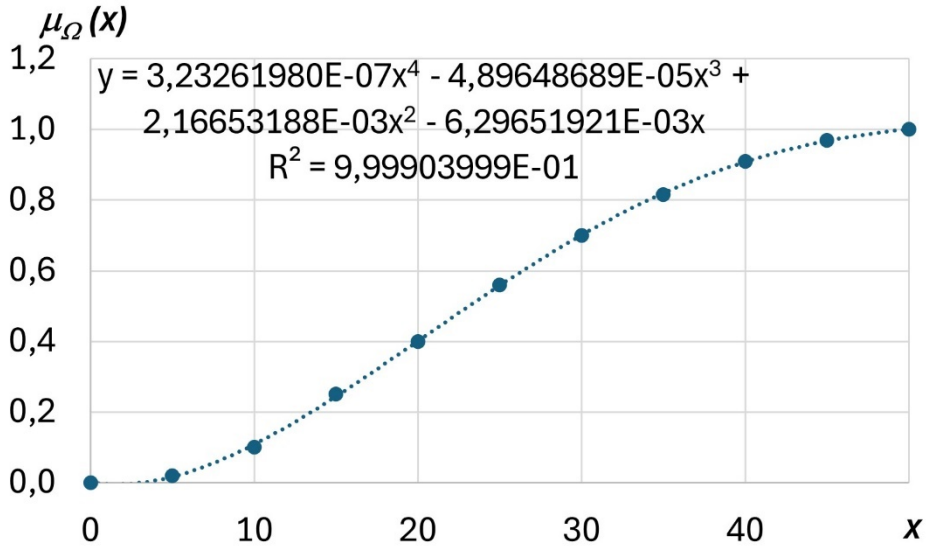


Рисунок 4.4 – Функція належності нечіткої множини складних систем

Якщо розподіл випадкової змінної (наприклад, у вигляді функції розподілу) відомий, то в цьому разі кажуть, що змінна статистично визначена. Випадкові змінні

з невідомими розподілами поділяють на два види: з відомими параметрами (характеристиками) розподілу та з невідомими параметрами. Під час дослідження систем із випадковими факторами широко використовують ймовірнісно-статистичні методи.

Наприклад, методами параметричного статистичного оцінювання можна визначити параметри розподілу випадкових змінних на основі статистичних випробувань (якщо такі можливі). Непараметричне оцінювання дає змогу встановити розподіли випадкових змінних.

Невизначені фактори нестохастичної природи Λ_J можна умовно поділити на дві групи: з відомими функціями належності (діапазонами зміни змінних), з невідомими функціями належності.

Функція належності задає деяку підмножину (підобласть) загальної припустимої області зміни фактора, що визначається, наприклад, фізичною природою відповідного фактора. Очевидно, підобласть, що визначається функцією належності, у певному сенсі відображає ступінь невизначеності фактора. Зрозуміло, що чим меншою є підобласть, яка визначається функцією належності, тим меншим є ступінь невизначеності фактора. У границі функція належності, що виділяє лише одне значення фактора, переводить його в розряд визначених факторів.

Найбільший ступінь невизначеності мають фактори з невідомими функціями належності. Зазвичай до них застосовують процедуру експертного оцінювання діапазонів змін їх значень.

Часто для опису факторів нестохастичної природи використовують апарат теорії нечітких множин [224]. Нечітка підмножина Ω деякої універсальної множини D $(\Omega \subset D)$ характеризується функцією належності $\mu_\Omega(d)$, значення якої є ступінь належності елемента d підмножині Ω. При цьому $\mu_\Omega(d)$ може набувати будь-якого значення в числовому інтервалі [0; 1], тобто $0 \leq \mu_\Omega(d) \leq 1$.

Підмножина у звичайному («чіткому») сенсі характеризується функцією приналежності, що набуває лише двох значень:

$$\mu_\Omega(d) = \begin{cases} 1, \text{якщо } d \in \Omega; \\ 0, \text{якщо } d \overline{\in} \Omega; \end{cases} \quad (4.10)$$

Таким чином, поняття функції належності нечіткої множини є досить широким узагальненням функції належності звичайної множини.

У досліджуваному випадку універсальна множина D є загальна область значень фактора. Функція $\mu_\Omega(d)$ виділяє нечітку підмножину його реальних значень у досліджуваних явищах. Зазвичай функцію належності вводять у вигляді так званої лінгвістичної змінної, тобто змінної, значення якої визначають реченням у природній мові [244]. Наприклад, категорія «складність» стосовно системи є лінгвістичною змінною, а її значення виражаються словами: не складна, не дуже складна, складна, досить складна, дуже складна [23]. У деякому класі систем зазначена лінгвістична змінна задає нечітку множину, наприклад, складних систем. На Рисунку 4.4 показано функцію належності $\mu_\Omega(x)$ для значення лінгвістичної змінної «складна система», що задає нечітку підмножину складних систем на множині систем із різним числом зв'язків x між елементами. Апроксимуючий поліном, що описує функцію належності $\mu_\Omega(x)$ наведено на Рисунку 4.4.

У практиці для побудови функції належності нерідко вдаються до експертного опитування з метою виявлення частки експертів, які при фіксованому (x) віднесли систему до класу складних. Цю частку експертів і приймають за значення функції належності $\mu_\Omega(x)$.

Наприклад, якщо чотири експерти з десяти систему, що має 20 зв'язків, віднесли до класу складних, то $\mu_\Omega(20) = 0{,}4$. Результат за поліномом дорівнює $\mu_\Omega(20) = 0{,}40069$.

Нерідко для опису невизначених факторів нестохастичної природи використовують суб'єктивні ймовірності [22]. У цьому разі при аналізі систем застосовується теорія ймовірностей. Однак при введенні суб'єктивних ймовірностей закон великих чисел може перестати діяти [326]. Суб'єктивні ймовірності вводять зазвичай за допомогою експертного оцінювання.

Деякі невизначеності нестохастичної природи іноді вдається перевести в розряд випадкових чинників за допомогою рандомізації (Рисунок 4.3). Під рандомізацією

розуміють штучне введення випадковості в ситуацію, де вона відсутня. Наприклад, під час аналізу ефективності пошуку об'єктів обслуговування (СТЗ, вантажних суден) досліднику може бути відомий лише район розташування деякого об'єкта. Положення об'єкта невипадкове. Однак дослідник може припустити, що в межах відомого району положення об'єкта розподілене з постійною щільністю ймовірності. Цим він рандомізував положення об'єкта, тобто ввів штучно ймовірнісний розподіл. Далі ситуацію з рандомізацією можна дослідити методами теорії ймовірностей і математичної статистики.

В окрему групу (за ступенем спільності) виокремлюють результуючі фактори, тобто фактори, що безпосередньо формують результат операції. До результуючих факторів, як уже зазначалося, відносять корисний ефект (q), досягнутий в операції, витрачені ресурси (C) і терміни (T) проведення операції. Результат операції подають у вигляді вектору, компонентами якого є результуючі фактори, тобто:

$$Y = \|q, C, T\| \tag{4.11}$$

або описують функцією від результуючих факторів. Досить загальним, наприклад, є подання результату операції у вигляді степеневої функції від результуючих факторів:

$$Y = \alpha_0 q^{\alpha_1} C^{\alpha_2} T^{\alpha_3}, \tag{4.12}$$

де $\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ – параметри функції результату.

При цьому результат буде нульовим, якщо хоча б один із результуючих чинників виявиться рівним нулю. Для опису результату в практиці часто використовують різні окремі випадки наведеної функції:

$$\begin{cases} \alpha_0 = \alpha_1 = 1 \\ \alpha_2 = \alpha_3 = 0 \end{cases} \Longrightarrow y = q \tag{4.13}$$

$$\begin{cases} \alpha_0 = \alpha_2 = 1 \\ \alpha_1 = \alpha_3 = 0 \end{cases} \Longrightarrow y = C \tag{4.14}$$

$$\begin{cases} \alpha_0 = \alpha_3 = 1 \\ \alpha_1 = \alpha_2 = 0 \end{cases} \Longrightarrow y = T \tag{4.15}$$

У цих окремих випадках результат операції описується лише результуючим фактором (при цьому на інші результуючі фактори накладають зазвичай обмеження у вигляді нерівностей).

Якщо припустити, що:

$$\begin{cases} \alpha_0 = \alpha_1 = 1 \\ \alpha_2 = -1 \\ \alpha_3 = 0 \end{cases} \Longrightarrow y = \frac{q}{C} \tag{4.16}$$

то вираз (4.16) можна використовувати під час аналізу систем за методом «ефект – витрати».

Використовуються й інші форми опису залежності результату операції від результуючих факторів. Зручно, наприклад, результат представляти у вигляді полінома від цих факторів [119].

Під час дослідження стохастичних систем, тобто систем, на поведінку яких істотно впливають випадкові чинники, результат операції Y буде випадковою змінною.

4.1.2 Загальна схема досліджень ефективності операцій технічного обслуговування

Форми досліджень ефективності технічного обслуговування дуже різноманітні. Мабуть, не може існувати універсальної рецептурної схеми проведення дослідження ефективності операцій технічного обслуговування, що належать навіть до однієї галузі техніки. Однак може виявитися корисним деякий перелік узагальнених положень, дотримуючись якого дослідник організовує свою діяльність під час розв’язання конкретної науково-технічної задачі, розділяючи її на етапи. У Додатку М17 наведено перелік таких положень, що становить узагальнену схему дослідження ефективності операцій.

На Рисунку 4.5 наведено схему основних етапів дослідження ефективності операцій технічного обслуговування і показано зв’язок між ними. Проблемний аналіз безпосередньо не входить у дослідження ефективності операції. Він передує цьому дослідженню, будучи необхідним його початковим етапом. Етап ухвалення рішення має більше організаційний характер, ніж дослідницький, будучи завершальною стадією всієї роботи. Порядок пунктів усередині кожного етапу залежно від конкретного дослідження може бути змінений, а частина пунктів – опущена. Крім того, всередині етапів, а також між етапами можливі цикли, тобто повернення після

виконання певних пунктів (етапів) до попередніх пунктів залежно від одержуваних проміжних результатів.

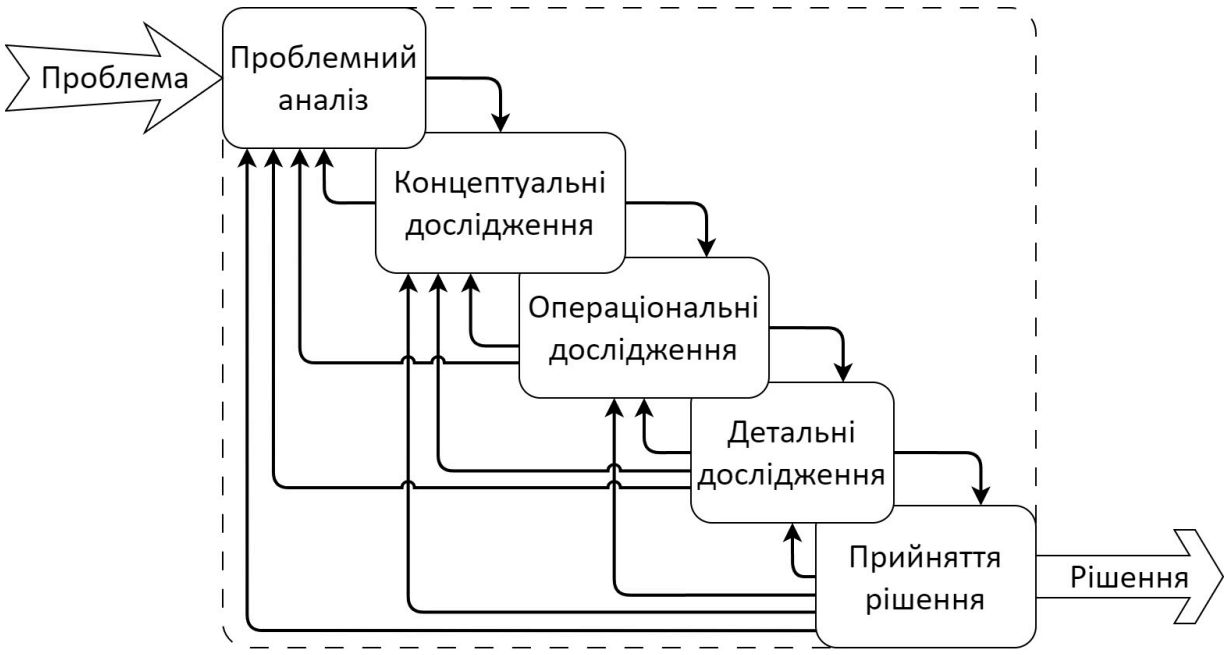


Рисунок 4.5 – Основні етапи дослідження ефективності операцій

З формального погляду на етапі проблемного аналізу реалізується відображення:

$$\alpha_0 \times \pi \to M_1, \tag{4.17}$$

де M_1 – множина метасистемних описів певної системи технічного обслуговування.

Відображення (4.17) кожній парі «мета–засіб» її досягнення ставить у відповідність конкретний метасистемний опис галузі системи технічного обслуговування, сукупність засобів якої здатна раціонально розв’язати виявлену проблему.

На етапі концептуальних досліджень реалізується відображення:

$$M_1 \times \mu \times \nu \times \gamma \to M_2, \tag{4.18}$$

де M_2 – безліч варіантів зовнішнього доповнення з конкретним описом S_o-системи, в рамках якої реалізується досліджувана операція.

Операціональне дослідження формально можна представити відображенням:

$$M_2 \times D \to U^*, \tag{4.19}$$

де D – множина варіантів вихідних даних задачі вибору раціонального рішення; U^* – множина раціональних рішень за різних варіантів вихідних даних.

Етап прийняття рішення реалізує відображення:

$$U^* \times \sigma \to U^*, \tag{4.20}$$

де σ – множина можливих ситуацій, що склалися до моменту ухвалення рішення.

Послідовна реалізація відображень (4.17) - (4.20) являє собою формальну схему дослідження ефективності операції технічного обслуговування. Такий формальний підхід становить основу для автоматизації системних досліджень ефективності операцій і загалом систем технічного обслуговування. Наразі практичне застосування такого підходу послідовно реалізовано в системі ShipDiMRO. Проте в міру накопичення результатів системних досліджень ефективності операцій і систем технічного обслуговування, систематизації різних підходів до метасистемного опису предметної області ступінь розмитості (нечіткості) відображень (4.17) - (4.20) значною мірою знижується. Це відкриває реальний шлях до розв'язання зазначеної проблеми на базі існуючої електронно-обчислювальної системи прескриптивного технічного обслуговування ShipDiMRO і розроблення відповідного математичного забезпечення у вигляді великих проблемно-орієнтованих імітаційних систем (див. розділ 7 дисертації).

4.1.3 Критерії ефективності системи технічного обслуговування

Критерій ефективності системи технічного обслуговування K є правило, що дає змогу зіставляти стратегії, які характеризуються різним ступенем досягнення мети, і здійснювати спрямований вибір стратегій із множини допустимих.

Критерій ефективності вводиться на основі певної концепції раціональної поведінки [334].

Існують три концепції раціональної поведінки (вироблення рішень) систем технічного обслуговування: придатності, оптимізації, адаптивізації [110].

Згідно з концепцією придатності раціональною є будь-яка стратегія u, за якої обраний показник ефективності системи технічного обслуговування набуває значення не нижче деякого прийнятного рівня W^{rq}, тобто:

$$W(u) \geq W^{rq}, u \in U, \tag{4.21}$$

де U – множина допустимих стратегій.

Якщо показник ефективності векторний (Таблиця Л.1), то нерівність (4.21) записується для кожного часткового показника $W_i(u) \geq W_i^{rq}$, що входить до складу векторного показника ефективності системи технічного обслуговування. Таким чином, рівень забезпечення W^{rq} ділить множину допустимих стратегій U на дві підмножини, що не перетинаються: U^{SAT} – множина прийнятних (пригожих) стратегій і множина неприйнятних стратегій $U \backslash U^{SAT}$. Усі прийнятні стратегії $u \in U^{SAT}$ рівноцінні (однаково задовільні), як і всі неприйнятні стратегії з множини $U \backslash U^{SAT}$ однаково незадовільні. Така концепція призводить до негнучкої та нецілеспрямованої системи дій.

Концепція оптимізації вважає раціональними ті стратегії $u \in U$, які забезпечують максимальний ефект в операції, тобто

$$W(u^*) = \max_{u \in U} W(u), \tag{4.22}$$

Оптимальна стратегія може бути неєдиною, тобто розв'язання задачі (4.22) може дати безліч рівноцінних оптимальних стратегій $U^* \in U$.

Використовувати концепцію оптимізації можна в тому разі, якщо комплекс умов проведення операції строго фіксований, а показник ефективності $W(u)$ – скаляр. Ця концепція призводить до цілеспрямованої, але не гнучкої системи дій, тому що не враховують поточну інформацію про зміни різного роду, які відбуваються в системі та в зовнішньому середовищі під час реалізації рішення u^*.

Концепція адаптивізації передбачає можливість оперативного реагування під час операції технічного обслуговування на поточну інформацію, що надходить, про зміну комплексу умов проведення операції. Суть концепції адаптивізації полягає у зміні стратегій управління і (стратегію розуміють у ширшому розумінні, вона охоплює як способи зміни параметрів системи технічного обслуговування, так і способи зміни її структури) на основі не тільки апріорної, а й поточної та прогнозної інформації з метою досягнення або збереження певного стану системи в умовах несталого комплексу умов проведення операції.

Множина допустимих стратегій U може видозмінюватися в процесі надходження поточної та прогнозної інформації. Як реакція на інформацію, що

надходить, і прогноз розвитку операції система технічного обслуговування може змінювати мету свого функціонування.

У цьому разі згідно з концепцією адаптивізації раціональною слід вважати таку адаптивну стратегію $u(t)$ з множини $U(t,\tau)$, яка забезпечує, наприклад, виконання умови:

$$W_t(u^*(t),\tau) \geq W^{rq}(u(t),\tau), u(t) \in U(t,\tau), \quad (4.23)$$

де t — час; τ — упередження прогнозу. Запис W_t означає, що показник ефективності може змінюватися в часі.

Концепція адаптивізації призводить до цілеспрямованої та гнучкої логіки дій у системі технічного обслуговування.

У рамках концепції придатності рекомендується вибір стратегії з умови (4.21). Наведемо основні критерії придатності.

1. Критерій прийнятного результату. В умовах визначеності як показник ефективності може бути обрано результат операції $y(u)$, мета якої має кількісний характер. У цьому випадку функція відповідності має вигляд $\rho(y(u), y^{rq}) = y(u)$. Критерій прийнятного результату рекомендує обирати стратегію (u) із множини допустимих, що задовольняє умову:

$$u^*: y(u) \geq y^{rq}, \quad (4.24)$$

де y^{rq} – прийнятний рівень результату.

2. Критерій допустимої гарантії. Згідно з цим критерієм функцію відповідності вибирають у вигляді:

$$\rho(y(u), y^{rq}) = \begin{cases} 1, \text{якщо } y \geq y^{rq}; \\ 0, \text{якщо } y < y^{rq}; \end{cases} \quad (4.25)$$

Принцип допустимої гарантії рекомендує вибирати стратегію (u) з умови:

$$u^*: P(y(u) \geq y^{rq}) \geq P^{rq}, \quad (4.26)$$

де P^{rq} – прийнятний рівень ймовірнісної гарантії.

3. Критерій допустимого гарантованого результату. Згідно з цим критерієм, функція відповідності має вигляд:

$$\rho = F_u^{-1}(1-\alpha) = y_\alpha(u), \quad (4.27)$$

Підходящу стратегію вибирають з умови:

$$u^*: y_\alpha(u) \geq y^{rq}, \tag{4.28}$$

де y^{rq} – допустимий рівень гарантованого (з ймовірністю α) результата.

4.1.4 Критерії оптимальності вибору цифрової стратегії підвищення ефективності системи технічного обслуговування вантажного судна

Залежно від виду функції відповідності в рамках концепції оптимізації параметрів системи технічного обслуговування виділяють такі критерії оптимальності.

1. Критерій найбільшого результату.

За аналогією з принципом прийнятного результату тут $\rho(y(u), y^{rq}) = y(u)$. Оптимальну стратегію вибирають з умови (4.22), тобто:

$$u^*: \max_{u \in U} y(u), \tag{4.29}$$

2. Критерій найбільшого середнього результату. За істотного впливу випадкових чинників часто сам результат $\hat{y}(u)$ вибирають як функцію відповідності. Тоді показник ефективності є математичне очікування результату (середній результат), тобто:

$$W(u) = M[\hat{y}(u)], \tag{4.30}$$

Критерій найбільшого середнього результату рекомендує вибирати як оптимальну стратегію u^*, для якої:

$$u^*: \max_{u \in U} M[\hat{y}(u)], \tag{4.31}$$

3. Критерій найбільшої ймовірнісної гарантії результату. Якщо результат операції виражається випадковою змінною $\hat{y}(u)$ і чітко визначено необхідний результат y^{rq}, то функцію відповідності вводять у такому вигляді:

$$\rho(y(u), y^{rq}) = \begin{cases} 1, \text{якщо } y(u) \geq y^{rq}; \\ 0, \text{якщо } y(u) < y^{rq}; \end{cases} \tag{4.32}$$

У цьому разі є ймовірність того, що реальний результат операції набуде значення, не нижчого за необхідний рівень, тобто:

$$W(u) = P(\hat{y}(u) \geq y^{rq}), \tag{4.33}$$

Критерій найбільшої ймовірнісної гарантії рекомендує як оптимальну вибирати стратегію $u^* \in U$ з умови:

$$u^*: \max_{u \in U} P(\hat{y}(u) \geq y^{rq}), \tag{4.34}$$

Ця умова зберігається при нечіткому визначенні y^{rq} за допомогою функції належності $\mu_A(y^{rq})$. У цьому разі функцію відповідності слід ототожнити з функцією належності, тобто:

$$\rho(y(u), y^{rq}) = \mu_A(y^{rq}), \tag{4.35}$$

Умова (4.34) набуде вигляду $u^* = \max_{u \in U} P(\hat{y}(u) \geq \hat{y}^{rq})$, . За випадкового характеру y^{rq} умова(4.34) зберігається в такому вигляді:

$$u^*: \max_{u \in U} P(\hat{y}(u) \geq \hat{y}^{rq}), \tag{4.36}$$

4. Критерій найбільшого гарантованого результату. За випадкового характеру результату $\hat{y}(u)$ операції гарантованим результатом (ймовірнісно-гарантованим результатом) називають рівень $y_\alpha(u)$, не нижче якого буде отримано реальний результат із заданою ймовірністю, тобто:

$$\alpha = P\big(\hat{y}(u) \geq y_\alpha(u)\big), \tag{4.37}$$

З цього виходить $y_\alpha(u) = F_u^{-1}(1-\alpha)$, і функція відповідності є $\rho = y_\alpha(u)$.

Отже, показник ефективності в силу того, що $y_\alpha(u)$ не є випадковою змінною, набуває вигляду:

$$W(u) = y_\alpha(u), \tag{4.38}$$

Згідно з критерієм найбільшого гарантованого (ймовірнісно-гарантованого) результату оптимальну стратегію обирають з умови:

$$u^*: \max_{u \in U} y_\alpha(u), \tag{4.39}$$

за фіксованої ймовірності α.

Нехай в умовах конфлікту показник ефективності $W(u)$ має вигляд $W(u) = \min_{v \in V} M[\rho(y(u,v), y^{rq})]$. Критерій найбільшого гарантованого результату в цьому випадку як оптимальну рекомендує вибирати стратегію u^* з умови:

$$u^*: \max_{u \in U} \min_{v \in V} M[\rho(y(u,v), y^{rq})], \tag{4.40}$$

Ця умова відображає принцип максиміна. При цьому стратегію u^* називають максимінною.

4.1.5 Концепція адаптивізації функціонування системи КПТОВС

У рамках концепції адаптивізації раціональна поведінка системи технічного обслуговування вантажних суден організовується відповідно до наведених у Додатку М18 основних принципів вибору критеріїв ефективності.

Поєднання цих принципів дало змогу розробити прескриптивну систему технічного обслуговування, здатну до самонавчання і самостійної адаптації, передбачення і запобігання потенційним проблемам, гнучких реакцій на мінливі умови і потреби, а також удосконалення своїх процесів, забезпечуючи безперервне поліпшення якості та ефективності технічного обслуговування [416].

Класифікацію критеріїв ефективності наведено на Рисунку 4.6. Найважливішим положенням, якого завжди слід дотримуватися під час вибору критерію ефективності операції технічного обслуговування, є узгодження мети операції та критерію ефективності.

У випадках, коли визначено необхідний результат операції, критерій найбільшої ймовірнісної гарантії краще узгоджений з метою операції, ніж критерій найбільшого середнього результату. Останній не враховує дисперсії, що характеризує розсіювання реального результату операції. На рисунку 4.7 зображено функції розподілу реального результату операції $F_{u_1}(y)$ та $F_{u_2}(y)$ при використанні стратегій u_1 та u_2.

Припустимо, що математичні очікування результатів для стратегій u_1 та u_2 однакові, тобто $M[y(u_1)] = M[y(u_2)]$. За фіксованого значення необхідного результату, як видно з рисунка, $P_{u_1}(y \geq y^{rq}) < P_{u_2}(y \geq y^{rq})$. Отже, перевагу слід віддати стратегії u_2. Однак, якщо значення необхідного результату вибрати досить великим $\left(y_1^{rq}\right)$, то перевагу матиме стратегія u_1, але при цьому рівень ймовірнісної гарантії неприйнятно низький.

Отже, рішення, що ухвалюються на основі критерію найбільшої ймовірнісної гарантії, можуть істотно залежати від рівня необхідного результату. Аналогічний висновок можна зробити щодо критерію найбільшого гарантованого результату, за якого рішення залежать від рівня гарантії α. На Рисунку 4.8 показано схему вибору

стратегії за критерієм найбільшого гарантованого результату для випадку, коли з двох допустимих стратегій u_1 и u_2 за рівня ймовірнісної гарантії α перевагу віддають стратегії u_2: $\left(y_\alpha(u_1) < y_\alpha(u_2)\right)$.

Однак, на рівні гарантій α' слід обрати стратегію u_1, оскільки $y_{\alpha'}(u_1) < y_{\alpha'}(u_2)$, але цей рівень гарантії, як показано на малюнку, неприйнятно малий.

Таким чином, критерій найбільшої ймовірнісної гарантії слід використовувати за не надто великих значень необхідного результату y^{rq} (зазвичай менших за середній результат, тобто $y^{rq} < M[y(u)]$. Критерій найбільшого гарантованого результату використовують за досить високого рівня ступеня гарантії ($\alpha > 0{,}6 \div 0{,}7$).

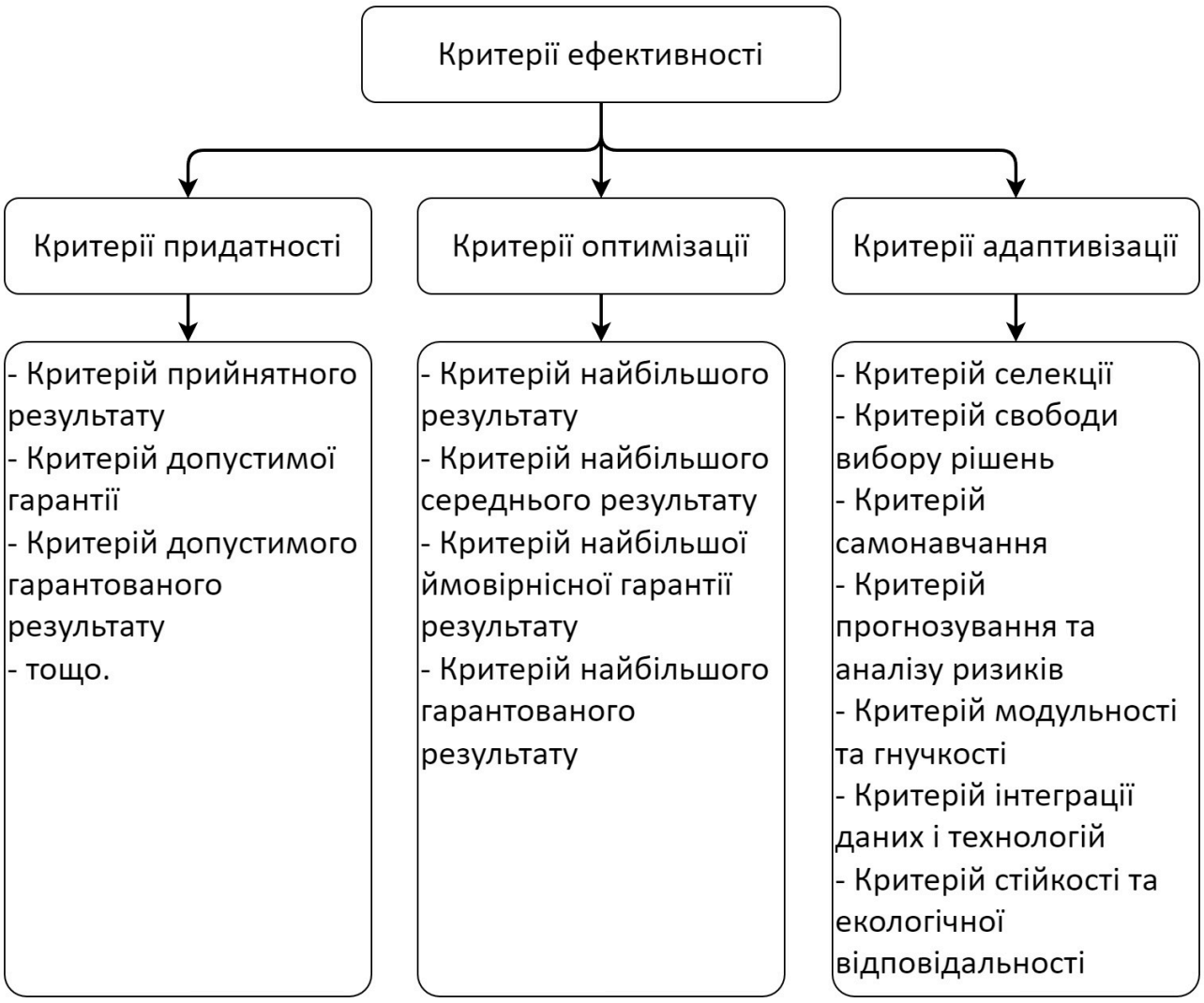


Рисунок 4.6 – Класифікація критеріїв ефективності

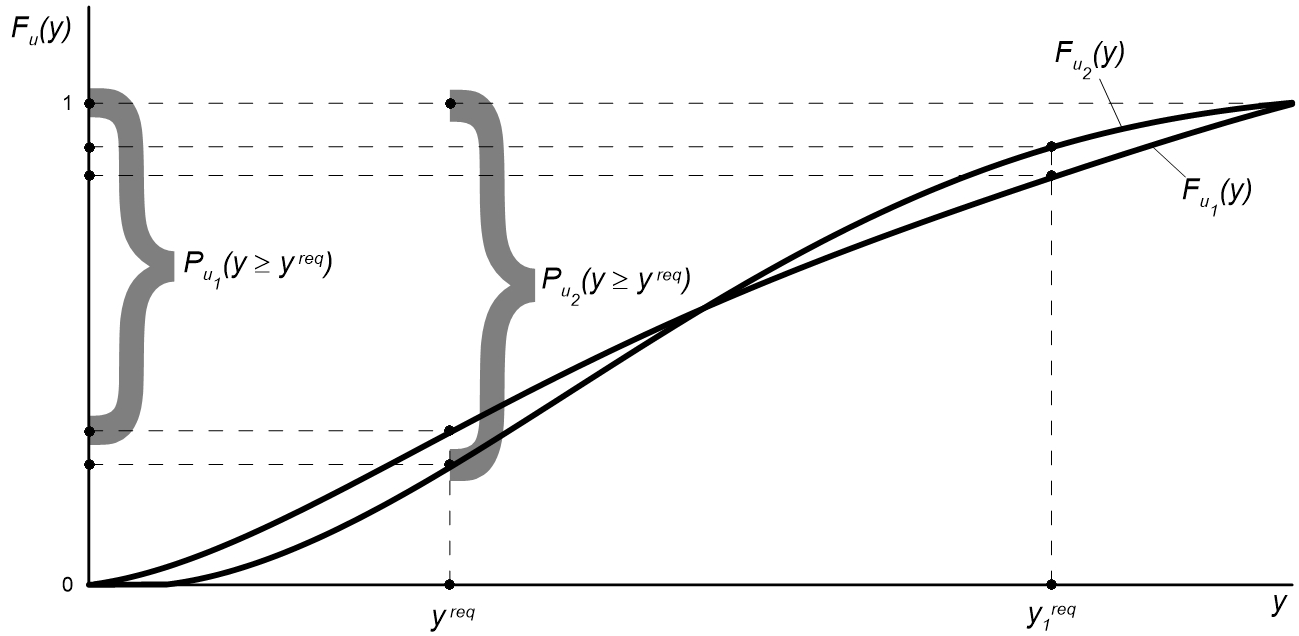


Рисунок 4.7 – Функції розподілу реального результату операції при використанні стратегій u_1 та u_2

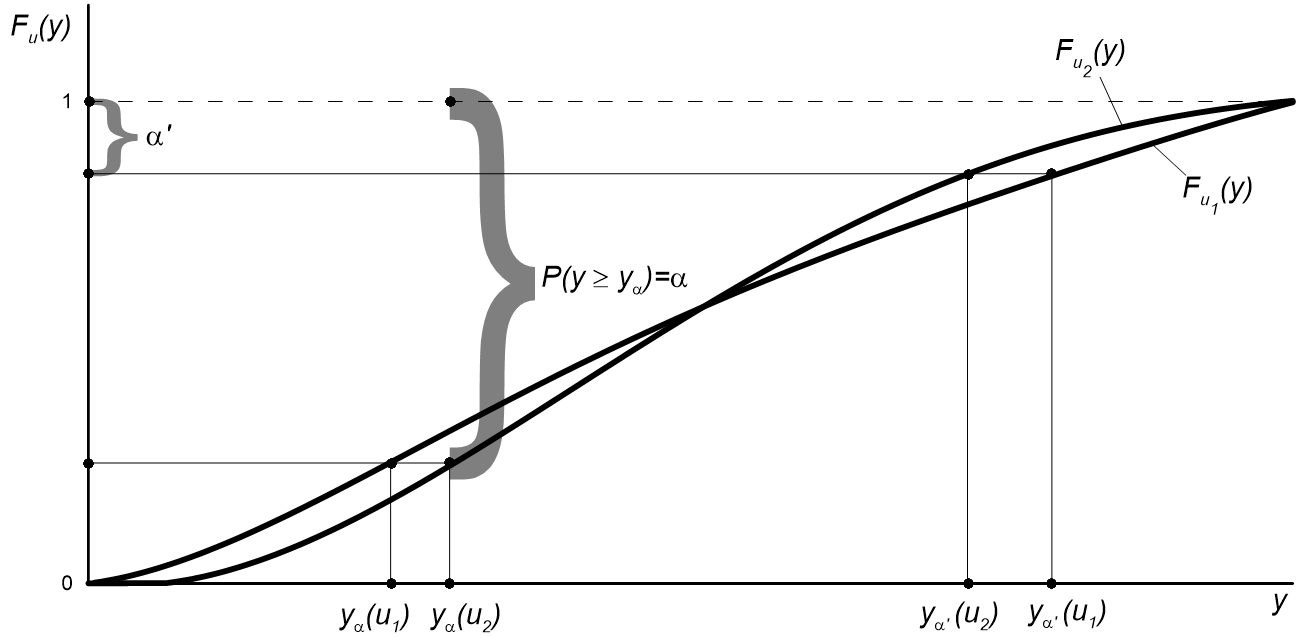


Рисунок 4.8 – Схема вибору стратегії за критерієм найбільшого гарантованого результату

Критерій найбільшого середнього результату в практиці дослідження операцій технічного обслуговування набув найбільшого поширення. Це зумовлено адитивністю показника середнього результату $M[\sum_i \hat{y}_i] = \sum_i M[\hat{y}_i]$, що значною мірою в деяких випадках полегшує його розрахунок. Однак показник середнього результату $W(u) = M[y(u)]$, що лежить в основі цього критерію, не враховує в

явному вигляді необхідний результат. Крім того, орієнтація на середній результат виправдана при масовому повторенні операції. При одноразовому проведенні операції (унікальні операції, системи) недоцільно використовувати критерій найбільшого середнього результату.

4.2 Системний підхід до підвищення ефективності системи технічного обслуговування вантажного судна в умовах експлуатації

Особливості системного підходу до підвищення ефективності системи ТО вантажного судна в умовах експлуатації наведено у Додатку М19.

4.2.1 Формування системи КПТОВС

Дослідження, представлені в цій дисертації, демонструють, що система технічного обслуговування вантажних суден може бути розглянута як окремий, специфічний об’єкт управління. Її унікальність полягає у відсутності матеріальної реалізації, незважаючи на наявність визначених характеристик (параметрів). Ця система тісно пов’язана з обслуговуваним об’єктом – вантажним судном – і забезпечує його придатність до технічного використання відповідно за призначенням протягом визначеного терміну в різних умовах експлуатації.

Навіть обмежений перелік характеристик системи технічного обслуговування вантажного судна (згідно з Таблицею 3.1 та Таблицею 3.2) підкреслює, що вона може значно змінюватися, залежно від ефективності суднових технічних засобів і конструкцій, умов експлуатації судна, кваліфікації обслуговуючого персоналу, рівня автоматизації, детальності і ймовірності контрольних операцій, ефективності ремонтних і профілактичних робіт, а також організаційної структури, яка включає як підрозділи судноплавної компанії, безпосередньо зайняті технічним обслуговуванням, так і підрозділи, відповідальні за організаційно-матеріальне забезпечення цієї системи.

Рисунки 3.6 – 3.18 об’єднують у собі схему всіх інформаційних потоків в системі КПТОВС, з яких видно наскільки великий обсяг даних повинен накопичуватись з метою отримання оптимального плану технічного обслуговування кожного екземпляру вантажного судна. Такий обсяг потрібної інформації пояснюється винятковою важливістю системи технічного обслуговування, її

багатопараметричністю, високою чутливістю до зміни конструктивних характеристик і характеристик надійності вантажного судна, їхніх окремих суднових технічних засобів, а також організаційної структури підрозділів судноплавної компанії. Все це потребує самої серйозної і всебічної перевірки базової системи технічного обслуговування і вироблення пропозицій з її вдосконалювання з урахуванням реальних умов експлуатації в конкретній судноплавній компанії.

Реалізація цієї задачі значно ускладнена через відсутність або неповноту методологічного підходу до адаптації системи технічного обслуговування для кожного вантажного судна з урахуванням унікальних умов експлуатації в рамках певної судноплавної компанії. Це призводить до різноманітності в якості виконання технічного обслуговування та в оцінці його результативності.

В сучасних умовах існує важлива потреба в уніфікації управлінських принципів системи технічного обслуговування вантажних суден [229]. Ця єдність принципів повинна бути врахована під час розробки методичного підходу для ефективної роботи такого складного і специфічного об’єкта, як система технічного обслуговування, у реальних умовах її експлуатації.

Під час експлуатації, коли існує можливість реально оцінити властивості основної системи технічного обслуговування вантажного судна, перевірити, наскільки ці властивості відповідають вимогам, та визначити напрямки для підвищення їх ефективності, можна виокремити декілька основних принципів, наведених у Додатку М20, які мають керувати формуванням системи КПТОВС.

Розроблені методи та моделі для аналізу та синтезу систем технічного обслуговування вантажних суден, разом із результатами досліджень, представлених у роботах [118, 119, 120, 122, 123, 398, 413, 415, 419, 428, 431] були використані як фундамент для створення математичного та програмного забезпечення системи КПТОВС. Вказані вище дослідження та розробки стали ключовими у формуванні теоретичної бази та практичних інструментів для оптимізації процесів технічного обслуговування. Використання цих ресурсів дозволило створити більш точні, ефективні та адаптивні системи обслуговування, що спираються на глибокий аналіз

даних і сучасні програмні рішення, що забезпечують кращий рівень обслуговування та більшу безпеку вантажних суден.

Єдність методичного підходу, який застосовується в розроблених методиках, дозволяє детально розкрити суть найбільш репрезентативних з них. Базуючись на загальній структурі методики аналізу та синтезу систем технічного обслуговування вантажних суден, що працюють в умовах конкретної судноплавної компанії, процедура формування системи прескриптивного технічного обслуговування вантажного судна на основі даних експлуатації включає в себе послідовність окремих операцій, представлених у вигляді Алгоритму 1. Цей алгоритм забезпечує послідовний підхід до визначення, аналізу, та оптимізації процесів технічного обслуговування судна, забезпечуючи ефективне управління ресурсами, підвищення надійності та безпеки судноплавства. Ключовим аспектом є адаптація методики до специфіки конкретної судноплавної компанії, що дозволяє урахувати унікальні умови експлуатації та потреби вантажних суден.

Алгоритм 1 – процедура формування системи КПТОВС (Рисунок 4.9), описаної у Додатку М21.

Виконання задач синтезу системи КПТОВС, засноване на аналізі даних експлуатації, включає процес визначення оптимальних параметрів для систем технічного обслуговування різних суднових компонентів, таких як технічні засоби, конструкції, системи та комплекси. Цей процес втілюється у вигляді певної послідовності дій, представленої як Алгоритм 2.

Алгоритм 2 – процедура синтезу системи КПТОВС (Рисунок 4.10 та Додаток М22).

Задача оптимізації налаштувань параметрів системи технічного обслуговування проводиться на основі ієрархічного підходу та включає ідентифікацію компонентів вантажного судна та його окремих суднових технічних засобів, конструкцій, систем і комплексів. Коригування параметрів цих систем має на меті забезпечення вимог до загальної системи технічного обслуговування вантажного судна, мінімізуючи при цьому витрати.



Рисунок 4.9 – Процедура формування системи КПТОВС

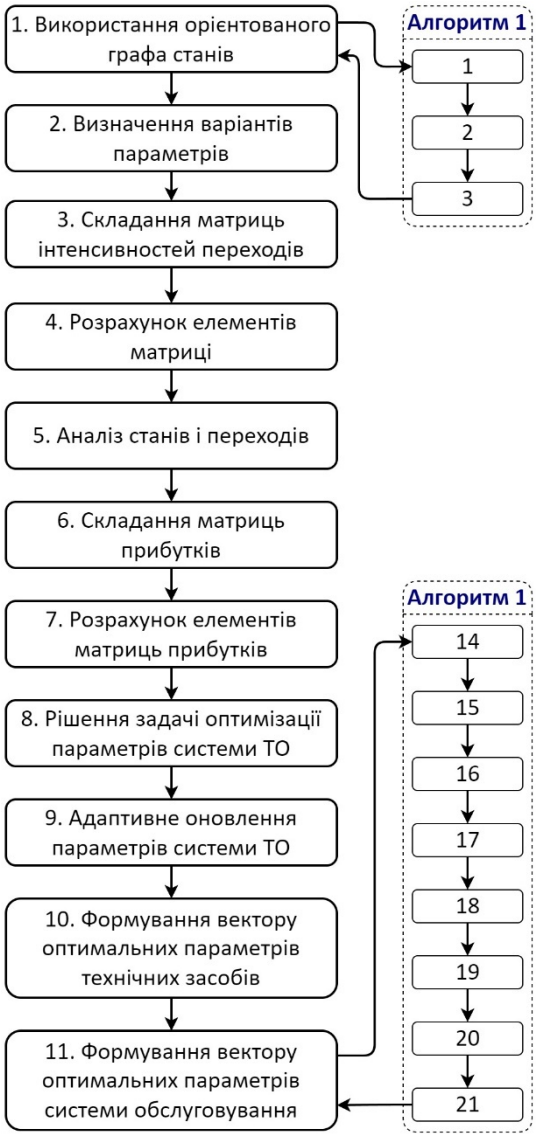


Рисунок 4.10 – Процедура синтезу системи КПТОВС

Методологія та структура вирішення задачі адаптивізації параметрів системи технічного обслуговування вантажного судна в основному збігаються з процедурою синтезу системи КПТОВС, однак із зміною у Кроці 2, який тепер сформулюється наступним чином: «Встановити кількість потенційних варіантів коригування параметрів системи технічного обслуговування для кожного суднового технічного засобу, конструкції, системи та комплексу вантажного судна».

На завершальному етапі формування системи прескриптивного технічного обслуговування вантажного судна складаються адаптивні стратегії (плани виконання) різних видів і форм технічного обслуговування. Ці стратегії базуються на

визначеному обсязі робіт, наявності кваліфікованого персоналу та матеріально-технічного забезпечення процесу технічного обслуговування вантажного судна. Під час практичної реалізації цих планів прескриптивного технічного обслуговування необхідно проводити їхнє постійне коригування, фіксувати дані про інциденти, прогнозувати потенційні збої та розробляти заходи щодо їх запобігання у майбутньому.

На Рисунку 4.11 представлена схема взаємодії програмних модулів системи КПТОВС, що забезпечує управління якістю системи технічного обслуговування для конкретного вантажного судна.



Рисунок 4.11 – Схема взаємозв’язків основних програмних модулів системи КПТОВС при керуванні якістю системи технічного обслуговування вантажного судна

Застосовуючи методологію морфологічного аналізу, зазначену у джерелах [237, 313, 341], було виконано детальний аналіз та синтез, що призвів до створення набору можливих цифрових стратегій для системи КПТОВС. Ці стратегії орієнтовані на різні функціональні елементи системи та розглядаються на різних етапах виконання її функцій під час експлуатації суден, як це відображено у Таблиці Л.6.

Сутність зазначеного методу полягає у виокремленні декількох ключових функціональних елементів морфологічних характеристик у рамках системи КПТОВС. Для кожної із цих характеристик створено вичерпний перелік різноманітних специфічних варіантів їх технічного втілення, як це вказано у джерелі [237]. Кожен з цих морфологічних елементів визначає певну функцію, конструктивний елемент, режим роботи чи стан інформаційної моделі системи технічного обслуговування, а також спосіб взаємодії між складовими елементами системи. Від цих характеристик безпосередньо залежить рішення проблеми і досягнення головної мети функціонування системи технічного обслуговування в умовах експлуатації.

Морфологічні характеристики, які стосуються топології даних і методів аналітики, разом з їх альтернативами на різних стадіях процесу, задіяні в управлінні продуктивністю системи технічного обслуговування, систематизовані у формі морфологічної матриці. Для адекватного проведення морфологічного аналізу були чітко визначені цілі функціонування системи КПТОВС. Щодо суднових технічних засобів, ці цілі орієнтовані на реалізацію оптимальних показників технічного стану в умовах експлуатації, оцінюваних через показники ефективності роботи вантажних суден, такі як питомі показники часу безвідмовної роботи, та імовірність перебування у стані технічної придатності, досягаючи цього за допомогою ресурсозберігаючих і екологічно чистих технологій обслуговування та експлуатації.

У рамках кожного функціонального елемента системи технічного обслуговування, задіяного в процесі імплементації цифрових стратегій, визначено основні морфологічні характеристики, критичні для досягнення цілей системи, які представлені в Таблиці Л.6.

У морфологічній матриці схем цифрових стратегій для функціонального елемента «топологія даних», виокремлено три ключові характеристики, які мають істотний вплив на економічні, технологічні, а також на габаритні та масові показники систем моніторингу технічного стану суднових технічних засобів, конструкцій, систем і комплексів. Ці характеристики включають цифрову модель, цифрову тінь та цифровий двійник. Серед них цифровий двійник є найбільш технологічно вдосконаленою характеристикою в контексті «топології даних».

Загальна кількість альтернативних морфологічних характеристик, представлених у Таблиці Л.6, становить $M = 3 + 14 + 8 + 3 + 6 + 4 + 9 + 4 + 3 + 12 = 66$. Варіації будь-якої з цих 66 характеристик призводять до формування нової схеми для підвищення ефективності системи технічного обслуговування вантажних суден.

Для комбінації морфологічних варіантів вибрані індивідуальні схеми кожної характеристики відповідно до конкретного досліджуваного варіанту, з урахуванням їх топологічних, економічних, габаритних та масових показників. Результатом є сформовані морфологічні матриці, які включають значну кількість несумісних варіантів, що вважається недоліком методу. Проте, одночасно, метод характеризується значною багатоваріантністю. Важливо зауважити, що цей підхід до дослідження, заснований на морфології об’єктів, дозволяє систематично аналізувати різні структури об’єкта, виходячи з їх конструктивних закономірностей.

Кількість потенційних схем цифрових стратегій за використання даної морфологічної матриці дорівнює $N = 3 * 14 * 8 * 3 * 6 * 4 * 9 * 4 * 3 * 12 = 31352832$, тоді як для одного варіанту «топології даних» за допомогою морфологічної матриці цифрових стратегій кількість варіантів складає $N = 10450944$.

4.2.2 Систематизація цифрових стратегій системи КПТОВС

Під час розв’язання загальної проблеми підвищення надійності та ефективності функціонування вантажних суден шляхом застосування системи КПТОВС виникає

завдання розроблення обґрунтованих цифрових стратегії експлуатації (технічного обслуговування) (Розділ 2 дисертації).

Цифрова стратегія експлуатації (правила технічного обслуговування) базується на:

- об'єктивних даних про вантажне судно (характеристик безвідмовності та ремонтопридатності, тощо);
- специфічних особливостях суднових технічних засобів (структури системи, характеристик індикації відмов, наявності вбудованого контролю працездатності, тощо);
- даних про умови експлуатації.

Цифрова стратегія експлуатації повинна мати властивість оптимальності за деяким показником, що характеризує якість функціонування та експлуатації вантажного судна.

Вибір оптимальної цифрової стратегії технічного обслуговування дає змогу досягати найкращих результатів завдяки реорганізації правил експлуатації без залучення додаткових сил і засобів.

Як математичну модель, що описує еволюцію вантажного судна в часі, використовують випадковий процес $\xi(t)$, що належить до одного з таких класів випадкових процесів: випадкові процеси регенерування, марковські випадкові процеси, напівмарковські випадкові процеси.

Під час дослідження моделей технічного обслуговування, в яких істотну роль відіграє структура суднових технічних засобів, основна проблема полягає у визначенні оптимальної глибини профілактики, тобто обсягу тієї частини системи, яка підлягає оновленню (заміні) під час проведення відновлювальної роботи. У багатьох випадках характеристиками подібних систем можуть слугувати напрацювання окремих елементів, а для математичного опису їхнього функціонування використовують апарат напівмарковських процесів. Основні показники якості розглянутих систем являють собою дрібно-лінійні функціонали, і профілактики слід призначати детерміновано.

У задачах технічного обслуговування розглядають такі показники якості функціонування під час тривалої експлуатації:

- K – коефіцієнт готовності;
- $R(z)$ – ймовірність виконання завдання (коефіцієнт оперативної готовності);
- S – середній прибуток за одиницю календарного часу;
- C – середні витрати за одиницю часу справного функціонування.

Для процесу регенерування $\xi(t)$:

$$K = \frac{MX^{(0)}}{M\tilde{X}}, \tag{4.41}$$

$$R(z) = \frac{MX^{(z)}}{M\tilde{X}}, \tag{4.42}$$

$$S = \frac{M\tilde{S}}{M\tilde{X}}, \tag{4.43}$$

$$C = \frac{M\tilde{C}}{MX^{(0)}}, \tag{4.44}$$

де $X^{(0)}$ – час справного функціонування системи в період регенерації; $X^{(z)}$ – час перебування процесу $\xi(t)$ у стані e_z – система працездатна і справно пропрацює час, більший за z; $\tilde{X}$ – тривалість періоду регенерації; $\tilde{S}$ – прибуток, отриманий на періоді регенерації; $\tilde{C}$ – витрати, що мали місце на періоді регенерації.

Для марковських і напівмарковських процесів $\xi(t)$ зі скінченною множиною станів:

$$K = \frac{\sum_{i=1}^{N}\left(M\tau_i^{(0)} \cdot p_i\right)}{\sum_{i=1}^{N}(M\tilde{\tau}_i \cdot p_i)}, \tag{4.45}$$

$$R(z) = \frac{\sum_{i=1}^{N}\left(M\tau_i^{(z)} \cdot p_i\right)}{\sum_{i=1}^{N}(M\tilde{\tau}_i \cdot p_i)}, \tag{4.46}$$

$$S = \frac{\sum_{i=1}^{N}\left(M\tilde{S}_i \cdot p_i\right)}{\sum_{i=1}^{N}(M\tilde{\tau}_i \cdot p_i)}, \tag{4.47}$$

$$C = \frac{\sum_{i=1}^{N}\left(M\tilde{C}_i \cdot p_i\right)}{\sum_{i=1}^{N}\left(M\tau_i^{(0)} \cdot p_i\right)}, \tag{4.48}$$

де $p_i, 1 \le i \le N$ – стаціонарні ймовірності вкладеного ланцюга Маркова; $\tau_i^{(0)}$ – час справного функціонування системи за період, на якому $\xi(t) = e_i$; $\tilde{\tau}_i$ – тривалість періоду, на якому $\xi(t) = e_i$; $\tilde{S}_i$ – прибуток, отриманий за період, на якому $\xi(t) = e_i$; $\tilde{C}_i$ – витрати, що мали місце на періоді, на якому $\xi(t) = e_i$.

4.2.2.1 Цифрова стратегія прогнозування термінів попереджувальної профілактики

Розглядається судновий технічний засів, конструкція, система або їх комплекс як послідовна система, що складається з N елементів. У системі можливе проведення відновлювальних робіт двох видів: позапланової попереджувальної профілактики, що повністю оновлює систему, і позапланових аварійно-профілактичних ремонтів частини системи, коли елемент, що відмовив, замінюють новим. Передбачається, що індикація відмови, яка виникла в системі, відбувається миттєво.

1. Опис цифрової стратегії. Стратегія експлуатації системи полягає в такому. У початковий момент часу призначається проведення попереджувальної профілактики тоді, коли прогнозне значення напрацювання досягне деякого заданого значення τ.

Якщо до моменту початку попереджувальної профілактики відбувається відмова системи, то проводять позаплановий аварійно-профілактичний ремонт (заміна елемента, що відмовив, на новий, ідентичний за своїми імовірнісними характеристиками колишньому) і корегуються параметри прогнозуючої моделі.

Будемо припускати, що під час проведення аварійно-профілактичного ремонту система вимикається, тобто характеристики надійності елементів не погіршуються і напрацювання системи не збільшується. Так чинимо доти, доки напрацювання системи не досягне заданого значення. У цей момент починається проведення позапланової попереджувальної профілактики незалежно від того, скільки календарного часу минуло з моменту закінчення останнього позапланового аварійно-профілактичного ремонту та скільки таких ремонтів було проведено за період, що минув після завершення попередньої попереджувальної профілактики. У результаті попереджувальної профілактики система повністю оновлюється, далі весь процес обслуговування повторюється.

Схема цієї цифрової стратегії включає такі сполучення визначених ознак:

$$[(11 \vee 12 \vee 13) + 2102 + 2208 + 3102 + 3202 + 3302 + 3610].$$

2. Постановка задачі. Необхідно задати такі характеристики системи:

$F_i(t)$ – функцію розподілу прогнозного часу безвідмовної роботи елемента $i = 1,2,\dots,N;\ P_i(t) = 1 - F_i(t)$;

T_i – середнє прогнозоване напрацювання до відмови елемента i;

T_{pm} – середню тривалість попереджувальної профілактики;

t_i – середню тривалість аварійно-профілактичного ремонту елемента i в разі його відмови;

c_i – витрати за одиницю часу під час проведення аварійного ремонту елемента $i = 1,2,\dots,N$;

c_{pm} – витрати за одиницю часу при проведенні позапланової попереджувальної профілактики;

c_0 – прибуток за одиницю часу безвідмовної роботи системи;

z – оперативний час роботи системи, необхідний для виконання завдання.

Нехай $H_i(t)$ – функція відновлення рекурентного потоку, утвореного послідовністю незалежних випадкових величин із функцією розподілу $F_i(t)$, перетворення Лапласа-Стілтьєса якої:

$$H_i^*(s) = F_i^*(s)/[1 - F_i^*(s)] \qquad (4.49)$$

де $F_i^*(s), H_i^*(s)$ – перетворення Лапласа-Стілтьєса функцій $F_i(t)$ та $H_i(t)$ відповідно.

Необхідно визначити такі значення τ, за яких показники якості функціонування системи досягають екстремального значення.

3. Основні результати. Вирази для основних показників якості роботи системи у вигляді функцій від τ мають вигляд:

$$K = \tau \left[\tau + T_{pm} + \sum_{i=1}^{N} t_i H_i(\tau) \right]^{-1}, \qquad (4.50)$$

$$R(z) = \int_0^{\tau} \prod_{i=1}^{N} \left[P_i(x+z) + \int_0^x P_i(x+z-y)dH_i(y) \right] dx \times \times \left[\tau + T_{pm} + \sum_{i=1}^{N} t_i H_i(\tau) \right]^{-1}, \quad (4.51)$$

$$S = \left\{ c_0 \tau - \left[c_{pm} T_{pm} + \sum_{i=1}^{N} c_i t_i H_i(\tau) \right] \right\} \left[\tau + T_{pm} + \sum_{i=1}^{N} t_i H_i(\tau) \right]^{-1}, \quad (4.52)$$

$$C = \tau^{-1} \left[c_{pm} T_{pm} + \sum_{i=1}^{N} c_i t_i H_i(\tau) \right]. \quad (4.53)$$

4.2.2.2 Цифрова мінімаксна стратегія прогнозування термінів попереджувальної профілактики

За недостатньої інформації про вид функцій розподілу прогнозного часу безвідмовної роботи використовують мінімаксні стратегії, що дають гарантовані результати в цілому класі розподілів.

1. Опис цифрової стратегії обслуговування і постановка задачі.

Розглядається стратегія обслуговування послідовної системи, описана в п. 4.2.2.1. Однак, на відміну від зазначеного випадку, прогнозної функції розподілу тривалості безвідмовної роботи елементів $F_i(x), i = 1,2, \dots, N$, відомі лише в окремих фіксованих точках, тобто $F_i \in \Omega_i(n_i, y_i, \pi_i) = \Omega_i$ де через $\Omega_i(n_i, y_i, \pi_i)$ позначено множину функцій розподілу, які в заданих точках $y_i = (y_{i1}, y_{i2}, \dots, y_{in_i})$ приймають задані значення $\pi_i = (\pi_{i1}, \pi_{i2}, \dots, \pi_{in_i})$ відповідно. Передбачається, що профілактики всієї послідовної системи призначаються детерміновано і починаються, коли напрацювання досягає значення τ.

Схема цієї цифрової стратегії включає такі сполучення визначених ознак:

$$[(11 \vee 12 \vee 13) + 2108 + 2204 + 2303 + 3105 + 3202 + 3307 + 3501 + 3612].$$

2 Основні результати. Відповідно до принципу мінімаксу розв'язання задачі розбивається на два етапи.

1) Визначення «найгірших» функцій розподілу в класах $\Omega_i, i = 1, 2, \dots, N$. Позначимо через $F_i^{(0)}(x)$ ступінчасту функцію розподілу виду:`

$$F_i^{(0)}(x) = \begin{cases} 0 \text{ при } x \le 0 \\ \pi_{ik} \text{ при } y_{ik} < x \le y_{i,k+1}, k = 0, 1, 2, \dots, n_i - 1, \\ 1 \text{ при } x > y_{i,n_i} \end{cases} \quad (4.54)$$

де $y_{i,0} = \pi_{i,0} = 0,\ i = 1, 2, \dots, N$. Вочевидь, що $F_i^{(0)} \in \Omega_i, i = 1, 2, \dots, N$.

Нехай далі $H_i^{(0)}(t)$ – функція відновлення рекурентного потоку, утвореного послідовністю незалежних прогнозованих величин із функцією розподілу $F_i^{(0)}(x)$.

Відомо, що розподіли вигляду (4.54) є «найгіршими» в класах Ω_i, стосовно основних показників якості функціонування – коефіцієнта готовності, середніх питомих витрат і середнього питомого прибутку.

2) Знаходження оптимального напрацювання. У зазначених умовах завдання визначення оптимального прогнозного періоду проведення попереджувальних профілактичних робіт зводиться до знаходження екстремумів за τ таких функцій:

для коефіцієнта готовності:

$$K = \max_{0 \le \tau \le \infty} \frac{\tau}{\tau + T_{pm} + \sum_{i=1}^{N} t_i H_i^{(0)}(\tau)}, \quad (4.55)$$

для середніх питомих витрат за одиницю часу справного функціонування:

$$C = \min_{0 \le \tau \le \infty} \frac{c_{pm} T_{pm} + \sum_{i=1}^{N} c_i t_i H_i^{(0)}(\tau)}{\tau}, \quad (4.56)$$

для середнього питомого прибутку в одиницю календарного часу:

$$S = \max_{0 \le \tau \le \infty} \frac{c_0 \tau - \left[c_{pm} T_{pm} + \sum_{i=1}^{N} c_i t_i H_i^{(0)}(\tau) \right]}{\tau + T_{pm} + \sum_{i=1}^{N} t_i H_i^{(0)}(\tau)}, \quad (4.55)$$

Точки екстремумів цих функцій визначають оптимальні прогнозовані значення напрацювання системи, після досягнення яких слід проводити попереджувальні профілактичні роботи, а відповідні екстремальні значення зазначених функцій – гарантовані величини показників якості, які забезпечуються в результаті застосування мінімаксної стратегії.

4.2.2.3 Цифрова стратегія адаптивного призначення попереджувальних профілактичних робіт

Схема цієї цифрової стратегії включає такі сполучення визначених ознак:

$$[(12 \vee 13) + 2107 + 2206 + 2301 + 3101 + 3204 + 3304 + 3501 + 3607].$$

Розглянемо функціонування дубльованої системи з ненавантаженим резервом, у якій елемент, що виконує основні функції, має час безвідмовної роботи ξ з прогнозованою функцією розподілу $F(x) = P(\xi < x)$. Передбачається, що відмова, яка виникла, проявляється через випадковий час ζ, розподілений за деяким законом $\Phi(y) = P(\zeta < y)$. Під час експлуатації такої системи ремонтна бригада розпочинає позаплановий аварійний ремонт елемента, що відмовив, у момент виявлення відмови (у цьому разі навіть за наявності працездатного пристрою вся система буде простоювати в несправному стані, тому що відмову основного елемента не виявлено). Негайно після початку ремонту працездатний резервний елемент перебирає на себе функції основного. Тривалість позапланового аварійного ремонту ξ_1 є випадковою величиною з функцією розподілу $F_1(x)$.

Крім позапланового аварійного ремонту в системі можливе проведення ще двох видів відновлювальних робіт – планової та позапланової попереджувальної профілактики, які організовуються таким чином. У момент початку функціонування будь-якого з двох елементів на місці основного призначається проведення планової попереджувальної профілактики через час τ, що дорівнює: τ_0, якщо в цей момент другий (резервний) елемент відновлюється за допомогою планової попереджувальної профілактики; τ_1 , якщо в цей момент другий елемент перебуває .у стані позапланового аварійного ремонту; τ_2, якщо в момент початку функціонування цього елемента на місці основного резервний перебуває на позаплановій попереджувальній профілактиці.

Якщо в призначений момент початку планової попереджувальної профілактики основного елемента в системі є працездатний резервний, то починається відновлювальна робота зазначеного виду, а резервний елемент займає місце основного. Інакше профілактика відкладається до появи справного резервного

елемента, і в момент його повернення в систему з основним елементом починає проводитися або позапланова попереджувальна профілактика (якщо він на той час не відмовив), або позаплановий аварійний ремонт (якщо на той час настала відмова), а відновлений елемент посідає місце основного. Тривалість планової та позапланової попереджувальних профілактики є випадковими величинами із заданими функціями розподілу $F_0(x)$ і $F_2(x)$ відповідно.

Вважається, що відновлювальні роботи всіх видів повністю відновлюють властивості безвідмовності пристроїв. Для проведення цих робіт є одна ремонтна бригада, тобто в довільний момент часу може відновлюватися тільки один елемент.

Для проведення розрахунків необхідно задати такі характеристики системи: функції розподілу $F(x)$, $\Phi(x)$, $F_0(x)$, $F_1(x)$, $F_2(x)$; c_0 – прибуток, одержуваний за одиницю часу справного функціонування системи; d_0, d_1, d_2 – витрати за одиницю часу проведення планової запобіжної профілактики, позапланової аварійної та позапланової запобіжної профілактики відповідно; $\tilde{c}_l, \tilde{c}_m$ – витрати за одиницю часу, проведеного пристроєм у станах прихованої відмови та тієї, яка проявилася, відповідно.

Завдання полягає у виборі значень τ_0, τ_1, τ_2 , що доставляють екстремум функціоналу середнього прибутку, віднесеного до одиниці календарного часу.

Для розв’язання використовується апарат керованих напівмарковських процесів.

Функціонал середнього прибутку в одиницю календарного часу виражається формулою:

$$S = \frac{\rho_0\varpi_0 + \rho_1\varpi_1 + \rho_2\varpi_2}{\nu_0\varpi_0 + \nu_1\varpi_1 + \nu_2\varpi_2}, \tag{4.56}$$

$$\varpi_0 = p_{10}p_{21} + (1 - p_{11})p_{20}, \tag{4.57}$$

$$\varpi_1 = p_{01}p_{20} + (1 - p_{00})p_{21}, \tag{4.58}$$

$$\varpi_2 = (1 - p_{00})(1 - p_{11}) - p_{01}p_{10}, \tag{4.59}$$

де $p_{ij}, i = j = 0,1,2$ – перехідні ймовірності вкладеного ланцюга Маркова напівмарковського процесу, що описує досліджувану систему, – визначають такими співвідношеннями:

$$p_{i0} = \bar{F}(\tau_i)F_i(\tau_i), \tag{4.60}$$

$$p_{i1} = 1 - \bar{F}(\tau_i)F_i(\tau_i) - \int_{\tau_i}^{\infty} \bar{F}(u)dF_i(u), \tag{4.61}$$

$$p_{i2} = \int_{\tau_i}^{\infty} \bar{F}(u)dF_i(u), \tag{4.62}$$

$$\bar{F}(x) = 1 - F(x), \tag{4.63}$$

величини ν_0, ν_1, ν_2 – середні тривалості перебування процесу у відповідних станах:

$$\nu_j = \int_0^{\infty} \left[1 - F_j(x)\Psi_j(x)\right]dx, \tag{4.64}$$

$$\Psi_j(x) = \begin{cases} \int_0^{\infty} F(x-u)d\Phi(u), x < \tau_j \\ 1, x > \tau_j, j = 0,1,2 \end{cases}, \tag{4.65}$$

ρ_i – середній прибуток за період перебування процесу в стані i до першого виходу з нього:

$$\begin{aligned} \rho_i = c_0 \left[\int_0^{\tau_i} \bar{F}(x)dx + \int_{\tau_i}^{\infty} \bar{F}(x)\bar{F}_i(x)dx\right] - d_i \int_0^{\infty} \bar{F}(x)dx - \\ -\tilde{c}_l \left[\iint_{x+z\le\tau_i} \bar{\Phi}(z)dF(x)dz + \iint_{x+z\le\tau_i} \bar{F}_i(x+z)\bar{\Phi}(z)dF(x)dz\right] - \end{aligned} \tag{4.66}$$

$$-\tilde{c}_m \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} \bar{F}_i(x+z)\bar{\Phi}(z)dF(x)dz\,, i = 0,1,2.$$

Точка абсолютного максимуму функціоналу $S = S(\tau_0, \tau_1, \tau_2)$ визначає оптимальну цифрову стратегію призначення попереджувальних профілактичних робіт.

4.2.2.4 Цифрова стратегія профілактики за відомого середнього напрацювання технічних засобів вантажних суден

Розглядається система з прогнозуванням технічного стану і миттєвою індикацією відмов (див. 4.2.2). Відомо, що $F(x)$ належить класу функцій розподілу із заданим середнім T_1.

Схема цієї цифрової стратегії включає такі сполучення визначених ознак:

$$[13 + 2109 + 2204 + 3106 + (3201 \vee 3203) + 3306 + 3503 + 3610].$$

Нехай τ – час від моменту чергового повного оновлення системи до початку наступної попереджувальної профілактики. Необхідно визначити величину $\tau = \tau_0$ і функцію розподілу $F^*(x)$, що забезпечують гарантоване значення заданого показника якості $L(\tau, F)$.

Мінімаксним правилом проведення попереджувальної профілактики, що забезпечує деяке гарантоване позитивне значення коефіцієнта оперативної готовності $R(t_0)$ за умови $t_0 < T_1$, є правило, відповідно до якого попереджувальні профілактики не проводяться. При цьому:

$$R(t_0) = \frac{T_1 - t_0}{T_1 + M\gamma_3} \tag{4.67}$$

середні питомі витрати

$$C(\infty, F^*) = \tilde{c}_p M\gamma_3 / T_1 \tag{4.68}$$

середній питомий прибуток, якщо $T_1 \geq \frac{\tilde{c}_p - c_{pm}}{c_0 + c_{pm}} M\gamma_3$,

$$S = \frac{\left(c_0 T_1 - \tilde{c}_p M\gamma_3\right)}{(T_1 + M\gamma_3)}, \tag{4.69}$$

де $\tilde{c}_p$ - витрати за одиницю часу під час проведення прогнозованого аварійно-профілактичного ремонту; γ_3 – тривалість прогнозованого аварійно-профілактичного ремонту.

4.2.2.5 Цифрова стратегія вибору оптимальних термінів проведення робіт технічного обслуговування за повної інформації (цифровий двійник)

Схема цієї цифрової стратегії включає такі сполучення визначених ознак:

$$[13 + 2101 + 2205 + 2303 + 3105 + 3202 + 3308 + 3402 + 3612].$$

Використання технології цифрових двійників в процесах технічного обслуговування вантажних суден характеризується наявністю повної інформації про всі процеси що мають місце під час експлуатації суднових технічних засобів, конструкцій, систем і комплексів вантажних суден. Знаходження оптимальних термінів проведення робіт технічного обслуговування вирішується наступним чином.

1. Процес регенерації. Припустимо, що в момент регенерації процесу $\xi(t)$ прогнозуємо і призначаємо через час η, розподілений за законом $G(x)$, проведення планової відновлювальної роботи. Тоді функціонали якості функціонування мають вигляд дробово-лінійного функціонала

$$J(G) = \frac{\int A(x)dG(x)}{\int B(x)dG(x)}, \tag{4.69}$$

Необхідно визначити функцію $G_0(x)$, для якої $J(G_0) = \max_G J(G)$.

2. Марківський і напівмарківський процеси. Припустимо, що в момент переходу процесу $\xi(t)$ стан $e_i, 1 \le i \le N$, призначають через час η_i, розподілений за законом $G_i(x)$, проведення прогнозної відновлювальної роботи. Тоді функціонали якості функціонування мають вигляд дробово-лінійного функціонала:

$$J(G_1, G_2, \dots, G_N) = \frac{\int A(x_1, x_2, \dots, x_N)dG_1(x_1)dG_2(x_2)\dots dG_N(x_N)}{\int B(x_1, x_2, \dots, x_N)dG_1(x_1)dG_2(x_2)\dots dG_N(x_N)}, \tag{4.70}$$

Необхідно визначити набір функцій розподілу $\left\{G_i^{(0)}(x), 1 \le i \le N\right\}$, для яких:

$$J\left(G_1^{(0)}, G_2^{(0)}, \dots, G_N^{(0)}\right) = \max_{\{G_i, i=1,\dots,N\}} J(G_1, G_2, \dots, G_N), \tag{4.71}$$

Розв’язання цих задач таке. Відомо, що екстремум дробово-лінійного функціонала можна шукати в класі вироджених функцій розподілу:

$$G(x) = \begin{cases} 0, x \le \tau \\ 1, x > \tau \end{cases}, \tag{4.72}$$

Тоді для процесу регенерування:

$$\max_{G} J(G) = \max_{\tau} \frac{A(\tau)}{B(\tau)} = \frac{A(\tau_0)}{B(\tau_0)}, \tag{4.73}$$

Величина τ_0 визначає оптимальну періодичність проведення прогнозованих відновлювальних робіт.

Для Марківського або напівмарковського процесу

$$\max_{\{G_i, i=1,\dots,N\}} J(G_1, G_2, \dots, G_N) = \max_{\{\tau_i, i=1,\dots,N\}} \frac{A(\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_N)}{B(\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_N)} = \\ = \frac{A\left(\tau_1^{(0)}, \tau_2^{(0)}, \dots, \tau_N^{(0)}\right)}{B\left(\tau_1^{(0)}, \tau_2^{(0)}, \dots, \tau_N^{(0)}\right)}, \tag{4.74}$$

Вектор $\left(\tau_1^{(0)}, \tau_2^{(0)}, \dots, \tau_N^{(0)}\right)$ визначає оптимальну періодичність проведення прогнозованих відновлювальних робіт у відповідному прогнозованому стані e_i. Дослідження на екстремум функції однієї або багатьох змінних здійснюється стандартними методами.

4.2.2.6 Цифрова стратегія вибору оптимальних термінів проведення робіт технічного обслуговування за неповної інформації (цифрова модель, цифрова тінь)

Схема цієї цифрової стратегії включає такі сполучення визначених ознак:

$$[(11 \vee 12) + 2101 + 2205 + 2303 + 3105 + 3202 + 3308 + 3402 + 3612].$$

Використання технології цифрова модель, цифрова тінь в процесах технічного обслуговування вантажних суден характеризується відсутністю повної інформації про всі процеси що мають місце під час експлуатації суднових технічних засобів, конструкцій, систем і комплексів вантажних суден. У багатьох практичних ситуаціях характеристики надійності точно не відомі, а відомо лише, що функції розподілу

належать деякому класу. Знаходження оптимальних термінів проведення робіт технічного обслуговування вирішується наступним чином. Можливі такі ситуації:

відомі значення $\pi = (0, \pi_1, \dots, \pi_n)$ функції розподілу часу безвідмовної роботи $F(y)$ в окремих точках $y = (y_0 = 0, y_1, \dots, y_n)$, тобто $F(y_i) = \pi_i, i = 0, \dots, n$ (клас таких функцій позначатимемо через $\Omega(n, y, \pi)$); відомі моменти розподілу $F(y)$: $\mu_k = \int_0^\infty x^k dF(x), k = 1, 2, \dots, m$ (клас таких функцій позначатимемо через $\Omega_m = \Omega(\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_m)$).

Для пошуку оптимальної стратегії в подібних задачах запропоновано використовувати метод мінімаксу, який полягає в такому. Спочатку серед усіх функцій розподілу, що характеризують функціонування системи та інформація про які обмежується їхньою приналежністю до певного заданого класу, знаходяться найгірші (у розумінні цього показника якості), а потім за цих умов визначається оптимальне керування.

Для процесу регенерування позначимо $\tilde{J}(F, G, \Phi)$ функціонал, що характеризує якість роботи системи. Необхідно визначити функції $F \in \Omega(n, y, \pi)$; $\Phi \in \Omega$; $G \in \Omega$, за яких досягається:

$$\tilde{J} = \max_{G \in \Omega} \min_{\Phi \in \Omega} \min_{F \in \Omega(n, y, \pi)} \tilde{J}(F, G, \Phi), \tag{4.75}$$

де $\Omega = \Omega(0, y, \pi)$; $\Phi(x)$ – функція розподілу часу самостійного прояву відмови.

Аналогічна постановка має місце при $F(x) \in \Omega_m$ (зазвичай беруть $m = 1$ або $m = 2$).

Якщо випадковий процес $\xi(t)$, що описує еволюцію станів суднових технічних засобів, конструкцій, систем і комплексів, та є регенеруючим, – то функціонал $\tilde{J}(F, G, \Phi)$ - дрібно-лінійний, і тоді екстремум функціоналу $\tilde{J}(F, G, \Phi)$ за функціями $F \in \Omega(n, y, \pi)$ досягається на одній зі ступінчастих функцій $F \in \Omega^*(n, y, \pi)$, де $\Omega^*(n, y, \pi)$ – множина функцій розподілу ступінчастого вигляду, які на кожному з напівінтервалів $(-\infty, y_1), (y_1, y_2), \dots, (y_n, \infty)$ мають рівно один стрибок величини $\Delta\pi_i = \pi_{i+1} - \pi_i$.

Нехай $A(x,\nu,\tau)$, $B(x,\nu,\tau)$ – підінтегральні функції чисельника і знаменника функціонала $\tilde{J}(F,G,\Phi)$. Якщо при цьому функція $A(x,\nu,\tau)$ не зменшується, а функція $B(x,\nu,\tau)$ не зростає по τ за будь-яких $x,\nu \in (0,\infty)$, то «найгіршою» функцією розподілу в класі $\Omega(n,y,\pi)$ стосовно функціоналу $\tilde{J}(F,G,\Phi)$ буде функція

$$F^*(y)=\begin{cases} 0 \text{ при } -\infty < y \le 0 \\ \pi_{k+1} \text{ при } y_k < y \le y_{k+1}, k=\overline{0,\dots,n-1}, \\ 1 \text{ при } y > y_n \end{cases} \tag{4.76}$$

У разі коли періоди профілактики призначаються детерміновано ($G(x) \in \Omega^*$ де Ω^* – клас вироджених розподілів), мінімум функціонала $\tilde{J}(F^*,G,\Phi)$ досягається за умови $\Phi(\nu) \in \Omega^*$ для будь-якого фіксованого $G(x)$, тоді:

$$\tilde{J}=\max_{G\in\Omega^*}\min_{\Phi\in\Omega^*}\tilde{J}(F^*,G,\Phi)=\max_{0\le x\le\infty}\min_{0\le\nu\le\infty}\frac{\sum_{i=0}^{n}A(x,\nu,y_i)\Delta\pi_i}{\sum_{i=0}^{n}B(x,\nu,y_i)\Delta\pi_i}, \tag{4.77}$$

За обмежень $F \in \Omega_m$ екстремум $\tilde{J}(F)$ також досягається на ступінчастих функціях, їх пошук виконується аналогічно.

4.3 Методика формування циклу підвищення ефективності системи технічного обслуговування вантажного судна з використанням цифрових стратегій

4.3.1 Методика прийняття рішень за векторним показником

За результатами відпрацювання прескриптивної системи технічного обслуговування за результатами експлуатації з використанням цифрових стратегій формуються векторний показник параметрів системи технічного обслуговування.

На відміну від задач прийняття рішення за скалярним показником, результатом яких є оптимальна стратегія (з точністю до передумов і припущень моделі Ψ), у задачах прийняття рішення за векторним показником не можна стверджувати, що те чи інше рішення справді оптимальне [234]. Це пояснюється тим, що одне з рішень може перевершувати інше за одними показниками і поступатися йому за іншими. У таких умовах важко визначити, яка зі стратегій краща, не кажучи вже про її оптимальність. Якщо в задачах прийняття рішення за скалярним показником основні труднощі полягають у розробленні або виборі формального методу (алгоритму) пошуку екстремуму, то в задачах прийняття рішення за векторним показником

головна увага приділяється виробленню розв'язувального правила, заснованого на компромісі між значеннями компонент векторного показника [204]. Таким чином, складність проблеми прийняття рішень за векторним показником навіть в умовах визначеності пов'язана не стільки з труднощами обчислення, скільки з концептуальною обґрунтованістю вибору «найкращого» рішення. Неможливо строго математично довести, що вибране рішення найкраще, – будь-яке рішення з-поміж недомінованих (таких, що не поліпшуються одночасно за всіма показниками) може виявитися найкращим для конкретного алгоритму прийняття рішень у конкретних умовах. Це є основною аксіомою прийняття рішень за кількома показниками.

На відміну від постановки задачі прийняття рішення за скалярним показником в умовах визначеності модель Ψ задає відображення виду:

$$\Psi: Y \to \left(\rho_1\left(y_1, y_1^{req}\right)\right), \left(\rho_2\left(y_2, y_2^{req}\right)\right), \ldots, \left(\rho_m\left(y_m, y_m^{req}\right)\right), \tag{4.78}$$

де y_i, y_i^{req} – детерміновані скалярні характеристики результату G і необхідного результату $(i = \overline{1,m})$. Функція Ψ ставить у відповідність кожній стратегії $u \in U$ значення векторного показника $\mathrm{W}(u) = \left(\mathrm{W}_1(u), \mathrm{W}_2(u), \ldots, \mathrm{W}_m(u)\right)^T$. Звичайним порядком система переваг $\mathcal{P}$ алгоритму прийняття рішень вводиться або на значеннях результатів y_i, або на значеннях показників $(\mathrm{W}_i, i = \overline{1,m})$ залежно від використовуваних функцій ρ_i. Тому надалі без втрати спільності міркувань розглядатимемо переваги тільки на значеннях W_i часткових показників ефективності та вважатимемо, що більші значення показників ефективності кращі за менші, а переваги алгоритму прийняття рішень не змінюються стрибком.

Оскільки кожному результату $\mathrm{g} \in G$, що характеризується вектором W, можна поставити у відповідність стратегію $u \in U$, що приводить до цього результату за правилом:

$$u = \Psi^{-1}(W), \tag{4.79}$$

то, обираючи кращу стратегію $u^* \in U$, алгоритм прийняття рішень може орієнтуватися на свої переваги, задані на множині значень $X = X_1 \times X_2 \times \ldots \times X_m$

векторного показника, де X_i - множина значень часткового показника ефективності W_i.

Таким чином,

$$u \gtrsim \upsilon \Leftrightarrow W(u) \geq W(\upsilon), \qquad \forall u, \qquad \upsilon \in U, \tag{4.80}$$

У загальному випадку відношення нестрогої переваги $\geq$ на множині значень показників ефективності X виявляється незв'язним. Тому вибір найкращої стратегії $u^* \in U$ слід здійснювати серед найгірших (недомінованих), векторні оцінки $W(u^*)$ яких становлять ядро відношення суворої переваги $\succ$, тобто:

$$u^* \in M \succ (u), \tag{4.80}$$

У окремому випадку, коли переваги алгоритму прийняття рішень не змінюються різко, а кожний результат операції $W(u)$ можна оцінити за допомогою функції ефективності $W_e(X)$, можна виокремити множину найкращих стратегій (вважаючи, що функція вибору моделюється функцією ефективності). Оскільки більші значення функції ефективності відповідають кращим результатам операції, то вибір рішення можна здійснювати з використанням критерію оптимальності:

$$u^*: \max_{u \in U} W_e\big(X(u)\big), \tag{4.81}$$

Якщо побудувати функцію ефективності не можна (або переваги алгоритму прийняття рішень змінюються різко у просторі X, або виміряти переваги алгоритму прийняття рішень в інтервальній шкалі важко), то під час вибору рішення слід керуватися лише (4.80).

Загальна постановка задачі прийняття рішення за векторним показником в умовах визначеності формально має такий вигляд:

$$\langle \theta_\lambda, \mathcal{P}, W, U; U^* \rangle, \tag{4.82}$$

На відміну від задачі прийняття рішень по скалярному показнику, у логічному висловленні (4.82) критерій K явно не присутній. Цим, по-перше, підкреслюється відмінна риса цієї задачі, яка аксіоматично припускає відсутність оптимального в абсолютному розумінні розв'язку, а по-друге, тим, що множина U у багатьох

випадках уже містить у собі тільки придатні для досягнення мети операції стратегії. Таким чином:

$$U = \{u | W_i(u) \geq W_i^{req}, i = \overline{1,m}\}, \quad (4.83)$$

тобто в (4.82) множину U сформовано на основі критерію технічної придатності вантажного судна. Якщо вдається переваги алгоритму прийняття рішень змоделювати прагненням до збільшення значень функції ефективності, то $U^* \subset U$ може бути знайдено за допомогою критерію оптимальності (4.81).

У загальному випадку задача (4.82) вимагає виявлення системи переваг алгоритму прийняття рішень на множині X і побудови на її основі вирішального правила. Залежно від способу формування розв'язувального правила методи розв'язання задачі (4.82) можна умовно поділити на дві групи. До першої групи методів належать евристичні, тобто такі, у яких алгоритм прийняття рішень одразу встановлює вид згортки компонент векторного показника у скалярний, який потім максимізується. При отриманні рішення його аналізують; за необхідності алгоритм прийняття рішень накладає додаткові обмеження на значення часткових показників ефективності, що не задовольняють алгоритм прийняття рішень, або змінює параметри згортки. Така процедура повторюється доти, доки не буде отримано прийнятне рішення з погляду алгоритму прийняття рішень. Друга група методів (аксіоматичні методи) ґрунтується на висуванні та перевірці аксіом, у разі задоволення яких зазначають цілком певний вид функції ефективності та спосіб визначення її параметрів. За допомогою побудованої функції ефективності розв'язується задача (4.81). Методи як першої, так і другої груп поділяють на однокрокові та багатокрокові (ітеративні). Однокрокові методи дають змогу відшукувати рішення за один прийом (крок) на основі одноразово сформованого вирішального правила. У багатокрокових процедурах реалізують, як правило, або принцип вкладених відношень, або те саме розв'язувальне правило застосовують багаторазово (з відповідним коригуванням параметрів функції згортки).

Вид параметрів функції згортки або функції ефективності визначають і уточнюють на основі аналізу комплексної інформації θ про розв'язувану задачу і

переваги алгоритму прийняття рішень. При цьому потужність множини стратегій $U^* \subset U$, яку виділяє вирішальне правило, визначається повнотою і якістю (достатністю) інформації θ.

Найпростіша інформація – незалежність часткових показників за уподобанням, складніша - значення «заміщень» часткових показників W_i або інформація Ω про відносну важливість цих показників з її особливими випадками рівноцінних (S), суворо впорядкованих (L) і симетрично лексикографічних (SL) показників ефективності. Найскладніша інформація – значення коефіцієнтів важливості часткових показників W_i.

Під час вибору конкретного методу побудови вирішального правила необхідно враховувати можливість отримання тієї чи іншої інформації та доступні способи її обробки. Крім того, кожній групі методів притаманні свої переваги і недоліки. Евристичні методи дослідники широко використовують у практиці. Після того як здійснено згортку часткових показників, розв'язок задачі може бути досить просто отримано методами математичного програмування. Однак проблема визначення виду і параметрів функції згортки не є в цьому випадку головною. Одна проблема підміняється іншою, не менш складною. Використання аксіоматичних методів дає змогу побудувати адекватнішу модель системи переваг алгоритму прийняття рішень і сформувати вирішальне правило. Однак ці методи вимагають спеціальної підготовки алгоритму прийняття рішень і дослідника, а реалізація цих методів пов'язана з порівняно великими витратами часу.

4.3.2 Методика визначення ефективних стратегії

Припустимо відомо, що переваги алгоритму прийняття рішень на множині векторних оцінок X змінюються плавно, і для будь-якої довільної точки $x \in X$ можна так змінити її компоненти, що початкова і нова точки будуть однакові за перевагою для досягнення мети операції. Для двовимірного випадку (Рисунок 4.12) це припущення означає, що в X є певна підмножина точок, еквівалентних за перевагою, і всім їм можна поставити у відповідність певний ступінь (міру) ефективності. Якщо цей ступінь вимірювати за допомогою функції ефективності $W_e(X)$, то в

розглянутому двовимірному просторі X можна зобразити лінії однакової прийнятності – криві рівноцінності $W_e(X) = const$. Якщо $x \sim y$, то вони розташовані на одній кривій рівноцінності $W_e(x) = a$, а якщо точка $z \succ x$, то її розташовано на кривій рівноцінності $W_e(z) = b > a$. Криві рівноцінності повністю моделюють переваги алгоритму прийняття рішень у множині X. Вище було зроблено припущення, що більші значення часткових показників ефективності (компонент оцінок x) кращі за менші. Навіть у цьому разі може виявитися, що для числа часткових показників $m \geq 3$ напрямки переваги за одними показниками змінюються залежно від того, яких значень набувають інші.

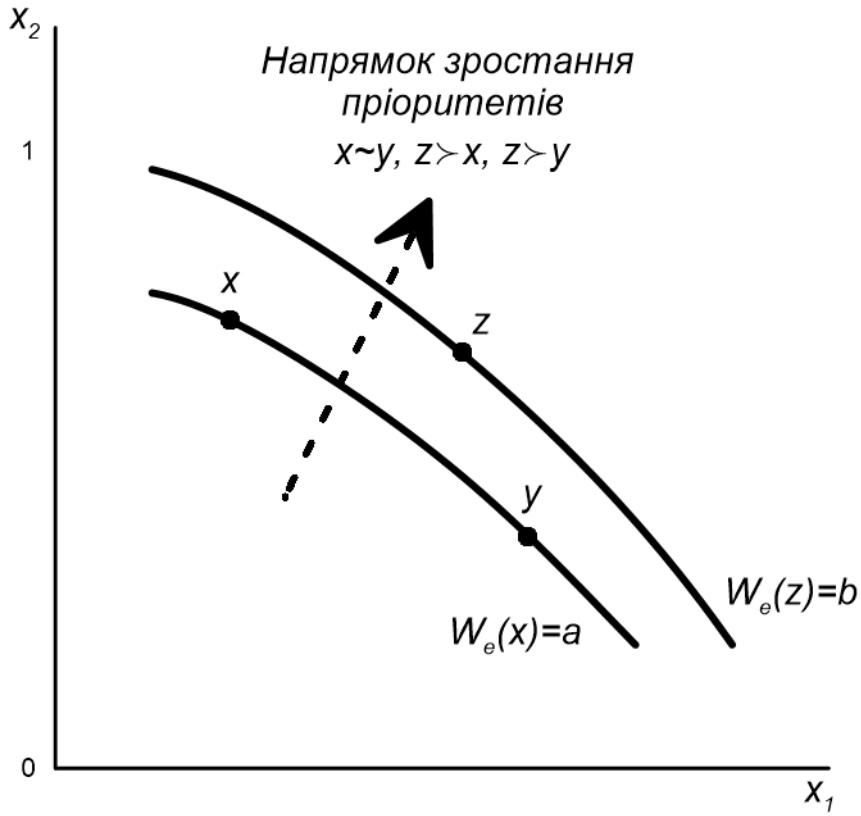


Рисунок 4.12 – Криві рівноцінності

Приклад 1. Під час управління системою технічного обслуговування алгоритм прийняття рішень керується трьома показниками: W_1 - відсоток виконання запланованих операцій технічного обслуговування; W_2 - час, що залишився до кінця періоду планування операцій технічного обслуговування; W_3 - додаткові витрати, пов’язані із забезпеченням виконання запланованих операцій технічного обслуговування.

Якщо відсоток виконання запланованих операцій високий і є великий резерв часу до звітного періоду, то стимулювати діяльність обслуговуючого персоналу немає необхідності, тобто алгоритм прийняття рішень надаватиме перевагу більшим значенням W_3 перед меншими. Якщо виконання запланованих операцій під загрозою (неприпустимо низькі значення W_1 і W_2), то алгоритм прийняття рішень, найімовірніше, надає перевагу зменшенню значень W_3 (збільшення додаткових витрат), а не зриву запланованих операцій технічного обслуговування. Таким чином, напрямок переваги за показником залежить від того, яких значень набувають показники W_1і W_2.

Показник W_i, для якого напрямок переваги залежить від того, яких значень набувають інші показники, називається залежним за перевагою від інших. Якщо напрямки переваги за кожним окремим показником не змінюються від того, яких значень набувають інші показники, то такі показники називаються взаємонезалежними за перевагою. Випадки такого роду вельми часто мають місце в практиці. Позначимо через Ω частину загальної інформації про завдання, що належить до переваг алгоритму прийняття рішень. На ранніх етапах ухвалення рішення інформація $\omega_0 \in \Omega \subset \theta$ про взаємонезалежність часткових компонент векторного показника дає змогу значно звузити початкову множину стратегій U, не розкриваючи повністю систему переваг алгоритму прийняття рішень. Вирішальне правило в цьому разі будується на основі аксіоми В. Парето [35].

Якщо в задачі прийняття рішення часткові показники незалежні за пріоритетом і значення кожного з них бажано збільшувати, то з двох векторних оцінок $x, y \in X$, для яких виконуються нерівності:

$$x_i \geq y_i, i = \overline{1, m}, \tag{4.84}$$

векторна оцінка x не менш пріоритетна за оцінку y:

$$x \overset{\omega_0}{\succsim} y, \tag{4.85}$$

Якщо хоча б одна з нерівностей (4.84) виконується як сувора, то виконується умова $x \overset{\omega_0}{\succ} y$. Якщо всі нерівності виконуються як рівності, то $x \overset{\omega_0}{\sim} y$.

Побудовані відношення (4.85) на множині X векторних оцінок породжують аналогічні відношення переваги на множині стратегій:

$$u \overset{\omega_0}{\succsim} v \Leftrightarrow x(u) \overset{\omega_0}{\succsim} x(v), \tag{4.86}$$

Відношення (4.85) і (4.86) не є зв'язними, тому що для довільних векторних оцінок $x, z \in X$ частина нерівностей у (4.84) може виконуватися в один бік $\left(x_i \geq z_i, i = \overline{1,k}\right)$, а частина - в інший $\left(x_j \leq z_j, j = \overline{k+1,m}\right)$. Такі векторні оцінки називаються непорівнянними за Парето. На підставі відношення суворого пріоритету $\overset{\omega_0}{\succ}$ на множині досяжних оцінок X_d вводиться ядро відношення $M_{\underset{\succ}{\omega_0}}$ Парето:

$$M_{\underset{\succ}{\omega_0}} = \left\{x | \exists y \in X_d : y \overset{\omega_0}{\succ} x, x \in X_d\right\}, \tag{4.87}$$

Стратегії U_{ω_0}, векторні оцінки яких належать ядру відношення $M_{\underset{\succ}{\omega_0}}$, називаються ефективними або недомінованими за Парето. Усі інші стратегії $U \backslash U_{\omega_0}$ називаються домінованими. Якщо деяка стратегія $v \in U$ домінована, то її недоцільно розглядати як можливе рішення, тому що існує (хоча б одна) ефективна стратегія $u \in U_{\omega_0}$, що дає більше значення хоча б за одним із часткових показників $W_i, i = \overline{1,m}$ порівняно зі стратегією v (виконується співвідношення (4.84)). Отже, рішення слід шукати лише на множині U_{ω_0} ефективних стратегій.

Ефективні стратегії не можна порівняти між собою за інформацією ω_0. Тому однозначний вибір за інформацією ω_0 можна здійснити лише у вкрай рідкісному випадку, якщо множина $M_{\underset{\succ}{\omega_0}}$ складається з одного елемента.

Для задачі прийняття рішення за двома, у рідкісних випадках трьома, частковими показниками ефективності множину ефективних стратегій можна знайти, виходячи з визначення (4.87). Для цього в просторі X будують множину досяжних векторних оцінок X_d, а потім виокремлюють ту його «північно-східну» частину, що міститься між лініями $x = x_1^{max}$ і $x = x_2^{max}$. Це можна зробити, якщо область X_d

строго опукла або строго увігнута. В іншому разі (за винятком лінійних меж) «північно-східна» межа області X_d розбивається на строго опуклі і строго увігнуті ділянки лініями, що проходять паралельно осям координат через точки перегину або зламу межі. У загальному випадку множину $M_{\underset{\succ}{\omega_0}}$ можна виділити за допомогою такого прийому - для цього необхідно прямокутний трикутник розташувати так, щоб його катети були паралельні осям координат, і переміщати його в ділянці X_d в напрямках «північ-схід» доти, доки вершина прямого кута не торкнеться межі області X_d. Точка торкання включається в множину $M_{\underset{\succ}{\omega_0}}$, якщо в створ прямого кута не потрапляє жодна з точок $x \in X_d$.

Якщо множина X_d дискретна, то ефективні стратегії відшукують на основі визначення (4.87) шляхом попарного порівняння векторних оцінок.

Якщо число компонент векторного показника ефективності більше за три, то відшукати ефективні стратегії за визначенням (4.87) важко. У цьому разі ефективні стратегії виділяють за допомогою спеціальних методів, в основі яких лежать теореми про властивості ефективних стратегій.

Теорема 1. Стратегія u^* є ефективною тоді і тільки тоді, коли для будь-якого $i = \overline{1,m}$, т вона задовольняє умові:

$$W_i(u^*) = \max_{u \in U} W_i(u), \tag{4.88}$$

$$W_j(u) \geq b_j, j = \overline{1,m}, j \neq i,$$

де $b_j = W_j(u^*), j = \overline{1,m}$.

Теорема 2. Стратегія u^* ефективна тоді й тільки тоді, коли вона за всіх $W_i(u^*) > 0$ і $\gamma_i^* = \frac{1}{W_i(u^*)}, i = \overline{1,m}$ задовольняє умові:

$$\Gamma\big(\gamma^*, W(u^*)\big) = \max_{u \in U} \Gamma\big(\gamma^*, W(u)\big), \tag{4.89}$$

де $\Gamma(\gamma, x) = \min_i \{\gamma_i \cdot x_i\}$.

Теорема 3. Якщо множина U опукла, а всі $W_i(u)$ - увігнуті, то для всякої ефективної стратегії u^* знайдуться такі невід'ємні числа $\gamma_i, \sum_{i=1}^m \gamma_i = 1$, що :

$$F(\gamma, u^*) = \max_{u \in U} F(\gamma, u), \tag{4.90}$$

де $F(\gamma, u) = \sum_{i=1}^{m} \gamma_i W_i(u)$.

За допомогою (4.88) – (4.90), теорем 1 – 3 виокремлення ефективних стратегій із множини допустимих може бути формально здійснено розв'язанням задач математичного програмування. Така процедура виділення ефективної множини може бути повністю здійснена лише для дискретної множини стратегій. Для безперервної множини стратегій U її ефективну підмножину апроксимують за окремими точками і за потреби уточнюють.

Якщо задачі математичного програмування, відповідно (4.88) – (4.90), потребують великих витрат часу та ресурсів, то ефективні стратегії виокремлюють у такий спосіб. Випадковим чином генерують стратегію $u \in U$, для неї обчислюють оцінку $X(u)$ відповідно до моделі Ψ. Генерують наступну стратегію v, яку порівнюють зі стратегією u за правилом (4.86). Домінуючу стратегію відкидають. Процедуру повторюють необхідну кількість разів; при цьому кожну знову згенеровану стратегію порівнюють з усіма недомінованими на попередніх кроках. Генерацію стратегій слід здійснювати таким чином, щоб забезпечити рівномірність вибірки на множині U.

Висновки по розділу 4

Була розроблена та обґрунтована загальна методологія формування та оцінювання способів підвищення ефективності системи технічного обслуговування вантажних суден в умовах їх експлуатації, яка включає наступні ключові аспекти:

1. Створено логічну структуру процесу оцінювання та вибору способу підвищення ефективності системи технічного обслуговування вантажного судна в умовах експлуатації. Представлений підхід може бути використаний як основа для формулювання технічних завдань щодо розробки та імплементації стратегій технічного обслуговування засобів транспорту.

2. Розроблено модель функціонування системи КПТОВС , яка базується на системних об'єктах. Це дозволяє структурувати потенційні стратегії технічного обслуговування та аналізувати вплив різних цифрових стратегій на підвищення

ефективності системи технічного обслуговування в рамках розробленої моделі функціонування системи.

3. Здійснено систематизацію цифрових стратегій системи КПТОВС як підсистеми, відповідальної за підвищення рівня ефективності системи технічного обслуговування вантажних суден в умовах експлуатації. Дана систематизація проведена з використанням морфологічного (структурного) аналізу, результатом чого стало формування потенційних і перспективних схем цифрових стратегій системи в контексті функціональних елементів на різних стадіях виконання їх функцій в умовах експлуатації засобів транспорту.

4. Розроблено і обґрунтовано структуру методики, яка дозволяє формувати цикл підвищення ефективності системи технічного обслуговування вантажного судна в умовах експлуатації з використанням цифрових стратегій.

Матеріали розділу 4 опубліковано в джерелах [118, 119, 120, 122, 123, 398, 413, 415, 419, 428, 431, 441].

РОЗДІЛ 5
МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ СИСТЕМИ КПТОВС

При створенні алгоритмів, що імітують процес технічного обслуговування судна, так само як і його технічної експлуатації, важливе значення має генерування випадкових приростів (позитивних і негативних) для середньої швидкості зміни технічного стану. У цій роботі було використано метод Монте-Карло для генерації випадкових прирощень. Метод Монте-Карло - це статистичний метод, який використовує випадкові вибірки для розв'язання проблем, які можуть бути фізичними або математичними. Алгоритм програми подано в Додатку Ґ до дисертації. Було згенеровано велику кількість випадкових прирощень і потім ці прирощення було використано для моделювання можливих сценаріїв зміни технічного стану.

Було використано такий алгоритм:

1. Визначено діапазон прирощень, який необхідно згенерувати.
2. Використано метод Монте-Карло для генерації великої кількості випадкових прирощень у цьому діапазоні.
3. Для кожного згенерованого прирощення, застосовано його до поточного технічного стану і розраховано новий технічний стан.
4. Цей процес був повторений багато разів, щоб змоделювати різні можливі сценарії зміни технічного стану.

Зазначений підхід може бути корисним, якщо необхідно спрогнозувати, як технічний стан може змінитися за різних сценаріїв, і оцінити ймовірність різних результатів.

Приростання параметра технічного стану y за період Δt_{reg}, що проходить між регламентними ТО:

$$y = \Delta t_{reg} \cdot \alpha \tag{5.1}$$

Величина випадкової швидкості α визначається - за формулами (5.3) – (5.6) залежно від застосовуваного закону розподілу.

У тому разі, якщо закон нормальний або логнормальний, то послідовно генерують 1000 випадкових чисел $l(i)$ рівномірного розподілу ($l(i) = random$), далі визначають суму:

$$f = \sum_{i=1}^{1000} [l(i) - 0.5] \tag{5.2}$$

При відомому коефіцієнті варіації швидкості зміни технічного стану V_v для нормального закону величина випадкової швидкості визначається:

$$\alpha = 1 + V_v \cdot f \tag{5.3}$$

При логнормальному законі розподілу:

$$\alpha = d \cdot e^{-b \cdot f} \tag{5.4}$$

де $b = \sqrt{ln(1 + V_v^2)}$ і $d = e^{-0.5 \cdot b^2}$.

При застосуванні закону Вейбулла генерується випадкове число $l = random$, далі:

$$\alpha = g \cdot e^{\left(\frac{1}{c \cdot ln[-ln(l)]}\right)} \tag{5.5}$$

де $g = \frac{1}{K_b}$, а $K_b = 0.440127 \cdot V_v^2 - 0.440113 \cdot V_v + 0.997488$ при значеннях коефіцієнту варіації $0 \leq V_v \leq 1.3$ (Рисунок 5.1) [343].

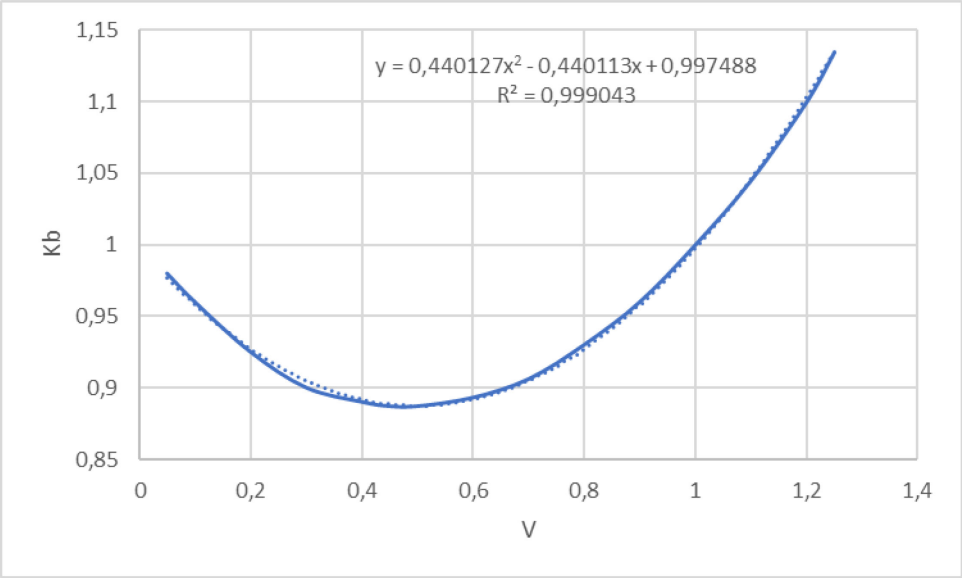


Рисунок 5.1 - Залежність коефіцієнта K_b від коефіцієнта варіації V_v

Величина c визначається за таких умов: якщо $V_v \leq 0.25$ то $c = 1.039 \cdot e^{-1.05 \cdot ln(V_v)}$; якщо $V_v > 0.25$ то $c = 0.955/(V_v - 0.049)$.

Для закону рівномірного розподілу:

$$\alpha = c_1 + (c_2 - c_1) \cdot l \tag{5.6}$$

де $c_1 = 1 - V_v \cdot \sqrt{3}$ і $c_2 = 1 + V_v \cdot \sqrt{3}$.

Під час моделювання процесу зміни технічного стану суднових технічних засобів у системі технічного обслуговування вантажних суден використовується підхід, що передбачає визначення значення параметра технічного стану об'єкта, позначеного як y, у кожен момент часу для заданого періоду регламентного технічного обслуговування Δt_{reg}. Далі проводиться порівняння отриманого значення y з певними передбаченими значеннями, що відповідають відповідним категоріям. При застосуванні технічного обслуговування залежно від стану, ця операція виконується протягом інтервалу між контрольними операціями Δt_c.

Під час моделювання комплексного технічного обслуговування умовою виконання технічного обслуговування за станом є досягнення параметром незадовільного стану $1 > y > y_u$ через час:

$$t_{mt} = \sum_{i=1}^{m} \Delta t_{ci} \tag{5.7}$$

де Δt_{ci} - фактичні інтервали між виконанням контролю, при цьому $\Delta t_{reg} > t_{mt}$. Якщо виконується умова $\Delta t_{reg} \leq t_{mt}$ на будь-якому кроці, то виконується регламентне ТО.

Під час моделювання процесу технічного обслуговування за станом величина параметра визначається як:

$$y = \sum_{i=1}^{m} \Delta t_c \alpha_i \tag{5.8}$$

де α_i - випадкова швидкість зміни технічного стану на інтервалі контролю.

При моделюванні процесів технічного обслуговування суднових технічних засобів вантажних суден, виникає проблема врахування залежності між медіанним та середнім значеннями ресурсу при визначенні залишкового ресурсу, який

безпосередньо формує витрати на змінно-запасні частини. Ця проблема обумовлена тим, що відносна величина залишкового ресурсу визначається за допомогою середнього значення, а не медіанного, оскільки ресурс вичерпується повністю при втраті функціональності. Наприклад, при моделюванні технічного обслуговування з урахуванням відмов, відносний залишковий ресурс повинен дорівнювати нулю при великій кількості реалізацій. Для регламентного технічного обслуговування, відносний залишковий ресурс враховується на основі m реалізацій:

$$R_{res} = \sum_{i=1}^{m} \left(\frac{1}{\alpha_i} - \Delta t_{reg} \right) \cdot K_t \tag{5.9}$$

5.1 Основні припущення, обмеження і положення моделювання процесів системи КПТОВС

Для досягнення наукової обґрунтованості та відповідності процесу технічного обслуговування суднових технічних засобів вантажних суден, важливо враховувати методологію використання результатів моделювання. Це може відбуватися на основі початкових даних, отриманих з актів виконання робіт з технічного обслуговування, або з вже оброблених записів та середніх значень. У першому випадку результати моделювання не потребують корекцій для врахування зв’язку між медіанним і середнім напрацюванням. Однак, при використанні оброблених даних зручніше, коли результати моделювання вже включають такі корекції.

У практичній експлуатації, після виконання технічного обслуговування, значення структурних параметрів та напрацювань (позначені як Y_i, Y_0, T_i) фіксуються у звітних документах. Для кожної реалізації процесу зміни технічного стану визначається швидкість зміни технічного стану за допомогою наступної формули:

$$a_i = \frac{|Y_i, -Y_0|}{T_i} \tag{5.10}$$

За результатами N реалізацій процесу визначиться a_{avg} - середня швидкість зміни технічного стану та V_v - коефіцієнт варіації:

$$a_{avg} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} a_i \tag{5.11}$$

$$V_v = \frac{\sum_{i=1}^{N}\left(a_i - a_{avg}\right)^2}{a_{avg}(N-1)} \tag{5.12}$$

За відомою аварійною величиною структурного параметра визначається величина медіанного напрацювання до аварійного стану:

$$T_{med} = \frac{\left|Y_{fail} - Y_0\right|}{a_{avg}} \tag{5.13}$$

Надалі для використання результатів моделювання в безрозмірних величинах для переходу до розмірних використовуються величини використаного ресурсу за параметром – тобто відносна величина, отримана як результат:

$$R = \frac{Y - Y_0}{Y_{fail} - Y_0} \tag{5.14}$$

Або якщо використовуються відносні величини:

$$R = y \tag{5.15}$$

Вважається, що ресурс R використовується на 100 % тільки у випадку відмови об’єкта [104]. Надалі, величина R застосовується для визначення витрат на змінно-запасні частини.

Відносні значення тривалості циклу експлуатації T_{MC} та використаного ресурсу перетворюються на абсолютні значення шляхом множення на середнє напрацювання до відмови T_{avg}:

$$T_{MC} = t \cdot T_{avg} \tag{5.16}$$

$$R_U = R \cdot T_{avg} \tag{5.17}$$

У випадку, коли вихідна інформація представлена медіанними значеннями напрацювань до відмови, а саме величиною (T_{med}) і коефіцієнтом варіації, для використання результатів описаного моделювання необхідно враховувати зв’язок між медіанним (T_{med}) і середнім (T_{avg}) напрацюваннями до відмови, а також між коефіцієнтом варіації для напрацювань до відмови (V_{fail}) і коефіцієнтом варіації для швидкості зміни технічного стану (V_v).

У деяких випадках вихідні дані можуть бути втраченими, але відомі середні значення напрацювань до аварійного стану або іншого стану, а також їхній коефіцієнт

варіації. У такому випадку можна скористатися кривими, отриманими за допомогою методу статистичних випробувань [104], або поліномами, отриманими на основі відомої густини розподілу швидкості зміни технічного стану $f(a)$ та густини напрацювань до відмови $f(t)$, що визначаються за формулою [150]:

$$f(t = T) = f[\varphi(T)] \cdot |\varphi'(T)| \tag{5.18}$$

де $\varphi(T)$ - обернена функція $f(a)$, для лінійного закону - $\varphi(T) = \frac{Y_{fail}}{T}$, $\varphi'(T)$ - похідна від оберненої функції, для лінійного закону - $\varphi'(T) = -\frac{Y_{fail}}{T^2}$.

Застосування поліномів у процесі технічного обслуговування суднових технічних засобів вантажних суден дозволяє безпосередньо встановлювати зв'язки між середніми та медіанними значеннями напрацювань, а також коефіцієнтами варіації швидкості V_v та напрацювань V_t:

$$T_{avg} = \frac{T_{med}}{K_t} \tag{5.19}$$

$$V_v = F(V_t) \tag{5.20}$$

Як зазначається в роботі [150], параметри, що характеризують граничний стан, є випадковими величинами (Рисунок 5.2).

Особливості побудови моделі технічного обслуговування суднових технічних засобів вантажних суден представлено у Додатку М23.

Важливим показником є ймовірність досягнення граничного стану за певне напрацювання, які визначають гамма-відсоткові ресурси.

Під час призначення періодичності технічного обслуговування рекомендуються такі допустимі ймовірності досягнення граничного стану $(1 - \gamma)$ [343]:

0.05 - для неприпустимих потенційних відмов (наявність втомних тріщин у відповідальних деталях);

0.20 - для основних відмов зносостійкого виду, що застерігаються (знос вузлів тертя, корозійний знос тощо);

0.50 - для неосновних відмов, що застерігаються (зміна форми поверхні, ризики, засмічення тощо).

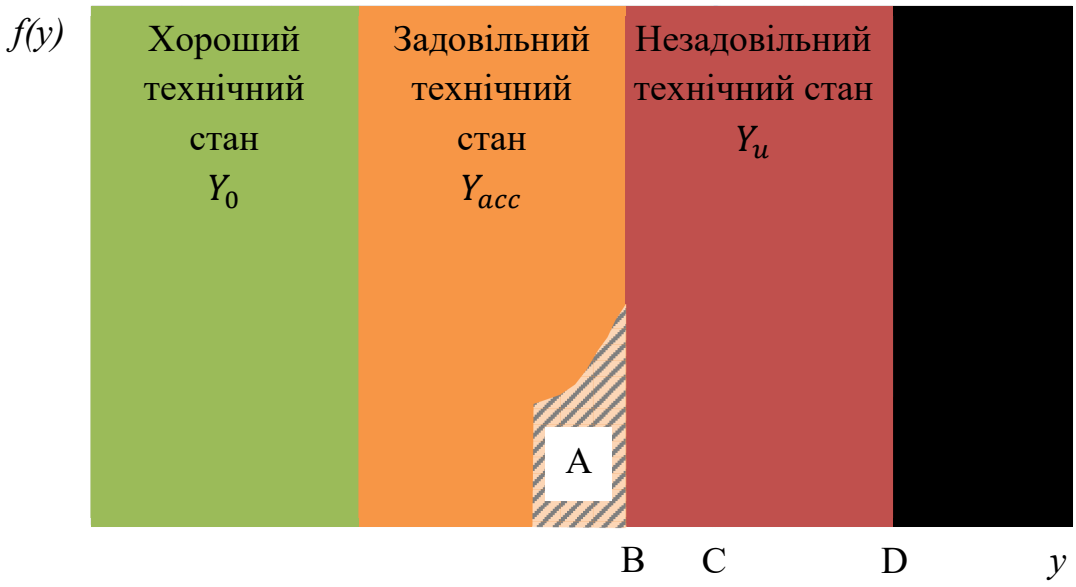


Рисунок 5.2 - Щільність розподілу граничних станів $f(y)$ для визначення гранично-допустимих значень параметрів технічного стану

A - допустима ймовірність досягнення граничного стану $(1-\gamma)$; B - гранично-допустиме значення параметра технічного стану (призначений рівень граничного стану); C - критичний рівень граничного стану; D - гранично-можливе значення параметра.

Зазвичай заводи-виробники встановлюють гранично-допустимі значення структурних параметрів і робочих параметрів, які слід враховувати при проведенні технічного обслуговування. Однак, конкретні значення структурних параметрів, які визначають критичний рівень граничного стану, що були враховані заводом-виробником, залишаються невідомими. Ці значення можна оцінити лише опосередковано, виходячи з рекомендованих ймовірностей досягнення критичного рівня і закономірностей зміни технічного стану, що були наведені раніше. Крім того, гранично-можливі значення структурних параметрів, які вказують на аварійний стан об’єкта, також залишаються невідомими. Зазвичай їх можна оцінити лише опосередковано в разі функціональної відмови об’єкта. Таким чином, експлуатаційник не має достовірних даних щодо критичного рівня граничного стану та гранично-можливих значень структурних параметрів.

З огляду на те, що найчастіше критичний рівень граничного стану невідомий, а відомий тільки рівень граничного стану, призначений заводом-виробником, на перший погляд, виявляється неможливим визначити ймовірність параметричних відмов у рамках планово-попереджувальної системи технічного обслуговування. У такій ситуації може бути визначена ймовірність лише функціональних відмов, та й то тільки за подіями, що фактично відбулися. При досягненні граничного стану, зазвичай не відбувається негайних наслідків для обсягу виконуваного технічного обслуговування, оскільки заводи-виробники встановлюють значення граничного стану з великим запасом. Проте, завжди існує спокуса продовжити експлуатацію в області незадовільних або граничних станів, проте це пов'язано з непотрібним ризиком, оскільки протяжність таких станів невідома. Для грубої оцінки ймовірності відмови при досягненні незадовільного або граничного стану можна скористатися такими логічними міркуваннями. Якщо припустити, що завод-виготовлювач призначив граничний або незадовільний стан, зважаючи на наведені вище міркування щодо гамма-відсоткових ресурсів, то за характером процесів, що призводять до основного виду зношування (втома, тертя тощо), можна прийняти величину γ, наприклад, «0,95», «0,8» або «0,5». Далі, вважаючи, що в разі досягнення критичного рівня, який є математичним очікуванням, ймовірність відмови понад «0,5», розглядаємо ймовірність відмови $Q(FL)$ у разі досягнення граничного стану як добуток двох статистично пов'язаних подій. Перша подія L - досягнення граничного стану з ймовірністю $Q(L)$, друга F - відмова після досягнення граничного стану з умовною ймовірністю $Q(F/L)$:

$$Q(FL) = Q(L) \cdot Q(F/L) \tag{5.21}$$

Умовна ймовірність відмови після досягнення математичного очікування рівня граничного стану $Q(F/L)$ приймається рівною «0,5». Ймовірність досягнення граничного стану $Q(L)$ при досягненні призначеного заводом-виробником гранично-допустимого значення структурного параметра дорівнює $(1-\gamma)$. Таким чином ймовірність відмови при досягненні призначеного рівня граничного стану приблизно дорівнює:

$$Q(FL) = 0.5 \cdot (1 - \gamma) \quad (5.22)$$

Якщо в результаті вивчення динаміки процесів зміни технічного стану встановлено швидкість зміни технічного стану, її коефіцієнт варіації, то може бути визначена ймовірність досягнення призначеного рівня граничного стану або незадовільного стану $(1 - P_L)$. Тоді $(1 - P_F)$ - ймовірність відмови визначитися як:

$$(1 - P_F) = 0.5 \cdot (1 - P_L) \cdot (1 - \gamma) \quad (5.23)$$

Наприклад, під час зношування поршневих кілець суднових двигунів внутрішнього згоряння переважає механічне зношування, при цьому, найймовірніше, завод-виготовлювач, призначаючи гранично-допустимі зазори в замку і кепах, керувався величиною $(1 - \gamma) = 0.2$. Якщо за результатами вимірів зношування кілець встановлено швидкість зношування, її розкид, і за заданої заводом-виготовлювачем періодичності моточисток визначено ймовірність недосягнення граничного стану кільцями $P_L = 0.7$, то, обчислюючи за формулою (5.23), ймовірність відмови суднового двигуна внутрішнього згоряння через зношення кілець:

$$(1 - P_F) = 0.5 \cdot (1 - 0.7) \cdot 0.2 = 0.03$$

Наведені вище вимоги до обсягу вихідної інформації зведені в Таблицю 5.1. З огляду на те, що практичне застосування будь-якого планово-попереджувального методу не передбачає точного дотримання періодичності технічного обслуговування або контролю в чітко визначений час і допускає певні відхилення, у моделі цей аспект враховується шляхом рівномірного розподілу фактичних моментів виконання цих операцій відносно директивних моментів з заданою похибкою. Зазвичай, величина цього розподілу не перевищує 10%, але вона може бути предметом окремого дослідження.

Методи технічного обслуговування включають регламентне технічне обслуговування, обслуговування за станом, за відмовами, а також комплексні методи, які поєднують регламентне обслуговування з контролем стану і відмов. Вибір методу залежить від специфіки об’єкта та доступної інформації про його технічний стан. Опис процесу зміни технічного стану включає в себе визначення швидкості зміни

технічного стану, визначення середнього значення та коефіцієнта варіації цієї швидкості, а також визначення закону розподілу для швидкості зміни технічного стану. Опис категорії технічного стану включає в себе визначення меж технічних станів, включаючи "хороший", "задовільний", "незадовільний" та "аварійний" стани. Ці межі використовуються для визначення моментів проведення технічного обслуговування або контролю.

Таблиця 5.1 - Особливості первинної інформації під час моделювання процесів технічного обслуговування

Категорія	Первинна інформація моделювання	Метод технічного обслуговування			
		За регламентом	За станом	За відмовами	Комплексний
Опис процесу зміни технічного стану	Закон розподілу швидкості зміни технічного стану	+	+	+	+
	Коефіцієнт варіації швидкості зміни технічного стану V_v або напрацювань до відмови V_t	+	+	+	+
	Середнє напрацювання до відмови T_{avg} або медіанне напрацювання T_{med}	+	+	+	+
Опис категорії технічного стану	Аварійного Y_{fail}	+	+	+	+
	Незадовільного Y_u	+	+	-	+
	Задовільного Y_{acc}	-	+	-	+
	Хорошого Y_0	+	+	+	+
Особливості алгоритму	Правило зміни періодичності контролю	-	+	-	+
	Алгоритм прогнозу зміни параметра	-	+	-	+
Інші особливості	Величина допустимого відхилення призначених моментів технічного обслуговування і контролю технічного стану	+	+	-	+

Таким чином, у випадку відсутності повної інформації про технічні стани, необхідно проводити додаткові дослідження. Це може включати детальніше вивчення методів технічного обслуговування, процесів зміни технічного стану, а

також категорій технічного стану. Ці дослідження допоможуть в уточненні моделі та підвищенні точності прогнозування технічного стану об’єкта.

Важливо зазначити, що у питанні про основні припущення і положення моделювання системних об’єктів системи КПТОВС важливими є наступні висновки:

1. Для досягнення наукової обґрунтованості та відповідності процесу технічного обслуговування суднових технічних засобів вантажних суден, важливо враховувати методологію використання результатів моделювання.

2. При використанні оброблених даних зручніше, коли результати моделювання вже включають корекції, які враховують зв’язок між медіанним і середнім напрацюванням.

3. Обґрунтованим є застосування поліномів які дозволяють безпосередньо встановлювати зв’язки між середніми та медіанними значеннями напрацювань, а також коефіцієнтами варіації швидкості та напрацювань.

4. Важливими є коефіцієнт варіації для швидкості зміни технічного стану, та закон розподілу.

5. Для переходу від відносних результатів моделювання до конкретних результатів досліджуваного об’єкта необхідно встановити наступні параметри: 1) середнє напрацювання до відмови; 2) або медіанне напрацювання до відмови, яке визначається як момент часу, коли досягається непрацездатний стан згідно середньої швидкості зміни технічного стану; 3) або швидкість зміни технічного стану.

6. Під час проведення контролю технічного стану, залежно від технології застосованого методу, може бути необхідним опис проміжних категорій технічного стану (принаймні однієї), при досягненні якої необхідно змінити періодичність контролю.

7. У разі застосування технічного обслуговування за станом необхідне завдання алгоритму прогнозу зміни технічного стану, який також має стати частиною моделі.

8. Під час моделювання процесів технічного обслуговування, особлива увага приділяється відомому недоліку інформації, що міститься в інструкціях заводів виробників.

9. Використання описаної моделі для імітації експлуатації об’єкта, який перебуває в системі технічного обслуговування, дозволяє встановити закон вплив розподілу на періодичність регламентного технічного обслуговування та контролю.

10. Наведені результати можуть бути застосовані до будь-яких фактичних даних шляхом переходу від безрозмірних характеристик до абсолютних значень.

5.2 Моделювання процесів зміни технічного стану з врахуванням складника випадковості

Основою моделей, що описують закономірності зміни технічного стану, є моделі закономірностей розвитку та накопичення пошкоджень. У цьому контексті використовуються аналітичні та статистичні моделі.

З традиційної практики, аналітичні моделі використовуються на етапі розробки нових технологій обробки, створення та дослідження матеріалів, що беруть участь в процесі зносу, виявлення причин незадовільних експлуатаційних якостей тощо.

Аналітичні моделі представляють собою найбільш строго обґрунтований опис процесів зносу і відрізняються повнотою врахування факторів. При цьому широко використовуються експериментальні дані, а також експлуатаційні дані про знос. Однак, з їх допомогою досить складно моделювати випадкові експлуатаційні фактори, що діють в інтервалі між технічним обслуговуванням суднових технічних засобів.

У контексті технічного обслуговування вантажних суден, ці моделі можуть бути застосовані для прогнозування технічного стану судна, включаючи різні складові, такі як двигуни, корпус, рушій, навігаційне обладнання, енергетичне обладнання, тощо. Особливість цього сектора полягає у тому, що випадкові експлуатаційні фактори можуть включати різноманітні умови моря, навантаження, погодні умови та інші фактори, які впливають на стан судна та його технічних засобів між плановими технічними обслуговуваннями.

Іншим напрямком у моделюванні процесів зміни технічного стану є використання статистичних моделей. Базуючись на них, було побудовано теорію масового обслуговування [390], що дозволяє розв’язувати задачі прогнозування потреби у технічному обслуговуванні на основі статистичних даних, не

заглиблюючись в сутність фізичних процесів. Найбільшого поширення набули Марківські моделі, які можуть допомогти в плануванні та оптимізації графіка обслуговування, передбачення потреби в ремонті та заміні компонентів. Статистичні моделі, особливо Марківські, виявляються корисними, оскільки вони можуть моделювати процеси зносу та пошкоджень, які є відмінними властивостями експлуатації вантажних суден.

5.2.1 Марківські моделі для опису процесів технічного обслуговування вантажних суден

Марківські моделі займають особливе місце в сучасному теоретичному підході до моделювання процесів технічного обслуговування та експлуатації вантажних суден. Завдяки своїм властивостям з урахуванням випадковості та непередбачуваності, вони стають незамінними в інструментах прогнозування та планування.

Основне припущення Марківського процесу полягає у тому, що майбутній стан системи залежить виключно від поточного стану, а не від шляху, яким було досягнуто цього стану. У контексті технічного обслуговування вантажних суден, це може бути інтерпретовано так, що поточний стан судна (наприклад, рівень зносу чи пошкоджень компонентів) впливає на його майбутній стан.

Особливості марковських моделей для опису процесів технічного обслуговування вантажних суден викладені у Додатку М24.

Позначимо індексом i - поточний стан, яких може бути загалом $2(M+N)$, де M - кількість вузлів, що підлягають ТО та беруть участь у розрахунку, N - кількість систем двигуна, що підлягають ТО. Множник “2” означає, що різновид ТО може бути як плановим, так і позаплановим. Лише один стан відповідає робочому стану головного двигуна і його систем, тому загальна кількість станів складає $2(M+N)+1$.

Цей підхід дозволяє враховувати різні стани технічного стану і складності системи технічного обслуговування вантажного судна, що включає численні компоненти і системи. Залежно від конкретних умов, різні компоненти і системи

можуть мати різні відмови і рівні надійності, що слід враховувати при плануванні та проведенні технічного обслуговування.

На Рисунку 5.3 представлено граф можливих станів головного двигуна, що використовується для розрахунку комплексних показників надійності. Стан S є працездатним. При $i = 1, 2, \dots N$ маємо місце непланові ТО внаслідок відмови вузла, $i = (N+1), (N+2), \dots (2N)$ - планові ТО вузла. При $i = (2N+1), (2N+2), \dots (2N+M)$ - позапланові ТО системи внаслідок відмови, а при $i = (2N+M+1), (2N+M+2), \dots 2(N+M)$ - планові ТО системи. Система рівнянь для розрахунку значень ймовірностей відповідних станів визначається розв'язанням системи рівнянь Чепмена-Колмогорова (рівняння 5.24).

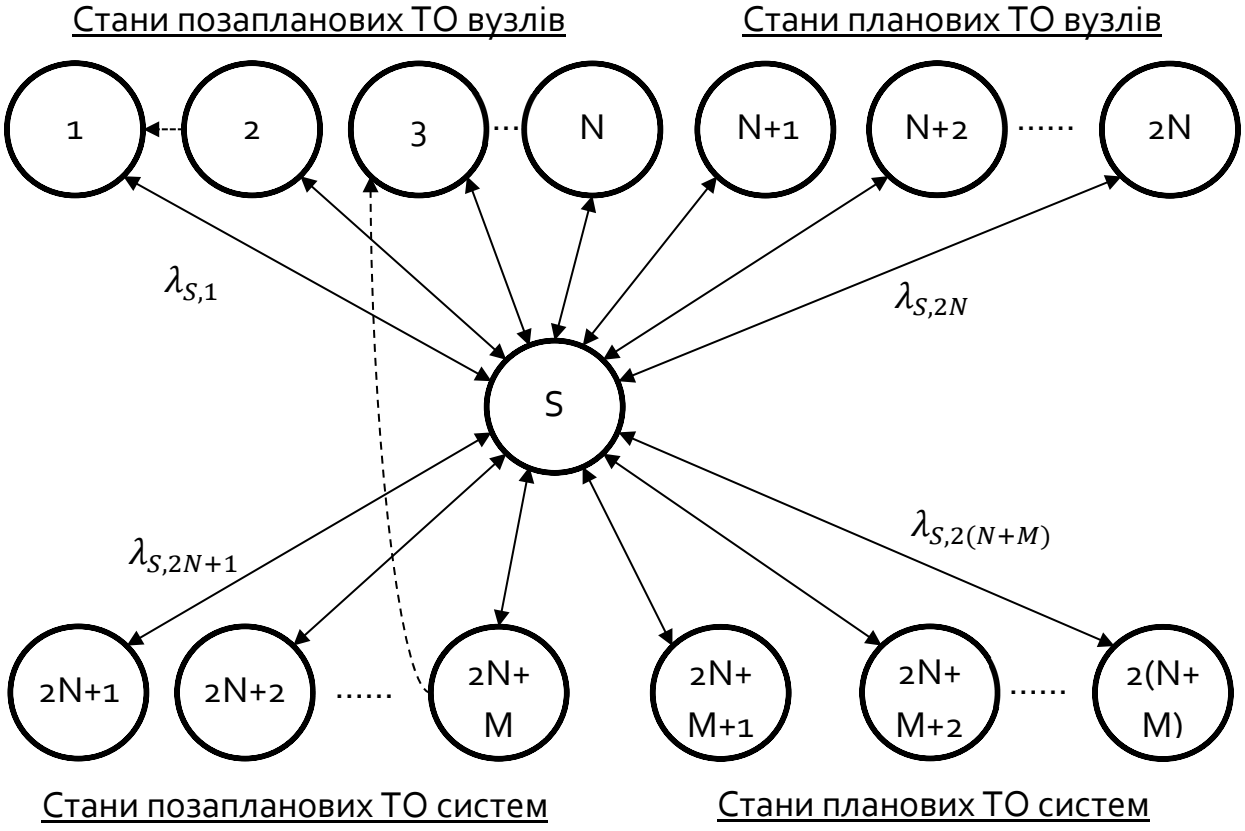


Рисунок 5.3 - Граф станів суднового технічного засобу
(на прикладі головного двигуна)

Така модель дозволяє детально враховувати окремі можливі стани головного двигуна в рамках технічного обслуговування вантажного судна. Це забезпечує більш точний і деталізований аналіз надійності, враховуючи різні види ТО - як планові, так

і непланові, для різних вузлів та систем. Система рівнянь Чепмена-Колмогорова, використана в цьому контексті, дозволяє обчислити ймовірності перебування в різних станах на основі інтенсивностей переходів між ними. У випадку, коли встановлено зв'язок відмови вузла або системи з відмовами інших вузлів та систем, система рівнянь ускладняється через появу додаткових членів, що враховують інтенсивність зв'язаних відмов. Наприклад, якщо відмова вузла 2 призводить до відмови вузла 1, і відмова системи M призводить до відмови вузла 3, то система рівнянь (5.24) набуває форми (5.25).

$$\begin{cases} \dfrac{dP_1(t)}{dt} = -\mu_{1,S} \cdot P_1(t) + \lambda_{S,1} \cdot P_S(t) \\ \dfrac{dP_2(t)}{dt} = -\mu_{2,S} \cdot P_2(t) + \lambda_{S,2} \cdot P_S(t) \\ \dots\dots\dots\dots\dots \\ \dfrac{dP_i(t)}{dt} = -\mu_{i,S} \cdot P_i(t) + \lambda_{S,i} \cdot P_S(t) \\ \dfrac{dP_s(t)}{dt} = \sum\limits_{i=1}^{M+N} \mu_{i,S} \cdot P_i(t) - P_S(t) \sum\limits_{i=1}^{M+N} \lambda_{S,i} \end{cases} \tag{5.24}$$

$$\begin{cases} \dfrac{dP_1(t)}{dt} = -\mu_{1,S} \cdot P_1(t) + \lambda_{S,1} \cdot P_S(t) + \lambda_{2,1} \cdot P_2(t) \\ \dfrac{dP_2(t)}{dt} = -\mu_{2,S} \cdot P_2(t) + \lambda_{S,2} \cdot P_S(t) - \lambda_{2,1} \cdot P_2(t) \\ \dfrac{dP_3(t)}{dt} = -\mu_{3,S} \cdot P_3(t) + \lambda_{S,3} \cdot P_S(t) + \lambda_{(2N+3),3} \cdot P_{2N+3}(t) \\ \dots\dots\dots\dots\dots \\ \dfrac{dP_{2N+3}(t)}{dt} = -\mu_{(2N+3),S} \cdot P_{2N+3}(t) + \lambda_{S,3} \cdot P_S(t) - \lambda_{(2N+3),3} \cdot P_{2N+3}(t) \\ \dots\dots\dots\dots\dots \\ \dfrac{dP_i(t)}{dt} = -\mu_{i,S} \cdot P_i(t) + \lambda_{S,i} \cdot P_S(t) \\ \dfrac{dP_s(t)}{dt} = \sum\limits_{i=1}^{M+N} \mu_{i,S} \cdot P_i(t) - P_S(t) \sum\limits_{i=1}^{M+N} \lambda_{S,i} \end{cases} \tag{5.25}$$

Прикладами таких зв'язків відмов можуть бути відмови підшипників шатунів через пошкодження теплообмінника і відмови системи змащування. Іншим прикладом може бути відмова системи охолодження, що веде до перегріву двигуна і можливої відмови циліндрів або підшипників. Або, наприклад, відмова системи

живлення, яка може призвести до збою в системі управління, що, в свою чергу, може призвести до відмови двигуна.

Числове розв’язання цієї істотно розрідженої системи диференціальних рівнянь навіть при змінних у часі інтенсивностях відмов не представляє суттєвих ускладнень. Основною проблемою є збір надійних експлуатаційних даних та визначення інтенсивностей відмов та відновлень.

Як правило, на практиці, відсутня вибірка необхідних параметрів. Навіть при наявності значної кількості відмов, вимагається, щоб ці відмови, будучи розбиті за видами, вузлами, системами тощо, представляли репрезентативну вибірку. Зазвичай це нереально. Отже, було б значущим кроком вперед вирішити цю задачу визначення інтенсивностей відмов та відновлень за допомогою експлуатаційних звітних даних, які включають закономірності зміни технічного стану. Одним з шляхів вирішення цієї задачі є методологія, заснована на цифрових двійниках та прескриптивному обслуговуванні [429].

Для опису процесів зміни технічного стану також може бути застосований цей самий метод Марківських процесів. При цьому заздалегідь повинна бути сформована система можливих станів на шляху від робочого стану після технічного обслуговування або виробництва до планового ТО або відмови. Основною особливістю цих станів є те, що самостійно, без проведення технічного обслуговування, об’єкт не може покращити технічний стан.

При деградації технічного стану він може переходити з категорії в категорію з різною швидкістю, що може, зокрема, виражатися в переході в іншу категорію, минаючи проміжну категорію. На Рисунку 5.4 представлено умовний граф зміни технічного стану.

Система рівнянь, що описує динаміку зміни технічних станів, може бути представлена у вигляді (5.26). Так само, як і в попередньому випадку, основна проблема полягає в отриманні необхідної інформації про фактичні значення інтенсивностей переходу з одного стану в інший (λ).

Кількість проміжних станів між початковим (1) і кінцевим (N) є тим більшою, чим більше кількість ділянок з особливостями зміни технічного стану потрібно

виділити. А проблема наявності достатньої статистичної інформації загострюється зі збільшенням числа можливих станів що потрібно виділити. Тому найчастіше задачу вирішують виділенням двох станів (робочого і неробочого).

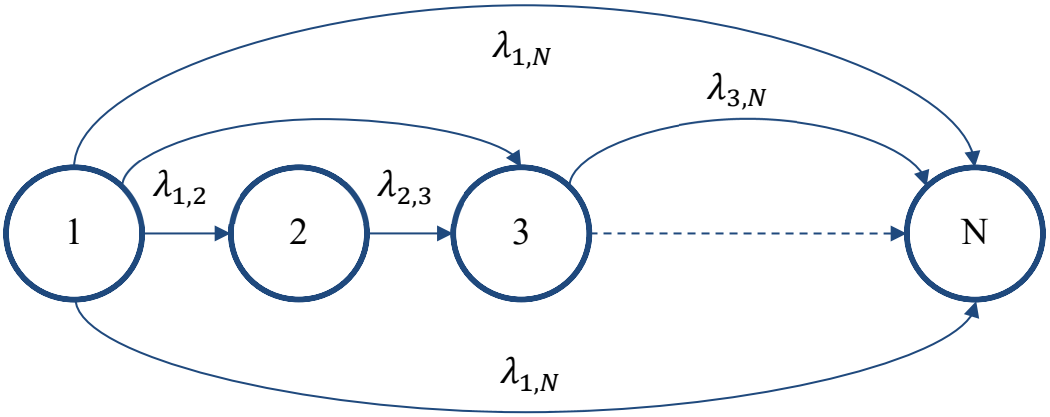


Рисунок 5.4 - Граф зміни технічного стану

$$\begin{cases} \dfrac{dP_1(t)}{dt} = -\left(\lambda_{1,2} + \lambda_{1,3} + \cdots + \lambda_{1,N}\right) \cdot P_1(t) \\ \dfrac{dP_2(t)}{dt} = \lambda_{1,2} \cdot P_1(t) - \left(\lambda_{2,3} + \cdots + \lambda_{2,N}\right) \cdot P_2(t) \\ \dfrac{dP_3(t)}{dt} = \lambda_{1,3} \cdot P_1(t) + \lambda_{2,3} \cdot P_2(t) - \left(\lambda_{3,4} + \cdots + \lambda_{3,N}\right) \cdot P_3(t) \\ \cdots \cdots \cdots \cdots \cdots \\ \dfrac{dP_N(t)}{dt} = \lambda_{1,N} \cdot P_1(t) + \lambda_{2,N} \cdot P_2(t) + \cdots + \lambda_{1N-1,N} \cdot P_{N-1}(t) \end{cases} \quad (5.26)$$

Іншим суттєвим недоліком цього методу є складність обліку властивостей планово-попереджувальної системи технічного обслуговування. Якщо для регламентованого методу технічного обслуговування принципової складності не виникає, то для методів технічного обслуговування за станом (з виконанням прогнозу і адаптацією періодичності виявленому стану), а тим більше комбінованих методів технічного обслуговування, побудова алгоритму функціонування об'єднаної моделі об'єкт-система технічного обслуговування стає складною задачею.

Разом з тим Марківські моделі можуть бути використані для дослідження об'єкта в цілому, що має кінцеву кількість елементів, видів відмов елементів і систему технічного обслуговування. Система технічного обслуговування налаштована на попередження відмов певного виду (за результатами аналізу критичності), роботи за

технічним обслуговуванням об’єднуються в комплекси. Відповідно кожен комплекс, налаштований на попередження найбільш критичних відмов автоматично забезпечує попередження інших з кінцевою ефективністю.

В змішаній моделі інтенсивності переходу з різних станів можуть бути отримані через величини інтенсивностей зношування, таким чином дозволяючи об’єднати фізичну модель з Марківською чи напівмарківською.

Розглянемо інший варіант опису процесу зміни технічного стану, який, будучи спрямований на опис фізичного процесу, дозволяє використовувати практично всю інформацію про зміну технічного стану, що збирається в процесі виконання діагностики, технічного обслуговування та ремонту.

5.2.2 Модель зміни технічного стану з випадковою складовою

Процес зміни технічного стану може бути представлений у вигляді певної функції $\mathrm{F}(t)$ і випадкової компоненти $\Delta(t)$:

$$Y(t) = \mathrm{F}(t) + \Delta(t) \tag{5.27}$$

Питання про походження випадкової компоненти при застосуванні традиційних методів теорії надійності, коли здійснюється відома обробка статистичного матеріалу, має значення лише на етапі класифікації відмов. При здійсненні управління ТО за регламентом, такий опис процесу зміни технічного стану повністю виправданий. При застосуванні управління ТО за конкретною реалізацією процесу зміни технічного стану такий розгляд випадкової компоненти не виправданий, оскільки суттєво погіршує результат застосування ТО за станом. Справа в тому, що кожне проміжне визначення технічного стану в які-небудь моменти часу звужує область можливих станів, в які може перейти об’єкт у майбутньому. Це пояснюється тим, що закономірність зміни технічного стану є результатом певної швидкості зміни технічного стану, яка має певну нестабільність через ряд експлуатаційних та технологічних факторів. В кінцевому рахунку, отриманий розкид в технічному стані обумовлюється розкидом швидкості зміни технічного стану. Такий розгляд випадкової складової в процесі зміни технічного стану дозволяє описувати процес управління ТО не тільки за регламентом, але і для

методів за станом і в більшій мірі, відповідає фізичному сенсу процесів, що відбувається.

При деталізованому аналізі процесу трансформації технічного стану протягом часу, функція швидкості зміни технічного стану $\gamma(t)$ відіграє ключову роль. Цей параметр відображає динаміку змін технічного стану засобів вантажного судна і є важливим індикатором для планування та проведення технічного обслуговування:

$$\gamma(t) = \frac{dY(t)}{dt}, \tag{5.28}$$

де $Y(t)$ - величина, що характеризує розмір пошкодження (збільшення зазору, величина відкладень, зменшення розміру деталі внаслідок зносу, розмір тріщини тощо) від часу t. Аналіз $\gamma(t)$ дозволяє виявити потенційні проблеми та відмови обладнання, а також оптимізувати графік технічного обслуговування, заснований на реальному стані суднових технічних засобів, а не лише на стандартному регламенті.

Знаючи функцію швидкості зміни технічного стану $\gamma(t)$ величину пошкодження в часі, визначають за формулою:

$$Y(t) = \int_0^t \gamma(t)dt. \tag{5.29}$$

Об’єктами технічного обслуговування та експлуатації є старіючі об’єкти, в яких відбуваються незворотні процеси, тому функція $Y(t)$ є монотонно зростаючою. Варто відзначити, що процеси накопичення розмірів пошкоджень є випадковими, а розгляд їх закономірності є не що інше, як математичне очікування даної випадкової функції. В загальному випадку з урахуванням випадкової компоненти швидкість зміни технічного стану може бути представлена як:

$$\gamma(t) = \alpha(t) + \delta(\alpha), \tag{5.30}$$

де $\alpha(t)$ - детермінована складова швидкості зміни, а $\delta(\alpha)$ - випадкова складова, яка розподілена відносно математичного очікування $\alpha(t)$ за яким-небудь законом розподілу, наприклад, логнормальному або Вейбулла, причому в загальному випадку з непостійним коефіцієнтом варіації. Типові закономірності процесів зміни технічного стану без урахування випадкової компоненти представлені в роботі [419].

Найбільш поширені стаціонарні процеси, коли $\alpha(t) = const$ або коливається відносно середнього, це має місце при стабілізації факторів, що впливають на швидкість зміни технічного стану. Цей тип залежності характерний для процесів механічного зношування прироблених пар тертя, корозійного зношування, а знос як результат цього типу процесів змінюється лінійно. Якщо при накопиченні пошкоджень виникають фактори, що інтенсифікують процес або навпаки - сповільнюють, швидкість зміни починає монотонно змінюватися, і накопичення пошкоджень відбувається не лінійно в часі. Прикладом такого процесу може бути зношування пари тертя на останній стадії, коли в результаті збільшення зазорів змінюється характер навантаження пари тертя, що призводить до інтенсифікації зносу. У деяких випадках швидкість протікання зміни технічного стану має екстремум (деякі процеси корозійного руйнування та короблення), після досягнення якого швидкість накопичення пошкоджень падає, а процес накопичення пошкоджень припиняє наростати. Це іноді спостерігається в відливках, коли після певного періоду часу та перерозподілу напружень та деформацій короблення її припиняється. Аналогічна картина спостерігається в складних конструкціях, що мають прокладки та зібрані на різьбових з'єднаннях, коли важко забезпечити рівномірність навантаження всіх елементів кріплення. У перший період експлуатації, по мірі отримання додаткових пластичних деформацій прокладками, відбувається перерозподіл навантажень між елементами кріплення. Як результат відбувається стабілізація навантаження елементів кріплення або навпаки - лавиноподібний ріст навантажень по мірі відмови найбільш навантажених елементів.

Процес зношування рамових підшипників двигуна [166] є ще більш складним, оскільки по мірі зношування величина навантаження на підшипник зменшується, а на сусідні - збільшується, що викликає їх більш інтенсивне зношування, що в подальшому знову збільшує навантаження на перший підшипник. Тобто, в цьому випадку можливі не один, а кілька екстремумів у швидкості зміни технічного стану.

Для втомних процесів характерне виникнення тріщини після певної кількості циклів навантаження, і лише після цього вона починає рости.

У умовах експлуатації частіше всього спостерігаються процеси, які представляють собою одночасне та взаємопов'язане протікання кількох закономірностей, та ще й із випадковою складовою. На Рисунку 5.5 представлені можливі випадкові реалізації процесу зміни технічного стану. Там же нанесені дві прямі: аварійного стану (a) та незадовільного (b). Якщо дотримуватися стратегії прогностичного ТО, то не можна допускати досягнення об'єктом аварійного стану, а ТО необхідно виконувати в інтервалі між незадовільним та аварійним станами, причому виконувати ТО раніше настання незадовільного стану нерозумно, оскільки це буде передчасно і в багатьох випадках скорочує ресурс об'єкта та збільшує витрати на ТО.

Для реалізації цілі прогностичного технічного обслуговування - запобігання відмов, необхідно визначити моменти часу досягнення параметром технічного стану значень, що відповідають незадовільному і, відповідно, аварійному стану.

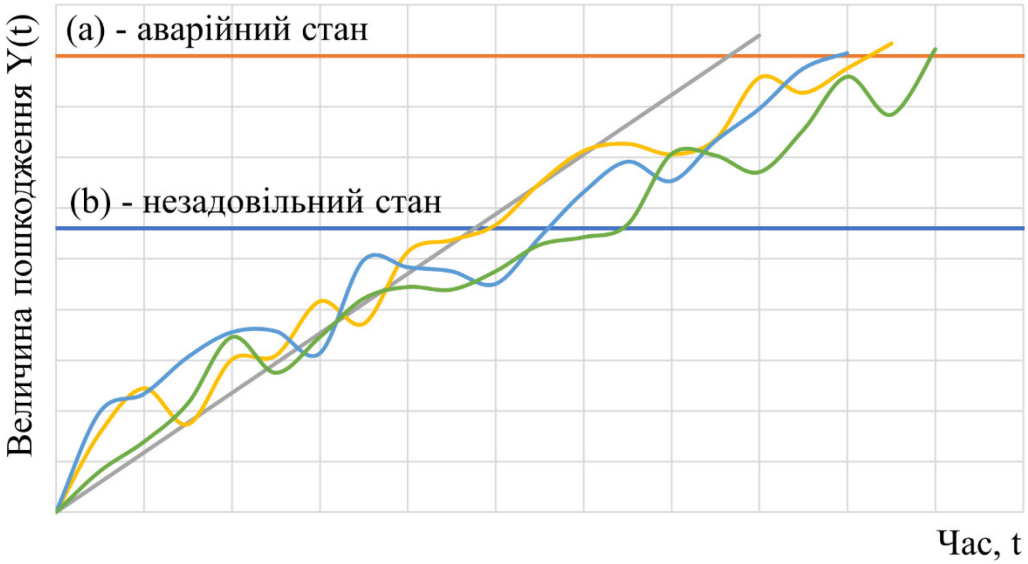


Рисунок 5.5 - Зміна технічного стану

Визначення цих моментів часу принципово можливе за допомогою двох методів:

1. Безпосередньо вирішуючи рівняння (5.26) відносно часу t при відомому аварійному значенні параметра технічного стану (a) і незадовільному значенні параметра (b). За цими даними побудувати залежності ймовірностей досягнення незадовільного, відповідно, аварійного станів.

2. Не займаючись проблемою опису процесу зміни технічного стану за допомогою рівняння (5.26), а просто зібрати достатню статистику фактичних напрацювань до аварійного стану і незадовільного стану і відразу побудувати залежності ймовірностей досягнення незадовільного і, відповідно, аварійного станів.

Припустимо, що в результаті реалізації першого або другого методу визначені середні напрацювання до аварійного стану (відмови) - T_{avg2} і до незадовільного стану - T_{avg1}. Припустимо, що знайдені коефіцієнти варіації для відповідних напрацювань - $R_e = \sigma_e/T_{avg2}$ і $R_u = \sigma_u/T_{avg1}$, де σ_e - середнє квадратичне відхилення для напрацювання до відмови, а σ_u - середнє квадратичне відхилення для напрацювань до незадовільного стану. Припустимо, що підібрані відповідні закони розподілу для напрацювань до незадовільного стану і аварійного стану. Якщо, наприклад, вони описуються нормальним законом розподілу, то для напрацювань до незадовільного стану густина розподілу:

$$f_u(t) = \frac{1}{\sigma_u\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(T_{avg1}-t)^2}{2\sigma_u^2}} \tag{5.31}$$

для напрацювань до аварійного стану:

$$f_e(t) = \frac{1}{\sigma_e\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(T_{avg2}-t)^2}{2\sigma_e^2}} \tag{5.32}$$

Враховуючи цілі запобігання відмовам, необхідно спочатку прийняти певне значення допустимої ймовірності виникнення відмови Q_{acc}. Визначення необхідної величини періодичності регламентного технічного обслуговування t_{reg} випливає з рівняння:

$$Q_{acc} = \int_0^{t_{reg}} f_e(t)dt \tag{5.33}$$

Для отриманого значення періодичності регламентного технічного обслуговування t_{reg} буде забезпечено визначене значення ймовірності досягнення незадовільного стану за рівнянням:

$$Q_u = \int_0^{t_{reg}} f_u(t)dt \tag{5.34}$$

Таким чином, для запобігання певному числу відмов необхідно встановити такий час виконання регламентного технічного обслуговування t_{reg}, який чітко визначить, в яких випадках з загального числа технічних обслуговувань вони будуть своєчасними, тобто буде досягнуто незадовільний стан. Однак це не завжди може бути задовільним, оскільки при невеликій досягнутій ймовірності незадовільних станів зростатимуть витрати, пов'язані з неповним використанням закладеного ресурсу. Це ілюструється на Рисунку 5.6, на якому зображені криві щільності $f_e(t)$ та $f_u(t)$. І величина періодичності регламентного технічного обслуговування, при якій забезпечується ймовірність відмови $Q_e = Q_{acc}$.

Також варто враховувати, що регулярне технічне обслуговування та моніторинг стану обладнання є важливими елементами для забезпечення надійності та продовження терміну служби суднових технічних засобів. Використання автоматизованих систем діагностики та прогнозування може допомогти виявити потенційні проблеми на ранніх стадіях та запобігти відмовам обладнання [123].

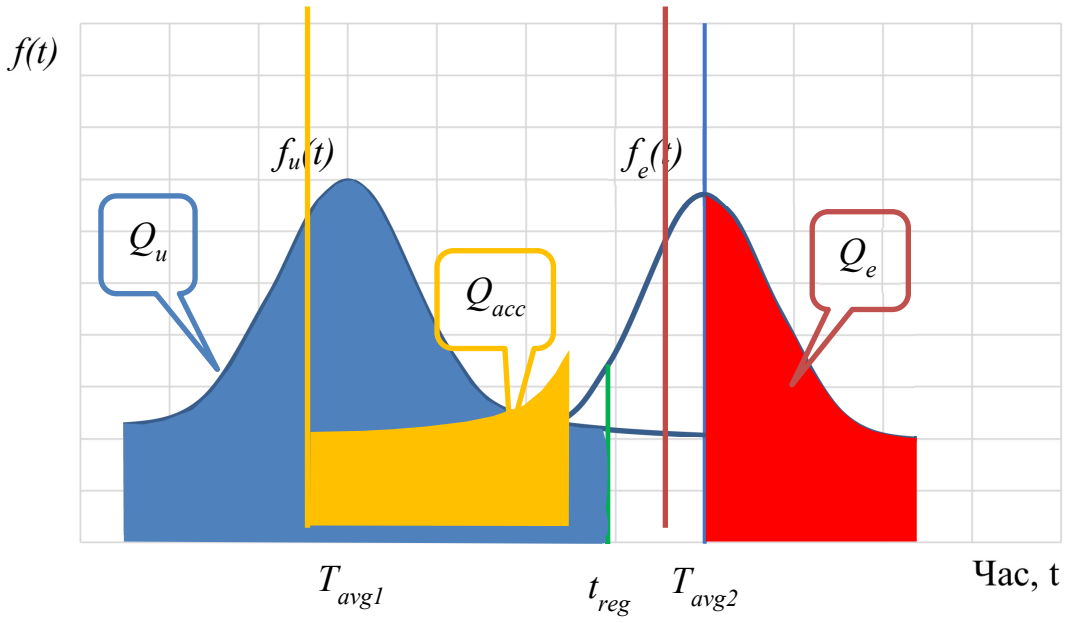


Рисунок 5.6 - Зв'язок між призначеним часом виконання ТО t_{reg} і ймовірністю досягнення при цьому незадовільного стану Q_u

Як відомо, інтегральні характеристики розподілу напрацювань до відмови, такі як повнота кривих щільності, залежать від статистичних параметрів цього розподілу. Коефіцієнт варіації фактичних значень напрацювань відносно середнього значення впливає на форму цих кривих, а середнє значення напрацювань визначає положення кривої відносно часової осі t. Отже, ефективність регламентованого методу обслуговування, який базується на одночасному вирішенні завдання профілактики відмови та максимального використання ресурсу, не завжди може бути гарантована.

Систематичний моніторинг технічного стану об'єкта дозволяє вчасно виявити перехід його в незадовільний стан і забезпечити своєчасне планове обслуговування. Це відрізняється від методу попереднього визначення термінів обслуговування на основі аналізу даних про напрацювання до відмови багатьох об'єктів, коли можливе як передчасне, так і запізнене технічне обслуговування.

Важливою особливістю є те, що найбільш повну інформацію про фактичний технічний стан об'єкта можна отримати під час його технічного обслуговування, після якого відбувається відновлення його стану, і процес зміни технічного стану повертається на початок (точка 0). Таким чином, обслуговуючий персонал має повну інформацію про технічний стан об'єкта на момент завершення попереднього технічного обслуговування та на момент виконання наступного технічного обслуговування. Інформація про проміжні стани, як правило, неповна або відсутня, або має опосередкований характер, що базується на даних проміжних оглядів, системи робочих параметрів і характеристик, а також діагностичних ознак.

Вказана особливість експлуатаційної інформації про технічний стан свідчить про те, що отримати фактичні залежності від часу для швидкості зміни технічного стану $\alpha(t)$, а також випадкової $\delta(\alpha)$ для закономірностей, відмінних від лінійних, практично неможливо.

Залежно від того, чи отримує обслуговуючий персонал інформацію про технічний стан між технічним обслуговуванням, використовуються дві основні стратегії призначення терміну виконання технічного обслуговування:

1. Рішення про виконання технічного обслуговування приймається в залежності від контрольованого стану.
2. Терміни технічного обслуговування призначаються заздалегідь за деякою середньою реалізацією неконтрольованого процесу між технічним обслуговуванням.

Ці дві стратегії забезпечуються застосуванням різних методів технічного обслуговування.

Таким чином, для підвищення ефективності технічного обслуговування вантажних суден необхідно розробити методику, яка би враховувала динаміку зміни технічного стану об’єкта і дозволяла проводити своєчасне обслуговування на основі актуальних даних про його стан. Одним з шляхів вирішення цієї проблеми є методологія, заснована на цифрових двійниках та прескриптивному обслуговуванні [429], що описана в Розділі 2.

5.3 Моделювання процесів нелінійної зміни технічного стану суднових технічних засобів

У контексті технічного обслуговування суднових технічних засобів вантажних суден, пріоритетним є застосування лінійної моделі, особливо у випадку регламентного технічного обслуговування, де інформація про технічний стан стає відомою лише після виконання обслуговування. Існування будь-якої іншої закономірності можна лише припускати. Проте, фактична зміна технічного стану може відрізнятися від лінійного закону, тому необхідно оцінювати вплив нелінійності. З метою дослідження цього питання було розглянуто два варіанти, (5.35) і (5.36), закономірності зміни технічного стану:

$$Y = \varepsilon t \tag{5.35}$$

$$Y = \varepsilon t^n \tag{5.36}$$

Дослідження проведено з метою вивчення впливу прийнятих закономірностей на процес технічного обслуговування суднових технічних засобів вантажних суден, з метою забезпечення об’єктивного порівняння були враховані такі важливі умови:

1. Значення параметра технічного стану нормовані відносно його аварійного значення, при цьому після проведення технічного обслуговування воно стає рівним нулю;

2. Час також унормовано відносно середнього напрацювання до відмови;

3. Коефіцієнти варіації для швидкості зміни технічного стануε є випадковою величиною, яка приймає значення в діапазоні від 0 до 1 і розподілена за певним законом (наприклад, нормальним або Вейбулла), при цьому варіація цього коефіцієнта задається значенням V_v;

4. Показник n є дійсним невипадковим числом;

5. Коефіцієнти варіації для швидкості зміни технічного стану ε для для лінійного і нелінійного законів у задачі порівняння повинні бути такими, щоб забезпечити однакові значення варіації для спостережуваних напрацювань до відмови, при рівних середніх напрацюваннях до відмови. Таким чином, обидва процеси починаються з точки $(t = 0, y = 0)$ і закінчуються при досягненні значення $y = 1$, якщо технічне обслуговування не виконується і середнє напрацювання дорівнює $T_{avg} = 1$ зі значенням варіації V_t.

На Рисунках 5.7 і 5.8 представлено поверхні, описані формулами (5.37) і (5.38), за допомогою яких буде забезпечено п’ять наведених вище умов для нелінійної моделі та закону розподілу Вейбулла для коефіцієнта ε. Як приклад, для отримання коефіцієнта варіації V_v для напрацювань до відмови, що дорівнює $V_t = 0.6$, і розподілі Вейбулла, швидкість зміни технічного стану ε повинна мати коефіцієнт варіації за лінійного закону $V_v = 0.359$ (при $n = 1.0$) за формулою (5.37) та за нелінійного $V_v = 0.173$ (при $n = 0.5$) за формулою (5.38).

Дослідження були проведені за показником ступеня n в діапазоні зміни його значень від 0.25 до 2. Цей діапазон прийнято з урахуванням досліджень [146, 388], де зазначається, що в період припрацювання n дорівнює від 0.45 до 0.75 і досягає значень 1.2 у період інтенсивного зносу.

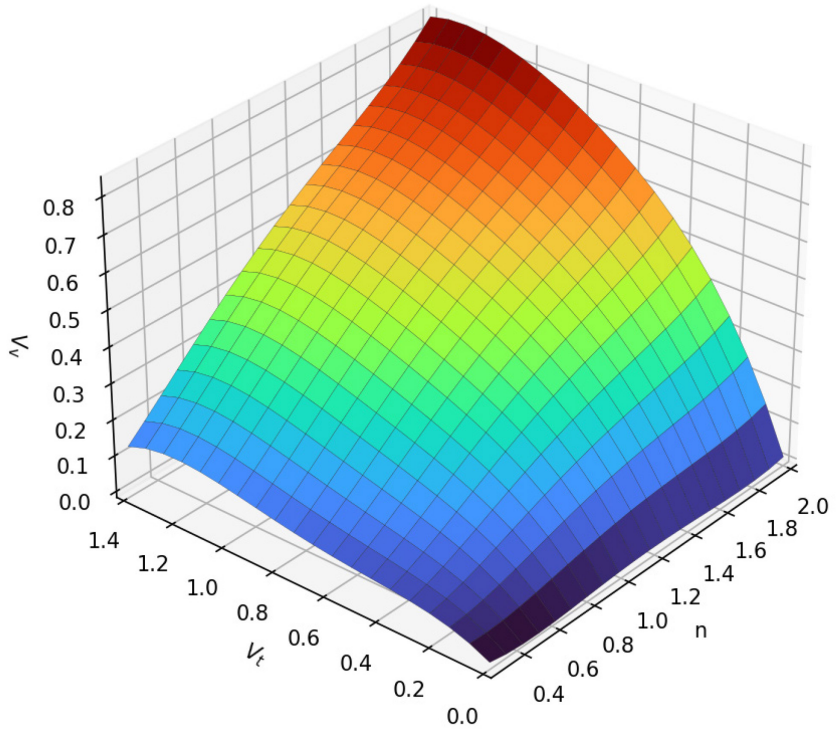


Рисунок 5.7 - Коефіцієнти зв'язку між коефіцієнтами варіації для напрацювань до відмови, визначених безпосередньо V_t за функцією зміни технічного стану V_v, що змінюється за законом $Y = \varepsilon t^n$ з розподілом Вейбулла для ε

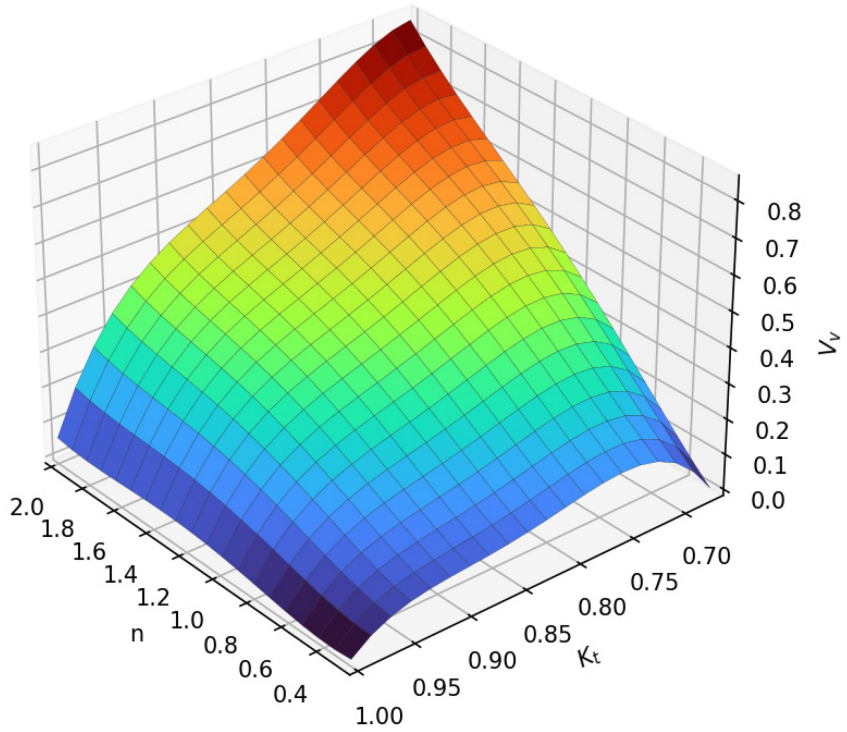


Рисунок 5.8 - Коефіцієнти зв'язку між середніми та медіанними напрацюваннями до відмови K_t та за функцією зміни технічного стану V_v, що змінюється за законом $Y = \varepsilon t^n$ із розподілом Вейбулла для ε

Рисунок 5.9 ілюструє отримані залежності тривалості циклу експлуатації, Рисунок 5.10 ілюструє залежність залишкового ресурсу, а Рисунок 5.11 ілюструє залежність елементарної функції витрат на змінно-запасні частини для крайніх значень показника нелінійності $n = 0.5$.

За результатами проведених досліджень, встановлено, що вплив нелінійності на тривалість циклу за одних і тих самих профілактичних властивостей системи (P_{pre}), що досягаються, є вельми незначним і за $n = 0.5$ та коефіцієнтів варіації для напрацювань до відмови $V_t < 0.7$ не перевищує $3.5 - 6$ % і лише за $V_t = 1.0$ досягає значень $11 - 16$ %. Виходячи зі структури виразу для визначення тривалості циклу експлуатації, малий вплив нелінійності можна пояснити через малу відмінність величин спостережуваних напрацювань до відмови за однакової ймовірності попередження відмов. Більш істотний вплив спостерігається на величині залишкового ресурсу і, відповідно, на величині питомих витрат на змінно-запасні частини (Рисунок 5.11).

$$
\begin{aligned}
V_v = {} & 0{,}060900119 - 0{,}368050929 * n + 0{,}121798700 \cdot V_t + \\
& + 0{,}626749910 \cdot n^2 + 1{,}193311999 \cdot n \cdot V_t - 0{,}739394205 \cdot V_t^2 - \\
& - 0{,}404056859 \cdot n^3 - 0{,}248792728 \cdot n^2 \cdot V_t - 0{,}727603518 \cdot n \cdot V_t^2 + \\
& + 0{,}993675764 \cdot V_t^3 + 0{,}088019942 \cdot n^4 + 0{,}043984999 \cdot n^3 \cdot V_t + \\
& + 0{,}050282336 \cdot n^2 \cdot V_t^2 + 0{,}160721461 \cdot n \cdot V_t^3 - 0{,}385922421 \cdot V_t^4
\end{aligned}
\tag{5.37}
$$

$$
\begin{aligned}
V_v = {} & -140{,}283883939 + 16{,}044869023 * n + 659{,}317198286 \cdot K_t + \\
& + 1{,}005549672 \cdot n^2 - 57{,}631937756 \cdot n \cdot K_t - 1156{,}605832190 \cdot K_t^2 - \\
& - 0{,}317968737 \cdot n^3 - 1{,}505070356 \cdot n^2 \cdot K_t + 70{,}368569766 \cdot n \cdot K_t^2 + \\
& + 898{,}353196296 \cdot K_t^3 + 0{,}095198128 \cdot n^4 - 0{,}124996589 \cdot n^3 \cdot K_t + \\
& + 1{,}175464456 \cdot n^2 \cdot K_t^2 - 29{,}120003111 \cdot n \cdot K_t^3 - 260{,}729639781 \cdot \\
& \cdot K_t^4
\end{aligned}
\tag{5.38}
$$

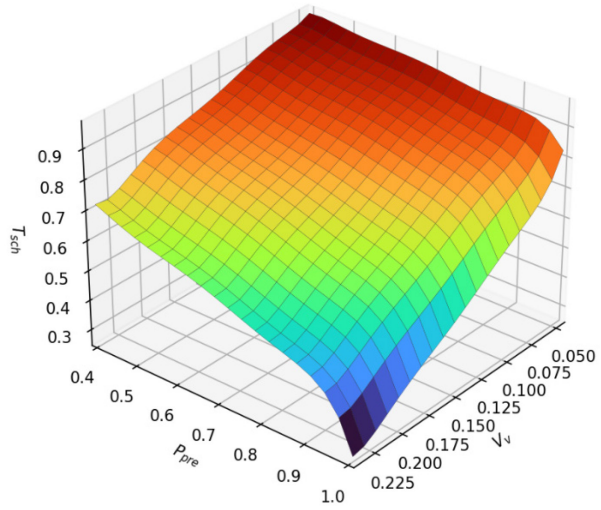


Рисунок 5.9 - Залежності тривалості циклу експлуатації від ймовірності попередження відмов P_{pre} регламентним технічним обслуговуванням для нелінійного закону зміни технічного стану $Y = \varepsilon t^n$, де $n = 0.5$ і закону Вейбулла для розподілу значень коефіцієнта ε

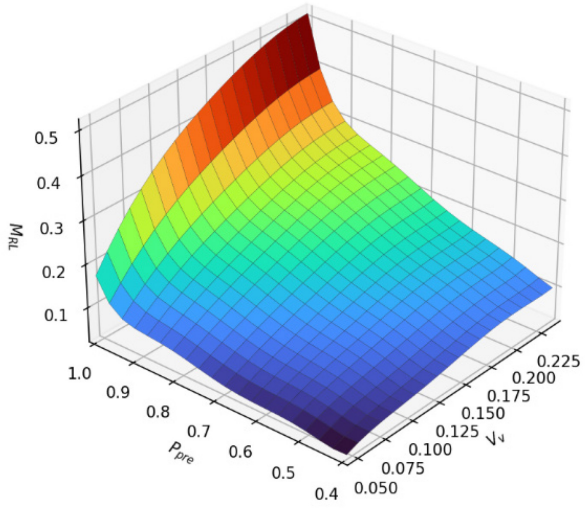


Рисунок 5.10 - Залежності залишкового ресурсу від ймовірності попередження відмов P_{pre} регламентним технічним обслуговуванням для нелінійного закону зміни технічного стану $Y = \varepsilon t^n$, де $n = 0.5$ і закону Вейбулла для розподілу значень коефіцієнта ε

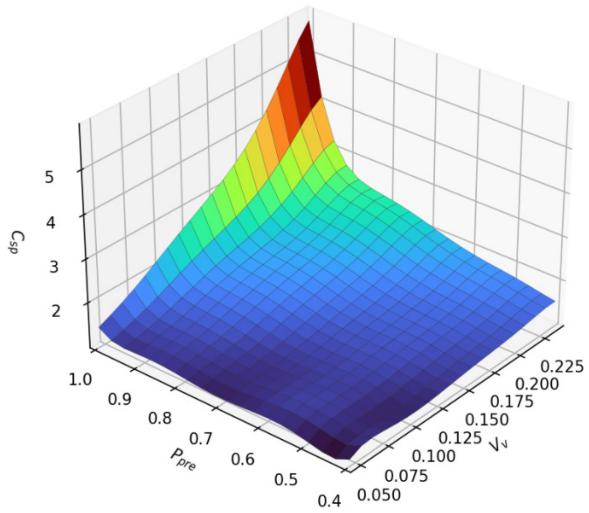


Рисунок 5.11 - Залежності питомих витрат на змінно-запасні частини C_{sp} від ймовірності попередження відмов P_{pre} регламентним технічним обслуговуванням для нелінійного закону зміни технічного стану $Y = \varepsilon t^n$, де $n = 0.5$ і закону Вейбулла для розподілу значень коефіцієнта ε

Порівнюючи результати розрахунку однакового середнього напрацювання до відмови та однакових коефіцієнтів варіації для напрацювань до відмови за лінійною та нелінійною моделями, доходимо висновку, що результати моделювання лінійної моделі можуть бути використані для порівняльних досліджень, за умови, що витрати на змінно-запасні частини не враховуються. Крім того, ці результати також можуть бути використані для аналізу витрат на змінно-запасні частини, якщо деталі замінюються за призначеним ресурсом.

Особливу увагу привертає істотний вплив варіації швидкості зміни технічного стану на витрати на змінно-запасні частини, що призводить до багаторазових змін витрат. Варто відзначити, що причини таких різниць у швидкості зміни не обмежуються лише експлуатаційними факторами, а також пов’язані з якістю виготовлення деталей. Іншими словами, можна припустити, що мінімальні питомі витрати на змінно-запасні частини можна досягти для деталей, які мають невеликі швидкості зношування та більшу стабільність властивостей, в той час як протилежні характеристики можуть призводити до збільшення витрат.

5.4 Моделювання процесів технічного обслуговування суднових технічних засобів методом статистичних випробувань

Для вирішення питання вибору методу технічного обслуговування, а також призначення його параметрів, необхідно мати не лише знання про закономірності зміни та прогнозування технічного стану, але й врахувати логіку обмежень, які випливають з використовуваного методу технічного обслуговування або їх комбінації. Для вирішення цієї задачі з мінімальною кількістю припущень може бути застосований метод статистичних випробувань, який імітує безліч експлуатаційних ситуацій, з якими зіштовхується судновий механік. Зокрема, за час експлуатації судна виконується обмежена кількість технічного обслуговування, і кожен окремий механік має справу з обмеженою кількістю випадків зміни технічного стану (у статистичному сенсі). Суть цього методу полягає в багаторазовому розв’язанні рівняння (5.25) шляхом генерування випадкової компоненти в (5.26).

Однак, щодо обмежень на застосування конкретних залежностей, вони відсутні, за винятком вимоги безперервності. Основною проблемою є знаходження конкретних закономірностей зміни технічного стану, включаючи випадкову компоненту (5.26).

У процесі моделювання технічного обслуговування суднових технічних засобів вантажних суден необхідно враховувати не лише зміну технічного стану, але й дії, які здійснює судновий механік залежно від відповідних параметрів. Дії механіка можуть переривати процес зміни технічного стану, не впливати на нього або коригувати його на визначені моменти контролю.

Очевидно, що контрольні операції під час моделювання, з одного боку, мають якимось чином враховувати факт виявлення відповідного стану, а з іншого - не впливати на закономірність зміни технічного стану. Привертає до себе увагу особливість дисперсії напрацювань до певного стану, контрольованого та неконтрольованого процесів зміни технічного стану, яка зумовлена дисперсією швидкості зміни технічного стану. Можна припустити, що чим частіше здійснюватиметься контроль, тим менша дисперсія можливих станів буде спостерігатися в момент наступного контролю відносно прогнозованого стану, а також за відповідних станів менший діапазон напрацювань до наступного стану. Цей аспект ілюструється на Рисунку 5.12.

Врахування факту виявлення технічного стану в момент контролю, одночасно зберігаючи закономірність зміни технічного стану, найбільш ефективно реалізується за допомогою моделі, що базується на виразі (5.25) та передбаченій закономірності для швидкості зміни технічного стану (5.26), включаючи випадкову компоненту.

Принциповою основою моделі може бути алгоритм, який зображений на Рисунку 5.13. Після обчислення статистики для різних результатів реалізацій проводяться розрахунки показників технічного обслуговування. Кількість різних результатів реалізацій не є обмеженою, але для отримання достовірних результатів, таких як третій знак після коми, необхідно мати не менше 10^3 випадків реалізацій. На Рисунку 5.13 представлений алгоритм моделювання технічного обслуговування об’єкта в системі технічного обслуговування вантажних суден. Цей алгоритм розроблений з метою ефективного врахування параметрів технічного стану та

забезпечення безперебійної зміни цього стану. Він слугує основою для створення інформаційної моделі, яка дозволяє враховувати зміни технічного стану і проводити контрольні операції на підставі отриманих результатів.

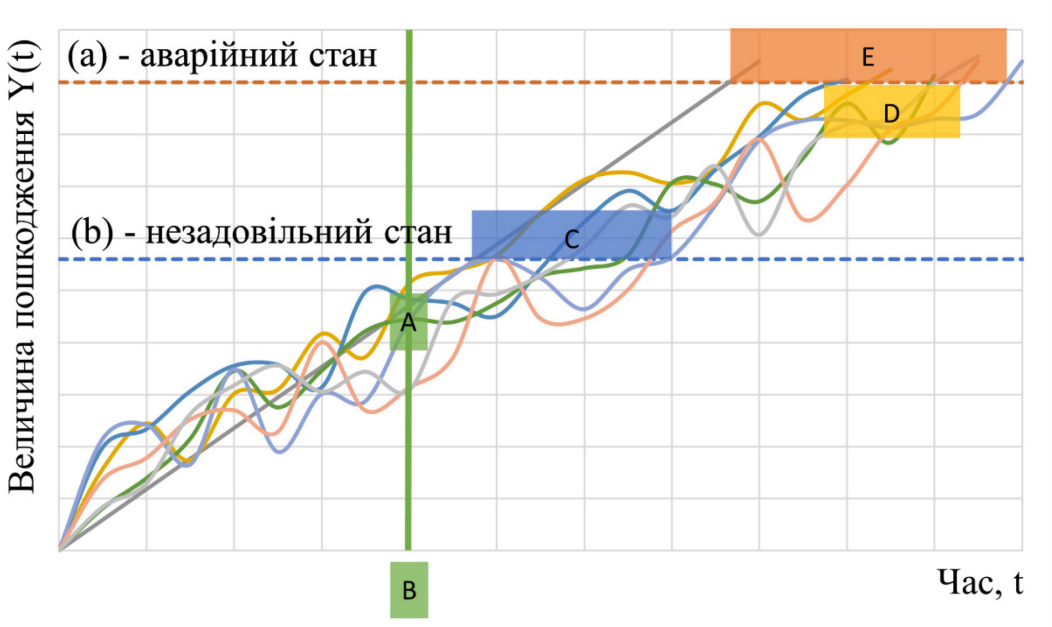


Рисунок 5.12 - Ілюстрація можливих реалізацій процесу зміни стану
A – технічний стан на момент контролю; B – момент контролю технічного стану; C – діапазон варіації напрацювань до незадовільного технічного стану за відсутності проміжного контролю; D – діапазон варіації напрацювань до аварійного технічного стану за наявності проміжного контролю; E – діапазон варіації напрацювань до аварійного технічного стану за відсутності проміжного контролю

Алгоритм передбачає послідовність дій, які включають аналіз статистики за різними випадками реалізацій, проведення розрахунків показників технічного обслуговування та забезпечення необхідної кількості випадків реалізацій для отримання достовірних результатів. Цей алгоритм виступає важливою складовою частиною процесу моделювання та обробки інформації в системі технічного обслуговування суднових технічних засобів вантажних суден.

Його застосування сприяє ефективному врахуванню фактів виявлення технічного стану та забезпеченню безперебійності процесу зміни технічного стану. Отже, Рисунок 5.13 демонструє важливу компоненту інформаційної моделі, яка

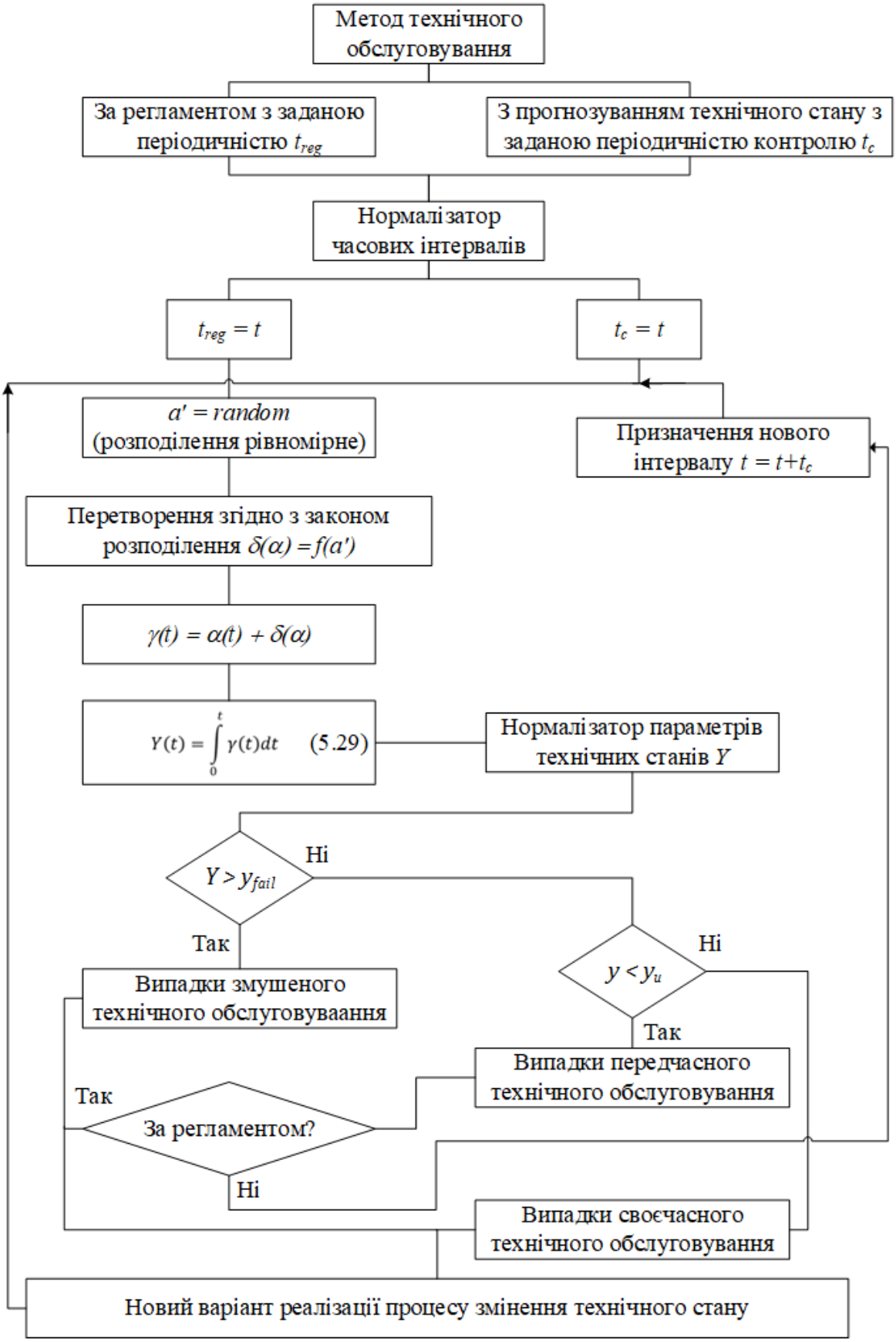


Рисунок 5.13 - Алгоритм моделювання технічного обслуговування об’єкта в системі технічного обслуговування

використовується для моделювання технічного обслуговування об’єкта в системі технічного обслуговування вантажних суден.

Основна перевага запропонованого алгоритму, представленого на Рисунку 5.13, і його відмінність від існуючих алгоритмів моделювання технічного обслуговування полягають у використанні нормованих величин у процесі його реалізації та можливості поширення отриманих результатів на інші об’єкти технічного обслуговування, зокрема суднові технічні засоби.

Алгоритм забезпечує ефективну обробку і аналіз інформації, використовуючи стандартизовані показники технічного стану та параметри обслуговування. Це дозволяє здійснювати порівняльний аналіз між різними об’єктами технічного обслуговування і встановлювати загальні закономірності.

Особливість цього алгоритму полягає в його універсальності, що дозволяє застосовувати його не тільки до конкретного об’єкта технічного обслуговування, а й розповсюджувати його на інші суднові технічні засоби з використанням нормованих величин.

Такий підхід сприяє зменшенню неоднорідності процесу технічного обслуговування і підвищенню ефективності управління цим процесом. Дотримання стандартів і уніфікація величин сприяють забезпеченню точності та об’єктивності отриманих результатів.

Таким чином, алгоритм, представлений на Рисунку 5.13, відображає прогресивний підхід до моделювання технічного обслуговування суднових технічних засобів вантажних суден, зокрема шляхом використання нормованих величин і можливості поширення результатів на інші об’єкти технічного обслуговування.

5.5 Моделювання процесів оцінювання ефективності переходу на КПТОВС

Особливості моделювання процесів оцінювання ефективності переходу на КПТОВС викладено у Додатку М25.

Розраховуючи питомі витрати на технічну експлуатацію об’єкта і функції витрат, які залежать від тривалості циклу експлуатації, доцільно використовувати множник R_{res} - залишковий ресурс до відмови у випадку невиконання технічного обслуговування даного типу. Величина цього множника визначається мінімальним

ресурсом будь-яких деталей, які підлягають заміні під час технічного обслуговування, або ресурсом, необхідним для виконання профілактичних робіт, наприклад, очищення, огляду з метою виявлення. Таким чином, залишковий ресурс деталі, яка підлягає заміні під час даного технічного обслуговування, може бути виражений наступним чином:

$$R_{i\,res} = R_{res} \cdot n_i \tag{5.39}$$

У випадку, коли деталі замінюються після кількох операцій технічного обслуговування, які зазвичай включають найбільш дорогі деталі, формула буде мати наступний вигляд:

$$R_{ti} = 1 + R_{res} \cdot P_{i\,pre}(n_i) \tag{5.40}$$

Кратністю залишкового ресурсу замінюваної деталі до залишкового ресурсу до технічного обслуговування (або відмови) можна обчислити за наступною формулою:

$$n_i = \frac{R_{i\,res}}{R_{res}} \tag{5.41}$$

Дослідження тривалості циклу експлуатації вказує на те, що зі зростанням ймовірності запобігання відмовам тривалість циклу зменшується, а особливо при значеннях ймовірності, що перевищують 0.9, вона швидко спадає. Важливо зазначити, що швидкість зниження тривалості циклу залежить від рівня розкиду в швидкості зміни технічного стану. Це свідчить про те, що для об’єктів з низьким рівнем розкиду можливої швидкості зміни технічного стану існує певна ймовірність запобігання відмовам, а отже, існує оптимальна періодичність регламентного технічного обслуговування, при якій подальше збільшення частоти обслуговування призводить до катастрофічного зростання витрат на відновлення технічного стану.

У процесі моделювання та оптимізації процесів технічного обслуговування суднових технічних засобів вантажних суден, можна визначити оптимальні параметри системи технічного обслуговування, які забезпечують мінімальні питомі витрати. Оптимізація впливає на систему через ймовірність попередження відмов системою технічного обслуговування, а також залежить від наслідків відмов за допомогою коефіцієнта (K). Крім того, важливим фактором є закон розподілу швидкостей зміни технічного стану, а також коефіцієнт варіації для швидкості (V).

Ці параметри впливають на швидкість зміни технічного стану обладнання та варіацію цього процесу. Розглядання цих факторів допомагає визначити оптимальну стратегію технічного обслуговування, що сприяє зниженню витрат та підвищенню ефективності процесу експлуатації суднових технічних засобів.

У зв'язку зі збільшенням можливого розкиду швидкості зміни технічного стану (V) , спостерігається зсув оптимальної точки в напрямку менших значень ймовірності запобігання відмовам. У той же час, цей оптимум стає менш вираженим. Навпаки, зменшення коефіцієнта варіації приводить до зміщення оптимальної точки в бік більших значень ймовірності запобігання відмовам. Таке зміщення оптимальної точки супроводжується значнішим зменшенням витрат порівняно з неоптимальними значеннями.

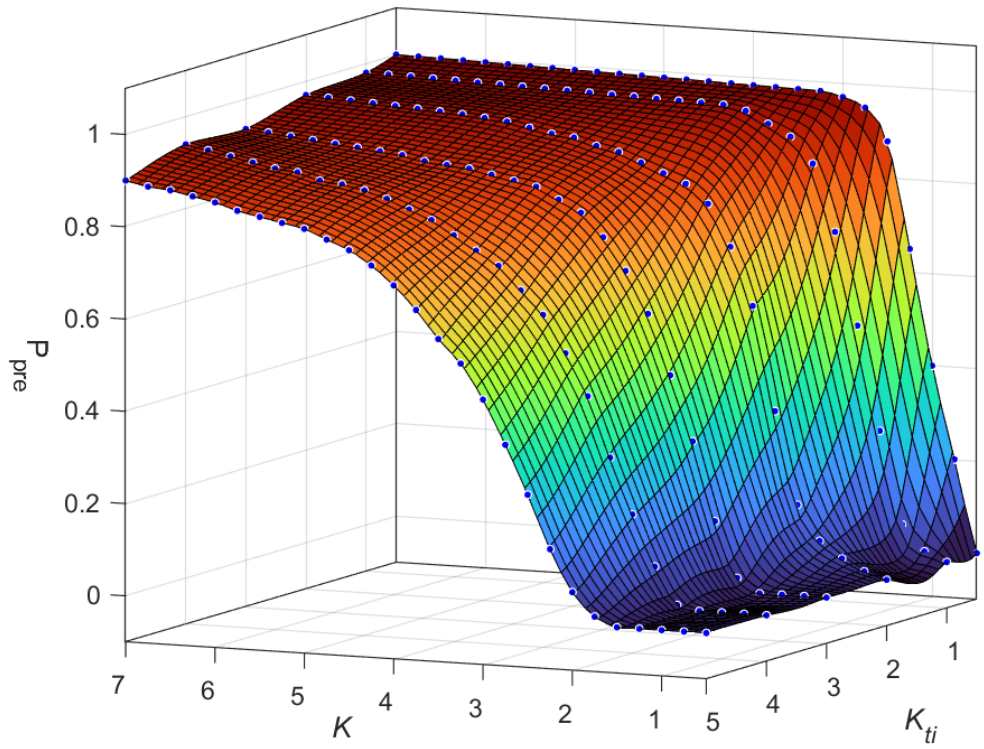


Рисунок 5.14 – Залежності ймовірності попередження відмов системою регламентного технічного обслуговування в контексті логнормального закону розподілу швидкості зміни технічного стану та при фіксованому значенні коефіцієнта варіації $(V = 0.5)$

Цей факт вказує на важливість контролю за розкидом швидкості зміни технічного стану під час розробки стратегій технічного обслуговування суднових

технічних засобів. Використання оптимальних значень коефіцієнта варіації сприятиме досягненню кращих результатів у зменшенні витрат та підвищенні надійності експлуатації суднових технічних засобів.

Це висновок здійснений на основі аналізу процесу технічного обслуговування суднових технічних засобів вантажних суден. Він підкреслює, що вартість запасних частин є одним із факторів, який впливає на ефективність системи технічного обслуговування. Необхідно збалансувати витрати на запасні частини та безпеку, враховуючи ймовірність відмов. У таких випадках, використання прогнозування технічного стану стає ключовим фактором для досягнення оптимального рішення.

Відомо, що впровадження комплексного технічного обслуговування з прогнозуванням стану є ефективним методом зниження витрат на технічне обслуговування та ремонт, а також зменшення аварійності суднових технічних засобів у вантажних суднах. Дослідження, що присвячені проблемі впровадження комплексного технічного обслуговування з прогнозуванням стану, містять оцінки можливого скорочення витрат на технічне обслуговування на рівні 25 % [78, 119, 181, 356]. Однак ці оцінки, які повторюються в різних джерелах, не підтверджуються теоретичними обґрунтуваннями і зазвичай є експертними думками.

Варто зазначити, що перехід від регламентного технічного обслуговування до комплексного технічного обслуговування з прогнозуванням стану вимагає інвестиційних витрат на придбання необхідного обладнання, розробку інструкцій для визначення технічного стану та перехід до електронного документообігу. Зрозуміло, що ці заходи є дорогими, і в деяких випадках вони можуть бути значними. В таких ситуаціях суперінтендант судноплавної компанії повинен вирішити, на що краще витратити гроші: на придбання обладнання для контролю технічного стану або на виконання робіт та запасні частини. Прийняття такого рішення може ґрунтуватися на інтуїтивних міркуваннях (що часто відбувається), або на основі більш об’єктивного розрахунку.

Давайте розглянемо підхід до оцінки результатів переходу на комплексне технічне обслуговування з прогнозуванням стану, який базується на фактичних даних про закономірності зміни технічного стану.

Завдання сформулюється таким чином. Є судновий технічний засіб, про який відомі:

- Параметри, що характеризують технічний стан засобу
- Середнє напрацювання до відмови засобу
- Середня швидкість зміни технічного стану на основі експлуатаційних даних
- Коефіцієнт варіації для швидкості зміни технічного стану
- Трудомісткість планового технічного обслуговування (H_{sch})
- Трудомісткість непланового технічного обслуговування (H_{usch})
- Трудомісткість однієї контрольної операції (H_{co})
- Середня оплата за 1 робочу годину члена екіпажу (q), що встановлена в Компанії
- Вартість обладнання (Q), яке необхідно придбати для реалізації комплексного технічного обслуговування з прогнозуванням стану
- Відношення вартості деталей, які замінюються під час технічного обслуговування, до вартості самого технічного обслуговування (z).

Умовне припущення, що використовується в цій задачі, полягає в тому, що збільшення витрат на непланове технічне обслуговування пов'язане виключно зі збільшенням його трудомісткості [119].

Процедура переходу на комплексне технічне обслуговування з прогнозуванням стану суднових технічних засобів у вантажних суднах визнана новою та недостатньо формалізованою. Цей підхід має потенціал для досягнення основного ефекту шляхом збільшення періодичності технічного обслуговування на рівні від 50 % до 65 %, що в свою чергу означає подовження фактичного експлуатаційного циклу. Проте, варто відзначити, що нормативні документи наразі не встановлюють чітку процедуру переходу на комплексне технічне обслуговування з прогнозуванням стану. Це обмеження обумовлено тим, що виконання технічного обслуговування з відставанням більш як на 50 % від попереднього регламентованого терміну не допускається. З цим обмеженням продовжуватиме діяти регламентне технічне обслуговування з більшою періодичністю, досягнутою завдяки виконанню

приладового контролю між запланованими технічними обслуговуваннями. Однак частина обсягу технічного обслуговування може бути виконана на основі прогнозування стану засобів.

Нехай H означає трудомісткість планово-попереджувального технічного обслуговування і контролю (за n контрольних операцій) протягом циклу експлуатації з відомою ймовірністю попередження відмов (P_{pre}):

$$H = H_{sch}P_{pre} + \left(1 - P_{pre}\right)H_{usch} + nH_{co} \tag{5.42}$$

Визначення величини ймовірності попередження відмов може бути здійснене шляхом побудови кривих, які отримані в результаті моделювання процесу технічного обслуговування. Для побудови цих кривих використовуються вихідні дані, що стосуються процесів зміни технічного стану. Так само, витрати за цикл можуть бути визначені за аналогічними методами.

Наслідки відмов, вимірювані у трудомісткості технічного обслуговування, можуть бути оцінені за допомогою коефіцієнта збільшення трудомісткості, що виникає внаслідок відмови:

$$K_{il} = \frac{H_{usch}}{H_{sch}} \tag{5.43}$$

Враховуючи припущення, що збільшення витрат на непланове технічне обслуговування пов’язане лише зі збільшенням його трудомісткості, коефіцієнт K_{il} залишається однаковим як для трудомісткості, так і для відношення витрат. З цим уявленням, ми маємо таку залежність:

$$S = qH_{usch}\left(P_{pre}(1 - K_{il}) + K_{il}\right) \tag{5.44}$$

Даний вираз може бути використаний для аналізу витрат, пов’язаних з виконанням технічного обслуговування суднових технічних засобів у вантажних суднах. У випадках, коли заміна деталей відбувається до досягнення призначеного ресурсу (якщо передбачена така принципова стратегія заміни - профілактична заміна), або до настання відмови в інших випадках, втрачається незворотна частина їхньої вартості:

$$S_m = C + S_M = C(2 - M) = C(1 + M_{RL}) \tag{5.45}$$

Витрати на технічне обслуговування суднових технічних засобів вантажних суден можуть бути представлені як сума двох функцій. Перша функція, зазначена раніше, не залежить від тривалості циклу експлуатації (5.44). Друга функція відображає витрати на змінно-запасні частини, які залежать від величини використаного ресурсу. У реальних умовах ці витрати складаються з суми витрат на всю номенклатуру змінно-запасних частин.

З огляду на наведені міркування для аналізу витрат за цикл експлуатації скористаємося виразом:

$$W = qH_{sch}\left(P_{pre}(1-K_{il}) + K_{il}\frac{C(1+M_{RL})}{qH_{sch}}\right) \tag{5.46}$$

Якщо врахувати, що тривалість експлуатаційного циклу становить:

$$T_{sch} = (\Delta T_{sch})P_{pre} + T_{avg}\left(1-P_{pre}\right) \tag{5.47}$$

де ΔT_{sch} - періодичність регламентного технічного обслуговування; T_{avg} - середнє напрацювання до відмови, спостережуване під час реалізації регламентного технічного обслуговування з прийнятими параметрами. Тривалістю планового і непланового технічного обслуговування нехтуємо.

Для визначення питомих витрат як суми витрат на оплату праці $w_h(t)$ і придбання запасних частин $w_m(t)$, необхідно:

$$w(t) = w_h(t) + w_m(t) = \frac{P_{pre}(1-K_{il}) + K_{il}\frac{C(1+M_{RL})}{qH_{sch}}}{T_{MC}} \tag{5.48}$$

де T_{MC} – тривалість циклу експлуатації (5.16).

Вочевидь, для порівняння ефективності застосування комплексного технічного обслуговування з прогнозуванням стану і технічного обслуговування за регламентом необхідно сформулювати завдання у одному з двох варіантів:

1. Ефективність попередження відмов за обома методами вважається однаковою; перевага полягає в збільшенні тривалості циклу експлуатації при застосуванні комплексного технічного обслуговування з прогнозуванням стану суднових технічних засобів вантажних суден.

2. У випадку, коли тривалість циклу експлуатації однакова для обох методів, перевага досягається шляхом зменшення витрат на непланове технічне обслуговування суднових технічних засобів вантажних суден.

Якщо розглядати як базу для порівняння методів їхні однакові профілактичні властивості (однакова P_{pre}), то витрати на виконання технічного обслуговування, без урахування витрат на змінно-запасні частини, визначатимуться множником T_{MC}^{-1}. На Рисунках 5.15, 5.16, 5.17 наведено залежності величини T_{MC}^{-1} від ймовірності попередження відмов P_{pre}. У цьому випадку розглянуто варіант з коефіцієнтом варіації для швидкості зміни технічного стану $V_v = 0.4$, з розподілом за законом Вейбулла. Технічне обслуговування за регламентом (Рисунок 5.15). Технічне обслуговування за станом (Рисунок 5.16) розглянуто у варіантах параметра незадовільного стану (a), відповідно, що дорівнює $0.7, 0.8, 0.9$. Для комплексного методу (Рисунок 5.17) на графіку представлено криві T_{MC}^{-1} з різною кількістю контрольних операцій між технічними обслуговуваннями ($2, 4, 8$) за параметра незадовільного стану $(a = 0.9)$.

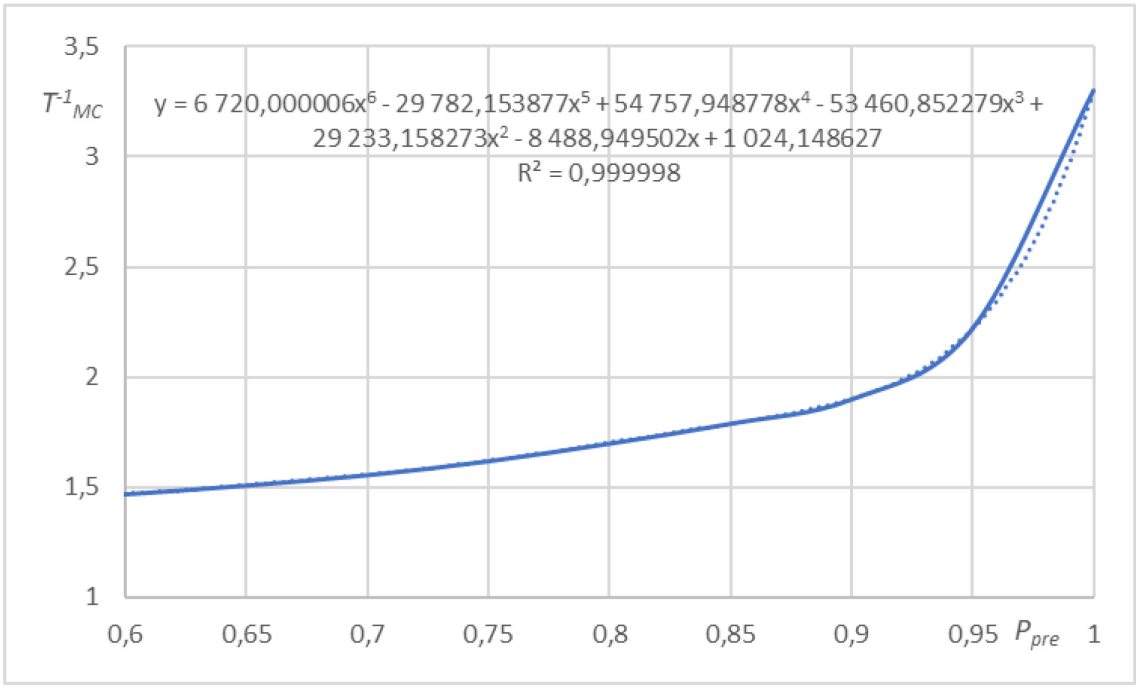


Рисунок 5.15 - Параметр T_{MC}^{-1} визначає питомі витрати на технічне обслуговування для регламентного методу технічного обслуговування

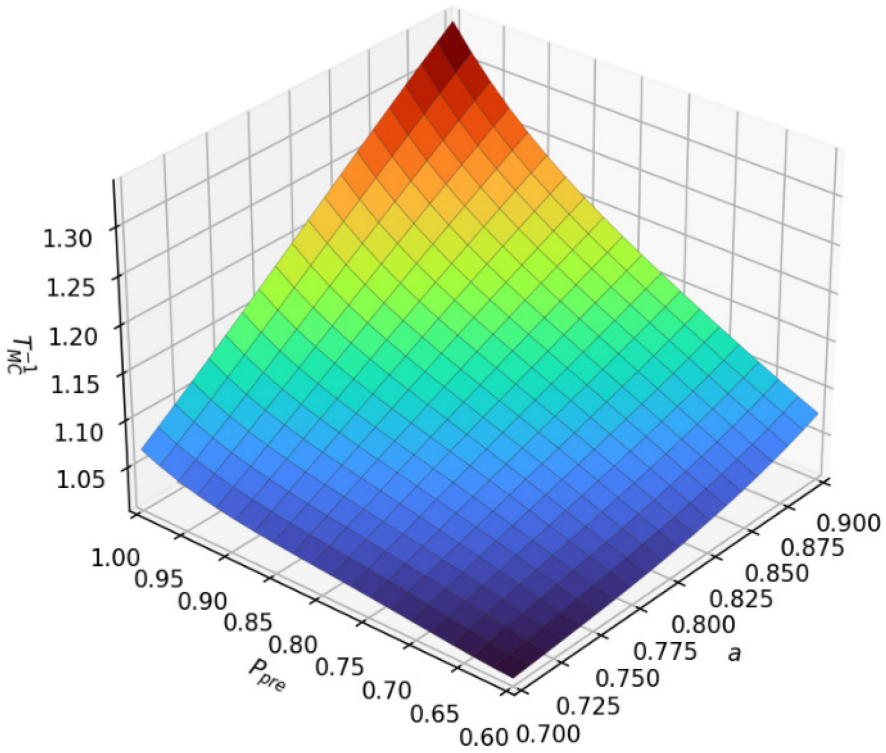


Рисунок 5.16 - Параметр T_{MC}^{-1} визначає питомі витрати на ТО для методу ТО з прогнозуванням технічного стану ($V_v = 0.4$)

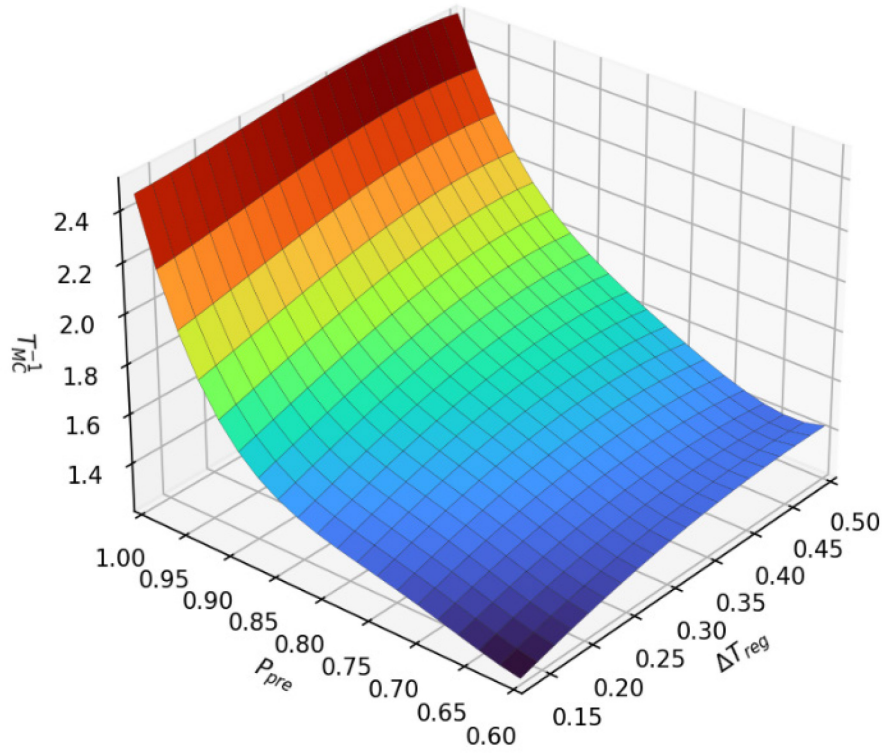


Рисунок 5.17 - Параметр T_{MC}^{-1} визначає питомі витрати на ТО для комплексного методу ТО ($V_v = 0.4$)

При порівнянні регламентного методу технічного обслуговування і комплексного технічного обслуговування з прогнозуванням стану суднових технічних засобів вантажних суден, якщо знайти величину $w(t)$ для регламентного методу і величину витрат у разі застосування комплексного технічного обслуговування з прогнозом стану $w(t)^*$, за їхньою різницею можна прийняти рішення щодо економічної доцільності придбання нового контролюючого обладнання за певною ціною.

Для варіантів, коли відоме напрацювання суднового технічного засобу на рік (c), то річний ефект становитиме:

$$E = (w(t) - w(t)^*) \cdot c \cdot q \cdot H_{sch} \tag{5.49}$$

Якщо вартість обладнання (Q) і купується воно ймовірно на (Y) років, то обґрунтуванням його придбання має бути умова:

$$E > \frac{Q}{Y} \tag{5.50}$$

У разі якщо обладнання універсального застосування, тобто може застосовуватися для кількох (N) суднових технічних засобів, то умова в першому наближенні має м'якший вигляд:

$$\sum_{i=1}^{N} E_i > \frac{Q}{Y} \tag{5.51}$$

Поява знаку суми у формулі (5.51) випливає з різних вихідних даних для суднових технічних засобів, зокрема: швидкості зміни технічного стану, трудомісткості технічного обслуговування, наслідків відмов тощо.

Науковий підхід до обґрунтування вартості обладнання для технічного обслуговування суднових технічних засобів базується на дослідженнях та фактичних даних. При визначенні вартості обладнання для комплексного технічного обслуговування з прогнозом технічного стану, можна враховувати такі факти:

1. Аналіз попередніх випадків застосування комплексного технічного обслуговування з прогнозуванням технічного стану показує, що такий підхід сприяє

покращенню ефективності обслуговування та зниженню витрат на непланове технічне обслуговування.

2. Наукові дослідження в галузі технічного обслуговування суднових технічних засобів підтверджують, що використання аналізатора спектру вібрації може забезпечити контроль технічного стану різних компонентів, таких як підшипники, електродвигуни та вентилятори.

3. Розрахунки вартості обладнання залежать від розмірів та складності об'єкта технічного обслуговування. Вартість комплекту підшипників насоса, вентилятора та електродвигуна може бути установлена на основі витрат на їх виробництво та постачання.

4. Дослідження впливу регулярності технічного обслуговування на ймовірність попередження відмов показують, що збільшення періодичності обслуговування сприяє покращенню своєчасності виявлення можливих проблем і зменшенню ризику виникнення відмов.

5.6 Моделювання процесу оцінювання економічної ефективності прийнятих рішень під час управління системою технічного обслуговування вантажних суден

На думку деяких фахівців з експлуатації транспорту, автоматизація процесів експлуатації веде до зменшення кількості бортового і берегового перевірочного устаткування, обсягу систем, які перевіряються, чисельності обслуговуючого персоналу, зниженню вимог до рівня його підготовки і, отже, до зменшення витрат. Це не зовсім вірно, тому що виграючи у вартості, можна суттєво програти в працездатності вантажного судна. В [360] показано, що на вартість експлуатації (C_{op}) великий вплив мають параметри вектору (X) експлуатаційних характеристик (які представлені у Таблиці Л.1).

Поліпшення окремих параметрів $(q_{14} - q_{21})$ вимагає великих витрат на розробку і виробництво і менших на технічне обслуговування - і навпаки. При цьому зміна різних параметрів вектору (X), як було показано вище, порізному впливає на готовність вантажного судна до технічного використання за призначенням.

Підвищення готовності можливе за рахунок підвищення надійності (параметри $q_{14} - q_{21}$), ймовірність контролю (q_{24}, q_{25}), поліпшення технологічності проведення технічного обслуговування (q_{26}, q_{27}, q_{28}), збільшення обсягу автоматизованого контролю (q_{27}, q_{29}, q_{35}), поліпшення підготовки обслуговуючого персоналу (q_{22}, q_{23}) і ряду інших параметрів. Але питома вага цих параметрів в підвищенні готовності вантажних суден неоднакова, як неоднакові і витрати на здійснення цих заходів. Це і викликає необхідність рішення задач оптимізації.

Застосування результатів отриманих в [119] і розроблених алгоритмів оптимізації вимагають знання залежності витрат або у постановці задач (2.4) - (2.10) прибутків від параметрів вектору (X), які отримуються як при перебуванні технічних засобів і конструкцій вантажного судна в якому-небудь стані (c_{ii}), так і при здійсненні переходів (c_{ij}). Зручно розглядати в (c_{ii}) тільки прибутки, принесені технічними засобами і конструкціями вантажного судна, як амортизацію вкладених в них коштів при розробці і виробництві, а в (c_{ij}) – всі витрати, необхідні для проведення різних видів технічного обслуговування.

В такій постановці всі діагональні елементи (c_{ii}) матриці (C) можна виразити як:

$$c_{ii} = \begin{cases} \dfrac{C_p}{P_w}, & \forall i \in S^{pros} \\ -\dfrac{C_p}{P_w}, & \forall i \notin S^{pros} \end{cases} \qquad (5.52)$$

де C_p – витрати на розробку та виробництво технічних засобів і конструкцій вантажних суден; P_w – гарантійний термін експлуатації; S^{pros} – множина станів готовності до технічного використання.

Прибуток (c_{ii}) буде позитивним в станах множини S^{pros}, для інших же станів він буде негативним.

Проведений аналіз залежностей [360] показав, що всі складові витрат на експлуатацію технічних засобів і конструкцій вантажних суден можна виразити через витрати на їхню розробку і виробництво. При цьому експлуатаційні витрати складають від 30 до 40 % витрат на розробку і виробництво:

$$C_m = (0.3 \div 0.4)C_p.$$

Поліпшення характеристик надійності технічних засобів і конструкцій вантажних суден приводить, з одного боку, до збільшення вартості (C_p) розробки і виробництва, а з іншого боку – до зменшення експлуатаційних витрат (C_m). Залежність витрат (C_p) і (C_m) від рівня надійності можна представити як:

$$C_p = C_p^{sp}\left(\frac{\omega_{sp}}{\omega_p}\right)^a;\ C_m = C_m^{sp}\left(\frac{\omega_p}{\omega_{sp}}\right)^a,$$

де C_p^{sp} – витрати на розробку і виробництво технічних засобів і конструкцій вантажних суден аналогічного проекту з параметром потоку відмов ω_{sp}; C_p – витрати на розробку і виробництво технічних засобів і конструкцій вантажних суден з поліпшеними характеристиками надійності (параметром потоку відмов ω_p); C_m^{sp}, C_m – аналогічні витрати на експлуатацію технічних засобів і конструкцій вантажних суден; a – коефіцієнт, який визначається експериментально і змінюється в діапазоні від 0.5 до 1.5.

Виділимо з експлуатаційних витрат C_m витрати на проведення технічного обслуговування, розділивши їх на наступні групи: на проведення регламентного технічного обслуговування (C_{reg}); на проведення міжрегламенгного обслуговування (C_{im}); на проведення аварійно-попереджувальної профілактики (C_{prev}); на усунення відмов і пошкоджень, виявлених під час проведення регламентного технічного обслуговування (C_{reg}^{rep}), аварійно-попереджувальної профілактики (C_{prev}^{rep}) і автоматичного контролю (C_{mon}^{rep}).

Представлена розбивка витрат на проведення різних видів технічного обслуговування дозволяє зв’язати їх із переходами і станами технічних засобів і конструкцій вантажних суден в процесі експлуатації.

Розглянемо структуру і залежності вищенаведених складових витрат на проведення технічного обслуговування, виражаючи їх через C_m.

Витрати на проведення регламентного технічного обслуговування представимо як:

$$C_{reg} = C_{reg}^{spc} + C_{reg}^{electro} + C_{reg}^{fl} + C_{reg}^{wm} + C_{reg}^{ms} + C_{reg}^{oth}, \quad (5.53)$$

де C_{reg}^{spc} – витрати на запасні частини та витратні матеріали; $C_{reg}^{electro}$ – витрати на електричну енергію; C_{reg}^{fl} – витрати на паливно-мастильні матеріали; C_{reg}^{wm} – витрати на виконання гарантійного нагляду; C_{reg}^{ms} – витрати на утримання обслуговуючого персоналу, який бере участь в проведенні регламентного технічного обслуговування; C_{reg}^{oth} – інші витрати.

Складові формули (5.53) розкладемо на разові $\left(C_{reg}^{ot}\right)$, пов'язані тільки з переходом у стан регламентного технічного обслуговування, і поточні $\left(C_{reg}^{og}\right)$, які характеризують витрати в самому стані регламентного технічного обслуговування:

$$C_{reg} = C_{reg}^{ot} + C_{reg}^{og}, \quad (5.54)$$

До разових витрат відносяться витрати на запасні частини та витратні матеріали, виконання гарантійного нагляду та інші витрати:

$$C_{reg}^{ot} = C_{reg}^{spc} + C_{reg}^{wm} + C_{reg}^{oth}.$$

До поточних відносяться витрати на електричну енергію, паливно-мастильні матеріали і утримання обслуговуючого персоналу, який бере участь в проведенні регламентного технічного обслуговування:

$$C_{reg}^{og} = C_{reg}^{electro} + C_{reg}^{fl} + C_{reg}^{ms}.$$

Разові витрати визначаються формулою:

$$C_{reg}^{ot} = (k^{spc} + k^{wm} + k^{oth}) C_m \frac{\tau_{reg}^m}{\tilde{\tau}_{reg}}, \quad (5.55)$$

де k^{spc}, k^{wm}, k^{oth} – коефіцієнти, які виокремлюють відповідну частку витрат від C_m; τ_{reg}^m – цільова періодичність проведення регламентного технічного обслуговування; $\tilde{\tau}_{reg}$ – величина оцінювання періодичності проведення регламентного технічного обслуговування за результатами експлуатації.

Поточні витрати визначаються формулою:

$$C_{reg}^{og} = \left(k^{electro} + k^{fl} + k^{ms}\right) \frac{C_m}{P_w} \frac{\tilde{\tau}_{dreg}}{\tau_{reg}^m}, \quad (5.56)$$

де $\tilde{\tau}_{dreg}$ – величина оцінювання тривалості проведення регламентного технічного обслуговування за результатами експлуатації; τ_{reg}^{m} – цільова тривалість проведення регламентного технічного обслуговування; P_w – гарантійний термін експлуатації.

Подібно отримаємо залежності для визначення витрат на проведення середнього обслуговування і аварійно-попереджувальної профілактики:

$$C_{im} = C_{im}^{spc} + C_{im}^{electro} + C_{im}^{fl} + C_{im}^{wm} + C_{im}^{ms} + C_{im}^{oth}, \tag{5.57}$$

$$C_{im}^{ot} = C_{im}^{spc} + C_{im}^{wm} + C_{im}^{oth} = (k^{spc} + k^{wm} + k^{oth}) C_m \frac{\tilde{\tau}_{reg}}{\tilde{\tau}_{im}} \frac{\tau_{im}^{m}}{\tau_{reg}^{m}}, \tag{5.58}$$

$$C_{im}^{og} = C_{im}^{electro} + C_{im}^{fl} + C_{im}^{ms} = \left(k^{electro} + k^{fl} + k^{ms}\right) \frac{C_m}{P_w} \frac{\tilde{\tau}_{id}}{\tau_{id}^{m}}, \tag{5.59}$$

де $\tilde{\tau}_{im}, \tau_{im}^{m}$ – величина оцінювання періодичності проведення середнього обслуговування та її цільове значення; $\tilde{\tau}_{id}, \tau_{id}^{m}$ – величина оцінювання тривалості проведення середнього технічного обслуговування та її цільове значення.

$$C_{prev} = C_{prev}^{spc} + C_{prev}^{electro} + C_{prev}^{fl} + C_{prev}^{wm} + C_{prev}^{ms} + C_{prev}^{oth}, \tag{5.60}$$

$$C_{prev}^{ot} = C_{prev}^{spc} + C_{prev}^{wm} + C_{prev}^{oth} = (k^{spc} + k^{wm} + k^{oth}) C_m \frac{\tilde{\tau}_{reg}}{\tilde{\tau}_{prev}} \frac{\tau_{prev}^{m}}{\tau_{reg}^{m}}, \tag{5.61}$$

$$C_{prev}^{og} = C_{prev}^{electro} + C_{prev}^{fl} + C_{prev}^{ms} = \left(k^{electro} + k^{fl} + k^{ms}\right) \frac{C_m}{P_w} \frac{\tilde{\tau}_{pd}}{\tau_{pd}^{m}}, \tag{5.62}$$

де $\tilde{\tau}_{prev}, \tau_{prev}^{m}$ – величина оцінювання періодичності проведення аварійно-попереджувальної профілактики та її цільове значення; $\tilde{\tau}_{pd}, \tau_{pd}^{m}$ – величина оцінювання тривалості проведення аварійно-попереджувальної профілактики та її цільове значення.

Розглядаючи витрати на подолання відмов і пошкоджень $C_{reg}^{fr}, C_{prev}^{fr}, C_{mon}^{fr}$, відзначимо, що разові витрати, які включають ті ж три складові (5.62), можна врахувати в разових витратах на проведення середнього (міжрегламентного) технічного обслуговування. Насправді, поповнення змінно-запасними частинами, витратні матеріали та інші витрати приходяться, як правило, на підготовку до проведення планового технічного обслуговування технічних засобів і конструкцій

вантажних суден. Тому представимо витрати на подолання відмов і пошкоджень як поточні витрати:

$$C_{reg}^{fr} = \left(k^{electro} + k^{fl} + k^{ms}\right)\frac{C_m}{P_w}\frac{\tilde{\tau}_{reg}^{fr}}{\tau_{reg}^{fr}},$$

де $\tilde{\tau}_{reg}^{fr}, \tau_{reg}^{fr}$ – величина оцінювання тривалості подолання відмов і пошкоджень та її цільове значення;

$$C_{prev}^{fr} = \left(k^{electro} + k^{fl} + k^{ms}\right)\frac{C_m}{P_w}\frac{\tilde{\tau}_{prev}^{fr}}{\tau_{prev}^{fr}},$$

де $\tilde{\tau}_{prev}^{fr}, \tau_{prev}^{fr}$ – величина оцінювання тривалості подолання відмов і пошкоджень при аварійно-попереджувальній профілактиці та її цільове значення;

$$C_{mon}^{fr} = \left(k^{electro} + k^{fl} + k^{ms}\right)\frac{C_m}{P_w}\frac{\tilde{\tau}_{mon}^{fr}}{\tau_{mon}^{fr}},$$

де $\tilde{\tau}_{mon}^{fr}, \tau_{mon}^{fr}$ – величина оцінювання тривалості подолання відмов і пошкоджень безперервно та автоматично контрольованих технічних засобів і конструкцій вантажних суден та її цільове значення.

Таким чином, представлені залежності дозволяють визначити прибутки (c_{ii}) та $\left(c_{ij}\right)$. В подальшому вони використовуються для розрахунку узагальнених і питомих витрат для конкретної реалізації системи технічного обслуговування вантажного судна і формування вимог до підвищення її ефективності, зокрема економічної (тобто за критерієм ефективності використання ресурсів).

5.7 Моделювання процесу оцінювання стану системи технічного обслуговування з використанням критеріїв впорядкованої мінімізації ризику

Дослідження завдань вибору розв’язувальних правил засвідчили, що найчастіше ситуація така, що задано певний клас розв’язувальних правил S і розраховують на завдання, для яких у цьому класі є "достатньо хороші" розділяючи правила. Нехай апріорні відомості про природу завдань, на які розраховується алгоритм адаптивізації, задаються як апріорна ймовірність тих чи інших завдань. У цьому разі зручний метод побудови алгоритму на базі мінімізації критерію Байєса:

$$R_B(A) = \sum_T P_{apr}(T) \cdot R_l(A,T).$$

Оптимальну за критерієм Байєса процедуру реалізує така схема:

1. Нехай задано послідовність $(x_1, \omega_1; \ldots; x_l, \omega_l)$ цієї послідовності для кожної задачі (T) обчислюють апостеріорну ймовірність $R_{apost}(T)$ того, що алгоритм зіткнувся саме з цією задачею:

$$P_{apost}(T) = \frac{P_{apr}(T)\prod_{i=1}^{l} P_T(x_i, \omega_i)}{\sum_T P_{apr}(T)\prod_{i=1}^{l} P_T(x_i, \omega_i)},$$

де $P_{apr}(T)$ – апріорна ймовірність задачі (T); $P_T(x_i, \omega_i)$ – розподіл, що відповідає задачі (T).

2. Для кожної ситуації (x) обчислюють апостеріорну ймовірність того, що її буде віднесено до класу (ω):

$$P_{apost}(\omega/x) = \sum_T P_T(\omega/x)\, P_{apost}(T).$$

3. Нарешті формується вирішальне правило $F(x)$, що застосовується у такий спосіб:

$$F(x) = \begin{cases} 0, & P_{apost}(1/x) < 0.5; \\ 1, & P_{apost}(1/x) \geq 0.5. \end{cases}$$

Перелічені кроки, незважаючи на свою привабливість, своїми очевидними процедурами можуть бути реалізовані у винятково найпростіших випадках. По-перше, у задачах оцінювання стану системи технічного обслуговування обране розв'язуване правило істотно залежить від апріорних відомостей. Зазначена обставина забезпечує успішне використання критерію Байєса тільки для дуже вузького кола завдань. Стратегія Байєса ефективна тільки в тому разі, якщо апріорні ймовірності є такими, що величезна більшість станів була в сукупності малоймовірною, а мізерна меншість станів утворювала б множину, ймовірність якої близька до одиниці.

Дійсно, нехай (Q) – множина всіх можливих вирішальних правил. Виділимо таку систему вкладених множин:

$$Q_1 \subset Q_2 \subset \cdots \subset Q_N \subset Q,$$

що ймовірність $P(Q_i)$ зустріти завдання з (Q_i) утворює систему нерівностей

$$P(Q_1) < P(Q_2) < \cdots < P(Q_N) < 1.$$

Тобто при переході від (Q_i) до (Q_{i+1}) кількість завдань різко зростає, тоді як монотонно зменшуються величини прирощення ймовірностей:

$$\Delta P_i = P(Q_{i+1}) - P(Q_i)$$

Система вкладених множин і ймовірностей становлять в умовах застосування критерію Байєса апріорні відомості, які, як правило, у більшості практичних завдань оцінювання стану системи технічного обслуговування визначити вельми проблематично.

Розглянемо можливості вдосконалення алгоритмів, відштовхуючись від розглянутого критерію. Припускаючи, що ми маємо тільки апріорно відому множину $Q_1 \subset Q_2 \subset \cdots \subset Q_N \subset Q$, сформуємо стратегію, виходячи з умови, що (ΔP_i) зменшується. У навчальній послідовності застосовується спочатку алгоритм, розрахований на завдання з класу (Q_1). Тільки в тому разі, якщо він дає незадовільні результати, застосовується алгоритм, розрахований на задачі з класу (Q_2) тощо.

Наведемо детальний опис процедури послідовної адаптивізації. У класі вирішальних правил (S) вводять упорядкування, тобто формують систему вкладених множин:

$$S_1 \subset S_2 \subset \cdots \subset S_N = S.$$

Після цього у класі (S_1) міститься правило, що мінімізує емпіричний ризик. Якщо знайдене розв'язувальне правило оцінюють як незадовільне, то є правило, що мінімізує емпіричний ризик у класі (S_2). Процедура пошуку завершується, коли буде знайдено задовільне вирішальне правило.

Запропоновану методику доцільно розглядати як дворівневу процедуру адаптації. На першому рівні та навчальній послідовності застосовують (N) алгоритмів $(A_1, \dots, A_N)$, кожний з яких обирає розв'язувальне правило, що мінімізує емпіричний ризик у класах (S_i). На другому рівні з (N) відібраних вирішальних правил обирають те, яке мінімізує заданий вибір.

Для реалізації методики необхідно знайти:

- критерій вибору вирішального правила;
- як вводити впорядкування класу розв'язувальних правил *S*.

Обґрунтування критерію вибору вирішального правила тісно пов'язане з функцією зростання. Опускаючи математичне обґрунтування питань, пов'язаних із функцією зростання, викладених у великій кількості літературних джерел, зазначимо лише її сенс - вона дорівнює максимальному числу способів розбиття на два класи за допомогою розв'язувальних правил $F(x,\alpha)$. Реалізація цієї ідеї пов'язана з використанням оцінки якості:

$$P(i) \le P_{emp}(i) + 2\sqrt{\frac{n_i(\ln 2l - \ln n_i + 1) - \ln \eta/5}{l-1}},$$

де $P_{emp}(i)$ – величина мінімуму емпіричного ризику в класі (S_i); n_i – показник ємності (S_i), l - довжина навчальної вибірки.

$$\varepsilon(i) = 2\sqrt{\frac{n_i(\ln 2l - \ln n_i + 1) - \ln \eta/5}{l-1}}.$$

Величина $\varepsilon(i)$ задає довірчий інтервал для класу (S_i), і монотонно зростає з номером (i). Навпаки, величина $P_{emp}(i)$ не зростає зі зростанням (i), оскільки емпірично оптимальне правило з (S_i), міститься у всіх $(S_j, j > i)$.

Як критерій вибору може бути взята права частина оцінки, тобто

$$K(\alpha) = P_{emp}(\alpha) + \varepsilon(i).$$

Правило, що мінімізує наведений вираз $K(\alpha)$, забезпечує мінімальну гарантовану величину ймовірності помилкової класифікації.

У класі лінійних розв'язувальних правил можливе суттєве спрощення впорядкування. Розглянемо клас лінійних розв'язувальних правил

$$F(x,\lambda) = \Theta\left(\sum_{i=1}^{m} \lambda_i \varphi_i(x)\right).$$

Розташуємо ознаки $\varphi_i(x)$ у порядку зменшення апріорної ймовірності того, що ця ознака знадобиться під час класифікації. Упорядкована система лінійних розв'язувальних правил формується так: у клас (S_1) потраплять розв'язувальні

правила, де всі $(\lambda_i = 0)$, за винятком (λ_1), у класі (S_2) – такі, що тільки $(\lambda_1$ і $\lambda_2)$ можуть бути відмінними від нуля, тощо. До першого класу потрапляють розв'язувальні правила, які під час розпізнавання використовують тільки першу ознаку, до другого класу ті, що використовують тільки першу і другу ознаки тощо. Показник ємності кожного з цих класів дорівнює $(m + 1)$, де (m) – кількість ознак що використовуються.

Процедура вищого рівня в алгоритмі впорядкованої мінімізації ризику в даному випадку обиратиме вирішальне правило, що мінімізує критерій:

$$K(m) = P_{emp}(\alpha_m) + 2\sqrt{\frac{(m+1)(\ln 2l - \ln(m+1) + 1) - \ln \eta/5}{l-1}}.$$

Наступним кроком у напрямі вдосконалення процедури за критерієм Байєса є підхід, який ґрунтується на побудові розв'язувального правила не за всією вибіркою, а лише за вибіркою, яка потрапляє в околицю дискримінованої точки. Упорядкуємо елементи навчальної послідовності за близькістю до елемента (x). Потім послідовно розглянемо (l) екстремальних гіперплощин, що розділяють відповідно $(1, 2, \dots, l)$ елементів упорядкованої навчальної послідовності. Проведемо аналіз завдання в детерміністській постановці. Нехай дано навчальну вибірку $(x_1, x_2, \dots, x_l)$. Алгоритми першого рівня, використовуючи впорядкований пошук, виберуть кожен у своєму класі (S_i), з числа безпомилкових вирішальних правил правило $F(x, \alpha)$. Як критерій вибору приймемо величину довірчого інтервалу:

$$\varepsilon = 2\frac{\alpha(E_i)(\ln 2l - \ln \alpha(E_i) + 1) - \ln \eta/2}{l},$$

$$\alpha(E_i) = min\left(\frac{D(E_i)}{4\rho(E_i)} + 2, i = 1\right).$$

Тут як величина $D(E_i)$, так і $\rho(E_i)$ залежать від підпростору (E_i), оскільки і відстань між опуклими оболонками класів замінюються під час проектування в підпростір.

При стохастичному варіанті завдання, яке відповідає оцінюванню системи технічного обслуговування за векторним показником (X), критерієм вибору буде залежність:

$$K(i) = P_{emp}(i) + 2\frac{d_i\left(\ln\frac{2l}{d_i}+1\right) - \ln\frac{\eta}{24}}{l} \cdot \left(1 + \sqrt{1 + \frac{4 \cdot l \cdot P_{emp}(i)}{d_i\left(\ln\frac{2l}{d_i}+1\right) - \ln\frac{\eta}{24}}}\right).$$

Оціночний вектор (X) відхиляється до того класу, до якого його відносить гіперплощина з найкращою оцінкою якості.

5.8 Перевірка адекватності критерію ефективності використання ресурсів та математичних моделей і системи КПТОВС

Перевірка адекватності моделі включала в себе аналіз однорідності дисперсії, відтворюваності та адекватності. Результати проведеного аналізу представлені в Додатку Ж.

Висновки по розділу 5

1. У роботі пропонуються основні припущення та положення для моделювання системних об’єктів системи КПТОВС. Ці припущення ґрунтуються на ретельному врахуванні різноманітних факторів, що включають в себе статистичні дані про швидкість зміни технічного стану, параметри розподілу цих змін, а також методи контролю та обслуговування, спрямовані на підтримку оптимального функціонування технічних засобів і конструкцій судна.

2. Розроблена математична модель процесів зміни технічного стану з врахуванням складника випадковості, в основі якої лежать Марківські моделі для опису процесів технічного обслуговування вантажних суден та модель зміни технічного стану з випадковою складовою, що мають місце в реальних експлуатаційних умовах.

3. Виконано моделювання процесів нелінійної зміни технічного стану суднових технічних засобів, вивчено вплив прийнятих закономірностей на процес технічного обслуговування суднових технічних засобів вантажних суден. Отримано коефіцієнти поліноміальних залежностей зв’язку між: коефіцієнтами варіації для напрацювань до

відмови; середніми та медіанними напрацюваннями до відмови; тривалості циклу експлуатації від ймовірності попередження відмов; залишкового ресурсу; питомих витрат на змінно-запасні частини від ймовірності попередження відмов за функцією зміни технічного стану, що змінюється за визначеним законом.

4. Проведено моделювання процесів технічного обслуговування суднових технічних засобів методом статистичних випробувань, за результатами якого розроблено алгоритм та програмне забезпечення для моделювання технічного обслуговування об’єкта в системі технічного обслуговування. Основна перевага запропонованого алгоритму, і його відмінність від існуючих алгоритмів моделювання технічного обслуговування полягають у використанні нормованих величин у процесі його реалізації та можливості поширення отриманих результатів на інші об’єкти технічного обслуговування, зокрема суднові технічні засоби і конструкції.

5. Виконано моделювання процесів оцінювання ефективності переходу на КПТОВС, яке показало, що зі збільшенням ймовірності попередження відмов системою технічного обслуговування, залишається більший невикористаний ресурс при заміні деталей, особливо у випадку короткого експлуатаційного циклу. Фактичні значення питомих витрат залежать від параметрів, що характеризують систему технічного обслуговування через ймовірність запобігання відмовам, а також властивостей об’єкта експлуатації, таких як коефіцієнт варіації для швидкості зміни технічного стану та закон розподілу. Це свідчить про необхідність уважного аналізу та встановленні параметрів системи технічного обслуговування при розрахунку питомих витрат на запасні частини. Оптимальний підхід полягає в досягненні балансу між ймовірністю запобігання відмовам, невикористаним ресурсом та ефективністю використання запасних частин.

6. Проведено моделювання процесу оцінювання економічної ефективності прийнятих рішень під час управління системою технічного обслуговування вантажних суден, за результатами якого встановлено, що підвищення готовності судна до використання можливе за рахунок підвищення надійності, ймовірність контролю, поліпшення технологічності проведення технічного обслуговування, збільшення обсягу автоматизованого контролю, поліпшення підготовки

обслуговуючого персоналу і ряду інших параметрів. Але питома вага цих параметрів в підвищенні готовності вантажних суден неоднакова, як неоднакові і витрати на здійснення цих заходів.

7. Під час моделювання процесу оцінювання стану системи технічного обслуговування з використанням критеріїв впорядкованої мінімізації ризику визначено критерій вибору, який відповідає оцінюванню системи технічного обслуговування за векторним показником. Оціночний вектор (X) відхиляється до того класу, до якого його відносить гіперплощина з найкращою оцінкою якості.

8. Перевірка адекватності критерію ефективності використання ресурсів проведено шляхом порівняння операції технічного обслуговування з однаковою ефективністю. Результати проведеної перевірки свідчать, що математичні залежності моделей адекватно описують реальні процеси в досліджуваній системі технічного обслуговування.

9. Перевірка адекватності математичних моделей і системи КПТОВС шляхом порівняння з результатами експериментальних досліджень показала, що використані математичні цілком задовільно описують основні процеси системи технічного обслуговування і можуть бути застосовані для оцінювання ефективності різних способів підвищення ефективності системи технічного обслуговування і не лише за рахунок використання цифрових стратегій.

Матеріали розділу 5 опубліковано в джерелах [119, 123, 401, 405, 406, 407, 409, 412, 413, 416, 419, 427, 428, 434].

РОЗДІЛ 6
ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ СИСТЕМ ТЕХНІЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ ВАНТАЖНИХ СУДЕН НА ОСНОВІ ЦИФРОВОЇ СТРАТЕГІЇ ТЕХНІЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ СУДНОВИХ ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ

6.1 Мета і програма експериментальних досліджень

Мета проведення експериментальних досліджень у даній роботі полягає у визначенні відповідних даних для перевірки адекватності та у створенні математичних моделей окремих елементів, підсистем та системи в цілому в контексті підвищення ефективності систем технічного обслуговування вантажних суден. Основою підвищення ефективності систем технічного обслуговування вантажних суден, визначено застосуванням цифрових стратегій обслуговування суднових технічних засобів в умовах експлуатації з використанням засобів моніторингу і прогнозування їх технічного стану. Визначені цілі досягаються шляхом адаптивізації параметрів системи технічного обслуговування та впровадження на вантажні судна засобів дистанційного моніторингу, які інтегруються у склад системи КПТОВС, спеціально розробленої для умов інтелектуальних транспортних систем.

У відповідності до зазначеної мети, програма експериментальних досліджень охоплювала:

- визначення параметрів системи технічного обслуговування для заданих умов автоматичного оцінювання стану технічних засобів вантажних суден на лабораторних установках;

- визначення параметрів системи технічного обслуговування для заданих умов автоматичного оцінювання стану технічних засобів вантажних суден у складі системи КПТОВС;

- визначення параметрів системи технічного обслуговування для заданих умов їхньої адаптивізації у складі системи КПТОВС;

- визначення параметрів системи технічного обслуговування для заданих умов динамічного корегування термінів технічного обслуговування вантажних суден у складі системи КПТОВС.

Для виконання поставлених задач був проведений комплекс експериментальних досліджень на лабораторних установках і на вантажному судні обладнаному системою ACMS, підключеною до сервісу ShipDiMRO віртуального підприємства експлуатації вантажних суден shipmonitoring.org в умовах інтелектуальних транспортних систем при дослідженні процесів контролю і прогнозування стану технічних засобів в експлуатаційних умовах і їхнього впливу на параметри системи технічного обслуговування.

6.2 Об’єкти і методики експериментальних досліджень

Об’єкти і методики представлено у відповідних розділах Додатку Д.

6.3 Експериментальні установки

Експериментальні установки представлені у відповідних розділах Додатку Д.

6.4 Особливості оцінювання технічного стану суднових технічних засобів в процесах підвищення ефективності системи технічного обслуговування вантажного судна

6.4.1 Результати дослідження процесів автоматичного оцінювання технічного стану суднових технічних засобів на основі методів машинного навчання для аналізу великих обсягів інформації з бази даних

Специфічна конфігурація температурного простору властива кожному судновому технічному засобу, як електричній (енергетичній) установці, що перебуває під навантаженням у вигляді прикладеної напруги і робочого струму. Розподіл внутрішніх джерел тепла створює температурне поле, характерне для конкретних типів суднових технічних засобів (установок). При цьому зміна інтенсивностей або співвідношень інтенсивності джерел нагріву в деякому об’єкті, так чи інакше, відображається на конфігурації його температурного простору шляхом деформації початкових температурних розподілів і зміни абсолютних значень температури. Тому аналіз конфігурації температурного простору суднового технічного засобу (електроустановки) дає змогу отримати інформацію про інтенсивність і розподіл внутрішніх джерел тепловиділення, інформація про які зі свого боку дає змогу судити про стан і режим досліджуваного об’єкта. Видається досить очевидним, що реєстрація теплового поля не дає змоги отримати вичерпні дані про температурний

простір досліджуваного об’єкта, що пов’язано з обмеженими можливостями застосованих методів, перешкодами тощо. Тому більш правильно було б говорити про реєстрацію фрагментів температурного простору. Тому в загальному випадку проблема ідентифікації стану суднового технічного засобу (у нашому випадку) електроустановки зводиться до знаходження інтенсивностей внутрішніх джерел тепловиділення за фрагментами його температурного простору.

Це завдання є типовою оберненою задачею математичної фізики. Обернена задача загального виду може бути сформульована як визначення кількісних характеристик (f) досліджуваного об’єкта за результатами вимірювання в експериментах їхніх непрямих проявів:

$$Af = u. \tag{6.1}$$

Застосовуючи це визначення до розглянутої вище проблеми ідентифікації режиму, як елемент (f) виступає розподіл джерел тепловиділення, (u) – його прояв у вигляді деякого розподілу температури. Оператор (A) визначається конструктивними особливостями об’єкта, його фізичними характеристиками, а також зовнішніми умовами, в яких проводяться вимірювання.

Зазначимо, що права частина (6.1), яка отримується в результаті вимірювань, не є точною, оскільки містить як мінімум похибки вимірювань. Тому точного розв’язку (6.1) щодо (f) у строгому сенсі взагалі не існує. Тому для оберненої задачі можливе лише одержання наближеного розв’язку, який щонайменше задовольнятиме заданому критерію наближеності приблизного розв’язку до точного. Крім того, алгоритм розв’язування оберненої задачі має оволодівати набором властивостей, що забезпечують кінцеву варіацію розв’язку за кінцевої ж варіації вихідних даних (u).

Описана задача, у якій потрібно визначити кількісні характеристики (f) досліджуваного об’єкта за результатами вимірювання їхніх проявів (Af), належить до класу так званих некоректно поставлених задач, для розв’язання яких застосовують спеціальні алгоритми.

Наближені рішення багатьох некоректно поставлених задач формувалися давно. Основним способом рішення був метод добору. Він полягає в тому, що

обчислюється ліва частина рівняння (6.1) для деякої підмножини (набору) (F_1) елементів (f). Зазвичай як(F_1) вибирають сімейство елементів (f), що залежать від кінцевої кількості числових параметрів, так що (F_1) є замкнутою множиною скінченновимірного простору. Якщо при цьому відомо, що кожен параметр змінюється в кінцевих межах, то існує послідовність (f_n), для якої нев'язка є:

$$\delta_n = \|Af_n - u\|. \tag{6.2}$$

Множина (F_1), для якої виконується (6.2), називається класом коректності. Формування (F_1), природно здійснювати, виходячи з фізичних обмежень для елементів (f), які визначаються конструктивними і режимними властивостями досліджуваного об'єкта. Замість (6.2) зручніше застосовувати так зване слабке формулювання задачі, коли вибирають елемент (f_n) із заданої множини, що забезпечує мінімізацію нев'язки в деякій нормі. Наприклад, застосовуючи формулювання методу найменших квадратів, якщо (u) є вектором розмірності (M) можна записати:

$$\sum_{k=1}^{M} ((Af)_k - u_k)^2 = min. \tag{6.3}$$

Універсальні методи рішення некоректно поставлених задач було запропоновано в роботах [337, 350]. Ці методи відрізняється від методу найменших квадратів додаванням стабілізуючого функціонала. При цьому, наприклад, формулювання задачі (6.3) за [350] набуває вигляду:

$$\sum_{k=1}^{M} ((Af)_k - u_k)^2 + \alpha \sum_{k=1}^{M} f_k = min, \tag{6.4}$$

де α - параметр регуляризації.

Застосування методів [337, 350] передбачає відомим аналітичний вираз для оператора (A). Однак під час розв'язання задач теплової діагностики оператор задачі (A) не має алгебраїчного представлення, оскільки температурні розподіли отримують або шляхом експериментальних вимірів, або на основі чисельних розв'язань рівнянь у часткових похідних. Тому метод підбору рішення (у задачі температурної діагностики як елементи вектору (f) виступають інтенсивності джерел тепловиділення із заданим положенням у просторі) діагностики для конкретного

суднового технічного засобу (електрообладнання) наразі видається більш перспективним. Проведення натурних і числових експериментів дає змогу отримати достатню базу даних щодо теплових станів конкретних видів електрообладнання. Заданим наборам інтенсивностей джерел тепловиділення можна зіставити розподіли поверхневої температури на характерних елементах суднових технічних засобів і конструкції. Насичення такої бази даних може спочатку проводитися шляхом прямих вимірювань усіх параметрів стану об'єкта з паралельними обчислювальними експериментами на основі методу кінцевих елементів з метою вибору параметрів числової моделі (граничні умови, коефіцієнти тепловіддачі, теплофізичні характеристики тощо), що забезпечують адекватний математичний опис. Подальше поповнення бази даних теплових станів об'єкта, зокрема в сферу режимів, які фізично важко реалізувати, може проводитися головним чином шляхом кінцево-елементного моделювання.

Другою важливою обставиною, пов'язаною з формуванням бази даних теплових станів, є суттєве звуження множини (F_1), з елементів якої обирають розв'язання оберненої задачі. Зокрема чітке обмеження можливих інтенсивностей теплових джерел дає змогу суттєво зменшити варіації (f_k) під час пошуку мінімуму (6.4).

Як найпростіший підхід до описаної проблеми добору розглянемо метод пошуку в базі даних станів елемента, що є найближчим до отриманого в результаті деяких вимірювань. Наприклад, якщо в базі даних містяться розподіли температури вздовж деякої характерної для цього обладнання поверхні, виміряні або розраховані за різних (відомих) поєднань джерел тепловиділення, то за достатньої повноти цих даних, знайшовши найближчий до випробуваного розподілу, можна з певним ступенем достовірності ідентифікувати режим суднового технічного засобу. Про достовірність результату ідентифікації можна судити, розглядаючи деякі тестові завдання, зокрема пошук станів із заздалегідь відомими параметрами. Як найпростішу модель, на якій можна дослідити цей підхід, розглянемо модель струмоведучої шини з контактним з'єднанням. Перехідний опір в області контакту може змінюватися. При цьому змінюється і розподіл температури вздовж шини. З

метою отримання аналітичного рішення для температурного розподілу вздовж шини не будемо аналізувати конструкцію самого контактного з'єднання, уявімо шину у вигляді нескінченного провідника з площею перерізу (S) і периметром перерізу (p). Початок координат розмістимо в точці контакту (Рисунок 6.1). Як математичну модель контакту використовуємо залежність погонного електричного опору шини в області контакту у вигляді:

$$R'(x) = (R'_1 - R'_0)exp(-\beta x) + R'_0, \qquad x \geq 0. \tag{6.5}$$

де R'_0 – нормальний погонний опір шини далеко від контакту, β – постійна, що характеризує зростання опору поблизу контакту.

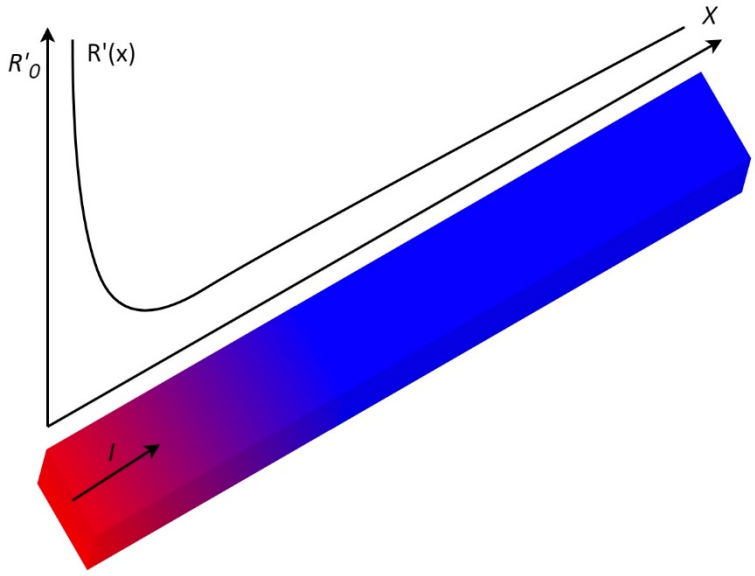


Рисунок 6.1 – Розрахункова модель шини з порушенням електричного опору

Якщо прийняти, що має місце конвективне охолодження шини вздовж усієї її поверхні і розподіл температури в перерізі шини однорідний, то стаціонарне рівняння теплопровідності можна записати у вигляді:

$$\lambda \frac{d^2T}{dx^2} + \rho j^2 - \frac{\alpha(T - T_e)p}{S} = 0, \tag{6.6}$$

де λ, ρ – коефіцієнт теплопровідності та питомий електричний опір матеріалу шини, α – коефіцієнт тепловіддачі з поверхні шини, T_e – температура довкілля, j - густина струму.

Використовуючи наступні зв'язки густини струму (j) і погонного електричного опору (R') з площею перерізу шини (S):

$$j = \frac{I}{S}, \qquad R' = \frac{\rho}{S}, \tag{6.7}$$

де I – повний струм шини.

Рівняння (6.6) можна привести до вигляду:

$$\frac{d^2\theta}{dx^2} - k^2\theta = -1 - (\gamma_0 - 1)exp(-\beta x), \tag{6.8}$$

де $\theta = (T - T_e)\lambda S/R_0' I^2; \quad k^2 = \alpha p/\lambda S, \quad \gamma_0 = R_1'/R_0'$.

Рівняння (6.8) розв'язується за таких граничних умов:

$$\left.\frac{d\theta}{dx}\right|_{x=0} = 0, \qquad \left.\frac{d\theta}{dx}\right|_{x=\infty} = 0.$$

При цьому

$$\theta = \frac{1}{k^2} - \frac{\beta(\gamma_0 - 1)}{k(k^2 - \beta^2)}exp(-kx) + \frac{\gamma_0 - 1}{k^2 - \beta^2}exp(-\beta x). \tag{6.9}$$

Повертаючись до розмірних одиниць температури, отримаємо розподіл температури вздовж шини при $x \geq 0$ за формулою:

$$T(x) = T_e + \frac{R_0' I^2}{\lambda S}\left(\frac{1}{k^2} + \frac{\gamma_0 - 1}{k^2 - \beta^2}\left(exp(-\beta x) - \frac{\beta}{k}exp(-kx)\right)\right). \tag{6.10}$$

Як приклад на Рисунку 6.2 наведено розподіл температури вздовж шини, розрахований за допомогою формули (6.10) для випадку мідної шини поперечним перерізом 2х4 см ($\rho = 5$Ом $\cdot$ м, $\lambda = 200$ Вт/(м $\cdot$ К) зі струмом 1000 А при зростанні погонного опору в ділянці контакту розміром 5 мм ($\beta = 200$ м$^{-1}$ у 100 разів $\gamma_0 = 100$ і коефіцієнті тепловіддачі $\alpha = 5$ Вт/(м^2 $\cdot$ К).

Припустимо зовнішні умови, включно зі струмом, що протікає шиною, незмінними. У цьому разі тепловий режим шини визначається тільки двома параметрами - просторовим масштабом області підвищеного опору ($\delta = 1/\beta$) і максимальним значенням відносного опору в області контакту (γ_0). Таким чином, база даних теплових станів досліджуваного прикладу має містити набір розподілів температури поблизу контакту для різних сполучень параметрів (δ) та (γ_0). Беручи до уваги, що зазначені розподіли в загальному випадку визначаються за допомогою прямих вимірювань і містять збудження, пов'язані з помилками інструменту

вимірювання, а також значний обсяг інформації, призначеної для зберігання в базі даних станів, необхідно потурбуватися про раціональний вибір кількості елементів бази даних (екземплярів розподілу температури на контрольній поверхні), крок табуляції параметрів, які управляють розподілами, та вибір допустимої похибки засобів вимірювання при створенні базових розподілів та під час контрольних вимірів.

Як перший приклад повернемося до розглянутої вище задачі нагрівання поблизу контакту (Рисунок Д.2 Додатку Д). При цьому вихідні розподіли відкладають на зазначеному на Рисунку 6.2 відрізку осі x із кроком 0.0025 м. Інтервали параметрів теплового стану об'єкта параметрів ($\delta = 0.001 \div 0.01$ м) та ($\gamma_0 = 10 \div 100$). Для моделювання процесу розпізнавання за базою даних теплових станів до розрахункових розподілів температури уздовж шини за допомогою генератора випадкових чисел уносять штучну похибку, максимальне значення якої визначають похибкою вимірювального приладу (Рисунок 6.3).

Розподіли температури, що передаються для розпізнавання, також містять шум відповідного рівня. Визначення стану (комбінації параметрів) за обраним розподілом температури зводиться до визначення найближчого до нього з тих, що містяться в базі даних. Критерієм максимальної близькості для двох дискретних розподілів – визначених у *N* точках значень температури є мінімум відстані між двома точками в *N*-вимірному просторі:

$$\sum_{i=1}^{N} \left(T_i - \dot{T}_i\right) \to min, \tag{6.11}$$

де $T_i, \dot{T}_i$ – точки розподілу температури з бази даних і обраним для розпізнавання відповідно.

Для розглянутого вище прикладу на Рисунку 6.4 проілюстровано розподіли відносної помилки (E) визначення стану (параметрів (δ) та (γ_0)) шляхом порівняння з еталонами з бази даних за різних рівнів похибки визначення розподілів температури еталонів бази та еталонів, що обираються для ідентифікації:

$$E_{\delta\gamma} = \sqrt{\left(\frac{2 \cdot |\delta - \dot{\delta}|}{|\delta| + |\dot{\delta}|}\right)^2 + \left(\frac{2 \cdot |\gamma_0 - \dot{\gamma}_0|}{|\gamma_0| + |\dot{\gamma}_0|}\right)^2}. \quad (6.12)$$

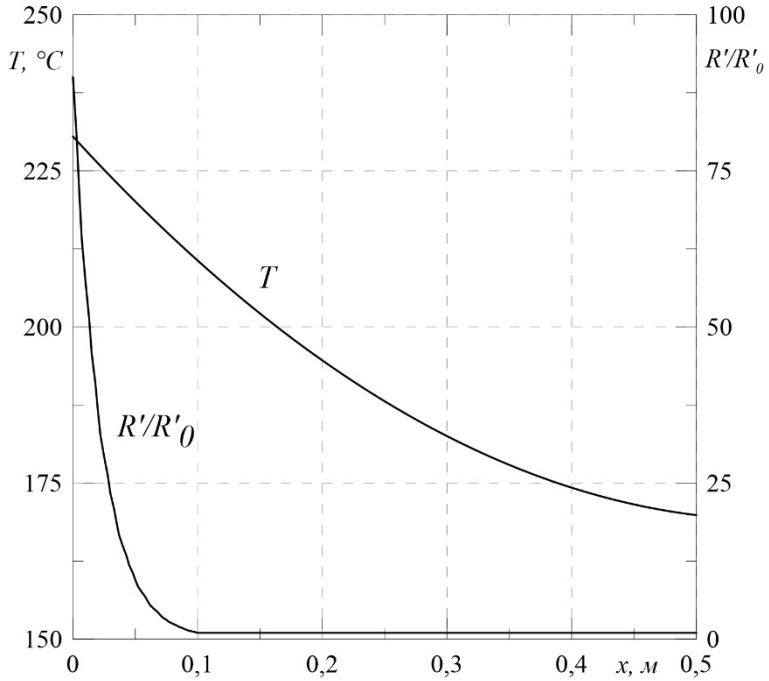


Рисунок 6.2 – Розподіл температури та відносного погонного електричного опору вздовж шини

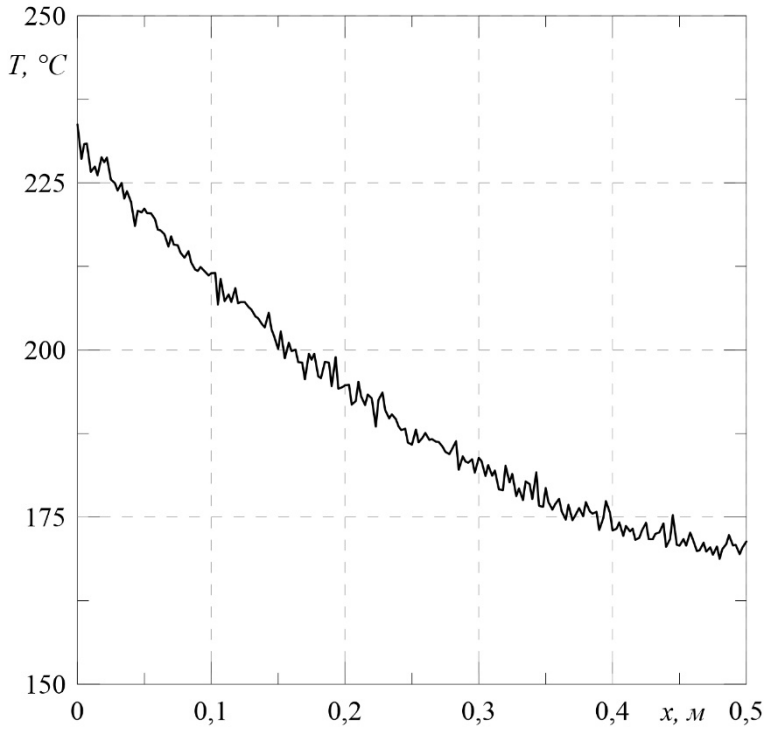


Рисунок 6.3 – Розподіл температури вздовж шини з внесеною похибкою вимірювального приладу

З Рисунку 6.4 зокрема видно, що розміри областей виникнення помилок визначення режиму зменшуються зі зменшенням похибки вимірювання або розрахунку. Звертає на себе увагу те, що помилки локалізуються в області відносно невеликих значень (δ) та (γ_0), за яких температурні розподіли (6.10) відрізняються меншими крутизною та амплітудою. Тому для цієї області параметрів вплив помилки вимірювання більш помітний. Зменшення вимірювальної похибки нижче 0.025 К забезпечує безпомилкову ідентифікацію режиму.

Вплив обсягу вибірки з безперервного розподілу температури (параметр N у (6.11)) можна проаналізувати за допомогою діаграм, аналогічних Рисунку 6.4.

На Рисунку 6.5 наведено розподіли відносної помилки ідентифікації, отримані в разі збільшення кроку табуляції температурних розподілів у чотири рази порівняно з даними, представленими на Рисунку 6.3, де крок табуляції за просторовою змінною (x) становив 5 мм.

Порівняння діаграм Рисунку 6.5 з аналогічними на Рисунку 6.4 показує, що області появи помилки ідентифікації збільшуються в розмірі при збільшенні кроку табуляції температурних розподілів. Водночас область впевненої ідентифікації залишається достатньою для практичного використання методу.

Розглянутий метод ідентифікації на основі бази даних станів принципово застосовний і для більшого, ніж два, числа параметрів, що визначають розподіл температури на контрольній поверхні. Зокрема в досліджуваному прикладі поряд із параметрами, що описують властивості електричного контакту (δ) та (γ_0), до числа ідентифікованих може бути також доданий коефіцієнт тепловіддачі з поверхні шини (α). Межі зміни цього параметра відносно невеликі, і, як показано в попередньому розділі, для повітря він становить у разі гладкої охолоджуваної поверхні від 4 до 20 Вт/(м^2 К). Оскільки фактичне представлення помилки ідентифікації аналогічно Рисункам 6.4, 6.5, 6.6, у разі трьох незалежних параметрів, що визначають розподіл температури, неможливе, обмежимося обчисленням середньої за областю відносної помилки ідентифікації:

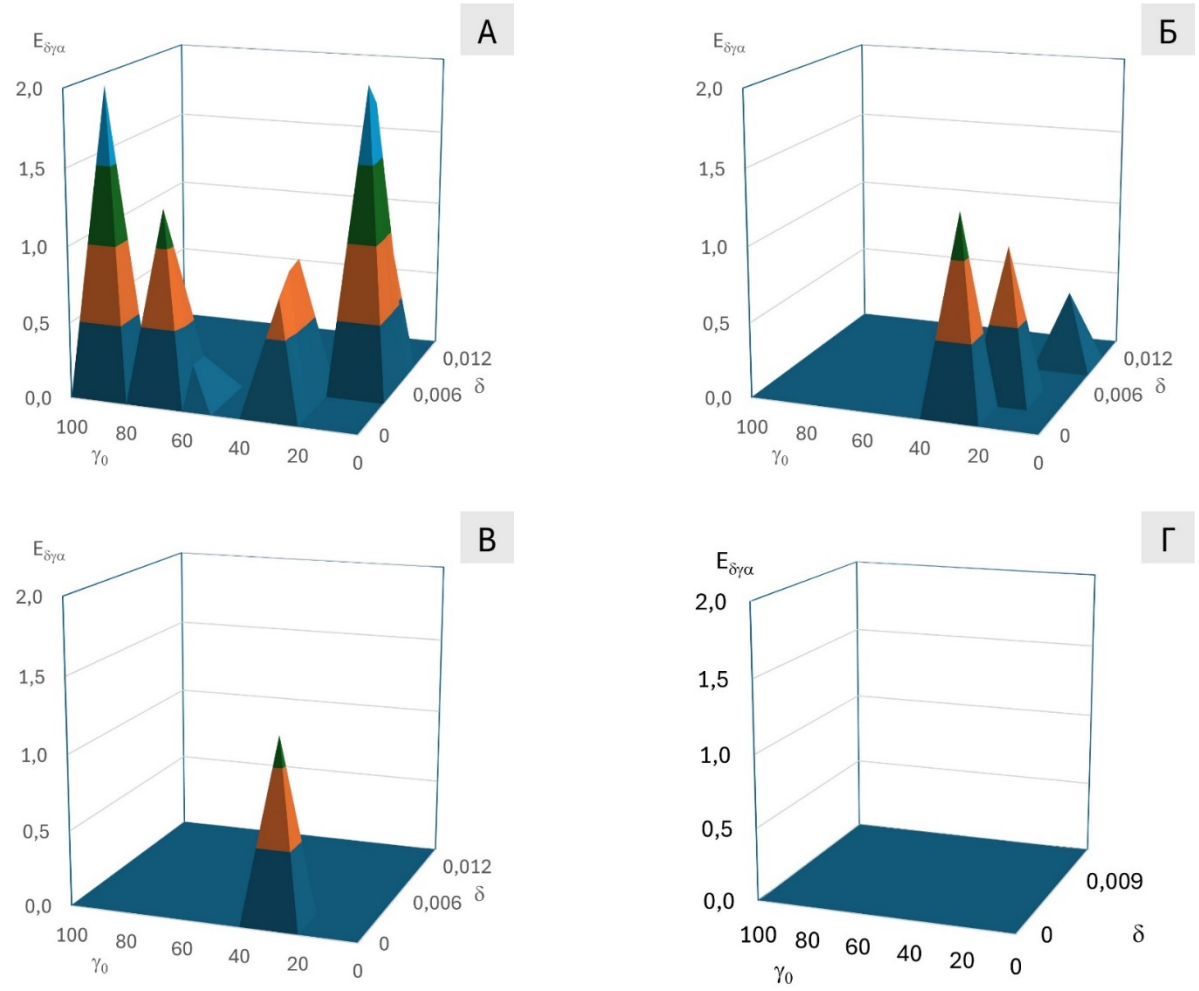


Рисунок 6.4 – Залежність відносної помилки розпізнавання теплового стану за різних рівнів шуму вимірювання

А – $(\delta T = 0.2\ K)$; Б – $(\delta T = 0.1\ K)$; В – $(\delta T = 0.05\ K)$; Г – $(\delta T = 0.025\ K)$.

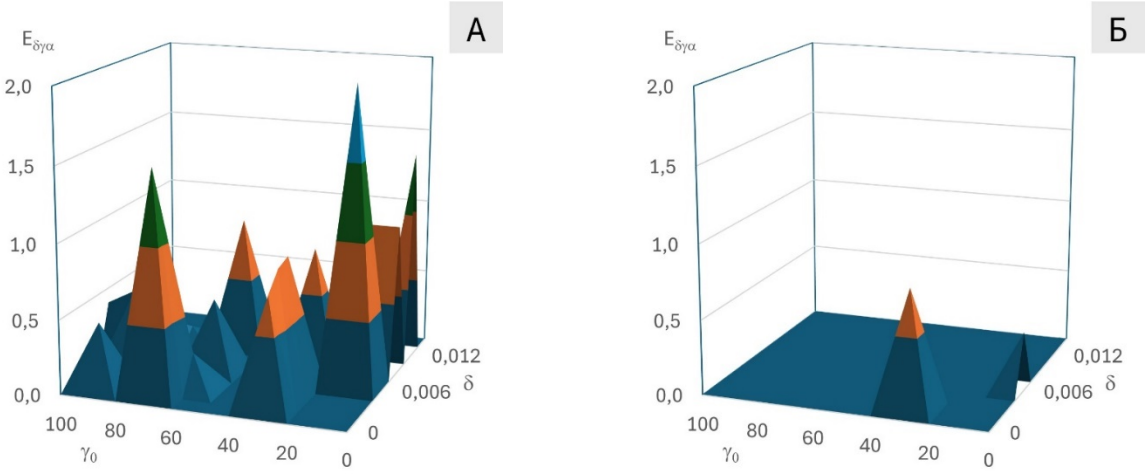


Рисунок 6.5 – Залежність відносної помилки розпізнавання теплового стану за різних рівнів шуму вимірювання при збільшенні просторового кроку табуляції температурних розподілів А – $(\delta T = 0.2\ K)$; Б – $(\delta T = 0.05\ K)$.

$$E_{\delta\gamma\alpha} = \frac{1}{M}\sum_{i=1}^{M}\sqrt{\left(\frac{2\cdot|\delta_i-\dot{\delta}|}{|\delta_i|+|\dot{\delta}|}\right)^2+\left(\frac{2\cdot|\gamma_{0i}-\dot{\gamma}_0|}{|\gamma_{0i}|+|\dot{\gamma}_0|}\right)^2+\left(\frac{2\cdot|\alpha_i-\dot{\alpha}|}{|\alpha_i|+|\dot{\alpha}|}\right)^2}, \qquad (6.13)$$

де індексом i позначено номер комбінації параметрів, що ідентифікується, а крапкою позначено параметр, який одержано у результаті ідентифікації.

Залежність середньої відносної помилки ідентифікації стану від похибки визначення температурних розподілів показано на Рисунок 6.6, деяка не гладкість кривої пояснюється дискретністю бази даних.

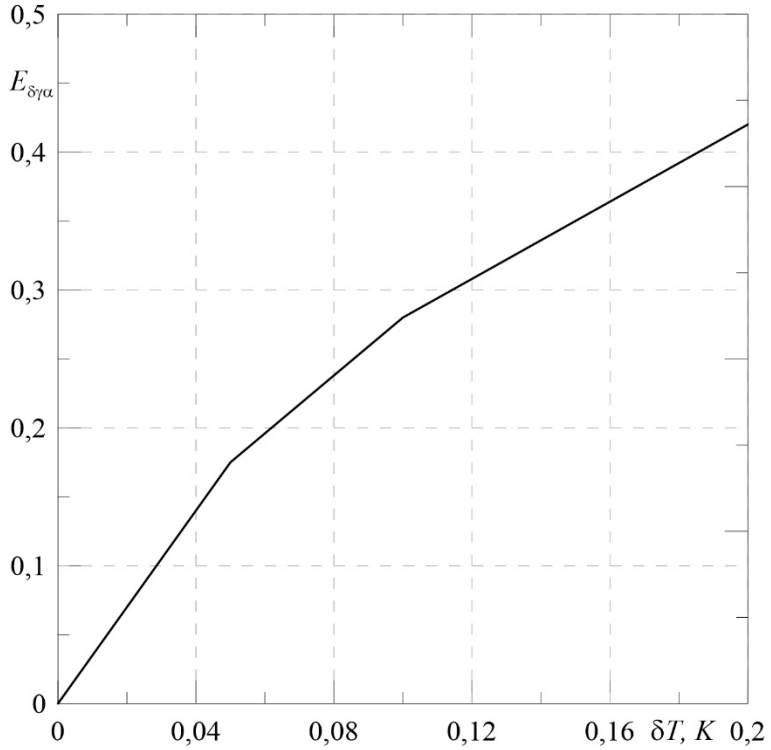


Рисунок 6.6 – Залежність осередненої відносної помилки ідентифікації режиму за температурним розподілом, контрольованим трьома параметрами

Слід зазначити, що в разі зниження частоти табуляції у базу даних, коли для економії обчислень використовують надмірно великі кроки табуляції за параметрами $(\delta, \gamma_0, \alpha)$ точність ідентифікації сильно падає аж до повної невідповідності ідентифікованого режиму дійсності. У нашому прикладі це пов'язано з появою третього параметра (α), який значно впливаючи на температурний розподіл, помітно послаблює контроль розподілу температури з боку параметрів (δ, γ_0).

Таким чином, метод ідентифікації стану за базою даних, з одного боку, створює принципову можливість розв'язання зворотної задачі аналізу температурного

простору (або розподілу іншого фізичного параметру). Однак, будучи по суті справи методом прямого пошуку, вимагає зберігання та обробки великих обсягів інформації з використанням методів машинного навчання (Таблиця Л.6) у межах цифрових стратегій [431]. При цьому гарантувати успіх методу прямого пошуку може тільки ретельне тестування отриманої бази даних шляхом ідентифікації стану за максимально великої кількості комбінацій параметрів, що керують температурним розподілом на контрольній поверхні.

За кількості таких керівних параметрів, що перевищує 3, обсяг бази даних і робіт з її створення та тестування стає вельми великим і пошук у такій базі даних ефективний лише за використання методів машинного навчання. Перевагою методу прямого пошуку є можливість прямого зіставлення і контролю елементів бази даних станів і обраного для ідентифікації розподілу температури. Метод був перевірений експериментально та апробований стосовно конкретного суднового обладнання, в результаті чого отримано адекватні збіги з методичними викладками [350, 404, 405, 406, 410].

Отримані результати процесів автоматичного оцінювання стану суднових технічних засобів використовуються у рамках цифрової стратегії прогнозування термінів попереджувальної профілактики, яка описана у розділі 4.2.2.1.

6.4.2 Результати дослідження процесів автоматичного оцінювання технічного стану на основі прескриптивного аналізу режимних параметрів суднових технічних засобів

Наявність великого обсягу проблем оцінювання стану енергетичних установок, які розв’язуються в умовах невизначеності, потребують адекватного методичного забезпечення.

Розв’язання, сформованих цими проблемами завдань, природно шукати на шляхах, апробованих практикою управління складними технічними системами. У цьому сенсі найпростішим є підхід, заснований на ідеях експертних систем у поєднанні з методами теорії нечітких множин. Практика застосування експертних систем для діагностування стану складних систем показала їхню високу ефективність. Виняткову продуктивність показали і методи теорії нечітких множин в

управлінні складними динамічними системами. У сукупності ці два напрямки дають широку методологічну базу для розроблення систем семантичного аналізу динамічних процесів на енергетичних об’єктах. Однак для їх реалізації потрібне додаткове формування структури формування засобів семантичного аналізу та принципів їхнього функціонування.

Проведений аналіз властивостей, ознак і методів розпізнавання технічного стану синхронних машин показав, що використовувані алгоритми, які ґрунтуються на зменшені зон контролю за одночасного підвищення швидкодії, володіють обмеженими можливостями і потребують пошуку нових технічних рішень, що спираються на принципово нові підходи. Тому в цьому параграфі наводиться аналіз і обґрунтування більш досконалих методів визначення стану суднових технічних засобів на базі дослідження сигналів анормального режиму.

В основу досліджень покладено вимірювання і подальший аналіз комплексного (векторного) сигналу $Z(t)$. Аналіз сигналів $Z(t)$ проводять на базі математичного, фізичного моделювання, а також на основі натурних випробувань, унаслідок яких отримано функції обгортання. Експериментальні дослідження проведені автором стосовно суднових дизель-генераторів та синхронних двигунів. Отримані результати можуть бути виділені в три групи.

Перша група режимів характеризується тим, що вимірюваний сигнал, рухаючись із зони, що відповідає нормальному режиму, в зону, що відповідає анормальному режиму (крива 2, Рисунок 6.7), потрапляючи в межі уставок (крива 1), залишається там на весь час ухвалення рішення. В рамках експерименту зона пуску алгоритму обирано у вигляді кривих, що проходять на різній відстані щодо частотних характеристик генератора. Криву 2 отримано на базі експериментальних досліджень дизель-генератора під час замикання обмотки збудження на коротко.

Друга група режимів відрізняється тим, що контрольований сигнал, досягнувши зони пуску, коливається відносно граничної лінії 1, поступово втягуючись у зону пуску. Крива 3 отримана в результаті експерименту під час гасіння струму в обмотці ротора за допомогою вимикача магнітного поля (автомат гасіння поля, АГП).

Третя група характеризується збереженням коливального характеру контрольованого сигналу (крива 4) щодо граничної лінії 1 на весь час існування режиму. Така зміна $Z(t)$ характерна для випадку, коли під час замикання обмотки збудження на відносно великий опір зберігається зв'язок зі збудником.

Найпростішим з погляду реалізації способом є інтегральна оцінка часу за наявності двох граничних кривих Z_{r1} та Z_{r2}, причому всі точки першої з них перебувають у зоні, обмеженій другою, тобто виконується умова $Z_{r1} \in Z_{r2}$.

Алгоритм інтегральної оцінки на базі двох зон контролю в стислому математичному записі, за умови $Z(t) \in Z_{r1}$, визначається залежністю:

$$\theta(s) = \sum_{i=1}^{n-1} \theta_i(s_i) q_i + \theta_{n_{pr}}(s_n) q_n > \theta_y, \tag{6.14}$$

де q_i – бінарна змінна, що визначає обнуління результату підсумовування при виході $Z(t)$ за межі граничної лінії:

$$\theta_i(s_i) = t_{i_{out}} - t_{i_{in}}, \qquad Z(t) \in Z_{r1},$$

де θ - час від моменту входу $t_{i_{in}}$ до моменту виходу $t_{i_{out}}$, що залежить від ковзання ротора (S).

Такий алгоритм забезпечує виявлення анормальних режимів за умов коливань у межах Z_{r1}. Однак час формування керуючого впливу після входу в межі Z_{r2} сильно залежить від швидкості зміни контрольованого параметра. Прискорення процедури виявлення можна досягти введенням адаптивної оцінки часу $\theta(s)$ відповідно до умов:

$$\theta(s) = \sum_{i=1}^{n-1} \alpha_i \theta_i(s_i) q_i + \alpha_n \theta_{n_{pr}}(s_n) q_n\,; \;\; Z(t) \in Z_{r1}, \tag{6.15}$$

$$q_i = \begin{cases} 1, & Z(t) \in Z_{r2} \\ 0, & Z(t) \notin Z_{r2} \end{cases}.$$

де α_i – ваговий коефіцієнт, який збільшується з кожним циклом потрапляння в зону пуску, забезпечуючи прискорене інтегрування часу. Виконання інтегральної оцінки за наявності тільки однієї характеристики вимагає введення спеціальних операцій для запам'ятовування результатів визначення часу в попередньому циклі в разі перевищення часу поза зоною пуску наперед заданого значення:

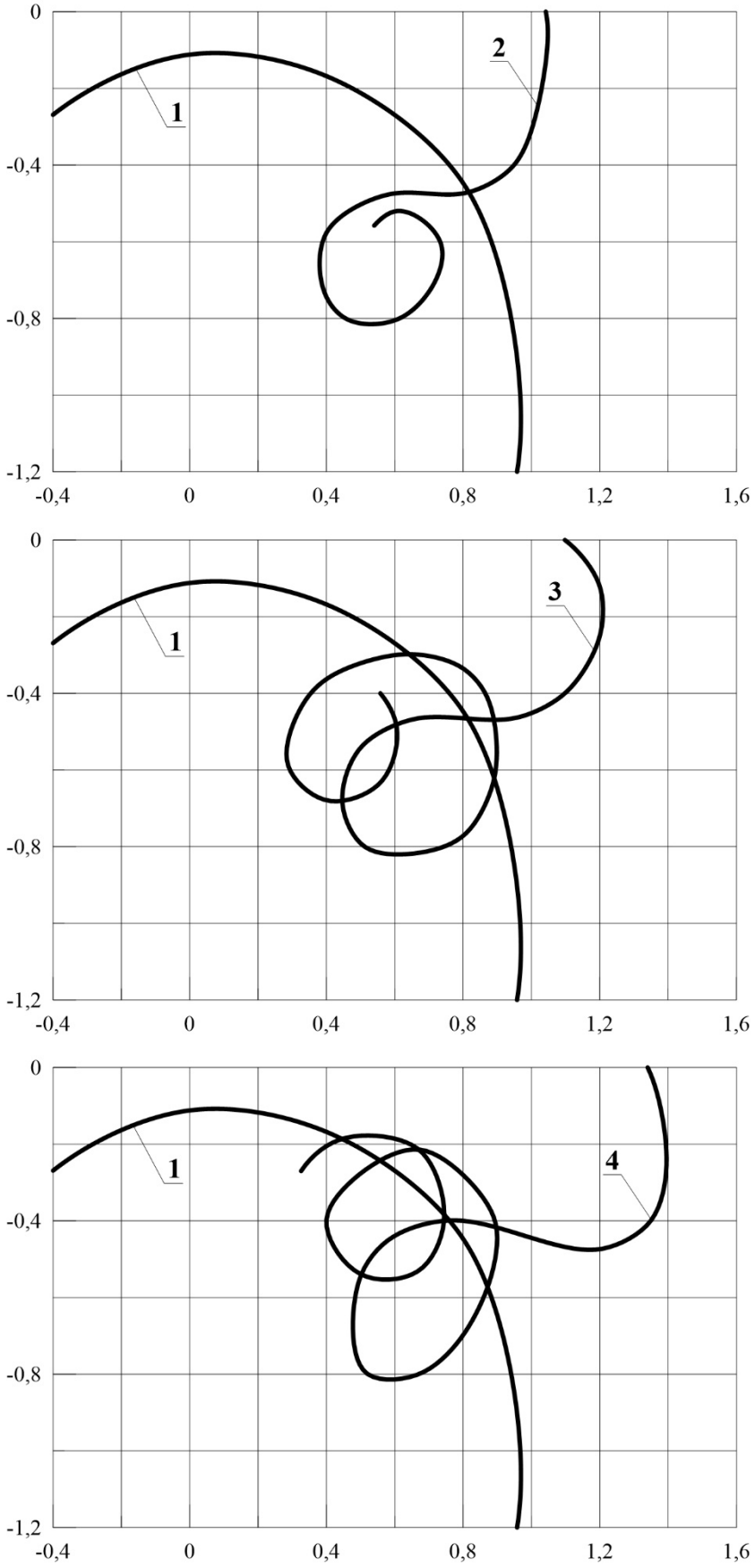


Рисунок 6.7 – Криві зміни комплексного сигналу $Z(t)$ при анормальному режимі генератора допоміжного двигуна

$$\theta(s) = \sum_{i=1}^{n-1} \theta_i(s_i)\beta_i + \theta_{n_{pr}}(s_n)\beta_n > \theta_y;\ \ Z(t) \in Z_{r1}, \tag{6.16}$$

де β – бінарна змінна, що занулює результати інтегрування:

$$\beta = \begin{cases} 1, & \theta_r > \theta_y \\ 0, & \theta_r < \theta_y \end{cases};$$

$\theta_r(s) = t_{r_{in}} - t_{r_{out}}$ – інтервальна оцінка часу знаходження за межами уставок Z_r, у разі вторинного потрапляння в зону пуску:

За великих прискорень контрольованого параметра часові алгоритми інтегральної оцінки виявляються малоефективними, хоча запобігають відмові у виявленні. Більш швидкодіючим є спосіб диференціальної оцінки часу, що ґрунтується на порівнянні часу знаходження контрольованого параметра в межах зони пуску з часом знаходження за межами цієї зони:

$$\sum_{i=1}^{n-1} \frac{\theta_i(s_i)}{\theta_r(s_i)} q_i > k_y;\ \ Z(t) \in Z_r, \tag{6.17}$$

де $\theta_i(s) = t_{i_{in}} - t_{i_{out}}$ – інтервальна оцінка часу знаходження $Z(t)$ у межах зони пуску; $\theta_r(s) = t_{r_{in}} - t_{r_{out}}$ – інтервальна оцінка часу знаходження $Z(t)$ поза зоною пуску; q_i – бінарна змінна, введена для організації циклічності алгоритму:

$$q_i = \begin{cases} 1, & \dfrac{\theta_i(s_i)}{\theta_r(s_i)} > k_y \\ 0, & \dfrac{\theta_i(s_i)}{\theta_r(s_i)} < k_y \end{cases}.$$

Розглянемо особливості функціонування алгоритмів експериментальних досліджень при виникненні різних дефектів у системі збудження. Дослідження наслідків, що виникають при різних відмовах, показують, що при всіх пошкодженнях, пов’язаних з обривом у колах збудження, коливальний характер $Z(t)$ пов’язаний передусім із циркуляцією струму в демпферних контурах або в бочці ротора. Розмах коливань, як правило, такий, що забезпечує правильність розпізнавання двох класів: G_1 – генератор справний, G_2 – генератор несправний. Однак за значних ковзань ротор генератора встигає провернутися кілька разів, що пов’язано з термічними і

динамічними впливами на конструктивні вузли та збільшенням імовірності втрати стійкості. Введення адаптації за допомогою коефіцієнтів α_i дає змогу, як показали експериментальні дослідження, зменшити максимальну кількість провертань з урахуванням реальних ковзань до 4-5, що безумовно значно збільшує швидкодію. Алгоритм диференціальної оцінки в цих умовах не працює, оскільки $\theta_r(s) = 0$ і виникає невизначеність в прийнятті рішення. Оптимальним за значних ковзань є алгоритм, заснований на підрахунку циклів у поєднанні з інтегральною оцінкою.

В умовах, коли дефект у колах збудження пов'язаний із замиканням обмотки на коротко, характеризується тим, що розмах коливань $Z(t)$ порівняно з попереднім випадком збільшений. Збільшення розмаху пов'язане з наведенням струму не тільки в демпферних контурах або в масиві ротора, а й у короткозамкненій обмотці збудження, причому частка струму в роторі, наведена в обмотці, становить від 70 до 80 % від сумарного струму. Реакція алгоритмів залежить від швидкості загасання вимушеної складової струму і від швидкості наростання наведених струмів. За швидкого набору ковзання можлива відмова алгоритму інтегрального оцінювання, але при цьому надійно працює алгоритм диференціального оцінювання.

Замикання обмотки збудження на опір супроводжується подальшим зростанням розмаху коливань. Це визначається такими складовими струму: загасанням струму збудження, зростанням наведених струмів в обмотці збудження, демпферних контурах і тілі ротора. Початковий етап процесу пов'язаний насамперед із загасанням струму збудження, причому чим більший опір, тим повільніше загасає струм. У цих умовах на першому етапі розмах коливань досягає значних величин. Коли алгоритм інтегральної оцінки непрацездатний. Але метод диференціальної оцінки по суті забезпечує розпізнавання в межах одного повороту. В подальшому, наведена складова струму починає превалювати над зменшуваною складовою струму збудження, що призводить до зменшення розмаху коливань, причому алгоритм диференціальної оцінки виявляється непрацездатним. Значно складніші процеси в умовах, коли зберігається зв'язок зі збудником. У міру ескалації анормального

режиму розмах коливань не тільки не зменшується, а може значно зрости. У таких умовах єдиним алгоритмом є диференціальна оцінка часових інтервалів.

Проведений аналіз результатів експерименту показує, що контроль тільки однієї з розглянутих ознак втрати збудження призводить або до значного збільшення часу виявлення анормального режиму, що пов'язано зі значними наслідками для конструктивних елементів генератора, або до швидкого виявлення зі збитком для селективності. Так, дані щодо роботи протиаварійної автоматики суднових електричних станцій свідчать, що використання алгоритмів із пуском за фактом потрапляння в зону частотних характеристик генератора і введенням витримки часу від 0,5 до 2,0 секунди призводить до збільшення часу виявлення, що досягає 10 секунд.

За цей час частота обертання генератора може досягти рівня уставки автомата безпеки дизельного двигуна, що призводить до поширення аварійної ситуації на тепломеханічне обладнання. Великі періоди вимкнення генератора також небезпечні для виникнення та розвитку дефекту внаслідок градієнта температур у конструктивних елементах ротора та статора, а також унаслідок термічного руйнування ізоляції. Важливо зауважити, що зазначений висновок було підтверджено в результаті експериментальних досліджень.

Організація автоматизованих систем управління вимагає більшої кількості класів адекватних числу керуючих впливів:

C_1 – відключити генератор;

C_2 – зменшити потужність на маховику двигуна на 20 %;

C_3 – зменшити потужність на маховику двигуна на 40 %;

C_4 – зменшити потужність на маховику двигуна на 60 %;

C_5 – відключити другорядні споживачі.

Розпізнавання великої кількості станів вимагає впровадження і більш складних алгоритмів.

Наступна група способів розпізнавання містить позиційні алгоритми. Як ознаки використовують такі контрольовані величини:

- відстані поточних значень $Z(t)$ від певних точок (позицій) Z_i. спостереження $|Z(t) - Z_i| = R_i$;
- фази зображення процесу на комплексній площині відносно позицій $arg[Z(t) - Z_i] = \varphi$;
- співвідношення наведених ознак R_i та φ, виміряних щодо різних точок.

Розглянемо як приклад двопозиційні способи розпізнавання. Перший із них заснований на вимірюванні відстаней комплексного сигналу, зображеного на площині, до позицій Z_1 і Z_2.

$$R = \frac{R_{Z_1}}{R_{Z_2}} > R_y, \qquad t \in \{t_1, t_2\},$$
$$R_{Z_1} = \sum_{k=1}^{n} |Z_1 - Z_k(t)| \cdot n^{-1}; \tag{6.18}$$
$$R_{Z_2} = \sum_{k=1}^{n} |Z_2 - Z_k(t)| \cdot n^{-1};$$

де n – кількість точок, у яких здійснюється вимірювання, $Z_k(t)$ – k точка $Z(t)$, у якій здійснюється визначення відстані $|Z_1 - Z_k(t)|$.

Порівнюючи процеси під час втрати збудження R_{FL} (Рисунок 6.8, А) і під час асинхронної роботи збудженого генератора R_{AO} (Рисунок 6.8, Б), легко переконатися, що є висока різниця станів генератора за ознакою (R).

Аналогічним чином як ознаку можна використовувати різницю фаз:

$$R = \frac{\Delta arg|Z_1 - Z(t)|}{\Delta arg|Z_2 - Z(t)|}, \qquad t \in \{t_1, t_2\}, \tag{6.19}$$

де $\{t_1, t_2\}$ – інтервал, у межах якого здійснюється визначення (R).

Стосовно наведених на Рисунках 6.8, 6.9 процесів результат $R_{FL} \gg R_{AO}$ зберігається і у варіанті виміру, отриманого згідно з виразом (6.19).

Друга група способів розпізнавання заснована на порівнянні поточного стану з еталонами, що відповідають анормальним режимам.

Для класифікації (M) станів генератора анормальні режими задаються кількістю (M) еталонів у вигляді дискретних значень $\check{Z}_{r_1}, \check{Z}_{r_2}, \dots, \check{Z}_{r_j}, \dots, \check{Z}_{r_n}$

де $r = 1, 2, \dots$ - номер анормального режиму.

Координати кожної точки можуть задаватися різними способами, однак, найприйнятнішим є завдання цих точок модулями опорів, відміряних від початку координат за фіксованих кутів $\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_N$.

На Рисунку 6.9 представлено розбиття площини на 16 секторів прямими, що виходять із початку координат під кутами $\varphi_1, \dots, \varphi_{16}$. Поточні значення Z_j знаходяться в моменти перетину з прямими $0\varphi_j$, тобто при фіксованих кутах між струмом і напругою. Відстані ΔZ_{rj} в цьому випадку знаходяться як різниця між еталонними і поточними значеннями опорів, що знаходяться на променях $0\varphi_j$.

Як приклад на Рисунку 6.9. представлено два еталони режиму втрати збудження і коливань у разі недостатнього збудження:

$$(\check{Z}_{11}, \check{Z}_{12}, \check{Z}_{13}, \check{Z}_{14}, \check{Z}_{15}, \check{Z}_{16}), (\check{Z}_{21}, \check{Z}_{22}, \check{Z}_{23}, \check{Z}_{24}, \check{Z}_{25}, \check{Z}_{26})$$

Значення координат еталонів, заданих у відносних одиницях та ступінь наближеності поточних значень до еталонів визначених відстанями до еталонів наведені у Таблиці 6.1.

Таблиця 6.1 – Числові значення еталонів та ступеня наближеності поточних значень до еталонів

Позначення	*r // j*	*j=1*	*j=2*	*j=3*	*j=4*	*j=5*	*j=6*
$\check{Z}_{rj}$	*r=1*	1.5	0.6	0.55	0.6	1.1	1.1
	r=2	1.8	1.9	1.7	1.2	1.5	1.9
ΔZ_{rj}	*r=1*	0.2	0.0	0.05	0.1	0.2	0.1
	r=2	0.3	1.3	1.3	0.7	0.6	0.8

В якості діагностичного критерію використаємо показник:

$$\delta_r = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{j=1}^{n} \Delta Z_{rj}^2}. \qquad (6.20)$$

Обчислені згідно з формулою (6.20) значення критеріїв відповідно дорівнюють: $\delta_1 = 0{,}053$; $\delta_2 = 0{,}37$. Згідно із зазначеним критерієм поточний стан має бути віднесено до асинхронного ходу при втраті збудження.

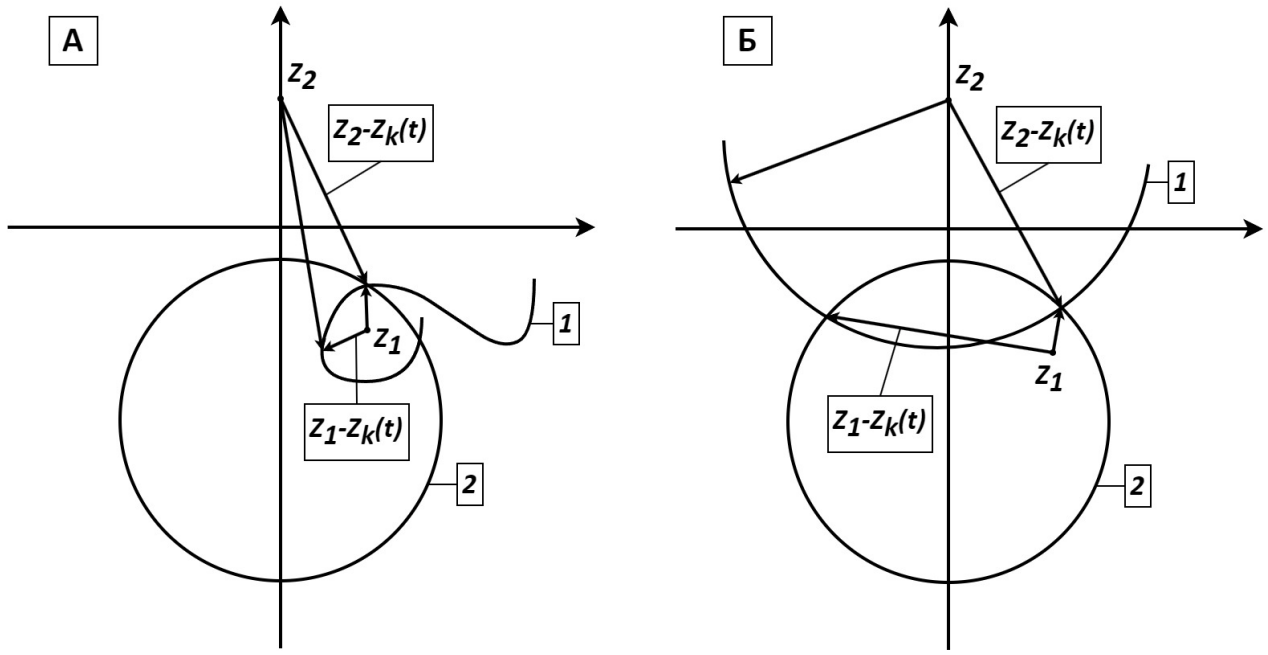


Рисунок 6.8 – Ілюстрація алгоритму позиційного виявлення анормального режиму синхронної машини

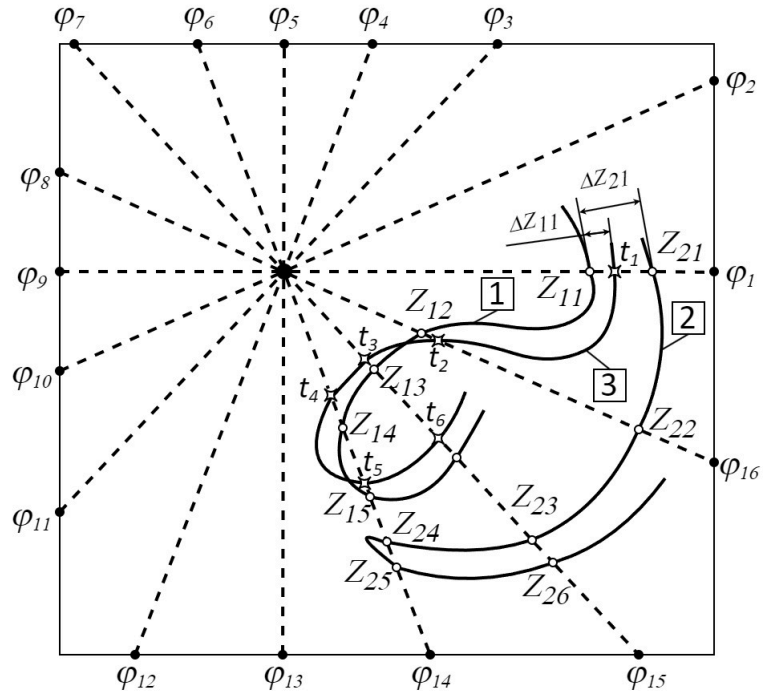


Рисунок 6.9 – Приклад розпізнавання анормальних режимів

Характерним для останнього алгоритму є послідовне вимірювання параметрів ΔZ_{rj} і при цьому на певному етапі необхідна зупинка, раціональне співвідношення між хибними розпізнаваннями та числом вимірів ознак які можна отримати,

здійснюючи вимірювання послідовно, та закінчуючи цей послідовний процес, коли досягнуто необхідної точності класифікації.

Отримані результати процесів автоматичного оцінювання стану суднових технічних засобів використовуються у рамках цифрової мінімаксної стратегії прогнозування термінів попереджувальної профілактики, яка описана у розділі 4.2.2.2.

6.5 Підвищення ефективності системи технічного обслуговування вантажного судна у складі цифрової стратегії

На першому етапі формування системи КПТОВС величини допустимої ймовірності запобігання відмовам системою технічного обслуговування визначаються виходячи з отримання середніх або низьких ризиків за кожним видом відмов. Далі приймається прийнятна для судноплавної компанії величина фінансового резерву на виконання непланових робіт. Проводиться підрахунок сумарного ризику і визначається фактично необхідний резерв. Якщо необхідний резерв виявився більшим, ніж наявний у розпорядженні технічних служб, має бути здійснено процедуру вибору робіт з технічного обслуговування, періодичність яких слід змінити або застосувати інший метод технічного обслуговування. Критерії вибору таких робіт можуть бути:

- Можливість застосування моніторингу та почастішання контролю для поліпшення профілактичних властивостей;
- Можливість зменшення інтервалів виконання регламентного технічного обслуговування;
- Можливість застосування контролю між операціями регламентного технічного обслуговування, тобто застосування комплексного методу технічного обслуговування з прогнозуванням технічного стану;
- Послідовно розглядати роботи, що роблять найбільший внесок у сумарний ризик відповідно до принципу Парето.

Процес зміни конфігурації системи технічного обслуговування триває доти, доки не буде отримано прийнятне поєднання планових і непланових робіт. Як правило, зменшення необхідного резерву тягне за собою збільшення планового

обсягу робіт, якщо не вдається застосувати завдання моніторингу в тому чи іншому вигляді.

Подальше вдосконалення конфігурації системи технічного обслуговування здійснюється виходячи з розв'язання завдань адаптивізації її параметрів, при цьому знову ж таки має перевірятися збереження на необхідному рівні співвідношення планових і непланових робіт.

6.5.1 Результати дослідження процесів адаптивізації параметрів системи технічного обслуговування за результатами одного процесу зміни технічного стану

Цей приклад є найпростішим, тому що ідеалізується система процесів, які інтерпретуються як один або обирається один як такий, що визначає потребу в технічному обслуговуванні. Відомо, що для допоміжних двигунів необхідність проведення моточистки значною мірою визначається зносом формуючої масляних кілець, унаслідок чого ефективність їхньої роботи падає, що призводить до значного збільшення витрат масла. Знос формуючої кільця призводить до збільшення зазору в замку за формулою:

$\Delta\delta = 2\pi \cdot \Delta d$, де Δd – середня зміна ширини масляного кільця в середньому інтервалі між регламентними моточистками Δt_{reg}, коли безпосередньо контролювали зміну зазорів у замках $\Delta\delta$. За експериментальними даними у процесі експлуатації було отримано значення $\Delta d = 0.44$ мм, при $\Delta t_{reg} = 6100$ годин, $\Delta\delta = 2 \cdot \pi \cdot 0.44 = 2.76$ мм.

У безрозмірних одиницях середня швидкість зміни технічного стану вузла визначиться за формулою:

$$\gamma_i = \frac{\Delta u_i}{\Delta t_{reg}} = \frac{1}{\Delta t_{reg}} \cdot \frac{\Delta\delta}{\delta_{lim} - \delta_{set}} = \frac{1}{6100} \cdot \frac{2.76}{4 - 1.15} = 0.159 \text{ тис.год}^{-1},$$

де установчий зазор $\delta_{set} = 1.15$ мм, а граничний зазор $\delta_{lim} = 4$ мм. При цьому коефіцієнт варіації швидкості зміни технічного стану становив ($V_v = 0.4$). Середнє напрацювання до досягнення гранично допустимого значення зазору в замку (4 мм)

унаслідок лінійного прогнозу зміни зазору або фактичних даних за вимірами під час моточистки склало ($T_m = 7900$) годин.

Для того, щоб скористатися розрахунковими кривими додатків для визначення робочих точок системи технічного обслуговування, необхідно визначити відносну періодичність регламентного технічного обслуговування:

$$\Delta T_{reg} = \frac{\Delta t_{reg}}{T_m} = \frac{6100}{7900} = 0.772$$

Використовуючи поліноміальну залежність результатів відпрацювання циклів експлуатації вантажного судна, представлену у Додатку Ж для регламентного методу за встановленої відносної періодичності технічного обслуговування $(\Delta T_{reg} = 0.772)$ для коефіцієнта варіації ($V_v = 0.4$) визначимо ймовірність запобігання досягненню граничного стану регламентною системою ТО $(P_{pre} = 0.5518)$, тривалість циклу експлуатації $(T_{cycle} = 0.699)$ та залишковий ресурс за зміною стану масляних кілець ($R_{res} = 0.321$).

Трудомісткість планових моточисток двигуна становить ($H_{sch} = 240$ люд. год). Якщо моточистка двигуна виконується в результаті досягнення граничного стану, збільшення трудомісткості оцінюється у 20%, тобто ($k = 1.2$).

Визначимо функцію витрат на виконання регламентного технічного обслуговування:

$$w = P_{pre} \cdot (1 - k) + k = 0.5518 \cdot (1 - 1.2) + 1.2 = 1.08964$$

Витрати віднесені до тривалості циклу експлуатації:

$$Y_{reg} = w/T_{cycle} = 1.08964/0.699 = 1.55886$$

Виражені в абсолютних одиницях витрати на виконання моточисток без урахування витрат на запасні частини становитимуть:

$$\frac{S_{reg}}{T_{cycle}} = \frac{Y_{reg} \cdot S_{sch}}{T_m} = \frac{Y_{reg} \cdot H_{sch} \cdot q \cdot 10^3}{T_m}$$

$$\frac{S_{reg}}{T_{cycle}} = \frac{1.55886 \cdot 240 \cdot 10 \cdot 10^3}{7900} = 473.58 \ \frac{\text{дол. США}}{\text{тис. год}}$$

де годинна ставка виконавців робіт встановлена в компанії ($q = 10$ дол. США/тис. год). Слід звернути увагу на відмінність отриманої величини витрат порівняно з величиною, що не враховує можливість виконання моточистки при досягненні граничного стану:

$$\frac{S_{reg}}{T_{cycle}} = \frac{H_{sch} \cdot q \cdot 10^3}{\Delta t_{reg}} = \frac{240 \cdot 10 \cdot 10^3}{6100} = 393.44 \ \frac{\text{дол. США}}{\text{тис. год}}$$

Слід зазначити, що прийняття збільшувального коефіцієнта ($k = 1.2$) до витрат на виконання робіт унаслідок досягнення двигуном граничного стану, є заниженим. Це особливо справедливо, якщо двигун головний, що визначає провізну здатність судна.

Витрати на придбання комплекту поршневих кілець для виконання моточистки становлять $s_2 = 500$ дол. США, проте з огляду на те, що замінні поршневі кільця мають залишковий ресурс ($R_{res} = 0.321$) фактичні витрати на змінно-запасні частини становитимуть:

$$S_{sp} = (1 + R_{res}) \cdot s_2 = (1 + 0.321) \cdot 500 = 660.5 \ \frac{\text{дол. США}}{\text{тис. год}}$$

Отримана величина витрат може бути уточнена підстановкою залишкових ресурсів для кожної із замінних деталей. Крім того, в цьому разі не враховували витрати довговічніших деталей, тобто тих, що замінюються через дві, три тощо моточистки – у цьому разі витрати на їхнє придбання з урахуванням залишкових ресурсів розподіляються на всі попередні операції технічного обслуговування. Витрати на змінно-запасні частини, віднесені до напрацювання, визначаються за формулою:

$$\frac{S_{sp}}{t} = \frac{1 \cdot 10^3}{T_{cycle} \cdot T_m} \sum_{i=1}^{n} s_i = \frac{1 \cdot 10^3}{0.699 \cdot 7900} \cdot 660.5 = 124.97 \ \frac{\text{дол. США}}{\text{тис. год}}$$

Таким чином сумарні витрати на виконання технічного обслуговування становлять: $473.58 + 124.97 = 598.55$ дол. США/тис. год.

Якщо перейти на ТО за станом за допомогою застосування контролю стану циліндрів двигуна за допомогою пневматичного індикатора, обліку витрати мастила на дизель, то прогнозовані витрати можуть істотно змінитися. Якщо, як і раніше,

забезпечувати таку саму ймовірність запобігання досягненню граничного стану $\left(P_{pre} = 0.5518\right)$, але виконувати чотири контрольні операції між моточистками, інтервал між якими може бути збільшено до $T_{cycle} = 0.92$ або в абсолютних одиницях $\Delta t_{reg} = 0.92 \cdot 7900 = 7268 \approx 7300$ годин. При цьому залишковий ресурс становитиме ($R_{res} = 0.24$). Крім того, якщо передбачити вісім контрольних операцій за періодичності моточисток 7300 годин імовірність запобігання граничному стану може бути піднято до величини $\left(P_{pre} = 0.75\right)$, але залишковий ресурс буде на дещо нижчому рівні ($R_{res} = 0.28$).

Тривалість циклу експлуатації становитиме $\left(T_{cycle} = 0.783\right)$. Безрозмірна функція витрат:

$$w = P_{pre}(1 - k) + k = 0.75 \cdot (1 - 1.2) + 1.2 = 1.05$$

Витрати віднесені до тривалості циклу експлуатації:

$$Y_{reg} = w/T_{cycle} = 1.05/0.783 = 1.341$$

Виражені в абсолютних одиницях витрати на виконання моточисток без урахування витрат на запасні частини становитимуть:

$$\frac{S_{reg}}{T_{cycle}} = \frac{Y_{reg} \cdot S_{sch}}{T_m} = \frac{Y_{reg} \cdot H_{sch} \cdot q \cdot 10^3}{T_m}$$

$$\frac{S_{reg}}{T_{cycle}} = \frac{1.341 \cdot 240 \cdot 10 \cdot 10^3}{7900} = 407.39 \ \frac{\text{дол. США}}{\text{тис. год}}$$

Витрати на змінно-запасні частини віднесені до напрацювання визначаються за формулою:

$$\frac{S_{sp}}{t} = \frac{1 \cdot 10^3}{T_{cycle} \cdot T_m} \sum_{i=1}^{n} s_i = \frac{1 \cdot 10^3}{0.783 \cdot 7900} (1 + 0.28) \cdot 500 = 103.46 \ \frac{\text{дол. США}}{\text{тис. год}}$$

Таким чином сумарні витрати на виконання технічного обслуговування становлять: $407.39 + 103.46 = 510.85$ дол. США/тис. год. Таким чином перехід на збільшену періодичність між регламентними технічними обслуговуваннями до 7300 годин забезпечить приблизно 15 % економії коштів на технічне обслуговування двигуна, однак при цьому необхідно збільшити витрати на контроль технічного стану.

Якщо одна контрольна операція має трудомісткість $1\,\text{люд.год}$, то витрати на 7 контрольних операцій становитимуть:

$$\frac{S_c}{T_{cycle}} = \frac{Y_{reg} \cdot S_c}{T_m} = \frac{Y_{reg} \cdot H_{sch} \cdot q \cdot 10^3}{T_m}$$

$$\frac{S_c}{T_{cycle}} = \frac{1 \cdot 7 \cdot 10 \cdot 10^3}{7900} = 8.86\ \frac{\text{дол. США}}{\text{тис. год}}$$

Якщо на судні встановлено три таких двигуни як дизель-генератори, то сумарний ефект для судна становитиме:

$$E = N \cdot (598.55 + 8.86 - 510.85) = 3 \cdot 96.56 = 289.68\ \frac{\text{дол. США}}{\text{тис. год}}$$

При напрацюванні кожного допоміжного двигуна на рік 4000 годин: $289.68 \cdot 4 = 1158.72\,\text{дол. США/рік}$. Якщо засіб контролю (пневмоіндикатор) коштує 250 дол. США, то він окупиться приблизно за 78 діб.

У тому разі, якщо вартість засобу контролю істотно вища, завдання можна поставити в дещо іншому формулюванні: яку максимальну ціну засобу контролю за передбачуваного терміну окупності може заплатити судноплавна компанія, коли застосує його для відомої кількості контрольованих об’єктів.

Отримані результати процесів адаптивізації параметрів системи технічного обслуговування за результатами одного процесу зміни технічного стану використовуються у рамках цифрової стратегії адаптивного призначення попереджувальних профілактичних робіт, яка описана у розділі 4.2.2.3.

6.5.2 Результати дослідження процесів адаптивізації параметрів системи технічного обслуговування за результатами одночасного аналізу двох процесів зміни технічного стану

Розглянемо складніший випадок аналізу поточних витрат на технічне обслуговування і варіанти прийнятих рішень щодо конфігурації системи, за яких будуть досягатися поставлені цілі. Як об’єкт дослідження взято баластний відцентровий насос НЦВ-400/30А, у якого інструкцією заводу-виготовлювача передбачено періодичні огляди з інтервалом 3 місяці, з трудомісткістю ($H_c = 1\,\text{люд.год}$) та ревізія через 5000 годин з трудомісткістю ($H_{rev} = 24\,\text{люд.год}$).

Годинна ставка виконавців робіт встановлена в компанії ($q = 10$ дол. США/тис. год) . Якщо технічне обслуговування насоса виконується внаслідок відмови, збільшення трудомісткості оцінюється у 20%, тобто ($k = 1.2$).

Експлуатаційна проблема: При виконанні ревізії через кожні 5000 годин зазвичай виявляється задовільний стан підшипників насоса і достатній запас по зазору в ущільненні корпус-робоче колесо. Під час підходу до термінів другої ревізії спостерігається істотне падіння подачі насоса. Технічний стан, що виявляється, свідчить про те, що зазор в ущільненні досяг гранично допустимих значень або перевищив його. Такий стан вимагає заміни робочого колеса і кільця ущільнювача або встановлення ремонтного кільця ущільнювача. Крім того, виявляється незадовільний стан підшипників насоса. Таким чином, періодичність ревізій, встановлена заводом-виробником, не відповідає реальним закономірностям зношування елементів насоса і потребує коригування. Тобто перша ревізія проводиться практично марно, а друга - пізно.

Робоче колесо піддається зношуванню у двох процесах: 1. зношення пари кільце ущільнювача - робоче колесо; 2. кавітаційне зношення лопаток робочого колеса. При цьому імовірно під час кожної третьої ревізії необхідно з цієї причини замінювати робоче колесо.

Потрібно розглянути питання про можливість уникнути постановки ремонтного кільця ущільнювача або заміни колеса через зношення ущільнення, а замінювати колесо під час третьої ревізії через зношення ущільнення і кавітацію робочого колеса.

У процесі вивчення даних отриманих за результатами відпрацювання системи технічного обслуговування в умовах експлуатації вантажного судна та оцінювання технічного стану в процесі прескриптивного технічного обслуговування визначено величини виміряних зазорів в ущільненні, а механіками зроблено оцінки залишкового ресурсу за станом поверхні робочого колеса через кавітацію. Результати двох послідовних ревізій для чотирьох насосів зведено в Таблицю З.1 Додатку З.

Будемо користуватися безрозмірними значеннями величин зазорів в ущільненні (u_i) і його прирощення між ревізіями (Δu_i):

$$u_i = \frac{\delta_i - \delta_{set}}{\delta_{crit} - \delta_{set}};\ \Delta u_i = \frac{\delta_i - \delta_{i-1}}{\delta_{prev} - \delta_{set}},$$

де δ_i – виміряний зазор у процесі першої ревізії, $\delta_{crit} = 0.8$ мм гранично допустимий зазор в ущільненні, $\delta_0 = \delta_{set}$ – установчий зазор. Якщо ΔT_{reg} – час, що минув від моменту зміни зазору від вихідного (δ_i) до поточного значення, то швидкість зміни технічного стану вузла ущільнювача між ревізіями визначається за формулою:

$$\gamma_i = \frac{\Delta u_i}{\Delta t_{reg}}.$$

Очікувані напрацювання до досягнення гранично допустимого зазору в разі сталості виявленої під час ревізії лінійної тенденції зміни технічного стану дорівнюють:

1. При дії тенденції до першої ревізії:

$$T_{11} = \frac{1}{\gamma_{11}};$$

2. При дії тенденції на інтервалі між першою та другою ревізіями:

$$T_{12} = T_{rev2} + \frac{1 - u_2}{\gamma_{12}}$$

У тих випадках, коли на момент виконання ревізії виявляли зазор, що перевищував гранично допустиме значення 0,8 мм, напрацювання до гранично допустимого стану визначали як момент часу між передостанньою та останньою ревізією:

$$T_{1i} = T_{rev(i-1)} + \frac{1 - u_{i-1}}{\gamma_{1i}},$$

а в нашому випадку:

$$T_{12} = T_{rev1} + \frac{1-u_1}{\gamma_{12}}.$$

Для процесу зміни технічного стану поверхні робочого колеса швидкість зміни технічного стану за кавітаційним зносом визначали за формулою:

$$\gamma_2 = \frac{1}{T_2},$$

де оцінка ресурсу $T_2 = R_{2res} + T_{sum}$, T_{sum} – сумарне напрацювання на момент оцінки залишкового ресурсу R_{2res}.

Таким чином, проаналізувавши результати відпрацювання системи технічного обслуговування в умовах експлуатації вантажного судна та оцінювання технічного стану в процесі прескриптивного технічного обслуговування, встановлено:

- За середнього напрацювання $T_{m1} = 9771$ годин доводиться замінювати або ремонтувати крилатку, замінювати підшипники насоса, ущільнювальне кільце, вартість комплекту деталей, що замінюються, становить приблизно 400 дол. США;
- Як альтернативу заміні комплекту кільця ущільнювача і робочого колеса може бути застосовано ремонтне кільце ущільнювача, з попереднім проточуванням колеса і підгонкою виготовленого в суднових умовах кільця з бронзової заготовки протягом 8 годин робочого часу із сумарною вартістю роботи і матеріалу – 85 дол. США;
- Необхідність заміни крилатки, зважаючи на її зношення внаслідок ерозії через кавітацію, за оцінками механіків, могла б виникнути за умови середнього напрацювання $T_{m2} = 16375$ годин, однак, якщо немає ремонтних кілець, доводиться замінювати колесо повністю;
- Необхідність заміни робочого колеса і кільця ущільнювача зумовлена надмірним (понад 0,8 мм) зазором між ними і відповідно падінням подачі насоса приблизно на 40 %.

Імовірно, надмірне зношування пари робоче колесо - кільце ущільнювача зумовлене зношуванням підшипників валу насоса. Згодом, внаслідок збільшеного люфту валу спостерігається напіврідинний режим тертя в парі кільце - робоче колесо. Таке припущення зроблено на підставі аналізу технічного стану Насоса 1, в якого в першу ревізію було виявлено інтенсивне зношення ущільнення робочого колеса ($\gamma_1 = 0.148 \cdot 10^{-3}$ год$^{-1}$), а також незадовільний стан підшипників насоса, які було замінено. У результаті в інтервалі до другої ревізії інтенсивність зношування істотно

знизилася і прийшла в норму ($\gamma_1 = 0.054 \cdot 10^{-3}$ год$^{-1}$), за величиною ближчою до інших випадків.

У результаті опрацювання фактичних даних за швидкістю настання гранично допустимого зазору в парі робоче колесо - кільце ущільнювача від установчого 0,3 мм до 0,8 мм визначено середню швидкість зміни технічного стану:

$\gamma_1 = 0.09775 \cdot 10^{-3}$ год$^{-1}$, за коефіцієнту варіації $V_v = 0.3$.

Середня швидкість кавітаційної ерозії, що призводить до необхідності заміни робочого колеса, становить:

$\gamma_2 = 0.06125 \cdot 10^{-3}$ год$^{-1}$, за коефіцієнту варіації $V_v = 0.11$.

Для того, щоб скористатися розрахунковими формулами отриманими за результатами відпрацювання системи технічного обслуговування в процесі експлуатації, наведеними у Додатку Ж, для визначення робочих точок системи технічного обслуговування, необхідно визначити відносну періодичність регламентного технічного обслуговування відносно швидкоплинного процесу:

$$\Delta T_{reg1} = \frac{\Delta t_{reg}}{T_{m1}} = \frac{5000}{10021} = 0.49895,$$

Для процесу кавітаційної ерозії, що повільно протікає, можливі терміни регламентної заміни робочого колеса під час третьої ревізії, могли б бути:

$$\Delta T_{reg3} = \frac{\Delta t_{reg3}}{T_{m2}} = \frac{5000 * 3}{16375} = 0.91603.$$

Використовуючи поліноміальну залежність результатів відпрацювання циклів експлуатації вантажного судна, представлену у Додатку Ж для регламентного методу за встановленої відносної періодичності технічного обслуговування $\Delta T_{reg1} = 0.49895$, для коефіцієнта варіації $V_{v1} = 0.3$ визначимо ймовірність запобігання відмовам прескриптивною системою технічного обслуговування $P_{pre1} = 0.9977$, тривалість циклу експлуатації $T_{cycle1} = 0.49953$, та залишковий ресурс за зміною стану ущільнення $R_{res1} = 0.51166$.

Під час другої ревізії, тобто через $\Delta T_{reg2} = 2 \cdot \Delta T_{reg1} = 2 \cdot 0.49895 = 0.9979$, імовірність запобігання відмовам через зношення ущільнення з тих самих

поліноміальних залежностей буде забезпечено на рівні $P_{pre2} = 0.36997$ з урахуванням того, що перша ревізія була контрольною операцією щодо другої, водночас тривалість циклу експлуатації становила $T_{cycle2} = 0.85853$, а залишковий ресурс $R_{res2} = 0.15651$. З огляду на те, що внаслідок зношення ущільнення знадобиться заміна колеса і кільця ущільнювача або принаймні встановлення ремонтного кільця, визначимо безрозмірні функції витрат за дві послідовні ревізії:

$$w_1 = P_{pre1}(1 - k) + k = 0.9977 \cdot (1 - 1.2) + 1.2 = 1.00046$$

$$w_2 = P_{pre2}(1 - k) + k = 0.36997 \cdot (1 - 1.2) + 1.2 = 1.126006$$

Під час розрахунку передбачалося 20 % збільшення витрат на технічне обслуговування в разі відмови, тобто $(k = 1.2)$.

Витрати віднесені до тривалості циклу експлуатації:

$$Y_{reg1} = w_1/T_{cycle1} = 1.00046/0.49953 = 2.003,$$

$$Y_{reg2} = w_2/T_{cycle2} = 1.126006/0.85853 = 1.312.$$

Далі виключаємо з розгляду випадок заміни робочого колеса під час першої ревізії, як найменш раціональний, і розглянемо два інші можливі варіанти:

- Під час другої ревізії заміна колеса і підшипників;
- Під час другої ревізії ремонт колеса і постановка ремонтного кільця, заміна підшипників, а під час третьої - заміна колеса.

Таким чином, перша ревізія після заміни колеса або для нового насоса не впливає на процес зміни технічного стану робочого колеса, якщо при цьому не проводиться заміна підшипників. Якщо вона проводиться, то перша ревізія впливає на процес зміни технічного стану ущільнювального кільця і сполученої поверхні колеса.

Якщо заміна робочого колеса через кавітаційний знос проводитиметься не під час другої, а в третій ревізії, з’являться додаткові витрати. Вони пов’язані з частковим відновленням колеса, а саме, парою колесо-ущільнювальне кільце. При цьому крива для ймовірності попередження відмови за станом ущільнення повертається у вихідну точку $P_{pre} = 1.0$, тоді як крива ймовірності відмови за кавітаційним зносом продовжує падати. З огляду на те, що потреба в заміні колеса тепер зумовлена другим

процесом зміни технічного стану, який відбувається з іншою швидкістю та коефіцієнтом варіації для неї $V_v = 0.11$, відносна періодичність роботи становитиме $\Delta T_{reg3} = 0.91603$, імовірність запобігання відмовам із урахуванням контролю під час двох попередніх ревізій $P_{pre3} = 0.77846$, тривалість циклу експлуатації $T_{cycle3} = 0.90693$, а залишковий ресурс із кавітаційного зносу становитиме $R_{res3} = 0.1063$. При виконанні заміни колеса під час третьої ревізії між ними виконуються загалом 9 оглядів і відповідно планова трудомісткість технічного обслуговування складе:

$$H_{sch3} = \sum_{i=1}^{3} H_{rev} + \sum_{i=1}^{9} H_c = 3 \cdot 24 + 9 \cdot 1 = 81 \text{ люд. год.},$$

Витрати на виконання третьої ревізії віднесені до одиниці часу становитимуть:

$$Y_{reg3} = \frac{w_3}{T_{cycle3}} = \frac{P_{pre3}(1-k)+k}{T_{cycle3}} = \frac{0.77846(1-1.2)+1.2}{0.90693} = 1.1515,$$

або в абсолютних одиницях:

$$\frac{S_{reg3}}{T_{cycle3}} = Y_{reg3} S_{sch3} \frac{1}{T_{m2}} = Y_{reg3} H_{sch3} q \frac{1}{T_{m2}} 10^3,$$

$$\frac{S_{reg3}}{T_{cycle3}} = 1.1515 \cdot 81 \cdot 10 \cdot \frac{10^3}{16375} = 56.96 \text{ дол. США.}$$

При виконанні заміни робочого колеса під час другої ревізії між ними виконуються загалом 6 оглядів, тому планова трудомісткість технічного обслуговування становитиме:

$$H_{sch2} = \sum_{i=1}^{2} H_{rev} + \sum_{i=1}^{6} H_c = 2 \cdot 24 + 6 \cdot 1 = 54 \text{ люд. год.},$$

Виражені в абсолютних одиницях витрати на виконання роботи без урахування витрат на запасні частини складуть для циклу з двох послідовних ревізій:

$$\frac{S_{reg2}}{T_{cycle2}} = Y_{reg2} S_{sch2} \frac{1}{T_{m1}} = Y_{reg2} H_{sch2} q \frac{1}{T_{m1}} 10^3,$$

$$\frac{S_{reg2}}{T_{cycle2}} = 1.312 \cdot 54 \cdot 10 \cdot \frac{10^3}{10021} = 70.70 \text{ дол. США.}$$

Таким чином, якщо заміна робочого колеса виконується під час другої ревізії, витрати на виконання ревізій будуть такі:

$$\frac{S_{reg2}}{T_{cycle2}} = 70.70 \text{ дол. США},$$

якщо під час другої ревізії колесо ремонтується, а заміна робочого колеса виконується під час третьої ревізії, то цикл експлуатації включає три послідовні ревізії:

$$\frac{S_{reg3}}{T_{cycle3}} = 56.96 \text{ дол. США}.$$

Розглянемо який вплив на витрати має вартість запасних частин. Під час першої ревізії, можливо, з імовірністю $1 - P_{pre1} = 1 - 0.9977 = 0{,}0023$ знадобиться замінити комплект підшипників вартістю 30 дол. США. Під час другої ревізії замінюється комплект підшипників і робоче колесо вартістю 400 дол. США або ремонтується колесо і встановлюється ремонтне кільце вартістю 85 дол. США, що включає вартість напівфабрикату, виготовлення і підгонку до колеса.

Витрати на заміну підшипників, що відмовили, під час першої ревізії становитимуть:

$$S_{bearings} = \left(1 - P_{pre}\right) \cdot s_1 = (1 - 0.9977) \cdot 30 = 0.07 \text{ дол. США}.$$

Під час другої ревізії витрати на придбання підшипників становитимуть 30$, оскільки всі підшипники замінюють.

Як видно із суті проблеми, робоче колесо піддається двом процесам зношування: ущільнювальної частини і кавітації робочої поверхні. Тому залишковий ресурс у будь-який момент часу в загальному випадку може бути різним за результатами протікання обох процесів. З огляду на те, що обидва процеси спричиняють необхідність виконання однієї й тієї самої роботи - ревізії та заміни або ремонту однієї й тієї самої деталі, у розрахункових формулах приймаємо мінімальний залишковий ресурс. За процесом зношування ущільнення через 10000 год або $\Delta T_{reg2} = 0.9979$, $R_{res2} = 0.15651$. За другим процесом кавітаційного зношування через цей самий час 10000 годин і відносний час за другим процесом:

$$\Delta T^*_{reg2} = \frac{10000}{T_{m2}} = \frac{10000}{16375} = 0.6107.$$

З огляду на те, що $P_{pre} = 1.0$ залишковий ресурс:

$$R_{res} \approx 1 - \Delta T^*_{reg2} = 1 - 0.6107 = 0.3893$$

Приймаємо $R_{res} = R_{res2} = 0.15651$.

Витрати на придбання робочого колеса в разі його профілактичної заміни під час другої ревізії становитимуть:

$$S_{whell} = (1 + R_{res}) \cdot s_2 = (1 + 0.15651) \cdot 400 = 462.61 \text{ дол. США}.$$

У разі, якщо колесо замінюється за відмовою, то витрати складатимуть: $S_{whell} = s_2 = 400$ дол. США.

Витрати на ремонт робочого колеса під час другої ревізії:

$$S_{whell\_repr} = 80 \text{ дол. США}.$$

Витрати на придбання робочого колеса під час третьої ревізії (через 15000 годин), якщо замінюється колесо, що має залишковий ресурс, становитимуть:

$$S_{whell} = (1 + R_{res3}) \cdot s_2 = (1 + 0.1063) \cdot 400 = 442.52 \text{ дол. США}.$$

Якщо замінюється колесо, що відмовило: $S_{whell} = s_2 = 400$ дол. США.

Витрати на заміну підшипників і ремонт або заміну робочого колеса на кожну тисячу відпрацьованих годин становитимуть:

якщо колесо замінюють під час другої ревізії

$$\frac{S_{sp}}{t} = \frac{1 \cdot 10^3}{T_{cycle2} \cdot T_{m1}} \sum_{i=1}^{n} s_i,$$

$$\frac{S_{sp}}{t} = \frac{1 \cdot 10^3}{0.85853 \cdot 10021}\left(0.07 + 30 + 462.61 \cdot 0.36997 + 400 \cdot (1 - 0.36997)\right) =$$

$$= 52.68 \frac{\text{дол. США}}{\text{тис. год}},$$

якщо колесо замінюють під час третьої ревізії, а під час другої виконують його ремонт:

$$\frac{S_{sp}}{t} = \frac{1 \cdot 10^3}{T_{cycle3} \cdot T_{m2}} \sum_{i=1}^{n} s_i,$$

$$\frac{S_{sp}}{t} = \frac{1 \cdot 10^3}{0.90693 \cdot 16375}(0.07 + 0.07 + 30 + 462.61 \cdot 0.77846 + 400 \cdot\cdot (1 - 0.77846)$$

$$+ 85) = 37.97 \frac{\text{дол. США}}{\text{тис. год}}.$$

Таким чином застосування ремонтного кільця забезпечує економію витрат на змінно-запасні частини у розмірі:

$$52.68 - 37.97 = 14.71 \text{ дол. США/тис. год.}$$

Таким чином сумарні витрати на виконання технічного обслуговування в разі заміни робочого колеса в процесі другої ревізії становлять:

$$70.70 + 52.68 = 123.38 \text{ дол. США/тис. год.}$$

А в разі заміни робочого колеса в третій ревізії за умови відновлення стану ущільнення:

$$56.96 + 37.97 = 94.93 \text{ дол. США/тис. год.}$$

У цьому прикладі видно, що основний ефект, у розмірі $123.38 - 94.93 = 28.45$ дол. США/тис. год, досягається проміжним відновленням робочого колеса. Причому в цьому випадку важливе значення має вартість відновлення.

За аналогією з попереднім прикладом може бути прогнозовано ефект від переходу на прескриптивне технічне обслуговування з контролем та прогнозуванням технічного стану. А в цьому разі він можливий, з огляду на те, що за допомогою індикатора стану підшипників, у складі системи ACMS, може бути визначено момент необхідної їх заміни для запобігання передчасному зносу ущільнювальної пари.

Отримані результати процесів адаптивізації параметрів системи технічного обслуговування за результатами одночасного аналізу двох процесів зміни технічного стану використовуються у рамках цифрової стратегії профілактики за відомого середнього напрацювання технічних засобів вантажних суден, яка описана у розділі 4.2.2.4.

6.5.3 Результати дослідження процесів динамічного корегування термінів технічного обслуговування вантажних суден

Періодичність технічного обслуговування суднової техніки встановлюється заводом виробником і визначається з використанням таких методів:

- за аналогією,
- за залишковим ресурсом,
- за допустимим рівнем безвідмовності,

- за допустимим рівнем недосягнення граничного стану.

Слід зазначити, що дотримання вказівок інструкції заводу-виробника, зокрема і щодо періодичності технічного обслуговування, є загальноприйнятим правилом для експлуатаційника. Однак у процесі експлуатації суден часто виникають ситуації, коли інструкція заводу виробника не повною мірою відображає можливі закономірності зміни технічного стану суднових технічних засобів. У результаті виникають два завдання:

- уточнення термінів подальшого технічного обслуговування за результатами попередніх;
- обґрунтованого корегування (адаптивізації) періодичність технічного обслуговування.

У керівних нормативних документах [435, 436, 439] наголошується, що посадова особа, до відповідальності якої відноситься загальне керівництво експлуатацією судна(старший механік), як найбільш кваліфікований фахівець на судні з інженерних питань, має право обґрунтовано змінювати терміни проведення технічного обслуговування, узгоджуючи це рішення із технічним менеджментом судноплавної компанії. З цієї причини проблема уточнення та обґрунтованої зміни періодичності технічного обслуговування важлива не тільки для заводу виробника, а й для судна.

За аналогією періодичність різних видів технічного обслуговування встановлюють шляхом визначення фактичної зміни технічного стану в попередньо призначені моменти часу за попереднім досвідом і подальшим поступовим уточненням. Цей метод використовують для призначення інтервалів між операціями технічного обслуговування для суднових технічних засобів нової конструкції. Після опрацювання даних дослідної експлуатації заводом-виробником остаточно встановлюється періодичність технічного обслуговування, яку вносять в інструкцію. Застосування цього методу обґрунтовується природною поступовою наступністю конструкції і технології виготовлення вузлів технічних об’єктів. Цей метод може бути використаний для уточнення термінів технічного обслуговування за результатами попередніх операцій технічного обслуговування. Особливо це важливо в тих

випадках, коли на момент виконання технічного обслуговування деталі високої вартості параметри технічного стану якої досягли значень, близьких до гранично допустимих, і вирішується питання, що потрібно робити: замінити деталь зараз і втратити частину вартості її з невикористаним ресурсом, або залишити в експлуатації та на який термін.

За зміною зовнішніх ознак призначається періодичність робіт, пов'язаних із видаленням експлуатаційних відкладень (забруднення, нагар, сажа, накип, обростання, корозія тощо), відновленням захисних покриттів, а також здійсненням інших операцій, необхідність виконання яких визначають візуально.

Уточнення періодичності за допустимим рівнем досягнення незадовільного або досягнення аварійного стану пропонується здійснювати за однією методикою. При цьому використовувати: аварійне значення параметра технічного стану в разі використання допустимого рівня досягнення аварійного стану та незадовільне значення параметра в разі застосування незадовільного стану. Допустимі рівні аварійного стану та незадовільного стану приймати відповідно до рекомендацій наведених нижче.

Розглянемо розв'язання задачі щодо використання вимог з недопущення відмов (аварійного стану). Використаємо позначення: (a_{us}) – незадовільне значення параметра технічного стану; (a_0) – початкове (після введення в експлуатацію, технічного обслуговування, ремонту) значення параметра технічного стану; (a) – поточне значення параметра технічного стану.

Під час визначення термінів технічного обслуговування за залишковим ресурсом необхідно мати у своєму розпорядженні дані за призначеними ресурсами об'єктів до виконання певного виду технічного обслуговування і дані за швидкістю витрати ресурсу.

$$T_{R0} = T_{Rm} - T_{Ru} = \frac{\left|\frac{a_{us} - a}{a_{us} - a_0}\right|}{\gamma_R(t)} = \frac{1 - u}{\gamma_R(t)},$$

де T_{Ru} — використаний ресурс; T_{Rm} – середній ресурс;

$u = |(a_{us} - a)/(a_{us} - a_0)|$ – безрозмірний параметр технічного стану; $\gamma_R(t)$ – швидкість зміни параметра, год$^{-1}$.

Як зазначалося у Розділі 5, швидкість зміни технічного стану являє собою суму детермінованої та випадкової компонент (5.30):

$$\gamma(t) = \alpha(t) + \delta(\alpha).$$

Тому залишковий ресурс, що визначається, являє собою деяку середню величину, яка свідчить, що при законі розподілу, наприклад, близькому до нормального, до цього моменту часу, найімовірніше, приблизно 50 % об'єктів матимуть незадовільне значення параметра технічного стану, а приблизно 50 % - після нього. Така точність у визначенні термінів необхідного технічного обслуговування не завжди може вважатися задовільною. Для того, щоб врахувати фактичний можливий розкид реалізацій залишкового ресурсу через випадкову компоненту швидкості зміни технічного стану можна скористатися відомим методом визначення довірчого інтервалу для випадкової величини. Якщо за даними експлуатації відомі (N) фактичних значень швидкості зміни технічного стану $\gamma_{R_i}(t)$ при $(i = 1, 2, \dots, N)$, та відповідні значення параметрів технічного стану (u_i),то за ними може бути визначено (N) різних значень залишкового ресурсу $\left(T_{R0_i}\right)$, користуючись наведеною вище формулою, та значення коефіцієнта варіації:

$$V_t = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N}\left(T_{R0_m} - T_{R0_i}\right)^2}{N-1}}}{T_{R0_m}}.$$

У тому разі, якщо в розрахункові формули для визначення залишкового ресурсу підставити значення параметра технічного стану $(u_i = 0)$, цей спосіб дає змогу визначати періодичність технічного обслуговування, тому що визначається залишковий ресурс для вихідного стану. Далі можна скористатися відомими формулами або графіками для визначення довірчого інтервалу, наведеними нижче. При цьому можна задаватися різними значеннями довірчої ймовірності ($\beta = 0.8, \beta = 0.9, \beta = 0.95$). Нижче наведено формули для двох розподілів напрацювань до відмов - Вейбулла і логарифмічно нормального, наведені в [343], які можна використовувати

як вираження для напрацювань до потреби в технічному обслуговуванні. Ці розподіли обрано з огляду на те, що для них немає обмежень за величиною коефіцієнта варіації для напрацювань.

Для розподілу Вейбулла значення коефіцієнтів (b) визначаються залежно від величини коефіцієнта варіації (V_t) [343]:

$$b = \begin{cases} 0.953/(V_t - 0.047), & V_t = 0.23 \div 1.2 \\ 1.037 \cdot {V_t}^{-1.07}, & V_t < 0.23 \end{cases}.$$

Залежно від прийнятої довірчої ймовірності фактичне значення залишкового ресурсу перебуватиме в інтервалі:

$$T_{R0_m} \cdot \delta_{low} \div T_{R0_m} \cdot \delta_{hi}.$$

Необхідні формули представлено в Додатку И. Виконуючи технічне обслуговування в моменти часу, що належать до отриманого інтервалу, буде забезпечено досягнення незадовільного значення параметра, що характеризує технічний стан, з імовірністю, що дорівнює прийнятій довірчій імовірності (β).

Виконуючи технічне обслуговування в моменти часу, визначені вище, буде забезпечено досягнення незадовільного значення параметра технічного стану, тим самим буде забезпечено використання ресурсу, близьке до повного, що передбачено інструкцією заводу-виробника. Однак за такого розв'язання задачі цілком можна очікувати й істотного зниження профілактичних властивостей системи технічного обслуговування через те, що в цьому разі не враховується зв'язок розподілів напрацювань до відмови і до незадовільного значення параметра. У зв'язку з цим, більш виправданим буде таке рішення, яке спрямоване не на досягнення незадовільного стану, а на попередження відмов.

Для забезпечення профілактичних властивостей системи технічного обслуговування необхідно скористатися величинами розрахункових гамма-відсоткових ресурсів, що визначаються за середніми ресурсами та прийнятим значенням допустимої ймовірності недосягнення граничного стану (γ) (рекомендації щодо вибору див. нижче). Так для розподілу Вейбулла гамма-процентний залишковий ресурс:

$$T_{R0_\gamma} = \frac{T_{R0_m}}{K_b}\left[\ln\left(\frac{100}{\gamma}\right)\right]^{\frac{1}{b}}.$$

Для розподілу Вейбулла значення коефіцієнтів (b) визначаються залежно від величини коефіцієнта варіації. Значення коефіцієнта (K_b) визначається поліноміальною залежністю зображеною на Рисунку 5.1.

Звертають на себе увагу результати використання наведеної формули для розрахунку гамма-відсоткового ресурсу. Здавалося б, з огляду на те, що використання гамма-відсоткових ресурсів неминуче тягне за собою почастішання виконуваних технічних обслуговувань, для того, щоб забезпечити недосягнення граничного стану на рівні (γ), а не середньому, що відповідає 50 %, і це об'єктивно призведе до не повного використання ресурсу деталей особливо високої вартості. Однак це не так, принаймні щоразу визначаючи технічний стан у процесі технічного обслуговування і, відповідно, визначаючи залишковий гамма-відсотковий ресурс, наближається до середнього фактично реалізований гамма-відсотковий ресурс.

Розглянемо як приклад втулку циліндра допоміжного двигуна (дизель-генератора), середня швидкість зношування втулки становить приблизно $(0.02\ \text{мм}/\text{тис.год})$, і за коефіцієнта варіації для швидкості зношування $(V_v = 0.3)$. За умови призначеного гранично допустимого діаметрального зношування втулки $(0.8\ \text{мм})$ середній ресурс становитиме $(T_{Rm} = 0.8/0.02 * 1000 = 40000\ \text{год})$. Якщо скористатися гамма-відсотковим ресурсом як для елемента, схильного до зносостійких відмов, то необхідно задаватися допустимим рівнем досягнення граничного стану $(1 - \gamma = 20\ \%)$. У цьому разі 80 % ресурс становитиме:

$$T_{R0_\gamma} = \frac{T_{R0_m}}{K_b}\left[\ln\left(\frac{100}{\gamma}\right)\right]^{\frac{1}{b}} = \frac{40000}{0.899}\left[\ln\left(\frac{100}{80}\right)\right]^{\frac{1}{3.761}} = 29861\ \text{год}.$$

Природно, гнітить різниця середнього і 80 % ресурсів $(T_{Rm} = 40000 - 29861 = 10139\ \text{год})$ години, як потенційно, можливо, недовикористаний ресурс. Водночас слід пам'ятати, що фактично до вичерпання 80 % ресурсу буде зроблено 3 обміри втулки в процесі моточистки. Припустимо, що діятиме середня швидкість

зношування $(0.02\ \text{мм/тис.год})$, тоді в процесі кожної з трьох очікуваних моточисток через приблизно 10000 годин буде виявлено 80 % залишковий ресурс:

Через 10000 годин:

$$T_{R0_\gamma} = \frac{T_{R0_m}}{K_b}\left[\ln\left(\frac{100}{\gamma}\right)\right]^{\frac{1}{b}} = \frac{30000}{0.899}\left[\ln\left(\frac{100}{80}\right)\right]^{\frac{1}{3.761}} = 22395\ \text{год.}$$

Через 20000 годин:

$$T_{R0_\gamma} = \frac{T_{R0_m}}{K_b}\left[\ln\left(\frac{100}{\gamma}\right)\right]^{\frac{1}{b}} = \frac{20000}{0.899}\left[\ln\left(\frac{100}{80}\right)\right]^{\frac{1}{3.761}} = 14930\ \text{год.}$$

Через 30000 годин:

$$T_{R0_\gamma} = \frac{T_{R0_m}}{K_b}\left[\ln\left(\frac{100}{\gamma}\right)\right]^{\frac{1}{b}} = \frac{10000}{0.899}\left[\ln\left(\frac{100}{80}\right)\right]^{\frac{1}{3.761}} = 7465\ \text{год.}$$

І якщо останню моточистку виконувати не через 10000 годин, як це робилося раніше, а через 7500 годин, то буде забезпечено однаковий рівень запобігання досягненню граничного стану за цим процесом зношування – 80 %. Таким чином, навіть якщо втулка буде замінена через 37465 години, цей фактично реалізований ресурс істотно ближчий до середнього, ніж до 80 % визначеного заздалегідь – 29861 година.

Наведений приклад демонструє наближення гамма-відсоткового ресурсу до середнього при виконанні проміжного контролю та збереженні постійної тенденції зміни технічного стану. І, таким чином, у разі виконання контролю технічного стану достатньо орієнтуватися на середні ресурси, за винятком останнього інтервалу, коли гамма-відсотковий залишковий ресурс менший за періодичність контрольних операцій. З іншого боку, з огляду на наявність істотного запасу надійності, що забезпечується різницею критичного значення параметрів граничного стану і заданих заводом в інструкції гранично-допустимих, за наявності проміжного контролю доцільніше орієнтуватися на середні ресурси, а не на гамма-відсоткові.

Для швидкого визначення періодичності прескриптивного технічного обслуговування із забезпеченням попередження відмов можливо використовувати наближену формулу:

$$\Delta T_{maintenance} = T_m - k\sigma.$$

де T_m – середнє напрацювання до відмови при середньоквадратичному відхиленні щодо її напрацювань (σ). Замість середнього наробітку до відмови може бути підставлено визначений за фактичними даними залишковий ресурс $\left(T_{R_{res}}\right)$. Коефіцієнт приймають $(k = 2.3)$, якщо закон розподілу нормальний і потрібно забезпечити ймовірність безвідмовної роботи, що дорівнює $(P = 0.99)$.

Отримані результати процесів динамічного корегування термінів технічного обслуговування вантажних суден використовуються у рамках:

цифрової стратегії адаптивного призначення попереджувальних профілактичних робіт, яка описана у розділі 4.2.2.3;

цифрової стратегії вибору оптимальних термінів проведення робіт технічного обслуговування за повної інформації (цифровий двійник), яка описана у розділі 4.2.2.5;

цифрової стратегії вибору оптимальних термінів проведення робіт технічного обслуговування за неповної інформації (цифрова модель, цифрова тінь) , яка описана у розділі 4.2.2.6.

Висновки по розділу 6

1. Для дослідження і оцінки процесів підвищення ефективності систем технічного обслуговування вантажних суден на основі цифрової стратегії технічного обслуговування суднових технічних засобів в умовах експлуатації були розроблені пристрої для реєстрації аналогових та цифрових сигналів, струмовий перетворювач та обчислювач частоти сигналу, які призначені для встановлення на технічних засобах вантажних суден та об’єднуються у суднову інформаційну автоматизовану систему моніторингу стану СТЗіК «ACMS». Розроблено автоматичну інформаційну систему «ShipDiMRO» у межах Web-сервісу віртуального підприємства «shipmonitoring.org», що спеціалізується на експлуатації водного транспорту. Розроблено схему для інформаційного обміну між елементами систем «ACMS» та «ShipDiMRO».

2. У процесі експериментальних досліджень визначення параметрів системи технічного обслуговування для заданих умов автоматичного оцінювання стану технічних засобів вантажних суден встановлено , що метод ідентифікації стану за базою даних, з одного боку, створює принципову можливість розв’язання зворотної задачі аналізу температурного простору (або розподілу іншого фізичного параметру). Однак вимагає зберігання та обробки великих обсягів інформації з використанням методів машинного навчання у межах цифрових стратегій.

3. В процесі експериментальних досліджень визначення параметрів системи технічного обслуговування для заданих умов автоматичного оцінювання стану технічних засобів вантажних суден у складі системи КПТОВС виявлено, що контроль тільки однієї з розглянутих ознак втрати збудження призводить або до значного збільшення часу виявлення анормального режиму, що пов’язано зі значними наслідками для конструктивних елементів генератора, або до швидкого виявлення зі збитком для селективності. Дані щодо роботи протиаварійної автоматики суднових електричних станцій свідчать, що використання алгоритмів із пуском за фактом потрапляння в зону частотних характеристик генератора і введенням витримки часу від 0,5 до 2,0 секунди призводить до збільшення часу виявлення, що досягає 10 секунд.

4. Експериментальне визначення параметрів системи технічного обслуговування для заданих умов їхньої адаптивізації у складі системи КПТОВС демонструє значний сумарний ефект у розмірі 289.68 дол.США/тис.год, як за результатами одного процесу зміни технічного стану допоміжного двигуна, так і у розмірі 28.45 дол.США/тис.год за результатами одночасного аналізу двох процесів зміни технічного стану баластного насосу.

5. У процесі експериментальних досліджень визначення параметрів системи технічного обслуговування для заданих умов динамічного корегування термінів технічного обслуговування вантажних суден у складі системи КПТОВС отримано збільшення фактично реалізованого ресурсу циліндрової втулки допоміжного двигуна з 74.6 % за регламентного методу технічного обслуговування до 93.7 % за

прескриптивного методу технічного обслуговування із контролем і прогнозуванням технічного стану.

6. Результати проведених досліджень свідчать по те, що використання цифрових стратегій у складі системи КПТОВС забезпечують підвищення ефективності системи технічного обслуговування. Отримані результати експериментальних випробувань стали основою узагальнення результатів досліджень та розробки математичних моделей системи КПТОВС для підвищення ефективності системи технічного обслуговування в умовах експлуатації.

Матеріали розділу 6 опубліковано в джерелах [118, 119, 123, 124, 350, 404, 405, 406, 410, 417].

РОЗДІЛ 7
ДОСЛІДЖЕННЯ НА МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЯХ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ СИСТЕМ ТЕХНІЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ ВАНТАЖНИХ СУДЕН

7.1 Розробка загального методу адаптивізації параметрів системи технічного обслуговування шляхом застосування цифрових стратегій для підвищення ефективності системи технічного обслуговування вантажного судна

Задача адаптивізації параметрів системи технічного обслуговування принципово вирішується за допомогою вибору, для реалізації в рамках цифрової стратегії, одного з таких критеріїв:

- Мінімізації відносних витрат часу на усунення відмов або на знаходження в стані технічного обслуговування (знаходження максимуму коефіцієнта технічного використання);
- Мінімізація сумарних витрат на технічне обслуговування (критерій ефективності використання ресурсів);
- Максимальна потрібність в технічному обслуговуванні об’єкта, що зберіг працездатність (критерій – потрібності в ТО).

Варто підкреслити, що задачу адаптивізації параметрів необхідно аналізувати у контексті управління параметрами використовуваної системи технічного обслуговування та її оптимізації через перехід до більш ефективного методу технічного обслуговування. Оптимізаційні процеси мають проводитись з урахуванням допустимих ризиків і відповідно до принципу ALARP (as low as reasonably practicable), що передбачає мінімізацію ризиків до рівня, коли подальше їх зниження стає нераціональним.

Безсумнівно, формування системи технічного обслуговування, яка забезпечить мінімальні витрати, є не зовсім коректною постановкою задачі. Важливою умовою розв’язання цієї задачі є віднесення до витрат на технічне обслуговування не тільки планових витрат, а й непланових, включно з можливою втраченою вигодою в разі відмови обладнання. Таким чином, адаптивізація процесів технічного обслуговування трансформується у безперервну оптимізацію процесів управління

відмовами. Визначення запланованих витрат на технічне обслуговування зазвичай не становить особливих труднощів, за винятком витрат на заміну деталей. Більшість номенклатури змінних частин замінюється при досягненні незадовільного стану, а не за принципом профілактичної заміни (підшипники ГТН, тонкостінні підшипники ДВЗ). Заводи виробники не прагнуть довести до відома експлуатаційників очікувані ресурси більшості, особливо дорогих деталей. Отже, прогнозування потреби в запасних частинах зазвичай здійснюється на підставі попереднього досвіду чи аналізу надійності. Наприклад, у системі річкового транспорту України існували стандарти витрати деталей двигунів внутрішнього згоряння для групи десяти однакових двигунів за певний період експлуатації. Втрати, асоційовані з відмовами, представляють собою ще більш невизначений параметр.

Часові витрати на непланове технічне обслуговування можуть бути оцінені з певним ступенем достовірності за допомогою аналізу наслідків відмов, в тому числі на основі даних про експлуатацію. Водночас, визначення часових і, зокрема, фінансових витрат на ліквідацію відмов, які призводять до простою транспортного засобу, становить більш складну задачу. Зазвичай, більшість відмов, що спричиняють простій судна, є результатом непередбачуваного співпадіння різних випадкових подій, причому усунення хоча б однієї з цих подій може перервати цю послідовність і запобігти простою.

Такий шлях, заснований на аналізі повних витрат на технічне обслуговування, видається найбільш перспективнішим, хоча його реалізація потребує впровадження системи для всебічного обліку витрат. Існують системи обліку витрат, такі як MOSyS, AMOS, CoCoS, shipmonitoring.org, проте лише MOSyS та shipmonitoring.org передбачають систематичний аналіз операційної діяльності, на відміну від інших зазначених інформаційних систем.

Крім того, в багатьох судноплавних компаніях старші механіки суден навіть не мають доступу до інформації щодо фактичних витрат компанії, як на усунення відмов, так і на планові потреби, що, на думку автора дослідження, є необґрунтованим. У зв’язку з частковою закритістю такої інформації будь-які розробки в області витратної оптимізації повинні бути спрямовані на загальне

використання, а не вирішення окремих проблем. Компанія повинна самостійно вирішувати, як використовувати отримані результати, враховуючи особливості своєї діяльності.

У літературі відсутня інформація, що стосується адаптивізації параметрів системи технічного обслуговування, проте активно досліджується їх оптимізація. Найбільш доцільним методом для вирішення цієї є пошук екстремумів для коефіцієнта технічного використання та готовності в залежності від частоти проведення регламентованого технічного обслуговування або перевірок технічного стану під час нього, як за станом, так і при проведенні комплексного технічного обслуговування. Крім того, існує розв'язання оптимальної задачі щодо визначення розмірів зони незадовільного стану (визначення оптимального попереджувального допуску) [296]. Ця група оптимізаційних задач базується на наявних даних про часові витрати на планове технічне обслуговування та позапланове технічне обслуговування.

Під час адаптивізації плану регламентного технічного обслуговування за максимумом коефіцієнта оперативної готовності на певний період часу (x) можна використовувати відповідне рівняння [296]:

$$\frac{T_{sch}}{T_{rec}+x} = 1 - \frac{1}{1 - Q(\Delta t_{reg}) + \lambda(\Delta t_{reg}) \times \int_0^{\Delta t_{reg}} [1 - Q(\Delta t_{reg})] dt} \qquad (7.1)$$

де $1 - Q(\Delta t_{reg}) = P(\Delta t_{reg})$ – ймовірність попередження відмов системою регламентного технічного обслуговування, що проводиться з періодичністю Δt_{reg} та інтенсивністю відмов $\lambda(\Delta t_{reg})$; T_{sch} – тривалість планового технічного обслуговування; T_{rec} – час відновлення після відмови.

Якщо в якості оптимізованої величини взяти максимум коефіцієнта технічного використання, тоді оптимальна періодичність регламентованого технічного обслуговування (Δt_{reg}) може бути визначена з даного виразу:

$$\frac{T_{sch}}{T_{rec} - T_{sch}} = \lambda(\Delta t_{reg}) \times \int_0^{\Delta t_{reg}} [1 - Q(\Delta t_{reg})] dt - Q(\Delta t_{reg}), \qquad (7.2)$$

Подібно до цього, для технічного обслуговування за станом оптимальна періодичність контрольних операцій визначається з максимуму коефіцієнта готовності, виходячи з наступного виразу:

$$\frac{1-Q(x+\Delta t_c)}{\int_0^{\Delta t_c}[1-Q(x+\omega)]d\omega}=\frac{\left(T_{cf}-T_{cg}\right)f(\Delta t_c)+1}{\Delta t_c+\left(T_{cf}-T_{cg}\right)Q(\Delta t_c)+T_{cg}}, \quad (7.3)$$

де T_{cf} – час на контроль несправного об'єкта, T_{cg} – час на контроль справного об'єкта, Δt_c – періодичність контрольних операцій, $f(\Delta t_c)$ – щільність розподілу відмов, а їхня ймовірність – $Q(\Delta t_c)$, ξ – випадковий час до відмови, $\omega = t - \xi$.

Під час прогнозування періодичності технічного обслуговування можна вибрати як мету максимальну прогнозну ймовірність досягнення об'єктом незадовільного стану при збереженні його працездатності [24]. З міркувань максимального використання закладеного ресурсу, коли технічне обслуговування виконують у максимальному наближенні до непрацездатного стану, незадовільний стан має бути призначено якомога ближче до непрацездатного. На Рисунку 7.1 представлено процес розв'язання задачі адаптивізації, коли термін регламентного технічного обслуговування призначається за максимумом різниці ймовірності досягнення незадовільного стану та відмови. Існуючі закономірності зміни технічного стану зазвичай передбачають відповідну спадкоємність законами настання відмов закономірностей настання незадовільного стану, коли виконане технічне обслуговування вважатиметься своєчасним. Таким чином, в основі рішення лежить припущення про те, що закони настання відмов є продовженням процесів зміни технічного стану.

Варто відзначити, що практично всі наведені вище відомі принципові рішення оптимізаційних задач наслідки відмов ураховують через різницю в часі усунення відмови і планового технічного обслуговування, аналогічно і для витрат. З іншого боку, сучасні вимоги національних і міждержавних нормативних актів стосовно системи технічного обслуговування та ремонту суден вимагають застосування системи планово-попереджувального обслуговування.

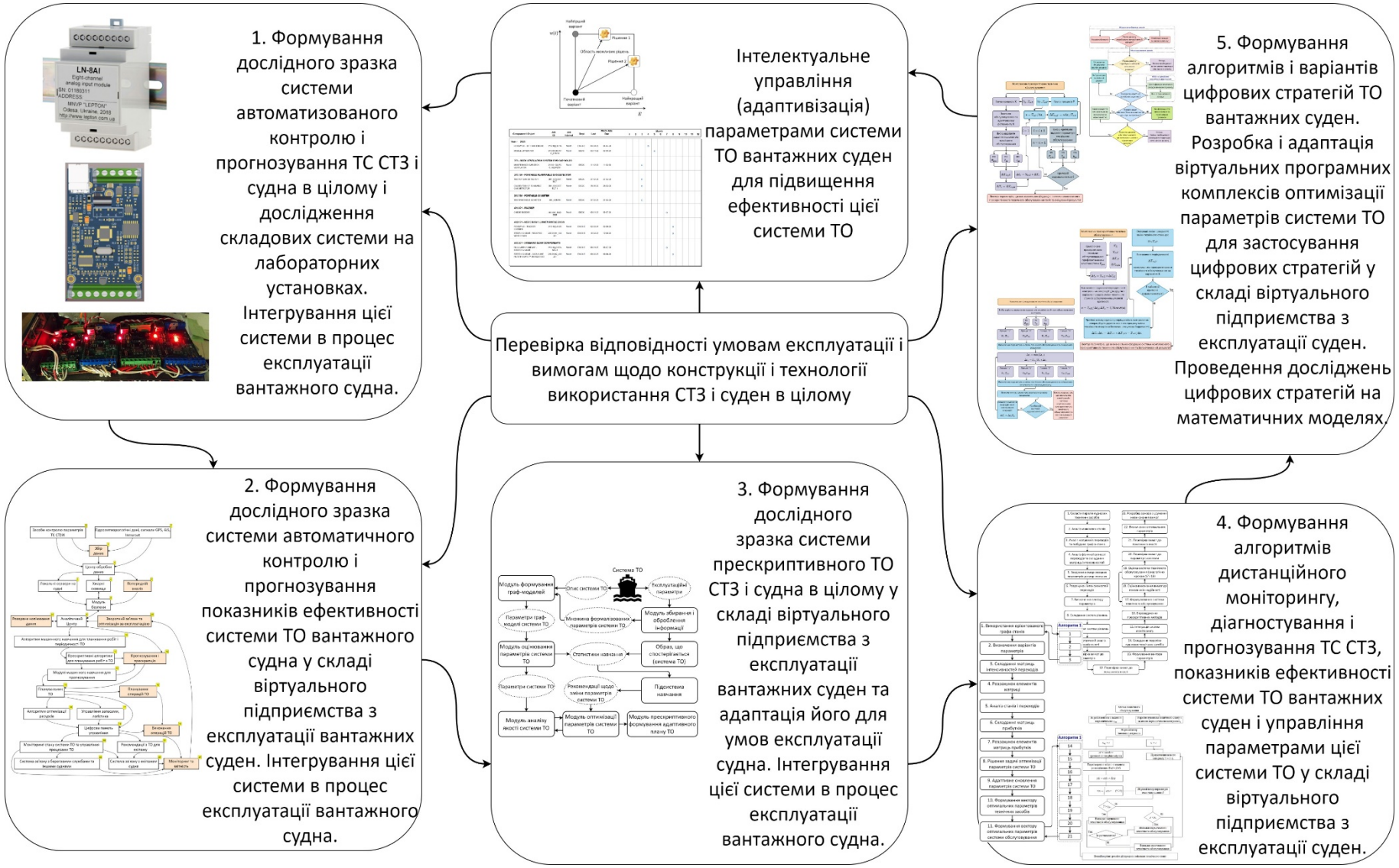


Рисунок 7.1 – Формування і дослідження процесу адаптивізації (інтелектуального управління) параметрів системи технічного обслуговування шляхом застосування цифрових стратегій для підвищення ефективності системи технічного обслуговування вантажного судна

Як наслідок, виникає питання про те, а яка частина виконуваних відповідно до принципів адаптивізації параметрів системи технічного обслуговування будуть плановими. Наприклад, чи можна говорити про можливість застосування нехай навіть комплексного технічного обслуговування, якщо ймовірність того, що воно буде виконано за планом, становитиме 50-70%. Очевидно, що ні, це не можливо. Потрібно розглядати придатність рішень оптимізаційних задач також з точки зору забезпечення безвідмовності при їх впровадженні.

Під час призначення періодичності технічного обслуговування або контролю технічного стану для об'єктів експлуатації як цілі обирають: а) відповідний рівень попередження відмов між плановими операціями технічного обслуговування; б) відповідний рівень ймовірності настання незадовільного технічного стану.

Фактично це означає необхідність за відомого опису непрацездатного стану призначення незадовільного стану (тобто призначення попереджувального допуску). З міркувань максимального використання закладеного ресурсу, коли технічне обслуговування виконується в максимальному наближенні до непрацездатного стану, незадовільний стан має призначатися якомога ближче до непрацездатного. Будемо вважати, що наявні закономірності зміни технічного стану, як правило, передбачають відповідну спадкоємність законами настання відмов закономірностей настання незадовільного стану, коли виконане технічне обслуговування вважатиметься своєчасним.

7.2 Результати використання запропонованих методик при проведенні адаптивізації параметрів системи технічного обслуговування за максимальним коефіцієнтом технічного використання, ефективністю використання ресурсів і за періодичністю технічного обслуговування в процесі формування цифрової стратегії

7.2.1 Адаптивне формування параметрів системи технічного обслуговування за максимальним коефіцієнтом технічного використання

Особливості адаптивного формування параметрів системи технічного обслуговування за максимальним коефіцієнтом технічного використання викладено у Додатку М26.

$$\begin{aligned} Z = {} & C[0] + C[1] * X + C[2] * Y + C[3] * X^2 + C[4] * X * Y + \\ & + C[5] * Y^2 + C[6] * X^3 + C[7] * X^2 * Y + C[8] * X * Y^2 + C[9] * Y^3 + \\ & + C[10] * X^4 + C[11] * X^3 * Y + C[12] * X^2 * Y^2 + C[13] * X * Y^3 + \\ & + C[14] * Y^4 + C[15] * X^5 + C[16] * X^4 * Y + C[17] * X^3 * Y^2 + \\ & + C[18] * X^2 * Y^3 + C[19] * X * Y^4 + C[20] * Y^5 + C[21] * X^6 + \\ & + C[22] * X^5 * Y + C[23] * X^4 * Y^2 + C[24] * X^3 * Y^3 + \\ & + C[25] * X^2 * Y^4 + C[26] * X * Y^5 + C[27] * Y^6 \end{aligned} \quad (7.4)$$

З огляду на викладене вище, використання адаптивних підходів дає змогу встановлювати адекватний алгоритм експлуатації, що враховує особливості прийнятого порядку виконання технічного обслуговування і контролю. При цьому застосовуючи змішані моделі експлуатації - одночасного здійснення комплексного прескриптивного технічного обслуговування, що включає в себе як регламентне, так і технічне обслуговування за станом.

7.2.2 Адаптивне формування параметрів системи технічного обслуговування за ефективністю використання ресурсів

Особливості адаптивного формування параметрів системи технічного обслуговування за максимальним коефіцієнтом технічного використання викладено у Додатку М27.

Для аналізу питомих витрат усі вони поділяються на дві групи – ті, що залежать і ті, що не залежать від тривалості циклу експлуатації (T_{cycle}):

$$Y_{reg} = \frac{w}{T_{reg}} + \frac{w_t(t)}{T_{reg}}, \quad (7.5)$$

$$Y_{cond} = \frac{w}{T_{cond}} + \frac{w_t^{cond}(t)}{T_{cond}}, \quad (7.6)$$

$$Y_{comp} = \frac{w}{T_{comp}} + \frac{w_t^{comp}(t)}{T_{comp}}, \quad (7.7)$$

Для регламентного методу технічного обслуговування застосовується формула (7.5), для технічного обслуговування за станом застосовується формула

(7.6) , для комплексного технічного обслуговування застосовується формула (7.7).

Функція витрат при застосуванні методу за відмовами:

$$Y_{fail} = \frac{w + w_t^{fail}(t)}{T_{fail}}, \tag{7.8}$$

Якщо знехтувати витратами на контроль, перша складова для всіх методів однакова (окрім ТО за відмовами), і відрізняється тільки тривалістю циклу $\left(T_{cycle}\right)$, до якого віднесено витрати:

$$\frac{w}{T_{fail}} = \left(P_{pre}(1-k) + k\right)/T_{fail}, \tag{7.9}$$

У розділі 5 було наведено графік для множника $\left(1/T_{cycle}\right)$, з якого видно, що діапазон змін цієї величини може досягати трикратної величини від застосування технічного обслуговування за станом до технічного обслуговування за розкладом за однакової ймовірності запобігання відмов за однакової ймовірності попередження відмов. Тому за однакових профілактичних властивостей відмінність у величинах питомих витрат за цикл експлуатації може бути суттєвою.

Розгляд кривих питомих витрат на змінно-запасні частини $\left(w_t(t)/T_{cycle}\right)$, наведених у Розділі 5 та додатках у вигляді компонент $\left(u_{sp}\right)$, показує, що ці величини не мають точок мінімуму або максимуму всередині робочого інтервалу виконання різних видів технічного обслуговування, а являють собою монотонні криві. Витрати на змінно-запасні частини зростають у міру зростання ймовірності запобігання відмовам особливо значно в разі застосування методу за розкладом.

Якщо результатом пошуку мінімуму питомих витрат може виявитися результат, коли ймовірність запобігання відмовам являє собою величину на рівні 0.6-0.5, коли стає важко назвати таку систему технічного обслуговування планово-попереджувальною. З іншого боку, як правило, така ситуація описується незначною величиною відмінності витрат між мінімальним

значенням і величиною витрат, що є при застосуванні технічного обслуговування за відмовами. Крім того, у цьому випадку наслідки відмов, що описуються коефіцієнтом к, зазвичай дорівнюють $(k < 3)$.

У тих випадках, коли наслідки відмов під час регламентного технічного обслуговування істотні $(k > 3)$, екстремум питомих витрат виражений яскравіше і переміщається в область високих імовірностей попередження відмов.

Для пошуку мінімуму питомих витрат на регламентне технічне обслуговування необхідно розв'язати рівняння щодо (P_{pre}):

$$\frac{dY_{reg}}{dP_{pre}} = \frac{d\left(\frac{w}{T_{cycle}}\right)}{dP_{pre}} + \frac{d\left(\frac{w_t(t)}{T_{cycle}}\right)}{dP_{pre}} = 0, \qquad (7.10)$$

або:

$$T_{cycle} - P_{pre}\frac{dT_{cycle}}{dP_{pre}} - \frac{1}{1-k}\left(\frac{k}{T_{cycle}}\frac{dT_{cycle}}{dP_{pre}} + \sum_{i=1}^{N}\frac{C_i}{W_{reg}}(F_i)\right) = 0, \qquad (7.11)$$

де:

$$F_i = \frac{dR_{res,i}}{dP_{pre}} - \frac{\left(1 + R_{res,i}\right)dT_{cycle}}{T_{cycle}dP_{pre}}.$$

Проводячи аналіз результатів чисельного розв'язання рівняння (7.11) для деяких випадків співвідношення планових і непланових витрат на технічне обслуговування і витрат на змінно-запасні частини, слід зазначити, що в разі не яскраво вираженого екстремуму, тобто в разі $(k < 3)$ спостерігається низька точність розв'язання рівняння. Розв'язання цієї проблеми скоріше має лише теоретичний інтерес і не є важливим для практики, тому що оптимізація в царині низьких профілактичних властивостей системи є неприйнятною або, принаймні, потребує додаткової оцінки ризиків відмов.

Можливі варіанти застосування комплексного методу технічного обслуговування:

1. У процесі виконання регламентованих робіт, параметри яких визначено характером і швидкістю перебігу будь-якого процесу зміни технічного стану, виконується контроль технічного стану, зумовлений перебігом іншого процесу

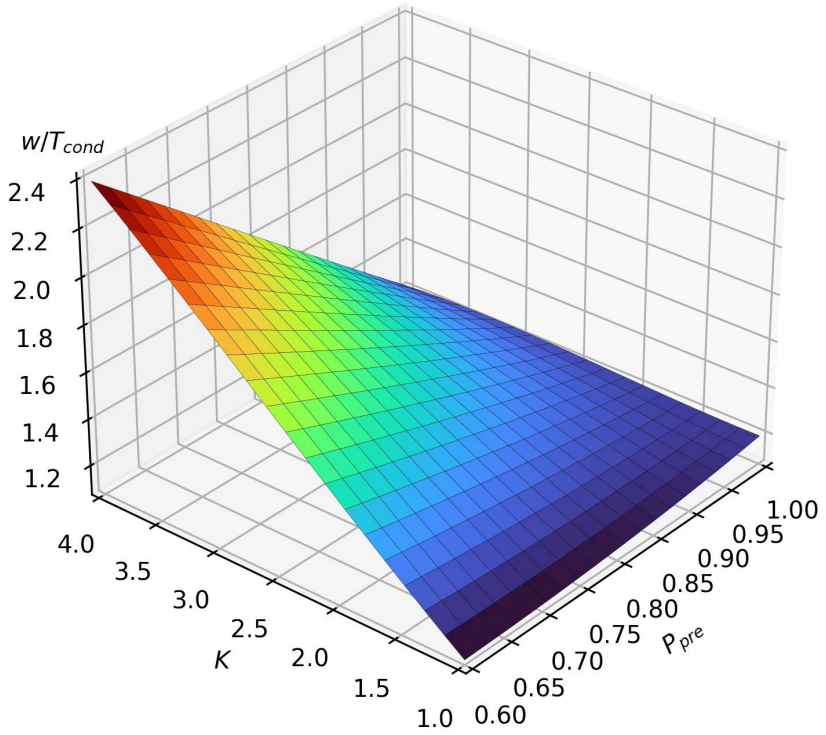


Рисунок 7.2 – Приклад залежності питомих витрат на виконання технічного обслуговування без урахування вартості змінно-запасних частин

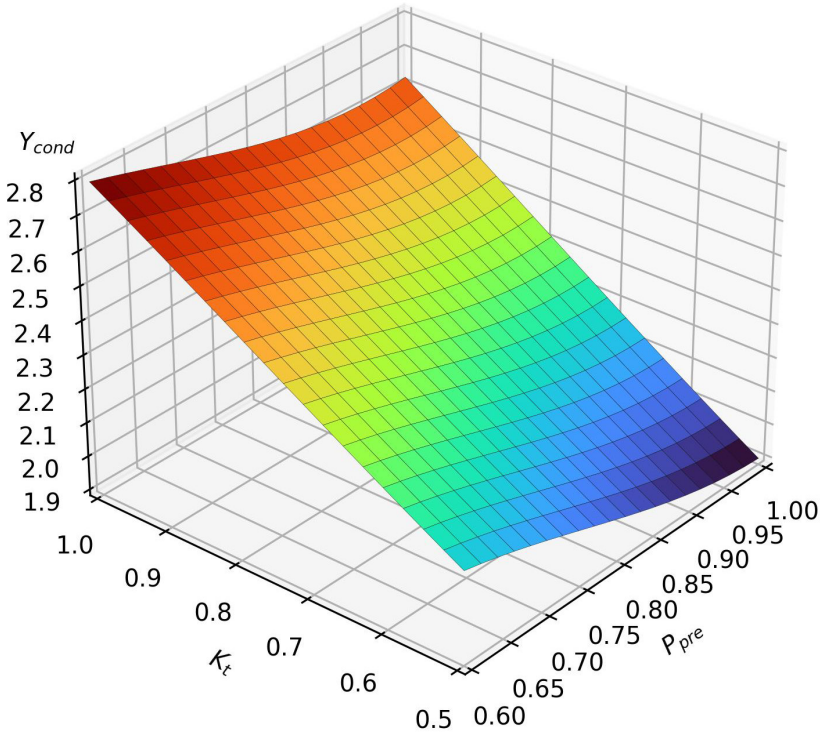


Рисунок 7.3 – Приклад залежності питомих витрат на виконання технічного обслуговування з урахуванням вартості змінно-запасних частин

зміни технічного стану. Наприклад, під час заміни мастила в редукторі проводиться контроль стану підшипників і зубчастих зачеплень. Наприклад, під час регламентованої заміни підшипника колінчастого валу визначають стан шийок колінчастого валу і стан постелі підшипника. Під час заміни поршневих кілець визначається знос канавок поршнів і необхідність заміни головки. За цим принципом побудовані системи технічного обслуговування більшості складних технічних об'єктів.

2. У тих випадках, коли фактичні умови експлуатації та режими, якість змінних деталей, що застосовуються, призводить до відхилення в більший або менший бік середньої швидкості зміни технічного стану та її коефіцієнта варіації. Термін регламентного технічного обслуговування задається у вигляді діапазону напрацювань за умови виконання проміжного контролю технічного стану. Як приклад, для сучасних дизелів, як правило, періодичність моточисток задається заводом-виробником у вигляді діапазону напрацювань $(T_{min} - T_{max})$.

3. Контроль технічного стану дає змогу виконувати контроль одночасно кількох процесів, виконання технічного обслуговування за показаннями, принаймні, одного з них з огляду на технологічні особливості виконання (доступу, наприклад) призводить до виконання комплексного технічного обслуговування, яке містить регламентні технічного обслуговування, навіть якщо за результатами перебігу відповідних процесів необхідності в цих роботах поки що немає. Такий вид комбінованого технічного обслуговування є комбінованим за фактом виконання, а не за завданням.

4. Крайній термін виконання технічного обслуговування задається вимогами класифікаційного товариства, коли для більшості суднового устаткування раз на п'ять років для виконання чергового огляду має бути проведено детальний огляд з розбиранням механізму, технічного засобу. У тих випадках, коли регламентований термін виявляється дещо меншим за п'ятирічний, є сенс прийняти саме п'ятирічний термін регламентного технічного обслуговування або кратний йому за умови проміжного контролю. Тобто в цьому випадку, фактично регламентне технічне обслуговування буде виконуватися

через п’ять років, через 2,5 роки або 1 раз на рік. Менші інтервали в цьому випадку не розглядаються, тому що при черговому огляді зараховуються результати виконаних оглядів за останній рік. У разі узгодження з класифікаційним товариством допускається збільшення, до 50 %, термінів між виконанням капітального ремонту окремих суднових технічних засобів або конструкцій з обов’язковим проведенням контролю та прогнозування їх технічного стану, що дає змогу значно збільшувати міжремонтні інтервали і в такий спосіб підвищувати ефективність системи технічного обслуговування за критерієм ефективності використання ресурсів.

7.2.3 Результати адаптивізації періодичності перевірок і операцій технічного обслуговування суднового аварійного джерела енергії

Особливості адаптивізації періодичності перевірок і операцій технічного обслуговування суднового аварійного джерела енергії викладено у Додатку М28.

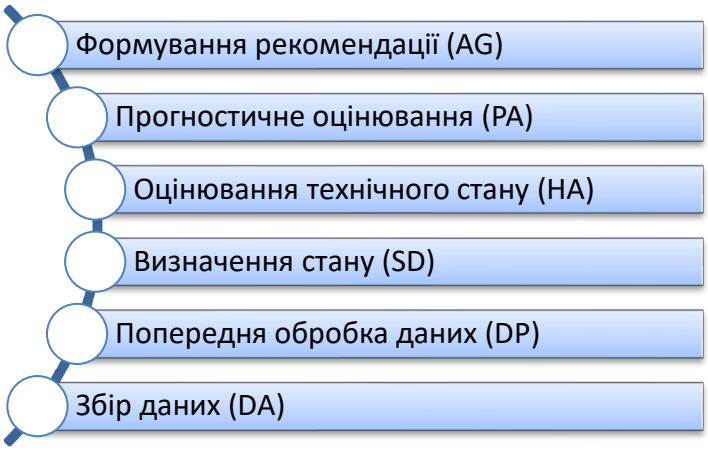


Рисунок 7.4 – Функціональні блоки OSA-CBM [258]

Щоб забезпечити порівнянність між оцінкою RBC (Cap_{rem}) і врахувати вплив температури, необхідна температурна компенсація. Метод прямого вимірювання передбачає визначення вимірюваної робочих параметрів батареї, які демонструють відтворюваний і чіткий зв’язок з Cap_{rem}. Така змінна повинна бути практично вимірюваною, наприклад, напруга батареї (V), імпеданс батареї (Z) і час відновлення напруги (τ) після відключення струмового навантаження. Однак, оскільки зв’язок між робочими параметрами акумулятора і Cap_{rem} часто

залежить від температури, дуже важливо також вимірювати температуру акумулятора. Залежність (f_T^d), де (d) вказує на пряму, а (T) - на температурний параметр, між виміряними параметрами батареї та Cap_{rem} може бути збережена в системі, тобто:

$$Cap_{rem} = f_T^d(V, Z, \tau) \tag{7.12}$$

Загальна напруга батареї V_{bat} визначається різницею між потенціалами електродів E_p і E_n, тобто:

$$V_{bat} = E_p - E_n = \left(E_p^{eq} \pm \eta_p^k \pm \eta_p^d\right) - \cdots - \left(E_n^{eq} \mp \eta_n^k \mp \eta_n^d\right) \pm I \sum R_\Omega \tag{7.13}$$

де E_p^{eq}, E_n^{eq} – рівноважний потенціал кожного електрода; η_p^k, η_n^k - кінетичний надлишковий потенціал кожного електрода; η_p^d, η_n^d - дифузійний надлишковий потенціал кожного електрода; R_Ω - омічні опори електродів та електроліту.

Попередня обробка даних є критично важливим кроком у забезпеченні точності та надійності виміряних даних RBC. Крім компенсації зовнішніх впливів на дані вимірювань, таких як температура і стан заряду, важливе значення має виявлення аномалій та їх обробка. Наприклад, збільшення RBC без заряджання може вказувати на відхилення або аномалію в даних. Варто зазначити, що оскільки на RBC впливає температура навколишнього середовища, то при підвищенні температури навколишнього середовища або системи може бути зафіксоване більш високе значення RBC. Цей ефект особливо помітний для малих середніх втрат RBC, і навіть незначні неточності в температурній компенсації можуть призвести до збільшення еталонного значення RBC $Cap_{rem,ref}$. У цьому сценарії значення $Cap_{rem,ref}$ з попереднього вимірювання на $(SVC - 1)$ розглядається як верхня межа еталонного значення для нового вимірювання. Тому розрахунок виконується наступним чином:

$$Cap_{rem,ref} = min\left(Cap_{rem,ref}(SVC - 1), Cap_{rem,ref}\right) \tag{7.14}$$

$$d_i = Cap_{rem,ref,i-1} - Cap_{rem,ref,i} \tag{7.15}$$

$$\bar{d}_n = \frac{\sum_{i=1}^{n} d_i}{n} \tag{7.16}$$

$$EOP_{avg,n} = \frac{D_a}{\bar{d}_n} \tag{7.17}$$

де $Cap_{rem,ref,n}$ –вимірювання RBC з компенсацією температури після SVC_n, та (n) як кількість SVC в точці вимірювання. Середнє значення деградації, обчислене за допомогою рівняння (7.16), та загальна межа деградації для контрольованої системи D_a, дозволяють розрахувати кінець прогнозу (EOP), тобто прогнозований час відмови після SVC_n. Перевага цього методу полягає в його обчислювальній простоті та неявному врахуванні всіх деградацій системи, доступних до моменту вимірювання. Тим не менш, цей метод чутливий до помилкових вимірювань або викидів, які можуть вплинути на його надійність.

Для підвищення стійкості до викидів також реалізовано прогноз відмов на основі лінійної регресії спостережуваних даних вимірювань, так званий метод регресії. Чутливість параметрів цього методу порівнюється з результатами, отриманими за допомогою методу середнього значення. Формула регресії після вимірювання (n) призначена для апроксимації всіх наявних даних вимірювань лінійною функцією з метою мінімізації суми квадратичних помилок (SSE) [321]:

$$y_n = \alpha + \beta_1 \cdot X_n \tag{7.18}$$

$$SSE = \sum (y_n - \hat{y}_n)^2 \tag{7.19}$$

У рівнянні (7.18) коефіцієнт (α) представляє номінальний стан системи без деградації, який штучно фіксується при заданому для даної симуляції початковому значенні RBC у 100 %. Нахил (β_1) характеризує середню деградацію системи на один SVC за умови мінімізації SSE у рівнянні (7.19). SVC_n після якого прогнозується втрата RBC, позначається через X_n. Рівняння (7.19) включає справжні дані вимірювань y_n і дані, отримані за допомогою методу регресії, $\hat{y}_n$, після SVC_n. Інформація про нахил буде використана для обчислення EOP для методу регресії, подібно до рівняння (7.17), за допомогою середнього значення деградації, розрахованого в рівнянні (7.16), і загальної межі деградації для контрольованої системи D_a. У той час як метод середнього значення неявно

враховує всі наявні деградації системи до моменту вимірювання, регресійний метод підвищує стійкість до викидів і помилкових вимірювань.

$$EOP_{reg,n} = \frac{D_a}{\beta_1} \tag{7.20}$$

У світлі відсутності фактичних даних, для оцінки RBC аварійного джерела живлення буксира було використано імітаційне моделювання. Зокрема, для моделювання втрат RBC було використано нормальний розподіл з випадковими щоденними падіннями RBC, який було обрізано зліва на рівні 0 %. Для забезпечення надійності результатів і врахування притаманної системі випадковості було проведено моделювання методом Монте-Карло з 1000 прогонів (Таблиця 7.1). Дані, отримані в результаті цього моделювання, називаються істинними даними, які слугують сурогатом реальних даних з фактичним значенням EOL [321].

Таблиця 7.1 - Опис налаштувань параметрів

Параметр	**Значення**	**Одиниця вимірювання**
Цикли симуляції	1000	-
Середній показник втрати RBC	0.05 – 2.0	% / day
Стандартне відхилення втрат RBC	0.0 – 2.0	% / day
Номінальний новий стан	100	%
Поріг технічного обслуговування	60	%

Для визначення оптимального підходу до прогнозування за різних вхідних параметрів виконано симуляції для всіх варіацій параметрів обох методів.

Оцінювання запропонованих методів проводиться з використанням метрик, наведених у [321]. Важливим параметром є прогностична точність (визначається рівнянням 7.21), яка представляє собою розбіжність між EOP та фактичним EOL.

$$PA = |EOP - EOL| \tag{7.21}$$

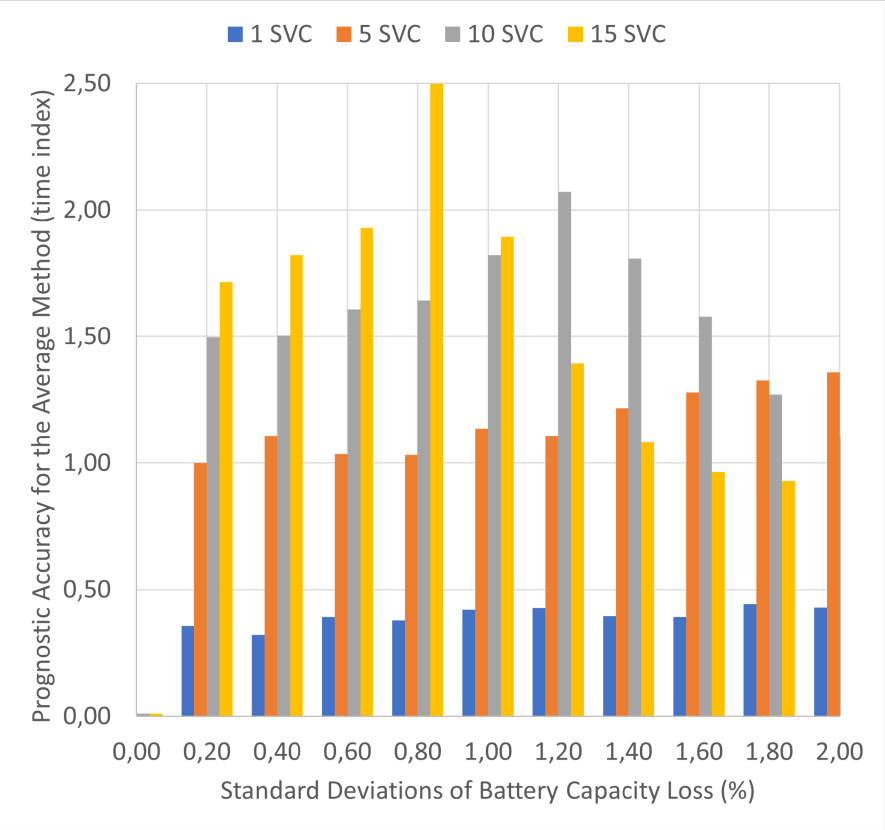


Рисунок 7.5 – Порівняння точності прогнозу для методу усереднення

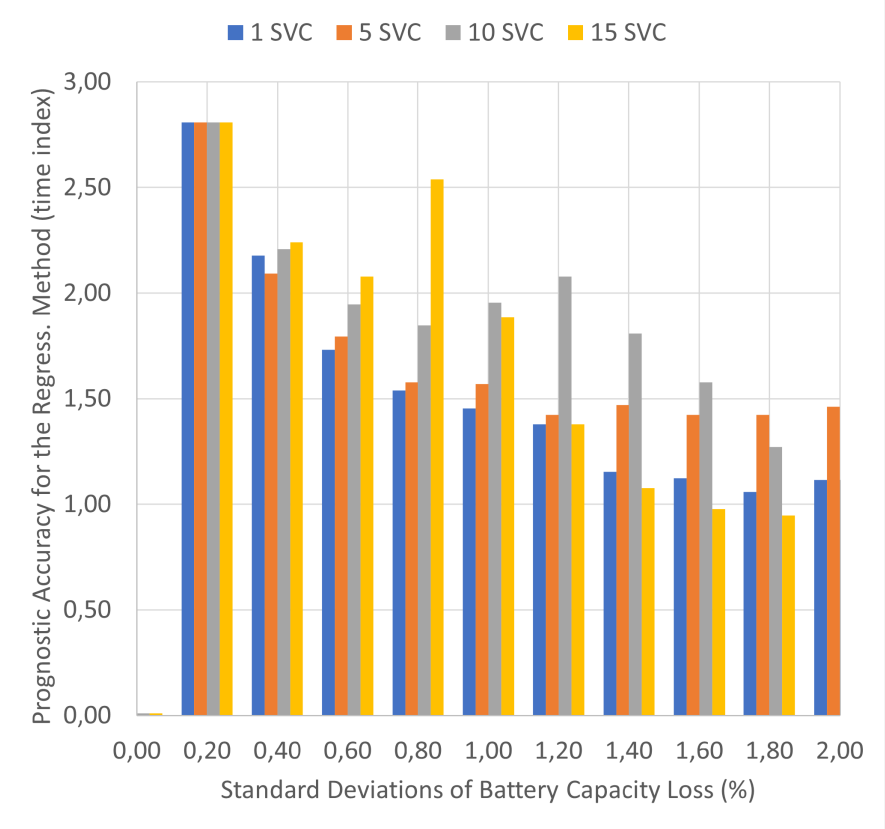


Рисунок 7.6 – Порівняння точності прогнозу для регресійного методу

Цей показник оцінки має важливе значення, оскільки він відображає ймовірність пропуску критичної аварійної сигналізації або передчасного спрацьовування, що може призвести до значних наслідків. Отже, для системи технічного обслуговування вкрай важливо підтримувати низький рівень помилок у прогнозуванні EOP і враховувати його при коригуванні порогу технічного обслуговування, щоб запобігти дорогим потребам у технічному обслуговуванні. Крім того, проаналізовано частоту пропусків (MR) для різних налаштувань параметрів:

$$MR = \frac{N_{MA}}{T_{NU}} \tag{7.22}$$

де N_{MA} – кількість пропущених тривог, а T_{NU} – загальна кількість пристроїв. Коефіцієнт пропущених спрацьовувань (MR) – це показник ефективності, який оцінює відношення кількості випадків, коли неможливо спрогнозувати відмову через ранню несправність до першої точки вимірювання, до загальної кількості випадків. Важливо враховувати MR, оскільки він вказує на надійність системи технічного обслуговування і враховує випадки, коли інформація про стан системи втрачається через передчасні несправності. Крім того, хоча середньоквадратична помилка (MSE) або коренева середньоквадратична помилка (RMSE) вважаються корисними показниками продуктивності згідно з дослідженням [321], прогноз RBC протягом нормальної експлуатації не вважається дуже важливим для цього дослідження. Крім того, зміщення для прогнозу відмов вже вимірюється за допомогою метрики PA.

Приклад сценарію передбачає середньодобову втрату RBC і стандартне відхилення 0,6 %/день, при циклі зчитування 15 SVC, що призводить до значення P_{60} дорівнює 4 SVC. Це означає, що існує 40% ймовірність того, що прогнозований EOP відхилятиметься більше ніж на 4 SVC від фактичного EOL. Щоб уникнути ймовірності передчасного виходу з ладу до планового технічного обслуговування, прескриптивне ТО (MT_p) повинно враховувати ці 4 SVC, як правило, встановлюючи його на рівні, що забезпечує достатній запас надійності:

Таблиця 7.2 – Розрахунок показників (метод усереднення)

Втрати RBC, %/добу	5 SVC		10 SVC		15 SVC	
	MR, %	P_{60}	MR, %	P_{60}	MR, %	P_{60}
0.2	0.0	2	0.0	2	1.1	4
0.5	0.0	2	0.0	3	16.1	5
1.0	0.0	3	10.1	5	98.8	4
1.5	0.46	3	54.1	4	99.4	2
2.0	0.9	3	89.8	2	100.0	-

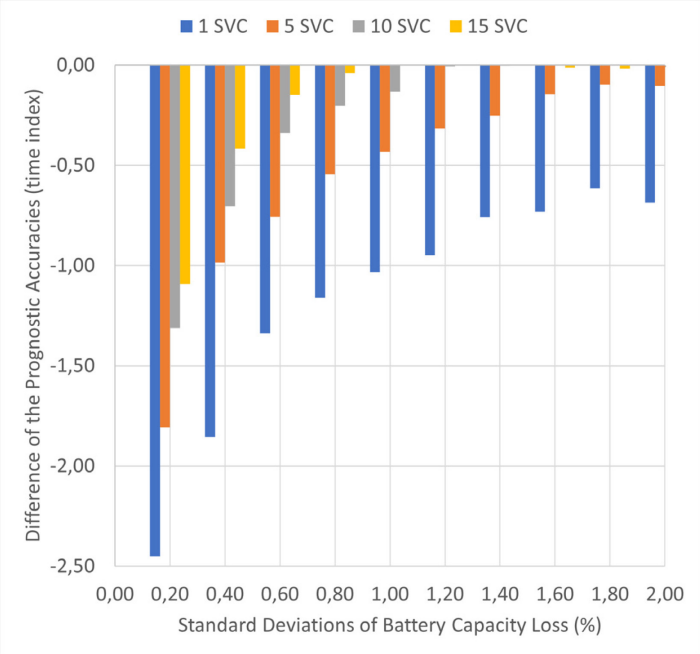


Рисунок 7.7 – Різниця між точністю прогнозу ($PA_{avg} - PA_{reg}$)

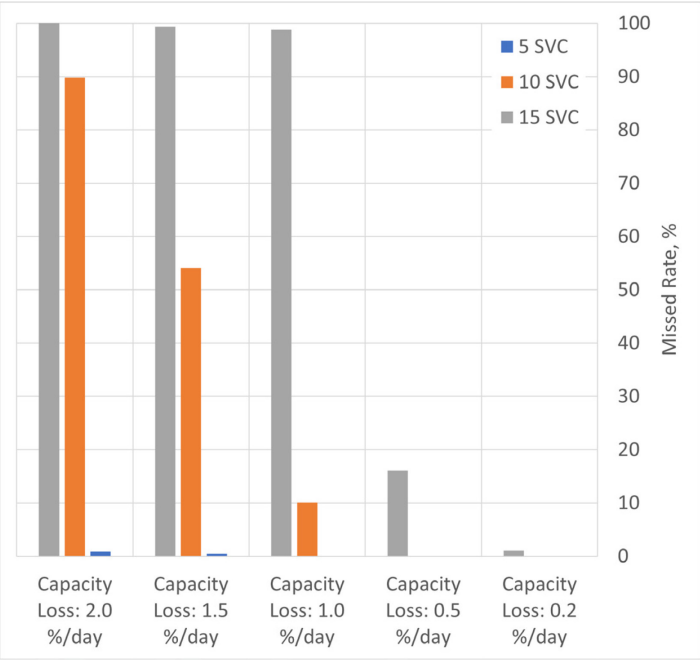


Рисунок 7.8 – Порівняння частоти пропусків для різних параметрів деградації

$$MT_p = MT_m + \frac{P_{60}}{u_d} \cdot \bar{d}_n \quad (7.23)$$

де MT_m – максимально допустимий поріг деградації, визначений виробником, u_d – щоденне використання і $\bar{d}_n$ – середня, щоденна деградація системи.

Загалом, це дослідження надає цінну інформацію щодо забезпечення надійного аварійного джерела живлення судна шляхом оптимізації частоти вимірювання RBC для обслуговування акумуляторних батарей, що може суттєво вплинути на витрати на експлуатацію та технічне обслуговування судна і автоматизованої системи моніторингу стану (ACMS).

7.3 Моніторинг і прогнозування технічних параметрів стану суднових технічних засобів в умовах експлуатації

Основні засади моніторингу і прогнозування технічних параметрів стану суднових технічних засобів в умовах експлуатації викладені у Додатку М29.

7.3.1 Практичні рекомендації з моніторингу стану суднових технічних засобів вантажних суден

Компоненти механізмів засобів водного транспорту виходять з ладу з різних причин, і не всі поломки однакові. Компоненти машин виходять з ладу або втрачають свою придатність, коли вони перестають функціонувати так, як вони були спроектовані. Ця втрата придатності поділяється на три основні категорії: старіння, аварії, деградація поверхонь.

Загальні положення з моніторингу стану суднових технічних засобів вантажних суден викладені у Додатку М30.

Кожна стратегія моніторингу стану або викидів базується на наступній концептуальній інформаційній моделі, показаній на Рисунку 7.9.

У загальному вигляді блок-схема моніторингу зображена на Рисунку 7.11, з якої випливає, що основними його частинами є система спостереження (система пунктів збору інформації) і система управління (центри прогнозної діагностики та управління), пов’язані між собою каналами передачі інформації. Важливими елементами структури моніторингу є: системи об’єктів моніторингу (складових частин технічних засобів водного транспорту); системи виробничих

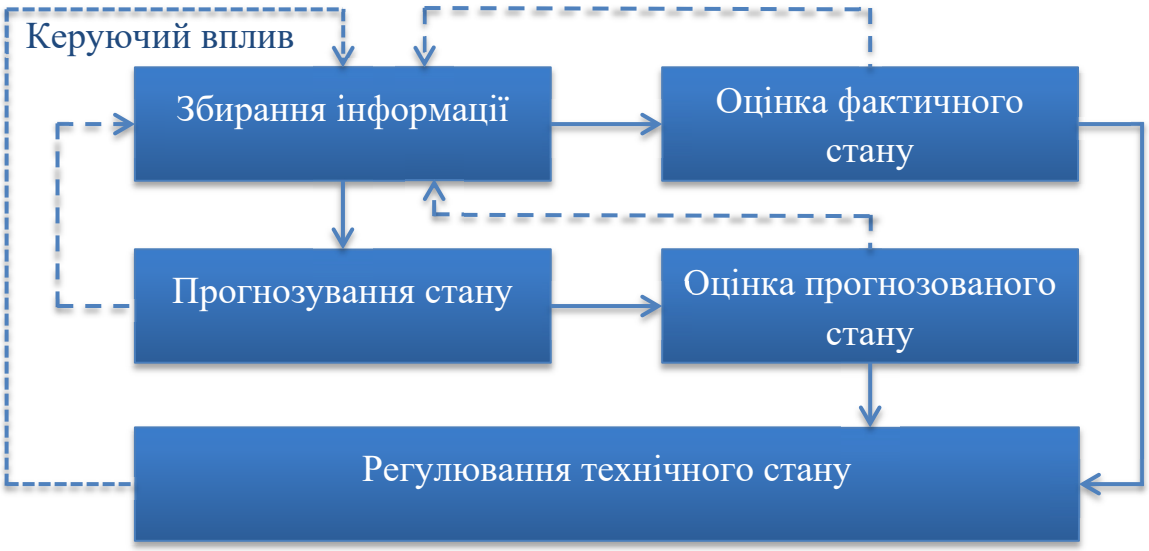


Рисунок 7.9 – Концептуальна інформаційна модель моніторингу стану СТЗіК



Рисунок 7.10 – Принципи організації систем моніторингу СТЗіК

робіт, що складають виробничу базу моніторингу (види робіт, які використовуються при організації та проведенні моніторингу); системи науково-методичних розробок (розробка всього комплексу методів, що використовуються при плануванні, організації та функціонуванні моніторингу, при проведенні виробничих робіт, при аналізі та оцінці результатів спостережень, при прогнозуванні та видачі управлінських рішень); системи технічного забезпечення (апаратура для проведення спостережень і збору

первинної інформації, датчики, індикатори, технічні засоби, лабораторне устаткування, обчислювальна техніка, засоби зв'язку тощо).

7.3.2 Результати розроблення системи моніторингу стану технічних засобів вантажних суден

Основою організаційної структури моніторингу стану та викидів є автоматизована інформаційна система (AIS), яка створюється за допомогою комп'ютерних засобів (Рисунок 7.11 та Додаток М31).



Рисунок 7.11 – Блок-схема моніторингу параметрів СТЗіК

В даній роботі на основі методів вейвлет-перетворення та прикладних технологій штучного інтелекту розроблено модель обробки (7.30) та прогнозування (7.29) кількості шкідливих викидів та показників стану технічних засобів і конструкцій вантажних суден, а також функціональну структуру системи автоматизованого контролю і прогнозування технічного стану та викидів засобів водного транспорту (Рисунок 7.13).

Створення моделі аналізу часових рядів на основі вейвлет-обробки дозволяє отримати інформацію про дані з меншою похибкою за рахунок зменшення їх флуктуацій та збільшення відношення сигнал/шум [350].

Дослідження показали, що функція спектральної густини аналізованого сигналу обчислюється на основі коефіцієнтів ДПФ послідовності вибірок довжиною N:

$$S(mn2\pi f_1) = \frac{1}{N}\sum_{n=0}^{n=\frac{N}{2}}\sum_{k=0}^{N-1} x(k)e^{-m\frac{2\pi}{N}nk}, f_1 = \frac{F_s}{N} = \frac{1}{t_s N} \tag{7.24}$$

де: x(k) – вибірки сигналів, t_s – період вибірки ($t_s \ll T_h$), F_s – Частота дискретизації АЦП, ($F_h = 10f_1$) – максимальна частота спектра.

Максимальний період дискретизації T_h визначається за формулою:

$$T_h = \frac{1}{2F_h} = \frac{1}{20f_1} = 1000\ seconds\ at\ f_1 = 0.5 \cdot 10^{-4}\ Hz \tag{7.25}$$

В процесі виконання дисертаційного дослідження було досліджено дві моделі прогнозування на основі штучного інтелекту: з прямими та зворотними зв'язками. За результатами аналізу обрано, за критерієм найменших обчислювальних витрат, модель штучної нейронної мережі (ANN) з прямими зв'язками. Етапи алгоритму навчання обраної моделі представлені формулами (7.26), (7.27), (7.28).

Перший етап навчання "Визначення результатів" – проводиться шляхом прямого проходження:

$$x_m = \begin{pmatrix} \alpha\left(z_{m1}^T x_{m-1} + z_{01}^j\right) \\ \alpha\left(z_{m2}^T x_{m-1} + z_{02}^j\right) \\ \vdots \\ \alpha\left(z_{ma_m}^T x_{m-1} + z_{0a_m}^j\right) \end{pmatrix}, \qquad m = 1, 2, \dots, n, \qquad x_0 = C_j(p) \tag{7.26}$$

де: x_{m-1} – вектор коефіцієнтів m-шарових ANN, z_{mx}^T and z_{0x}^j – вагові коефіцієнти ANN, $\alpha(i)$ – функція масштабування, $C_j(p)$ – апроксимуючі коефіцієнти.

Другий етап навчання "Виявлення помилок" – проводиться шляхом зворотного проходження:

$$\begin{gathered} a_{m-1} = E_m Z_m a_m, \qquad m = n, n-1, \dots, 2, \qquad a_n = \alpha(k_n) - y \\ k_m = E_m^T x_{m-1} + z_{m0} = \left(k_{m1}, k_{m2}, \dots, k_{ma_m}\right)^T \end{gathered} \tag{7.27}$$

де: E_m – функція активації m-нейрона, Z_m - вектор синаптичних коефіцієнтів.

Третій етап навчання - "Корекція коефіцієнтів":

$$z_{ml}(k+1) = z_{ml}(k) - qh_{jl}(k_{ml})a_{ml}x_{m-1}, \qquad l = 1, 2, \dots, n$$
$$z_{m0}(k+1) = z_{m0}(k) - qZ_m a_m, \qquad z_m = \left(z_{m1}, z_{m2}, \dots, z_{ma_m}\right)$$
$$\frac{\delta\alpha^T(k_m)}{\delta k_m} = diag\left(\frac{\delta\alpha(k_1)}{\delta k_{m,1}} \; \frac{\delta\alpha(k_2)}{\delta k_{m,2}} \; \dots \; \frac{\delta\alpha(k_{ma_m})}{\delta k_{m,a_m}}\right) \equiv Z_m \tag{7.28}$$
$$h_{jl}(k_{ml}) = \frac{\delta\alpha(k_{ml})}{\delta k_{ml}}$$

де: z_{ml} – синаптичні коефіцієнти, q and h_{jl} – поправочні коефіцієнти, $\alpha(i)$ – функція масштабування, a_m – помилка, виявлена на другому етапі.

Модель відновлення вихідного часового ряду з прогнозом зміни даних для y - періодів має вигляд:

$$s(p+y) = \frac{1}{r}\left(\begin{array}{c} u(p)\psi_1(2t-p) + \left(\sum_{i=2}^{5}(C_{i-1})\psi_i\left(2^i t - p\right)\right) + \\ +C_5^*\psi_6(2^6 t - p) + C_5^{**}\psi_6(2^6 t - p) \end{array}\right) \tag{7.29}$$

$$s(p) = \frac{1}{r}\left(u(p)\psi_1(2t-p) + \left(\sum_{i=2}^{6}(C_{i-1})\psi_i\left(2^i t - p\right)\right) + C_6\right) \tag{7.30}$$

де: $u(p)$ – значення очищеного $x(p)$, $\psi_i(p)$ – вейвлет-функція, C_i – апроксимуючі коефіцієнти.

На основі розробленої моделі прогнозування (7.29) та моделі обробки часових рядів (7.30) було розроблено структурну схему моделі системи моніторингу технічного стану та викидів (Рисунок 7.13), яку було впроваджено у бортове обладнання системи ACMS.

На Рисунку 7.13 визначено модель обробки в задачах автоматизованого управління та прогнозування з використанням ANN технологій. Проблема контролю в реальному часі на алгоритмічному рівні задається складною динамікою розподілу несправностей на об’єкті контролю, характеристиками датчиків, засобів обробки та передачі інформації, в тому числі часом прийняття

рішень на вищому системному рівні [143]. Для вирішення цієї задачі використовується підсистема аналізу та обробки отриманих експериментальних та розрахункових часових рядів рівня вібрації. В даному алгоритмі прогнозування та реконструкція базується на регресійному аналізі апроксимуючих та деталізуючих коефіцієнтів вейвлет-перетворення та на використанні ANN.

Аналіз результатів дослідження дозволяє стверджувати, що в процесі виконання капітального ремонту засіб водного транспорту не експлуатується і оператори не отримують денну ставку за судно. Загальний час, необхідний для проведення капітального ремонту, залежить від багатьох факторів, таких як час, необхідний для демонтажу, транспортування, капітального ремонту та монтажу компонентів обладнання. В даному випадку це 30 днів. При денній ставці 600 тис. доларів США це становить загальну вартість 18 млн. доларів США. Використовуючи запропонований підхід, другий капітальний ремонт після 10 років експлуатації не потрібен, тому ці 18 млн. доларів США можна вважати непрямою економією, що суттєво підвищує ефективність системи технічного обслуговування на 28 % за критерієм ефективності використання ресурсів.

Дослідження демонструє, що в результаті використання системи WVCM зі стратегією PxM у поєднанні з AAI можна очікувати зниження витрат на технічне обслуговування, оскільки в більшості випадків періоди між капітальними ремонтами можуть бути продовжені. У деяких випадках періоди між капітальними ремонтами подовжуються з п’яти до семи з половиною років, тому в перші 10 років замість звичайних двох капітальних ремонтів потрібен лише один. Крім того, зменшується ризик неочікуваних поломок, що також знижує витрати на обслуговування.

Завдяки системі WVCM оператору може бути дозволено проводити капітальний ремонт засобу водного транспорту двічі на 15 років, а не тричі, тобто на 33 % ефективніше експлуатувати судно. Тепер технічне обслуговування засобів водного транспорту може здійснюватися відповідно до стратегії PxM, що дозволяє судновласникам і операторам: приймати оперативні рішення на основі

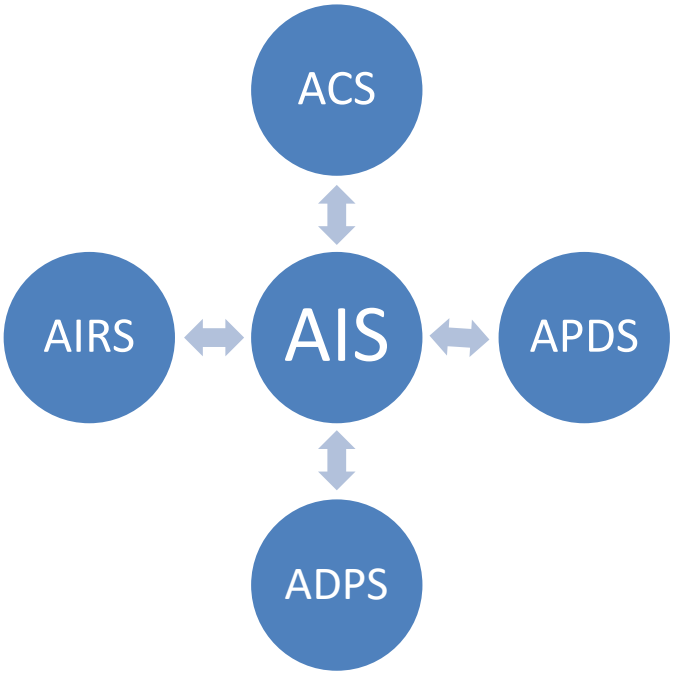


Рисунок 7.12 – Структура моніторингу AIS WVCM

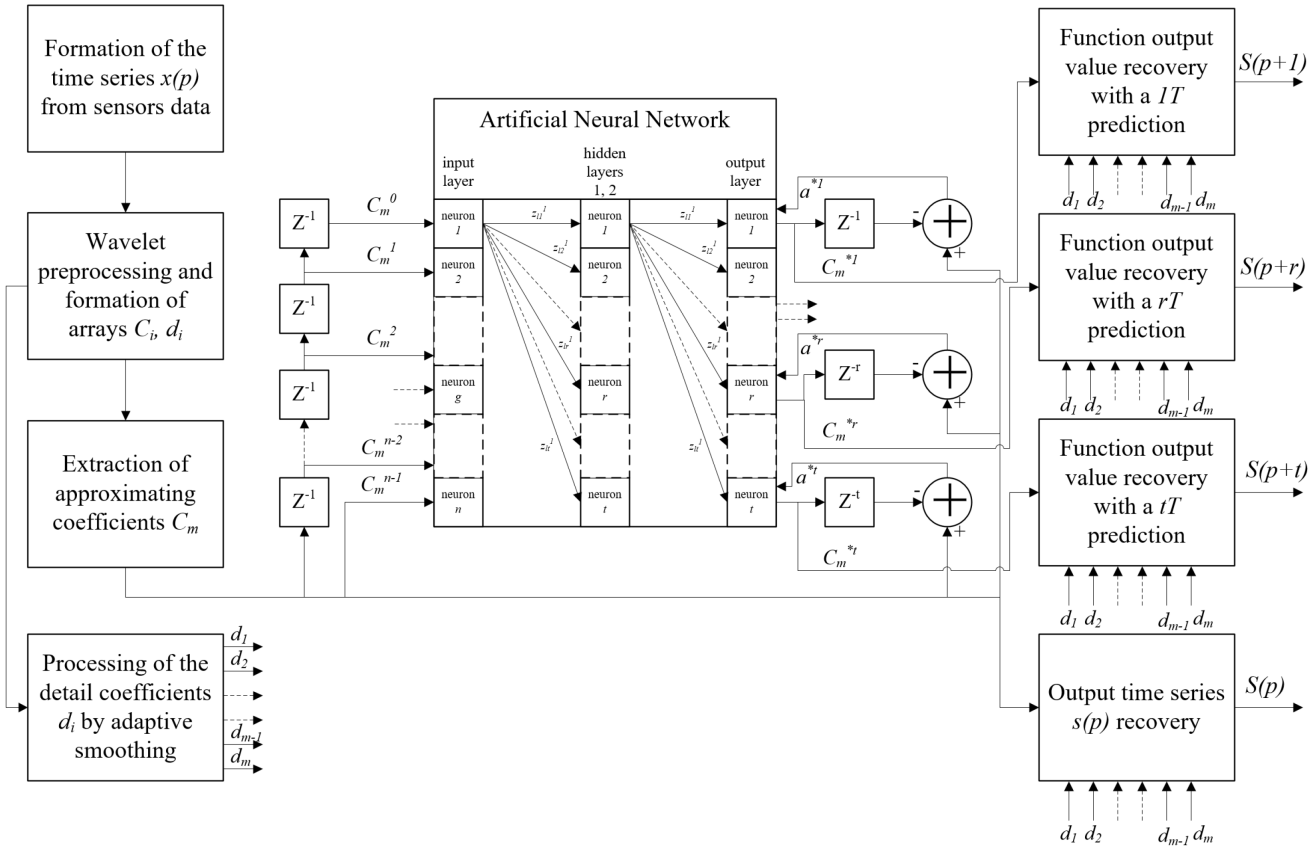


Рисунок 7.13 – Структурна схема моделі системи моніторингу технічного стану та викидів (система WVCM як підсистема ACMS)

відомого стану компонентів обладнання; оцінювати ризики для майбутніх контрактів на основі надійності компонентів обладнання; максимізувати експлуатаційну готовність обладнання, виконуючи капітальні ремонти тільки в разі потреби, значно знижуючи ймовірність незапланованих поломок і помилок в обслуговуванні; бути добре поінформованими про несправності до того, як вони призведуть до поломки; збільшити термін служби обладнання, маючи зворотний зв'язок в реальному часі щодо умов, які спричиняють надмірне спрацювання устаткування; знизити загальну вартість володіння та максимізувати рентабельність.

Впроваджена методика використання стратегії PxM у поєднанні з AAI легко адаптується та застосовується не лише на вантажних суднах, а також на суднах внутрішнього плавання, пасажирських морських і річкових суднах, а також на стаціонарних електростанціях, обладнаних дизельними генераторами.

7.4 Оцінювання параметрів системи технічного обслуговування деяких суднових технічних засобів судна інтегрованого в цифрову стратегію

У процесі оцінювання параметрів прескриптивної системи технічного обслуговування суднових технічних засобів і конструкцій обов'язковим є врахування ризиків, матрицю яких, для енергетичної установки, потрібно будувати, зважаючи на те, що, зазвичай, лише відмова пропульсивної установки, що включає головний двигун і валопровід, призводить до найістотніших наслідків із виведенням судна з експлуатації. Відмови інших компонентів енергетичної установки, включно із судновою електростанцією, не призводять до необхідності виведення судна з експлуатації, і тому збитки виявляються істотно меншими. Звертає на себе увагу широкий діапазон ризиків, які потрапляють в один і той самий осередок матриці, що залишає остаточне рішення про оцінку ризику за системою ShipDiMRO.

На початковому етапі формування прескриптивної системи технічного обслуговування необхідно передбачати розподіл ризиків на категорії, такі як неприпустимі та інші, за окремими елементами судна, а також за видами виконуваних технічних робіт. Оскільки на етапі початкового формування

невідомий розподіл можливих збитків внаслідок відмов, вважаємо за доцільне, щоб величини ризиків були пропорційні відносним витратам на технічне обслуговування окремих елементів судна. У подальшому, з плином часу та збільшенням накопиченого досвіду, ці величини можуть бути відкориговані. При цьому необхідно коригувати не лише величини ризиків різних категорій за окремими компонентами, але й загалом по всьому судну. На основі аналізу даних планів-графіків різних суховантажних суден для перевезення було встановлено співвідношення між витратами на технічне обслуговування для окремих елементів судна (див. Рисунок 7.14).

За допомогою вказаного співвідношення (див. Рисунок 7.14) було здійснено визначення величин неприпустимих сумарних ризиків відмов за окремими компонентами судна, які подані в (Додатку І).

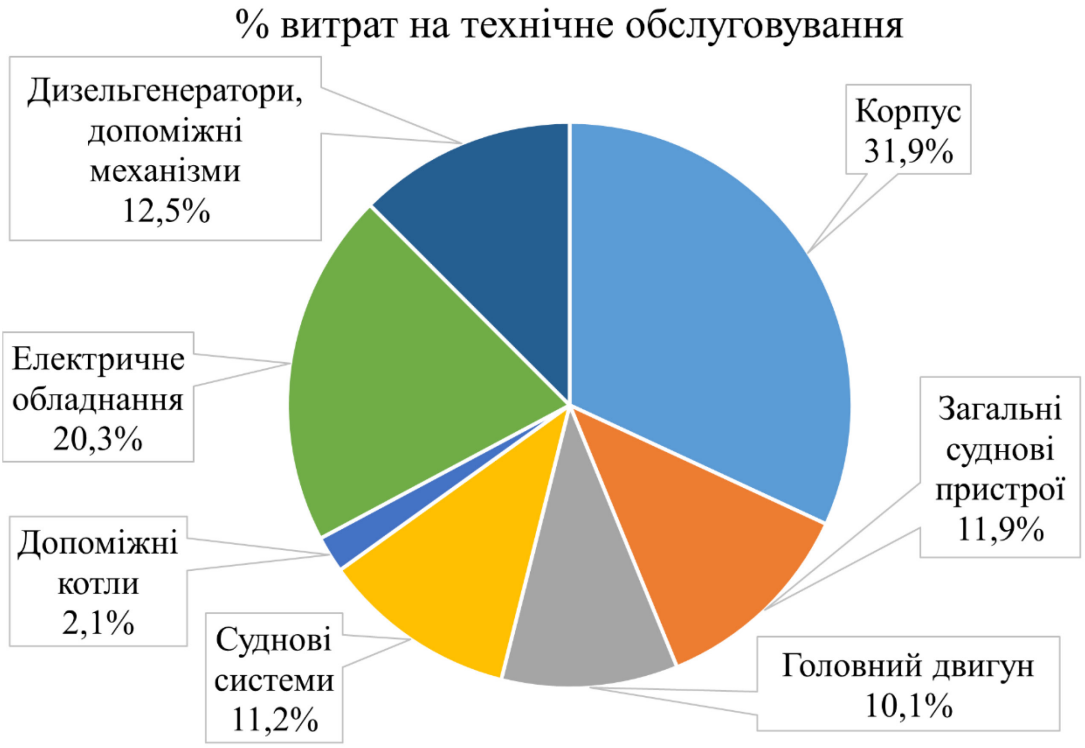


Рисунок 7.14 – Співвідношення між витратами на технічне обслуговування за частинами судна

Формування прескриптивної системи технічного обслуговування відповідно до принципів ефективного прогнозування та управління не лише технічних станом, а і ризиками передбачає, що сумарний прогнозований ризик

(7.31) не має перевищувати відповідних меж за абсолютною або відносною величиною, забезпечуючи таким чином максимальну ефективність використання ресурсів. Однак, цей сумарний прогнозований ризик включає в себе ризики, що виникають в результаті окремих робіт.

Сумарний ризик для всієї електромеханічної частини судна визначається як сума ймовірностей спільних подій, тобто тих подій, що передбачають появу хоча б однієї з усіх можливих N відмов разом із відповідними наслідками. Величина сумарного прогнозованого ризику визначається за формулою:

$$R_{\Sigma} = \sum_{i=1}^{N} S_{us_i} Q_i - \sum_{i,j=1}^{N} Q_i Q_j \left(S_{us_i} + S_{us_j}\right) + \\ + \sum_{i,j,k=1}^{N} Q_i Q_j Q_k \left(S_{us_i} + S_{us_j} + S_{us_k}\right) - \cdots + (-1)^{n-1} \sum_{i=1}^{N} S_{us_i} \prod_{i=1}^{N} Q_i \tag{7.31}$$

де S_{us_i} – позапланові витрати на технічне обслуговування i; Q_i – ймовірність настання відмови, що призводить до позапланового технічного обслуговування з індексом i.

Для цілей розрахунку можна обмежитися першим членом суми ймовірних подій. Очікується, що дотримання умов не перевищення межі прогнозованого ризику для кожної операції технічного обслуговування забезпечить дотримання умов для суми ймовірних подій. Однак, забезпечити це правило завжди для окремої операції, ймовірно, не завжди можливо. Це означає, що для забезпечення прийнятного рівня ризику необхідно внести зміни в систему технічного обслуговування, зосередившись на тих операціях, які дозволять знизити прогнозовані ризики з найменшими витратами. Для досягнення цієї мети може бути корисним показник питомого прогнозованого ризику:

$$r_{\text{i}} = \frac{S_{us_i}}{S_{sch_i}} = Q_i K_s \tag{7.32}$$

де S_{sch_i} – планові витрати на технічне обслуговування i за час, на який прогнозовано ймовірність відмови.

Чим більший питомий ризик (7.32), тим меншою величиною обсягу планового технічного обслуговування він буде зменшений.

Не важко уявити, що, наприклад, резерв у 10 % буде достатнім, якщо ймовірності відмов однакові і дорівнюють 0.01, а співвідношення витрат на усунення відмов до планових буде 10:1. Проте, якщо ймовірності відмов складатимуть 0.05, то співвідношення непланових витрат до планових повинно бути не більше ніж 2:1.

Порівняння даних таблиць Додатку І та Додатку Ї вказує на те, що сумарні фактичні ризики для середньо-оборотних двигунів перевищують межі припустимих ризиків, визначених як 20 % резерву для середньорічних витрат на їх технічне обслуговування. Для мало-оборотних двигунів величина середньорічного ризику наближається до рівня неприпустимого ризику, який, в разі необхідності, може бути скоригований за рахунок зменшення неприпустимого ризику для інших технічних засобів та конструкцій судна. Однак для суден із середньо-оборотними двигунами корекція неприпустимих ризиків має бути більш суттєвою. З даних Додатку Ї за даними для суден із середньо-оборотними двигунами видно, що порівняно з середньорічним ризиком на підставі даних страховиків, який становить 29469 дол. США, неприпустимий ризик (таблиця у Додатку І) приблизно у 2-3 рази менший. Це створює загрозу для існування планово-попереджувальної системи технічного обслуговування навіть в рамках прийнятого 20 % резерву бюджету на технічне обслуговування.

З іншого боку, величини фактичних ризиків можуть бути зменшені за рахунок адаптивізації та підвищення профілактичних властивостей системи технічного обслуговування. Одним з основних показників такої адаптивізації є ймовірність попередження відмов системою технічного обслуговування.

Для встановлення прийнятної величини ймовірності попередження відмов необхідно визначитися з величиною фінансових резервів для виконання непланових операцій технічного обслуговування. Слід при цьому розуміти, що їхня затребуваність реалізовуватиметься протягом тривалого періоду, що, в принципі, має бути перехідним у наступні інтервали планування.

На Рисунку 7.15 зображена блок-схема алгоритму аналізу ефективності заходів щодо скорочення ризику відмов. Аналізу економічної ефективності передує перевірка, чи перебуває рівень ризику в неприпустимій області. У разі підтвердження цього факту, визначаються необхідні заходи для переведення ризиків у припустиму зону.

Якщо рівень ризику перебуває в "прийнятній" області, тобто нижче за нижню межу прийнятності, подальший добір заходів зниження ризиків не є необхідним, і подальше оцінювання заходів може бути зупинене [279].

Якщо рівень ризику потрапляє в сферу помірних ризиків, необхідно розглянути можливі заходи їх зниження.

Кожен захід зниження ризику оцінюється кількісно щодо його впливу на безпеку персоналу, довкілля та виробничі об’єкти з урахуванням:

1. відповідності інструкціям, настановам, стандартам і прийнятій практиці;

2. якісної оцінки скорочення потенційного ризику.

Якщо реалізація заходів скорочення ризику вимагає витрат, які за своєю величиною менші, ніж одержувані вигоди, рішенням має бути їх виконання. В іншому разі вони мають бути відхилені. Розрахункові формули для визначення витрат наведено в розділах 3 і 4, а допоміжні графіки подано в розділах 5 і 7.

На останньому етапі, якщо заходи скорочення ризику не дали необхідного результату, відхилені заходи можуть бути розглянуті повторно і прийняті незважаючи на їхню економічну неефективність.

Застосування аналізу економічної ефективності в контексті заходів зі зниження ризику має специфіку, оскільки вартість заходів є детермінованою, а економічна вигода є випадковою величиною, пов’язаною з великою можливою вигодою, що настає з малою ймовірністю.

Під час розрахунку витрат і вигоди необхідно описати їх з максимальним охопленням. Процес вибору комплексу заходів зниження ризику є послідовним ітераційним процесом. Деякі заходи, такі як розроблення планів дій у разі відмови, завжди розглядаються як кандидати на включення, але при цьому їхню економічну ефективність часто не оцінюється.

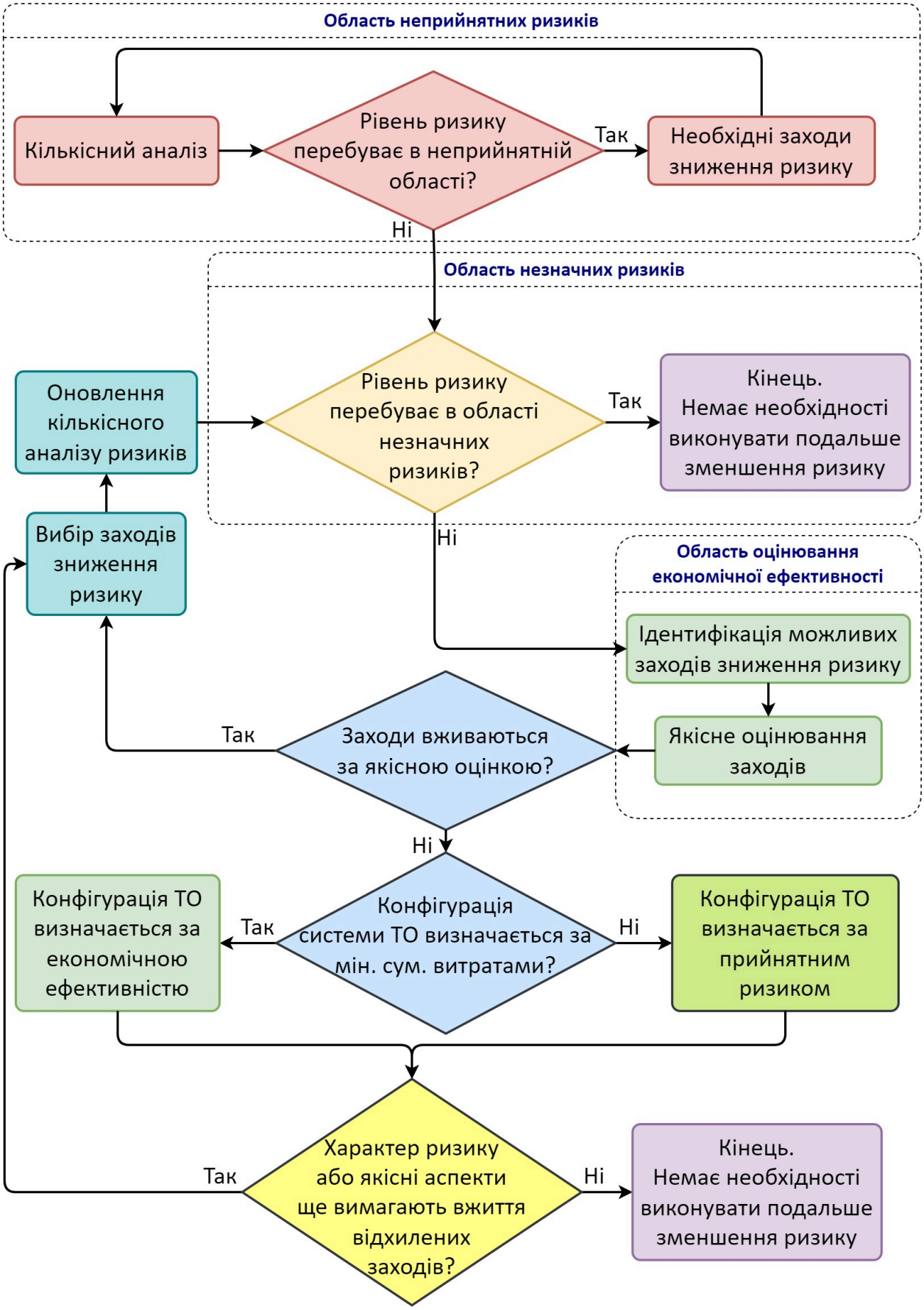


Рисунок 7.15 – Блок-схема алгоритму системи ShipDiMRO щодо вибору заходів зниження прогнозованих ризиків

При розгляді економічної ефективності вжитих заходів зниження ризику, можна розглядати величину ризику (7.33) як добуток імовірності відмови на величину наслідків відмови. Ці наслідки включають в себе витрати на оплату праці, витрати на змінно-запасні частини та інші додаткові витрати, які описані в розділі 3:

$$RISK = \frac{W_{us}\left(1 - P_{pre}\right)}{T_{cycle}}, \tag{7.33}$$

На Рисунку 7.16 представлена графічна інтерпретація економічної ефективності заходів зниження ризику. Збільшення питомого обсягу планових витрат протягом циклу експлуатації має бути меншим, ніж зменшення питомого обсягу непланових витрат або зменшення ризику:

$$\Delta\left(\frac{W_{sch}P_{pre}}{T_{cycle}}\right) \leq \Delta\left[\frac{W_{us}\left(1 - P_{pre}\right)}{T_{cycle}}\right], \tag{7.34}$$

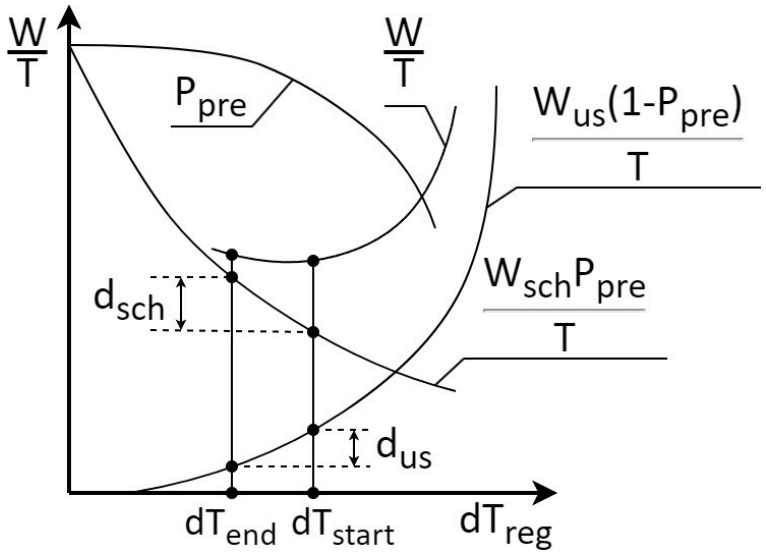


Рисунок 7.16 – Ілюстрація до задачі зменшення ризику

Зменшення ризику у деяких випадках може вимагати розгляду періодичності технічного обслуговування, яка забезпечить мінімізацію сумарних планових і непланових витрат. Рішення цього завдання описано в Розділі 7.

Попередньо проводиться оцінка наслідків відмови, виражена коефіцієнтом K. Оскільки витрати на непланове технічне обслуговування переважно є віртуальними і, фактично, реалізуються протягом тривалого періоду, деякі

автори пропонують враховувати їх у розрахунках за життєвий цикл [187] за допомогою визначення різниці між сумарною величиною капітальних витрат і експлуатаційних витрат та величиною зменшення ризику.

Оскільки облік "віртуальних" грошей може бути недостатньо зрозумілим та ефективним, може бути корисним визначити ціну зменшення ризику до прийнятного рівня. У цьому контексті судноплавна компанія може встановити свій припустимий резерв витрат (зазвичай 10-20 %), забезпечуючи приблизну рівність суми ризиків за будь-який період і запланованого резерву. Величина ризику за цикл експлуатації може бути визначена як:

$$RISK = \frac{W_{us}\left(1 - P_{pre}\right)}{T_{cycle}} = \frac{W_{sch} \cdot K \cdot \left(1 - P_{pre}\right)}{T_{cycle}}, \quad (7.35)$$

або у відсотковому співвідношенні до планованих витрат $W_{sch}/\Delta T_{sch}$:

$$\delta_{us} = \frac{K \cdot \left(1 - P_{pre}\right) \cdot \Delta T_{sch}}{T_{cycle}} = K \cdot f \cdot 100\%, \quad (7.36)$$

Після визначення наслідків K, можна скористатися графіком, наведеним на Рисунку 7.17, для встановлення періодичності планового технічного обслуговування, при якій прогнозований ризик не перевищить прийняту величину.

Для цього, припустимо, що ми встановили допустимий обсяг непланових витрат, наприклад, $\delta_{us} = 0{,}1\ (10\ \%)$. Потім, розраховуємо параметр f, який представляє собою відношення допустимого обсягу витрат до коефіцієнта наслідків відмов, наприклад, $K = 2$. Таким чином, $f = \delta_{us}/K = 0{,}1/2 = 0{,}05$.

Цей підхід до управління ризиками, який зазвичай вважається більш прийнятним, особливо під час вирішення завдання мінімізації сумарних витрат, включаючи як планові, так і можливі непланові витрати, застосовується досить широко. Для багатьох компаній, зокрема невеликих, такий підхід є більш прийнятним. Також, цей метод використовується, коли розв’язання оптимізаційної задачі призводить до мінімізації сумарних витрат у точці, де

профілактичні властивості системи технічного обслуговування проявляються як недостатні $(P_{pre} < 0{,}9)$, як показано, наприклад, на Рисунку 7.17.

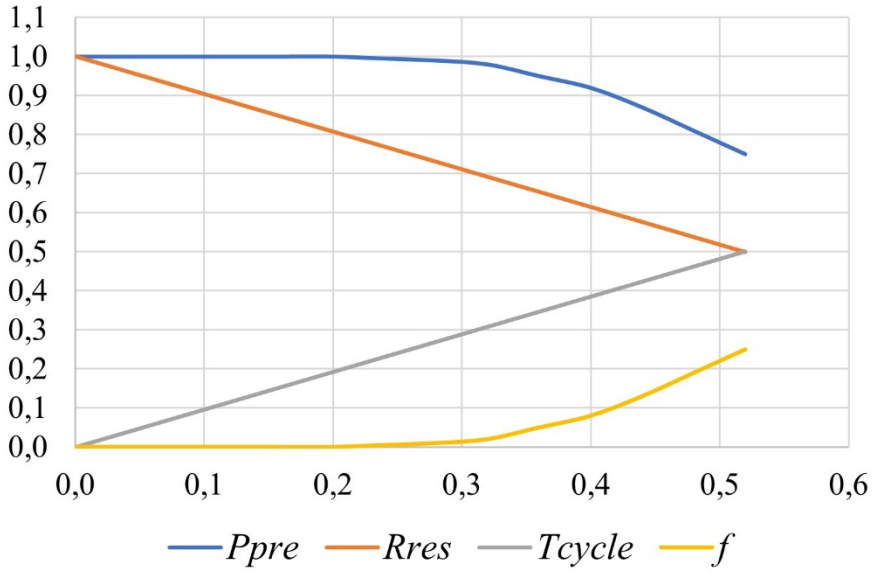


Рисунок 7.17 - Ілюстрація до визначення параметрів регламентного технічного обслуговування за допустимою величиною непланових витрат (δ_{us}) і коефіцієнтом наслідків відмов (K). Закон зміни технічного стану лінійний з коефіцієнтом варіації швидкості зміни технічного стану $(V_v = 0{,}48)$

Безумовно, жодна з галузей застосування аналізу ризиків в управлінні технічним використанням і технічним обслуговуванням не може абсолютно точно врахувати всі можливі ризики через багато причин, включаючи складність систем і ситуацій. Часто моделювання ситуацій спрощує зв'язки між причинами і наслідками. Однак сам факт застосування процедур аналізу ризиків і врахування їх результатів при прийнятті експлуатаційних рішень свідчить про те, що судноплавна компанія розвивається у правильному напрямку в плані вдосконалення технічної експлуатації.

7.5 Результати дослідження впливу цифрової стратегії на зміну параметрів системи технічного обслуговування

У відповідності із описом можливих варіантів застосування комплексного методу технічного обслуговування (наведених у кінці Розділу 7.2.2) розглянемо, як може бути здійснена мінімізація сумарних витрат на технічне обслуговування

при застосуванні перелічених варіантів цифрових стратегій (Розділ 4.2.2) в реалізації комплексного прескриптивного технічного обслуговування.

Випадок 1. Оскільки адаптивні регламентні роботи виконуються через певний динамічний проміжок часу, застосування комплексного методу можливе лише у варіанті з постійною періодичністю проміжного контролю. Алгоритм такого рішення представлено на Рисунку 7.18.

Вибір періодичності адаптивних регламентних робіт (ΔT_{regX}) через перебіг процесу (групи процесів) $\boldsymbol{X}$, які є одночасно контролем технічного стану через перебіг процесу (групи процесів) $\boldsymbol{Y}$ $(\Delta T_c = \Delta T_{regX})$ здійснюється, виходячи з вимог із забезпечення безвідмовності у зв'язку з перебігом процесів $\boldsymbol{X}$. Термін адаптивного регламентного ТО через протікання процесу $\boldsymbol{Y}$ (ΔT_{regY}) Повинен бути в цьому разі кратний величині (ΔT_{regX}). Тому вибір може бути здійснено лише між варіантами з різною величиною (ΔT_{regY}).

Випадок 2. Постановка задачі для цього випадку має сенс лише за умови забезпечення однакової ймовірності попередження відмов для будь-якого з варіантів ухваленого рішення, тобто забезпечення однакових профілактичних властивостей системи. Алгоритм такого рішення представлено на Рисунку 7.19. Таким чином, інтервал регламентного технічного обслуговування, що задається, обумовлений можливими змінами коефіцієнта варіації для швидкості зміни технічного стану (V). Або (і) зміни середнього напрацювання до відмови через зовнішні умови, режими або якість застосовуваних матеріалів і деталей. Якщо вихідну конфігурацію регламентного технічного обслуговування побудовано для відомої швидкості зміни технічного стану з коефіцієнтом варіації (V_X) і (T_{mX}) та періодичності контролю (ΔT_c) , то за цими величинами можна визначити фактичну ймовірність запобігання відмов системою технічного обслуговування (P_{pre}).

Якщо такі профілактичні властивості системи технічного обслуговування задовольняють споживача, то надалі все будується на основі підтримання цієї величини постійною та отримання результату – очікуваних результатів

функціонування системи технічного обслуговування, що задовольняють прийнятим критеріям. Якщо від самого початку профілактичні властивості системи не задовольняють споживача, вирішують питання про те, якою має бути величина ймовірності запобігання відмови системою технічного обслуговування (P_{pre}), і надалі вже вона стає тією основою, навколо якої будують систему.

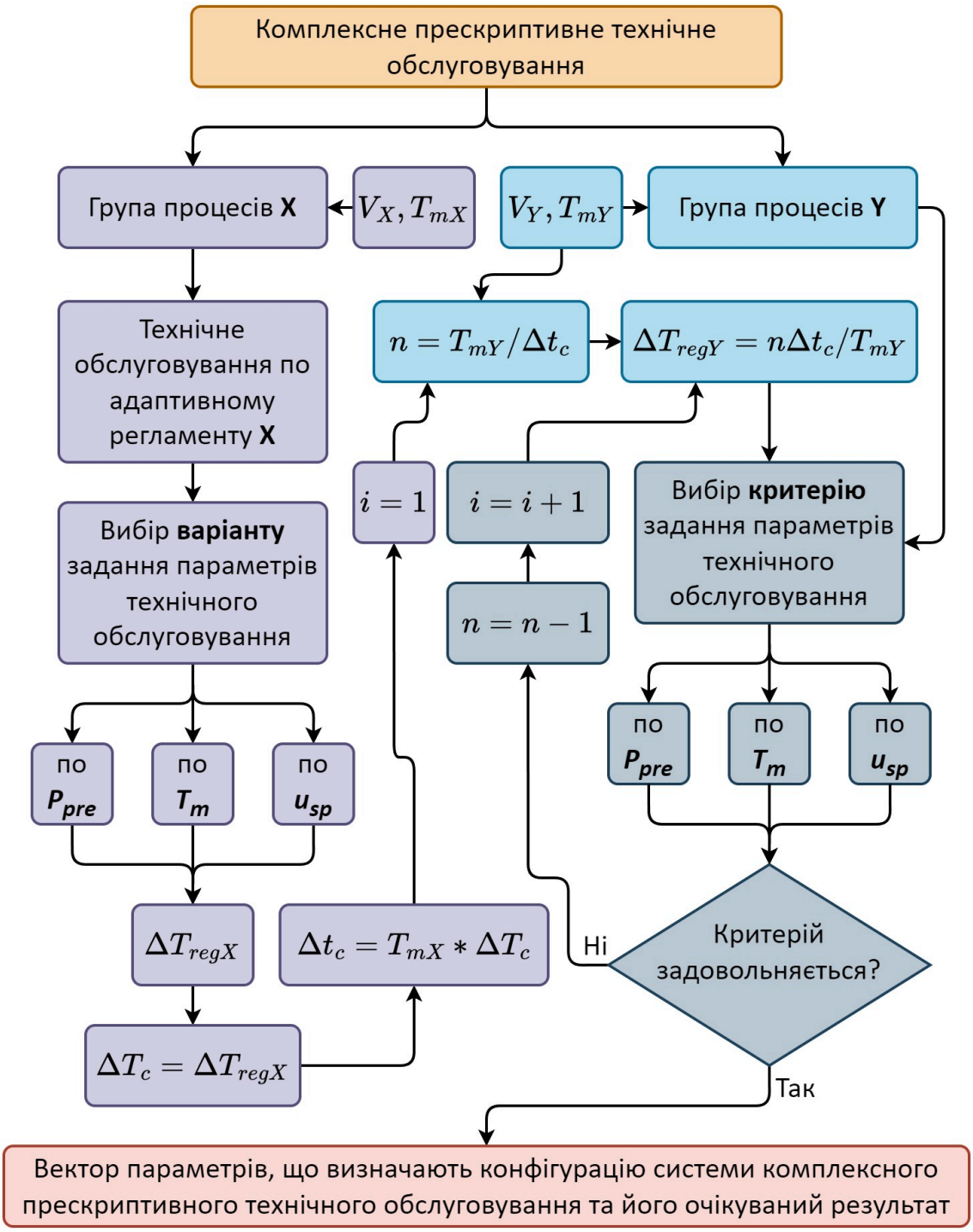


Рисунок 7.18 – Алгоритм адаптивізації параметрів системи КПТОВС за обраним критерієм

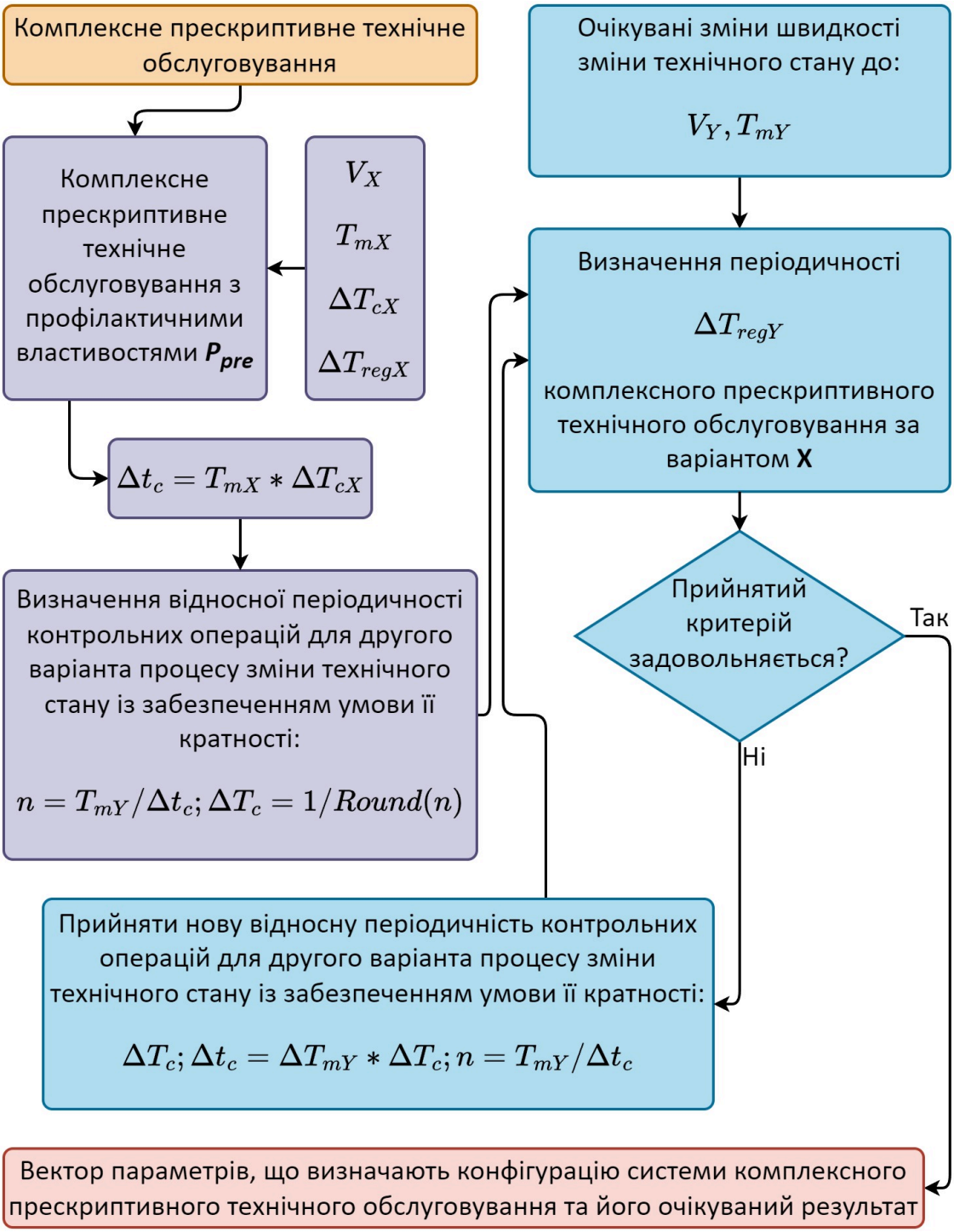


Рисунок 7.19 – Алгоритм визначення конфігурації системи КПТОВС, що забезпечує підтримання сталості профілактичних властивостей

Слід зазначити, що, власне, застосування комплексного прескриптивного технічного обслуговування є одним із шляхів оптимізації регламентного технічного обслуговування, тому що при збереженні профілактичних властивостей дає змогу збільшити тривалість циклу експлуатації, а це є найбільш дієвим способом скорочення питомих витрат.

Для комплексного технічного обслуговування тривалість циклу експлуатації може бути збільшена за допомогою збільшення кількості контрольних операцій між операціями регламентного технічного обслуговування, що сприяє виконанню більшої кількості технічного обслуговування за станом.

Величиною, що характеризує повноту використання можливостей комплексного методу за збереження профілактичних властивостей $\left(P_{pre} = idem\right)$ може бути відносна кількість передчасно виконаних операцій технічного обслуговування $(P_{ut} - P_{it})$.

Випадок 3. У цьому випадку система технічного обслуговування спочатку формується щодо обраного процесу зміни технічного стану, який вимагає найменший інтервал контролю технічного стану для виконання технічного обслуговування за станом. Алгоритм такого рішення представлено на Рисунку 7.20. При цьому роботи з технічного обслуговування, які необхідно виконувати для усунення всіх видів несправностей, пов'язані в єдиний технологічний процес. У разі виникнення відмови через протікання відповідного процесу наслідки будуть різні. Після визначення найбільш несприятливого процесу з погляду необхідної частоти контролю, ці величини приймаються як величини, що визначають фактичну конфігурацію системи технічного обслуговування відносно решти процесів. Визначаються очікувані фактичні результати функціонування системи щодо всіх процесів, тобто визначаються узагальнені показники.

Визначення узагальнених показників включає визначення для прийнятої періодичності контролю величин імовірності запобігання відповідним видам відмов $\left(P_{pre_i}\right)$ за прийнятою періодичністю контролю $(\Delta \mathrm{t}_c)$. Для кожного з процесів (i) періодичність контролю становить: $\left(\Delta \mathrm{t}_{c_i} = T_{m_i}/(T_m \Delta \mathrm{t}_c)\right)$. Далі проводиться порівняння тривалості циклу експлуатації за кожним із процесів: $\left(\mathrm{t}_{cycle_i} = T_{cycle_i} * T_{m_i}\right)$.

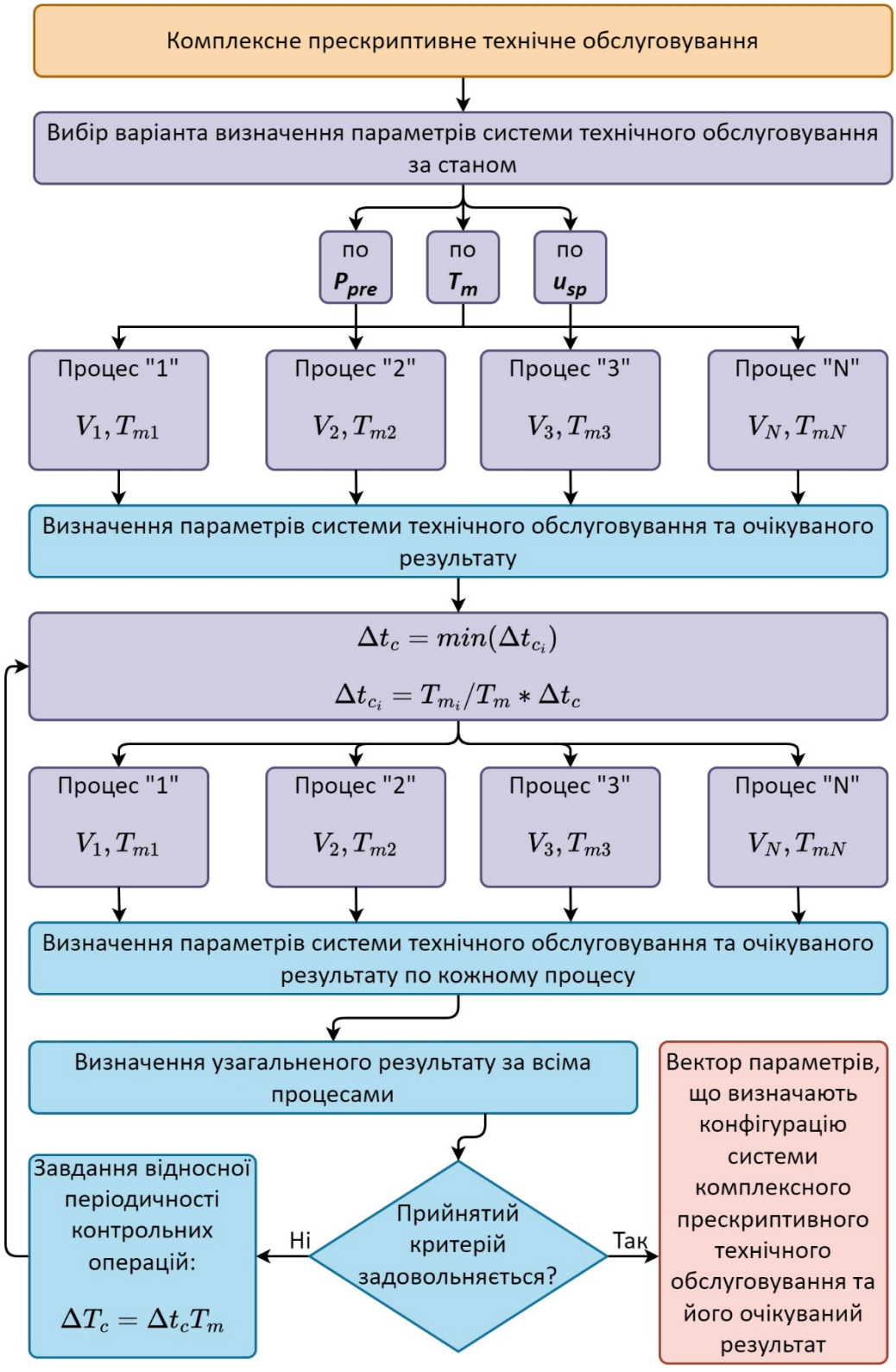


Рисунок 7.20 – Алгоритм адаптивізації параметрів системи КПТОВС

Мінімальна тривалість циклу з розрахованих для всіх процесів буде інтервалом комплексного прескриптивного технічного обслуговування: $\mathrm{t}_{cycle} = min(\mathrm{t}_{cycle_i})$, величина, яку буде використана для визначення питомих витрат.

Величина першої складової узагальнених витрат може бути визначена як:

$$W_{h,\Sigma} = \sum_{i=1}^{N} S_{sch_i} \left[P_{pre_i}(1 - K_i) + K_i\right], \tag{7.37}$$

де коефіцієнт (K) визначає наслідки 1-го виду відмов: $\left(K_i = S_{usch_i}/S_{sch_i}\right)$.

Величина узагальнених витрат на змінно-запасні частини дорівнює:

$$W_{sp,\Sigma} = \sum_{i=1}^{N} C_i \left(1 + R_{res_i}\right), \tag{7.38}$$

де коефіцієнт (C) вартість змінно-запасних частин.

Питомі узагальнені витрати визначаються як:

$$w(t) = \frac{1}{\mathrm{t}_{cycle}} \left(W_{h,\Sigma} + W_{sp,\Sigma}\right). \tag{7.39}$$

Як критерій може бути прийнята величина питомих узагальнених витрат, прийнята заздалегідь, або проведено пошук величини періодичності контролю.

Випадок 4. Коли як регламентний термін технічного обслуговування приймається інтервал регламентований необхідністю пред'явлення об'єкта огляду T_{dir} відносна періодичність регламентного технічного обслуговування визначається як співвідношення $\Delta T_{reg} = T_{dir}/T_m$. Алгоритм такого рішення представлено на Рисунку 7.20, як окремий випадок для однієї операції технічного обслуговування.

Визначення параметрів комплексного прескриптивного технічного обслуговування фактично полягає у визначенні періодичності контролю технічного стану (ΔT_c) за заданою періодичністю регламентного технічного обслуговування та прийнятною ймовірністю попередження відмов системою технічного обслуговування $\left(P_{pre}\right)$.

Далі може бути визначена величина питомих витрат на технічне обслуговування:

$$w(t) = \frac{1}{\mathrm{t}_{cycle}} \left(W_h + W_{sp}\right), \tag{7.40}$$

Складові витрат визначаються аналогічно до попередніх випадків:

$W_h = S_{sch}\left[P_{pre}(1-K)+K\right]$, $W_{sp} = C(1+R_{res})$, – що забезпечує мінімум питомих узагальнених витрат із застосуванням будь-якого ітераційного методу, де (C) – вартість змінно-запасних частин.

Оптимізація за цим випадком може полягати у визначенні такої періодичності контролю, за якої витрати на збільшення контрольних операцій будуть меншими, ніж ефект від збільшення тривалості циклу експлуатації за рахунок поліпшення безвідмовності.

Однак основний ефект досягається за рахунок поєднання виконання операцій технічного обслуговування з необхідним оглядом класифікаційним товариством. Після узгодження з класифікаційним товариством можна розглядати потенціал збільшення термінів між капітальними ремонтами окремих суднових технічних засобів або конструкцій до 50 %, при умові проведення обов'язкового контролю та прогнозування їх технічного стану. Це значно збільшує міжремонтні інтервали та підвищує ефективність системи технічного обслуговування за критерієм оптимізації використання ресурсів [123].

7.6 Оцінювання ефективності прийнятих рішень у частині адаптивізації параметрів системи КПТОВС

Контроль технічного стану здійснюється безпосередньо перед застосуванням за призначенням (контроль у процесі технічного використання), між операціями технічного обслуговування під час застосування методів за станом або комплексних методів, у процесі технічного обслуговування і ремонту, під час здійснення технічного спостереження. Завданням будь-якого технічного обслуговування і ремонту є не тільки виконання профілактичних і відновлювальних заходів, а й контроль технічного стану. Перелік контрольованих параметрів технічного стану встановлюється інструкціями заводу виробника, інструкціями із застосування приладів контролю, правилами органів спостереження, інструкціями судноплавної компанії. Форми заповнюваних при цьому документів, як правило, встановлюються технічним департаментом судноплавної компанії.

Зміст заповнюваних форм обліку технічного стану має давати змогу не тільки документально фіксувати досягнутий стан, а й давати можливість визначати швидкість зміни технічного стану, визначати залишковий ресурс до технічного обслуговування, необхідної заміни. У додатках до КНД 31.5.001-96 «Керівництва з технічного спостереження за ремонтом суден для різних суднових технічних засобів та їхніх вузлів» [437] наведені основні види можливих пошкоджень. Ці дані спільно з інструкцією заводу-виробника можуть бути вихідною базою для змістовної частини форм обліку технічного стану. Як визначаються швидкості зміни технічного стану за результатами контролю діагностичних параметрів або за результатами виконаного технічного обслуговування було наведено вище. У деяких випадках застосовуються параметри технічного стану, які неможливо виміряти і констатується лише сам факт наявності пошкодження. Наприклад, під час моточистки або в процесі огляду через продувні вікна, констатується факт рухливості поршневих кілець у кепах або його відсутності, характер нагару - сухий, маслянистий, по всій поверхні кепів, констатується цілісність кілець. У таких випадках як одиниця виміру параметра технічного стану слугує умовна величина, значення якої, що дорівнює одиниці, відповідає відмові або незадовільному стану. Під час використання таких параметрів можливі два випадки: 1. Параметр визначається під час виконання технічного обслуговування; 2. Параметр визначається в процесі контролю між операціями технічного обслуговування.

У першому випадку визначаючи швидкість зміни технічного стану цим параметром, якщо виявляється відмова або незадовільний стан:

$v = 1/t$, де $t = \Delta T_m$ – під час виконання регламентного технічного обслуговування або технічного обслуговування за станом (напрацювання між операціями технічного обслуговування),

$t = \sum_{i=1}^{M} \Delta T_c$ – при виконанні контролю технічного стану, з відповідною періодичністю (ΔT_c) , при загальній кількості (M) перевірок з останнього технічного обслуговування.

Якщо відмову об’єкта за параметром або його незадовільний стан за ознаками не виявляють у процесі технічного обслуговування, для надання результату відчутної величини необхідно давати оцінку залишковому ресурсу (T_{res}) до досягнення відповідного стану.

Тоді в наведеній формулі: $t = \Delta T_m + T_{res}$. Якщо цього не робити, фактично, інформація буде втрачена.

Іншим способом врахування подібної інформації про події, які могли статися, але не відбулися, щоб визначити величину напрацювання до відмови або незадовільного стану (t) , є відомі з теорії надійності методи обробки цензурованих вибірок. Однак вони можуть бути реалізовані лише за наявності фактичних напрацювань до стану, що цікавить, у частині наявних даних про результати технічного обслуговування.

У Додатку Й подано можливі параметри технічного стану та діагностичні параметри, що визначають необхідність виконання регламентного технічного обслуговування або технічного обслуговування за станом. Аналогічні таблиці можуть бути складені для будь-якого суднового технічного засобу і його вузла.

Усе, що оцінюється візуально, передбачає наявність інструкції, що містить опис відповідного стану, і механіку потрібно звірити з цим описом фактичний стан. Таким чином, потрібно дати відповідь так чи ні щодо кожної категорії стану. Якщо категорій лише дві, потрібно або оцінювати залишковий ресурс, або застосовувати методи обробки цензурованих вибірок. Якщо категорій більше двох, необхідно також дати оцінку залишковому ресурсу, якщо для кожної категорії в інструкції немає очікуваного залишкового ресурсу, встановленого інструкцією заводу виробника. Наразі заводи виробники таку інформацію не наводять. Водночас вони можуть давати інформацію про зовнішній стан деталей, за якого деталі відпрацюють ще один термін до технічного обслуговування або ремонту. Прикладом може слугувати система буклетів "Guideline For Reusable Part and Salvage Operation", розроблена фірмою Caterpillar для своїх сервісних інженерів і клієнтів.

7.6.1 Результати оцінювання ефективності прийнятих рішень у частині вдосконалення системи технічного обслуговування вантажного судна

Огляд досліджень і публікацій останніх років показує, що більшість дослідників найпильнішу увагу приділяють питанням прогнозу витрат за цикл життя. При цьому розглядаються найрізноманітніші варіанти придбання, комплектації та подальшої стратегії технічного обслуговування.

Вище описано метод оцінювання ефективності переходу на комплексне прескриптивне технічне обслуговування і ремонт із прогнозуванням стану. Пропонувалося оцінювати ефективність застосовуваного методу за величиною питомих витрат за цикл експлуатації. У джерелі [380] пропонується використовувати координатну систему витрати за життєвий цикл-ефективність об'єкта. Під ефективністю розуміють ефективність використання об'єкта, причому краще виражену в грошовому еквіваленті або іншою нормованою величиною. Доти, доки результат прийнятих рішень полягає у зменшенні витрат і збільшенні ефективності, якихось складнощів не виникає. Однак, часто ухвалене рішення супроводжується як збільшенням ефективності, так і збільшенням витрат за життєвий цикл, у цьому разі потрібно, щоб $\Delta E > \Delta L$, тобто приріст ефективності перевищував приріст витрат. А це означає, що обидві вони мають бути нормовані або бути виражені в грошовому еквіваленті.

Істотної різниці між витратами за життєвий цикл (L) і питомими витратами $(w(t))$ немає, оскільки фактично для отримання витрат за життєвий цикл необхідно знати передбачувану його тривалість (T_{LC}).

$$L = w(t) \cdot T_{LC} \cdot d, \tag{7.41}$$

де d - нормувальний множник.

Питомі витрати за цикл $w(t)$ є нормованою величиною, до того ж нормувальний множник (d) для суднових технічних засобів являє собою величину планових витрат за цикл експлуатації, що дорівнює за тривалістю напрацюванню на відмову.

У джерелі [380] під ефективністю розуміють добуток низки коефіцієнтів, які у українських публікаціях у галузі технічної експлуатації не застосовують, окрім, мабуть, ймовірності безвідмовної роботи та ймовірності відновлення в заданий час. За закладеними в це поняття величинами воно являє собою відносну величину ефективності використання потенціалу експлуатованого об'єкта. З використанням загальноприйнятих термінів українських публікацій можна запропонувати такі інтерпретації ефективності (E) для суден загалом і їхнього обладнання:

1. Для суден загалом як коефіцієнт використання провізної здатності судна:

$$E = \eta_{nc} = K_{\text г} \cdot K_{\text х} \cdot K_v \cdot K_{\text тв}, \tag{7.42}$$

де $K_{\text г}$ – коефіцієнт використання вантажопідйомності; $K_{\text х}$ – коефіцієнт ходового часу; K_v – коефіцієнт використання проектної швидкості; $K_{\text тв}$ – коефіцієнт технічного використання.

2. Для суднових технічних засобів:

$$E = K_{\text р} \cdot K_{\text тв}, \tag{7.43}$$

де $K_{\text тв}$ – коефіцієнт технічного використання; $K_{\text р}$ – коефіцієнт використання потужності (тільки для головних і допоміжних двигунів і генераторів).

Для суден загалом, на думку автора, можливі два варіанти рішення: у нормованих величинах і в абсолютних. У разі застосування абсолютних величин витрати за життєвий цикл (L) визначаються загальноприйнятим порядком і виражаються в грошових одиницях. У цьому випадку ефективність також має виражатися в грошовому еквіваленті, а саме:

$$E^* = K_{\text г} \cdot K_{\text х} \cdot K_v \cdot K_{\text тв} \cdot T_{LC} \cdot f, \tag{7.44}$$

де (f) – вартість тайм-чартеру цього судна.

З огляду на занадто грубе поширення поточної величини тайм-чартеру на весь термін служби судна, більш об'єктивним буде використання відносних величин. У цьому разі ефективність вимірюватиметься коефіцієнтом використання провізної здатності (7.42), а витрати за життєвий цикл можуть бути

визначені у відносному вигляді як: $l = L/L_1$, где L - витрати за цикл для поточного варіанта, а L_1 – початкова величина витрат.

Для суднових технічних засобів зручніше користуватися безрозмірними величинами, тобто координатною системою $(w(t) - E)$ (питомі витрати-ефективність); графічна інтерпретація розв'язання задачі наведена на Рисунку 7.21.

Розгляд Рисунка 7.22 показує, що найкращим варіантом є рішення, що приводить до підвищення ефективності та скорочення витрат. Якщо вибирати між рішеннями 1 і 2, то кращим є рішення 2, проте необхідно визначити переважання приросту ефективності над приростом витрат, як про це було сказано вище. У дослідженні [418] розглядалася можливість чисельної оцінки ефективності від переходу до технічного обслуговування і ремонту на підставі передбачуваного стану об'єктів, з урахуванням ймовірності уникнення відмов завдяки системі технічного обслуговування. Підхід, описаний вище, дозволяє оцінити переваги переходу на технічне обслуговування і ремонт за передбачуваним станом, одночасно змінюючи не лише тривалість експлуатаційного циклу, а й ймовірність уникнення відмов.

Для прикладу було проведено дослідження ефективності та співставлення результатів для суднових технічних засобів і конструкцій вантажних суден з використанням безрозмірних величин, тобто координатною системою $w(t) - E$ (питомі витрати - ефективність використання ресурсів); графічна інтерпретація розв'язання задачі представлена на Рисунку 7.22, який ілюструє результати розрахунку представлені у Таблиці 7.3.

Таблиця 7.3 – Результати розрахунку нормованих показників питомих витрат та ефективності використання ресурсів

Позначення стратегії ТО	Питомі витрати - $w(t)$	Ефективність використання ресурсів - E
A_1	0,4916	0,4887
A_2	0,6245	0,4358
A_3	0,6587	0,6324
A_4	0,3884	0,6952

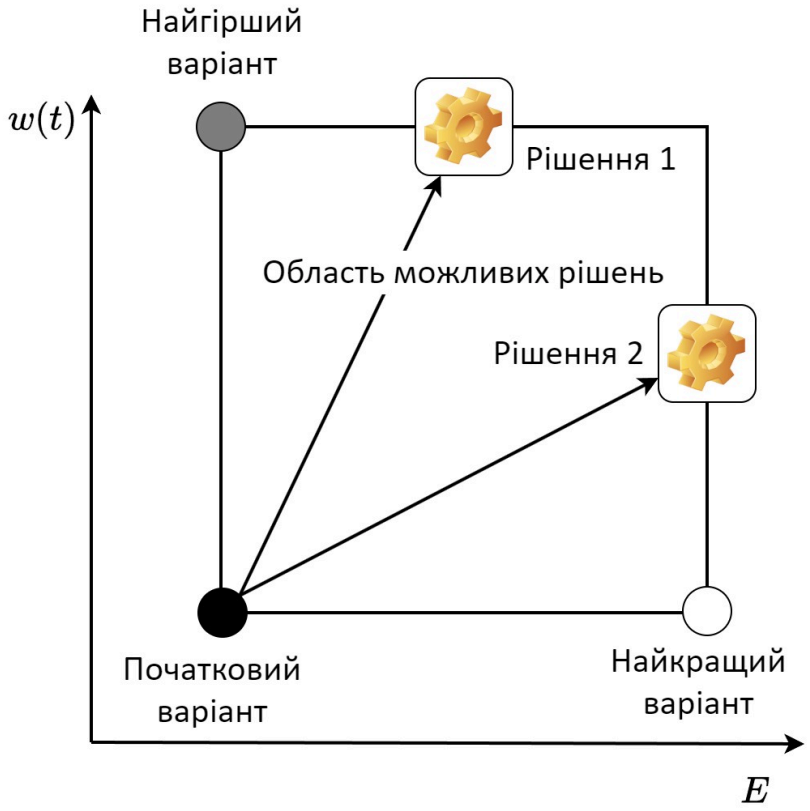


Рисунок 7.21 – Шаблон для візуалізації рішення завдання підвищення ефективності технічного обслуговування

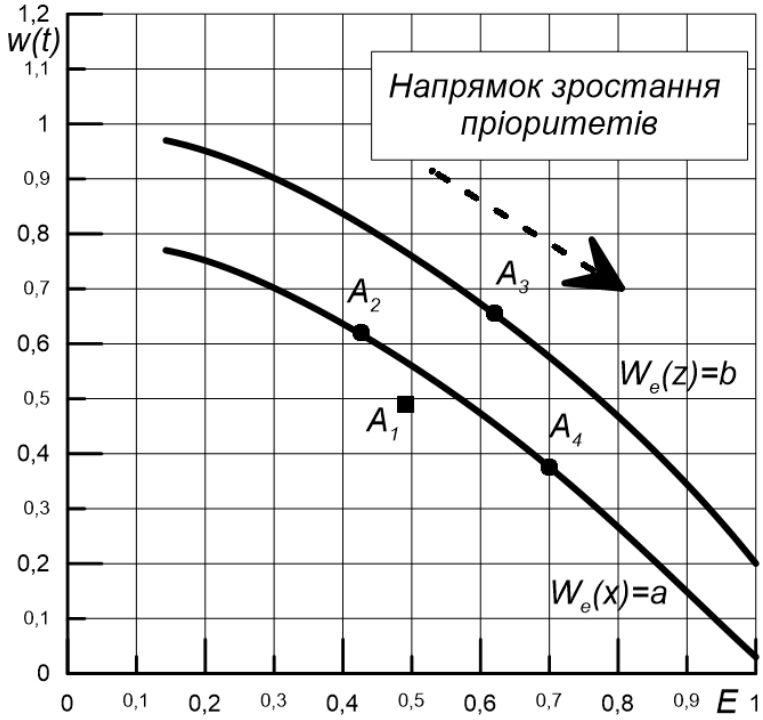


Рисунок 7.22 – Графічна інтерпретація результатів вирішення задачі підвищення ефективності

Питомі витрати за цикл $w(t)$ є нормованою величиною, до того ж нормувальний множник для суднових технічних засобів являє собою величину планових витрат за цикл експлуатації, що дорівнює за тривалістю напрацюванню на відмову [120]. Величина E ефективності використання ресурсів, також нормується відповідним нормувальним множником.

Аналіз Рисунка 7.23 демонструє, що у порівнянні стратегій $A_2 - A_4$ системи КПТОВС із стратегією регламентного технічного обслуговування A_1, найкращим варіантом є рішення, що призводить до підвищення ефективності та скорочення витрат. Якщо вибирати між рішеннями A_3 і A_4, то кращим є рішення A_4 , проте необхідно визначити переважання приросту ефективності над приростом витрат, як про це було сказано вище. При співставленні стратегій A_4 і A_1 відмічається зниження питомих витрат на 20,9 % у сукупності із підвищенням ефективності використання ресурсів на 29,7 %.

Для суднових технічних засобів у статті [123] пропонувалося кількісно оцінювати ефективність переходу на технічне обслуговування і ремонт за станом за збереження ймовірності запобігання відмов системою технічного обслуговування. Цей підхід дозволяє оцінювати ефективність переходу не тільки на прескриптивне технічне обслуговування, а також на технічне обслуговування і ремонт за станом, враховуючи одночасні зміни не лише тривалості циклу експлуатації, але й імовірності запобігання відмов.

Ухвалення ефективного рішення багато в чому залежить від наявності та якості інформації про фактичну надійність та змін у неї, а також про фактичні витрати. Необхідно зазначити, що для того, щоб системи КПТОВС наповнилася сучасним змістом, необхідно, щоб вона включала низку додаткових компонентів. До них відносяться:

1. Ідентифікація видів відмов для збереження функцій, які впливають на функціонування;

2. Розташування необхідного обладнання на основі аналізу пріоритетів;

3. Вибір практично застосовних та ефективних завдань технічного обслуговування, які зберігають і відновлюють функції.

Отже, необхідно, щоб системи КПТОВС визначала пріоритети відповідно до потреб у технічному обслуговуванні та фокусувала ресурси судна на завданнях, які спрямовані на підвищення надійності судна. В цьому контексті можуть бути рекомендовані критерії оцінки для насичення новим змістом системи КПТОВС:

1. Які функції та пов’язані з ними необхідні стандарти функціонування судна та його технічних засобів в умовах експлуатації?

2. В яких випадках відмова будь-якого елемента може призвести до втрати ним функцій, функцій технічного засобу і функцій судна?

3. Які є причини кожної функціональної відмови?

4. Які прояви супроводжують кожну відмову (її прояв)?

5. Які наслідки має кожна відмова (її наслідки)?

6. Які заходи слід вжити для передбачення або запобігання кожній відмові (профілактичні завдання, їх перелік, локації та терміни виконання)?

7. Якщо відповідне профілактичне завдання неможливо знайти (не можна виконати необхідні дії), то яким чином слід діяти?

Таким чином створення сучасної системи технічного обслуговування починається з визначення переліку функцій, які необхідно забезпечити. З урахуванням того, що ці функції мають бути розподілені за пріоритетом відповідно до наслідків втрати функціонування, з одного боку, необхідний збір фактичної інформації про наслідки відмов, а з іншого - має існувати можливість зміни пріоритету функцій самим обслуговуючим персоналом.

Говорячи про обсяг оперативної інформації, варто зазначити, що він безумовно збільшиться. Однак сама система технічного обслуговування охоплює фактично всі компоненти системи діагностики та прийняття рішень. Це скоротить час на пошук несправностей і зменшить кількість помилок, зокрема в складних об’єктах.

7.6.2 Результати підвищення ефективності системи технічного обслуговування шляхом обґрунтованого впровадження об’єктів системи КПТОВС

Наукове обґрунтування доцільності впровадження нових об’єктів у систему технічного обслуговування повинно бути сфокусоване на критерії ефективності використання ресурсів. В якості прикладу розглянуто вирішення цього завдання за методикою описаною у Розділі 5.5 дисертації на прикладі типового суховантажного судна з різними механізмами, що обладнані силовою установкою. В якості потенційних об’єктів контролю технічного стану між технічними обслуговуваннями було обрано насоси, електродвигуни та вентилятори. Для контролю цих об’єктів може застосовуватися аналізатор спектра вібрацій підшипників. Це обладнання дозволяє визначити технічний стан кочення підшипників. Стан цих підшипників значно впливає на ресурс кілець ущільнювачів насосів та валу ротора електродвигуна. Своєчасна заміна цих компонентів сприяє збереженню технічного стану пов’язаних деталей. [119]

Додатково, за допомогою аналізатора спектра можна контролювати технічний стан елементів таких суднових технічних засобів, зокрема:

1. Підшипники: Аналізатор спектра може використовуватися для контролю стану підшипників у різних механізмах, таких як двигуни, генератори, насоси та вентилятори. Він дозволяє виявити ознаки відмови підшипників, такі як вібрація або шум, що можуть свідчити про їхню несправність.

2. Ротори: Аналізатор спектра може допомогти контролювати стан роторів електричних машин, таких як електродвигуни та генератори. Він дозволяє виявити небаланс ротора, знос підшипників або дефекти у статорі.

3. Турбокомпресори: Для контролю технічного стану турбокомпресорів також може застосовуватися аналізатор спектра. Він дозволяє виявити відхилення в роботі турбокомпресора, такі як вібрація, шум або зміна частотних характеристик.

4. Гідропневматичні системи: Аналізатор спектра може бути використаний для контролю гідропневматичних систем суднових технічних

засобів, таких як системи гідравлічного управління або пневматичні системи. Він дозволяє виявити проблеми, такі як протікання, зношення або несправність клапанів, що можуть впливати на роботу системи.

5. Електричні мережі: Аналізатор спектра може бути використаний для контролю електричних мереж на судні. Він дозволяє виявити несправності, такі як гармоніки, перенапруга або перетікання струму, що можуть призводити до пошкодження електричного обладнання.

Для спрощення розв'язання задачі було прийнято середній коефіцієнт варіації для швидкості зміни технічного стану, що дорівнює $V_v = 0.3$. За допомогою лінійної моделі зміни технічного стану було визначено характеристики системи регламентного технічного обслуговування та комплексного технічного обслуговування за станом. На Рисунку 7.23 наведено основні залежності ймовірності попередження відмов (P_{pre}) від інтервалу між технічними обслуговуваннями. У розрахунках було використано співвідношення параметра, що характеризує незадовільний стан у відношенні до аварійного ($a = 0.9$). Трудомісткість планового технічного обслуговування насоса було прийнято рівною ($H_{sch} = 15$ чол.год), а вартість 1 години роботи члена екіпажу ($q = 10\$$). Вартість комплекту підшипників насоса, вентилятора та електродвигуна залежно від розмірів становить у середньому ($C = 20\$$), тому $Z = C/qH_{sch} = 20/(10 \cdot 15) = 0.13$. Під час виконання розрахунків припускали, що витрати на проведення контролю становлять $0.01 \cdot H_{sch}$. Якщо прийняти $P_{pre} = 0.95$ як допустиму ймовірність запобігання відмовам, то для забезпечення такої безвідмовності необхідно виконувати технічне обслуговування з періодичністю $\Delta T_{sch} = 0.6$ відносного часу (t) (Рисунок 7.23).

Під відносним часом (t) розуміється відношення реального часу (T) до часу середнього напрацювання до відмови (T_{avg}). У цьому разі прийнято таку ймовірність з огляду на високі вимоги до безвідмовності, хоча могла бути прийнята й інша величина. Але якщо дотримуватися сформульованих вище

варіантів розв'язання задачі, це не принципово. Важливо, щоб ймовірність попередження відмов залишалася однаковою для двох методів.

У зв'язку з тим, що під час переходу на комплексне технічне обслуговування з прогнозуванням технічного стану періодичність необхідно збільшити на величину від 50 до 65 %, було зроблено розрахунки на моделі для регламентного технічного обслуговування зі збільшеним інтервалом між ними і виконанням проміжного контролю. Було зроблено два варіанти з періодичністю ($\Delta t_{sch} = 0.8$) і ($\Delta t_{sch} = 0.9$). Забезпечити адекватність умов порівняння, тобто однакову ймовірність запобігання відмовам $\left(P_{pre} = 0.95\right)$ можливо варіюванням періодичності контролю. На Рисунку 7.25 представлено результати проведених розрахунків.

За графіками можуть бути визначені інтервали контролю технічного стану (Δt_c). За інтервалів регламентних технічних обслуговувань, що дорівнюють ($\Delta t_{sch} = 0.9$), щоб забезпечити $\left(P_{pre} = 0.95\right)$, як видно, періодичність контролю у відносних величинах має становити ($\Delta t_c = 0.225$) відносних одиниць. При цьому питомі витрати на технічне обслуговування з урахуванням витрат на змінно-запасні частини становитимуть ($w(t)^* = 1.5$) відносні одиниці, тоді як за застосування регламентного технічного обслуговування вони становили ($w(t) = 2$) (Рисунок 7.24).

При зменшенні величини інтервалу регламентного технічного обслуговування до ($\Delta t_{sch} = 0.8$), буде спостерігатися зниження витрат на технічне обслуговування об'єктів до ($w(t) = 1.82$), але водночас також знижується ймовірність запобігання відмов до $\left(P_{pre} = 0.72\right)$.

У зв'язку з цим доцільніше розглянути інший варіант поліпшення роботи системи технічного обслуговування. А саме, зберігши періодичність рівною ($\Delta t_{sch} = 0.8$), запровадимо між технічними обслуговуваннями додатковий контроль, що дасть змогу збільшити до необхідного рівня ймовірність запобігання відмовам. Результати цих розрахунків на тій самій моделі зображено на Рисунку 7.26.

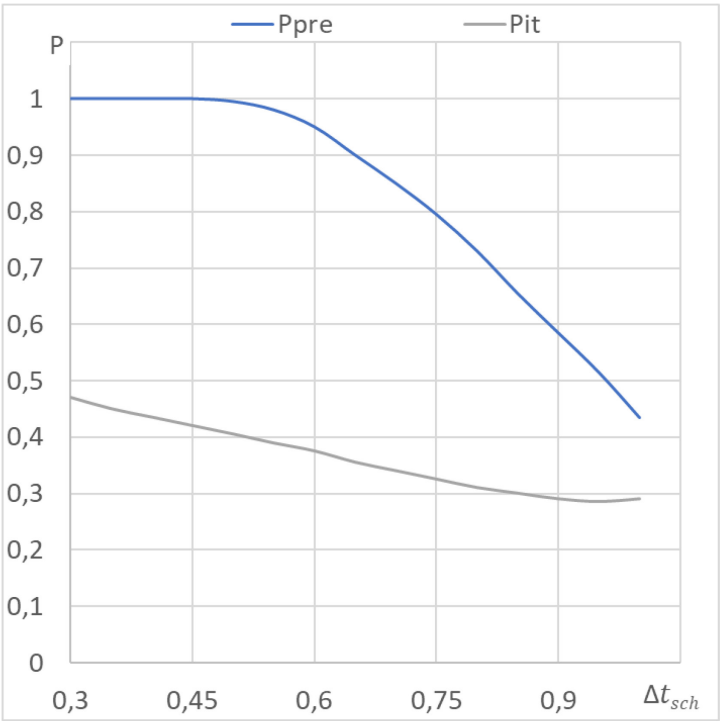


Рисунок 7.23 – Залежність своєчасності і ймовірності попередження відмов технічним обслуговуванням за регламентом від періодичності технічного обслуговування

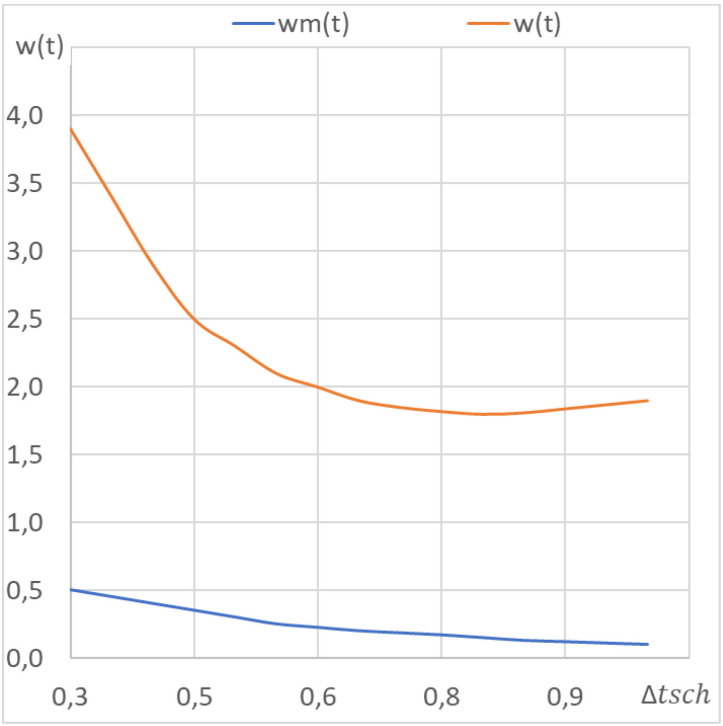
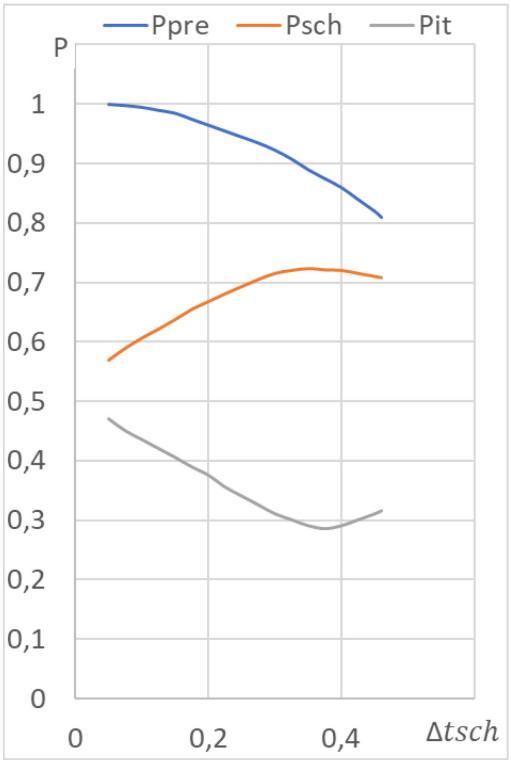


Рисунок 7.24 – Залежність питомих витрат при технічному обслуговуванні за регламентом від періодичності технічного обслуговування



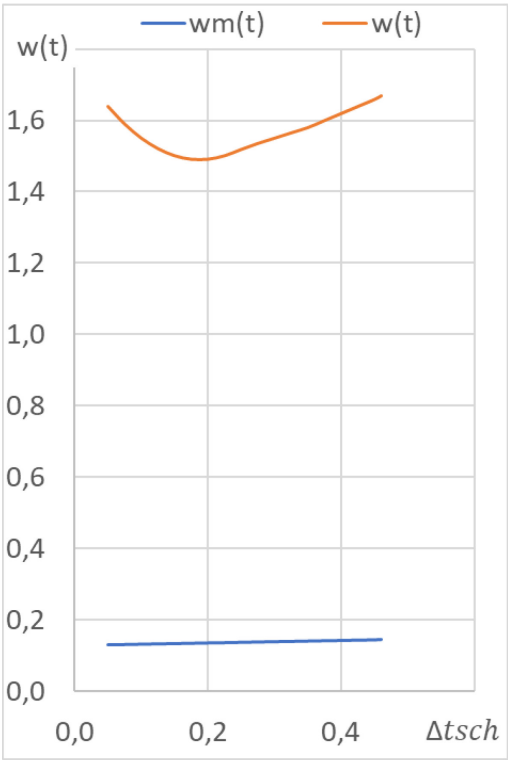
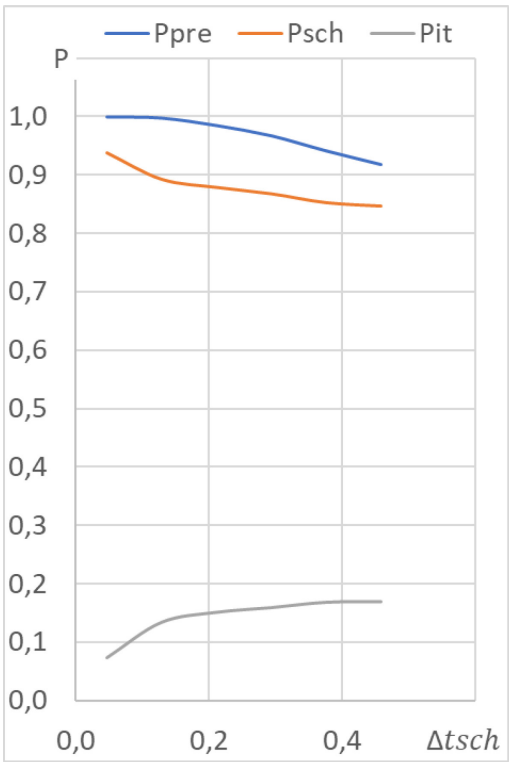


Рисунок 7.25 - Результати моделювання для регламентного технічного обслуговування ($\Delta t_{sch} = 0.9$) з проміжним контролем



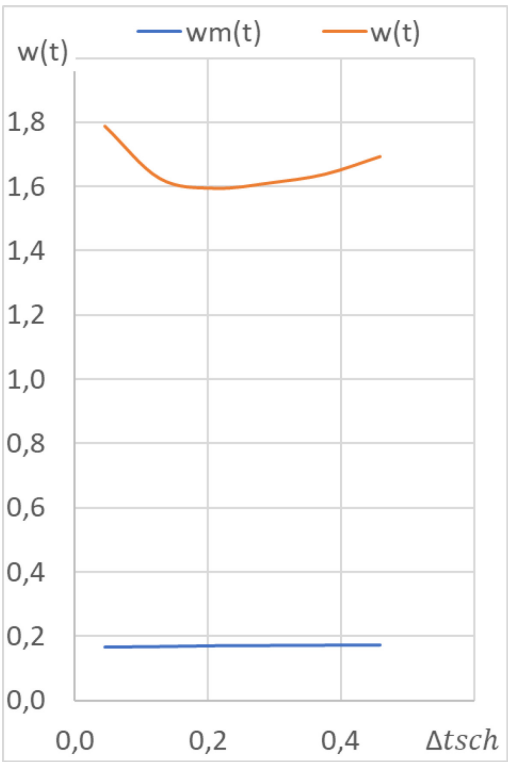


Рисунок 7.26 - Результати моделювання для регламентного технічного обслуговування ($\Delta t_{sch} = 0.8$) з додатковим проміжним контролем

Як видно з графіків, для досягнення того самого результату $\left(P_{pre} = 0.95\right)$ необхідно контроль проводити з періодичністю приблизно $(\Delta t_{sch} = 0.39)$. Однак, витрати при цьому слід очікувати приблизно рівними $(w(t)^* = 1.65)$.

Це результат дещо гірший за варіант за періодичності технічного обслуговування, що дорівнює $(\Delta t_{sch} = 0.9)$, але кращий, ніж якби контроль не здійснювався.

На Рисунку 7.26 звертає на себе увагу значно гірші результати щодо своєчасності виконання технічного обслуговування, $(P_{it}) = 0.168$ порівняно з випадком за умови $(\Delta t_{sch} = 0.9)$, $(P_{it}) = 0.35$, тобто майже дворазове погіршення. З огляду на те, що в розрахунках було прийнято співвідношення витрат на змінно-запасні частини до витрат на оплату праці, значно менше за одиницю (0,1), результат міг би бути істотно гіршим за дорогих замінних деталей. У даному випадку враховувалася тільки заміна під час технічного обслуговування відносно дешевих підшипників, і їхній невикористаний ресурс коштує недорого порівняно з вартістю робочої сили. Будь-які спроби за рахунок збільшення кількості перевірок технічного стану будуть малоефективні, тому що питомі витрати однаково не стануть меншими за перший варіант.

Вочевидь у цьому разі слід віддати перевагу інтервалу між регламентними технічними обслуговуваннями $(\Delta t_{sch} = 0.9)$, з проміжним контролем технічного стану з періодичністю $(\Delta t_c = 0.225)$. Якщо величини питомих витрат наведені в розрахунках для відносного часу (наші розрахунки якраз такі), то для отримання річного ефекту напрацювання замість формули (5.49) формула матиме вигляд:

$$E = (w(t) - w(t)^*) \cdot c \cdot q \cdot H_{sch}/T_{avg} \qquad (7.45)$$

У нашому випадку напрацювання на рік приблизно дорівнює половині середнього напрацювання до відмови: $c = 0.5 \cdot T_{avg}$. В такому разі, за формулою (7.45) отримаємо:

$$E = (2 - 1.5) \cdot 0.5 \cdot 10 \cdot 15 = 37.50 \text{ \$/рік}$$

Як зазначено у статті [119] якщо прийняти термін окупності обладнання для контролю технічного стану 5 років, то за умови контролю щонайменше 30

об’єктів (насосів, електродвигунів, вентиляторів), устаткування, що купується, повинно коштувати менше ніж $37.50 * 5 * 30 = 5625$ \$, а якщо контрольованих об’єктів буде 50, то є сенс купувати обладнання ціною до $37.50 * 5 * 50 = 9375$ \$.

Науковість та обґрунтованість вартості обладнання, що придбається для технічного обслуговування суднових технічних засобів вантажних суден, потребує уваги до деталей та точного підходу до розрахунків. Важливо враховувати, що в даному випадку було використано середній об’єкт як базис для обґрунтування вартості обладнання, і отримані результати мають наближений характер. Однак, для більш точного обґрунтування можливо провести аналогічні розрахунки для кожного окремого об’єкта перед переходом до комплексного технічного обслуговування з прогнозом технічного стану. Методика розрахунку залишається незмінною у таких випадках. Отримані результати розрахунків надають можливість аналізувати загальний ефект та приймати обґрунтовані рішення.

Ці факти підтверджують важливість наукового підходу та дослідницької роботи в процесі визначення вартості обладнання та ефективності комплексного технічного обслуговування суднових технічних засобів.

За використаною методикою обґрунтовується доцільність впровадження всіх об’єктів системи КПТОВС [119].

7.6.3 Результати адаптивізації параметрів системи КПТОВС

Національні та міжнародні нормативні документи з технічної експлуатації встановили найважливіші вимоги до виконуваного технічного обслуговування:

- має виконуватися відповідно до загальноприйнятих правил;
- має виконуватися відповідно до додаткових правил судноплавної компанії.

Під загальноприйнятими правилами розуміється виконання інструкції з експлуатації, поставленої заводом-виробником разом з механізмом, пристроєм, системою. Крім цього в Україні діють національні Правила технічної експлуатації суднових технічних засобів і конструкцій (ПТЕ) [435, 439]. Відомо,

що заздалегідь установити періодичність регламентного технічного обслуговування або періодичність контролю, за яких забезпечуватимуть одночасно планово-попереджувальний принцип і прийнятний для компанії рівень витрат на утримання судна, не завжди можливо. Крім того, у міру зносу судна можуть змінюватися параметри закономірностей зміни технічного стану і їх необхідно враховувати під час подальшої практики експлуатації. Таким чином, у процесі експлуатації судна потрібно вносити зміни в параметри системи технічного обслуговування суднових технічних засобів, і це санкціонується Українськими ПТЕ.

Для того, щоб такі зміни могли б бути зроблені, необхідно вирішити принаймні такі завдання:

- які параметри системи технічної експлуатації існують у даний момент часу;
- сформулювати цілі, яким має задовольняти конфігурація системи технічного обслуговування після коригування;
- визначити обсяг необхідної інформації для вирішення сформульованої мети;
- визначити нові параметри конфігурації системи технічного обслуговування;
- динамічно адаптувати параметри конфігурації системи технічного обслуговування для забезпечення найбільш можливої ефективності системи технічного обслуговування.

Управління технічним обслуговуванням значною мірою являє собою управління процесами зміни технічного стану, оскільки закономірності, що лежать в основі цих процесів, визначають потребу в технічному обслуговуванні, яка виникає. При цьому фактично виконуваний обсяг робіт з технічного обслуговування визначається не тільки фактичним станом об’єкта експлуатації, а й вимогами різних інструкцій, положень тощо, що регулюють діяльність суднових екіпажів. Безумовною метою будь-якої судноплавної компанії є повна гармонія фактичного стану, виконуваних вимог різних нормативних документів

і забезпечення при цьому безпеки судна та конкурентоспроможності судноплавної компанії.

Для того, щоб сформулювати цілі, яким має задовольняти конфігурація системи технічного обслуговування, необхідно визначити область параметрів технічної експлуатації, в якій функціонує система технічного обслуговування в поточний момент. При цьому важливо знати, що ж фактично описує той чи інший параметр. Наприклад, середньорічна трудомісткість технічного обслуговування за відсутності вимушених робіт описує значно більшою мірою вимоги заводу-виробника, ніж реальну потребу в технічному обслуговуванні. Причому метою планово-попереджувальної системи є повне виключення відмов або, принаймні, зведення їх числа до мінімуму. Відсутність відмов не свідчить про бездоганну надійність об'єкта експлуатації через рідкість цих подій. Тому аналізу повинні піддаватися не тільки загальні витрати на технічне обслуговування, а й фактичний технічний стан на момент виконання технічного обслуговування і закономірності його зміни.

Таким чином, для того, щоб дати об'єктивний висновок про те, наскільки ефективною є прийнята система технічного обслуговування, необхідно враховувати не тільки фактичні витрати, а й потенційні витрати, що могли б статися просто за умови збільшення або зменшення кількості циклів експлуатації, виходячи з фізичних закономірностей. Для розв'язання задачі, що дає відповідь на це запитання, необхідно для об'єкта відносно кожного виду технічного обслуговування визначити ті (n) параметрів технічного стану $(a_1, a_2, \dots, a_n)$, які визначають потребу у виконанні даного технічного обслуговування.

Далі за даними обліково-звітних документів за результатами виконаних операцій технічного обслуговування через фактичні напрацювання $(t_1, t_2, \dots, t_n)$ необхідно визначити середню швидкість зміни технічного стану (v_m) та її коефіцієнт варіації (V_v):

$$v_m = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\frac{a_i}{t_i}, \qquad V_v = \frac{1}{v_m}\sum_{i=1}^{N}\frac{\left(\frac{a_i}{t_i} - v_m\right)^2}{N}.$$

Для того, щоб можна було скористатися розрахунковими кривими (поліномами), наведеними в додатках, необхідно визначити нормувальний множник - середнє напрацювання до відмови, якщо задане аварійне значення цього параметра технічного стану (a_{fail}), або до незадовільного стану, якщо в інструкції задано лише значення параметра для незадовільної категорії технічного стану (a_{us}):

$$T_{fail} = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} a_{fail}\cdot\frac{t_i}{a_i}, \qquad T_{us} = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} a_{us}\cdot\frac{t_i}{a_i}.$$

Слід зазначити, що якщо відомі тільки фактичні або прогнозовані напрацювання до незадовільного стану, то весь аналіз може стосуватися тільки досягнення або недосягнення незадовільного стану, тобто йтиметься тільки про гамма-відсоткові ресурси, до того ж у разі відомого критичного рівня граничного стану, яким керувався завод-виробник під час призначення граничного стану для експлуатаційника. Усі залежності для ймовірності попередження відмов від періодичності регламентного технічного обслуговування або періодичності контролю під час технічного обслуговування за станом використовуються у відносних одиницях часу. Для визначення періодичності прескриптивного технічного обслуговування у відносних одиницях необхідно за відомою з інструкції періодичністю (Δt_{reg}) або періодичністю контролю (Δt_c) визначити їхнє відносне значення:

$$\Delta T_{reg} = \begin{cases}\Delta t_{reg}/T_{fail}\\ \Delta t_{reg}/T_{us}\end{cases}, \qquad \Delta T_c = \begin{cases}\Delta t_c/T_{fail}\\ \Delta t_c/T_{us}\end{cases},$$

За знайденою величиною коефіцієнта варіації для швидкості зміни технічного стану та застосовуваного методу технічного обслуговування визначається та робоча точка системи технічного обслуговування, що визначає очікувану ймовірність запобігання відмовам системою технічного обслуговування (P_{pre}), очікувану тривалість циклу експлуатації (T_{reg}), або

(T_{cond}), або $(T_{prescript})$ та очікуваний залишковий ресурс (R_{res}), виражені у відносних одиницях часу. Причому залишковий ресурс до відмови визначатиметься, якщо відомо аварійне значення параметра технічного стану, і, якщо воно невідоме, то визначатиметься залишковий ресурс до незадовільного стану. За цими величинами можуть бути визначені величини очікуваних витрат на технічне обслуговування, змінно-запасні частини за цикл експлуатації та віднесені до тривалості циклу. Під час визначення витрат на технічне обслуговування вихідними даними є трудомісткість технічного обслуговування, годинна ставка членів екіпажу, зайнятих у роботі, вартість запасних частин і матеріалів, інші витрати на технічне обслуговування, а також оцінка непланових витрат у разі відмови згідно зі структурою витрат.

Для того, щоб сформулювати мету зміни конфігурації системи технічного обслуговування вантажного судна на основі визначення робочої точки, необхідно враховувати такі обставини:

- у результаті зміни параметрів системи технічного обслуговування безвідмовність об’єкта не повинна погіршитися;
- зменшення витрат на технічне обслуговування забезпечується скороченням суми планових і непланових витрат, при цьому планова складова може навіть зрости;
- мінімальна зміна положень інструкції заводу виробника щодо регламентного технічного обслуговування, з можливим істотним поліпшенням параметрів функціонування системи технічного обслуговування, полягає у введенні проміжного контролю технічного стану між регламентними технічного обслуговування з обов’язковим прогнозуванням тренду розвитку контрольованого стану;
- будь-який додатковий контроль, як ініціатива технічного менеджменту судноплавної компанії, що виконується між регламентними технічними обслуговуваннями за допомогою засобів технічного контролю і діагностування, сприяє скороченню непланової складової витрат на технічне

обслуговування та збільшує частку своєчасних операцій технічного обслуговування, що виконуються за станом (прогнозом стану);

- технічне обслуговування за станом, якщо воно не передбачено інструкцією заводу-виробника, не повинно застосовуватися для технічних засобів, які не входить до переліку об'єктів, що перераховані в правилах Українського морського регістра судноплавства "Частина VII. Механічні установки";
- у разі зміни конфігурації системи технічного обслуговування судноплавна компанія має враховувати наслідки цього у відстоюванні своїх інтересів при роботі зі страховою компанією в разі аварійних випадків;

Component / Object	Job ID	Job Interval	Dept.	Work Date Last	Work Date Due	Month 1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Year : **2023**																	
RENEW LO - LIFT CAR ENGINE	215-18_LO-16	Month	ENGINE	04-04-22	04-04-23				D								
MOBILE LIFTER CAR	210-06-36_PC C_LFTCR	Month	DECK	02-11-22	02-05-23					D							
373 - OPEN VENTILATION SYSTEM FOR CAR HOLDS																	
MAINTENANCE CAR DECK VENTILATOR	210-01-05_PC C_HLDVENT	Month	DECK	11-12-22	11-03-23			D									
381.730 - PORTABLE FLAMMABLE GAS DETECTOR																	
TEST OF GAS DETECTOR	381_GASDETECT	Month	DECK	27-02-23	27-03-23			D									
CALIBRATION OF FLAMABLE GAS DETECTOR	381_GASDETECT-1	Month	DECK	28-09-22	28-03-23			D									
381.750 - PORTABLE O2 METER																	
TEST PORTABLE O2 METER	381_O2MTR	Month	DECK	27-02-23	27-03-23			D									
401.001 - RUDDER																	
CHECK RUDDER	401.001_RUDDER	Month	DECK	05-01-21	05-07-23							D					
402.031 - NECK BUSH / LOWER PINTLE BUSH																	
RENEW LO - RUDDER CARRIER	215-18_LO-25	Month	ENGINE	02-02-21	02-08-23								D				
STEERING GEAR - RECORED WEAR DOWN	220-01-04_402.031	Month	ENGINE	10-02-21	10-08-23								D				
403.201 - STEERING GEAR COMPONENTS																	
FILL & APPLY GREASE - STEERING GEAR	215-18_GREASE-03	Month	ENGINE	06-01-23	06-07-23							D					
STEERING GEAR - CLEAN LINE FILTER & SAFETY DEVICE TEST	220-01-02_403.201	Month	ENGINE	09-02-23	09-08-23								D				

Рисунок 7.27 – Фрагмент плану прескриптивного технічного обслуговування системи КПТОВС

- під час застосування різного обладнання для контролю технічного стану слід враховувати, що неможливо створити прилад, який би забезпечив

можливість контролю за всіма процесами, які протікають в об’єкті експлуатації, і, передусім, необхідно контролювати найімовірніші процеси, які протікають із найбільшою швидкістю. У цьому разі під час проведення комплексного прескриптивного технічного обслуговування з прогнозуванням стану можуть бути безпосередньо проконтрольовані багато інших важливих процесів.

Результатом процесу адаптивізації та динамічного корегування, сервісом shipmonitoring.org, параметрів системи технічного обслуговування вантажних суден є динамічно оновлюваний план технічного обслуговування, приклад якого наведено на Рисунку 7.27.

Висновки по розділу 7

1. Було розроблено підхід і метод загальної адаптивізації параметрів системи технічного обслуговування для підвищення ефективності системи технічного обслуговування вантажного судна за допомогою застосування цифрових стратегій. У цьому контексті була представлена структура алгоритму для вирішення задачі адаптивізації, де термін технічного обслуговування призначається, виходячи з максимуму різниці між кривими ймовірності досягнення незадовільного стану та відмови.

2. Запропоновані методики адаптивізації системи технічного обслуговування спрямовані на максимізацію коефіцієнта технічного використання, ефективності використання ресурсів та встановлення оптимальної періодичності технічного обслуговування в рамках формування цифрової стратегії. Проведення досліджень за різними критеріями дозволяють обирати оптимальні параметри синтезу цифрової стратегії з урахуванням особливостей операцій і технології використання в умовах експлуатації, а також визначати вплив окремих факторів на ефективність системи технічного обслуговування вантажних суден в реальних умовах експлуатації. Метод адаптивного формування параметрів системи технічного обслуговування за ефективністю використання ресурсів дозволяє з’ясовувати причини незадовільного функціонування системи технічного обслуговування та аналізу її ефективності. Це в кінцевому підсумку сприяє надійному функціонуванню суднових технічних

засобів та суттєвій оптимізації витрат на експлуатацію та технічне обслуговування судна.

3. Використання отриманих прогнозних моделей у складі систем ACMS та ShipDiMRO на основі розробленого віртуального підприємства «shipmonitoring.org», що спеціалізується на експлуатації водного транспорту дозволяє забезпечити прогнозування не лише параметрів ефективності системи технічного обслуговування вантажних суден, а і параметрів технічного стану суднових технічних засобів на прикладі температури та вібрації СТЗ в процесі експлуатації в умовах інтелектуальних транспортних систем. Використовуючи запропонований підхід, формується резерв, що суттєво підвищує ефективність системи технічного обслуговування на 28 % за критерієм ефективності використання ресурсів. Технічне обслуговування вантажних суден може здійснюватися відповідно до стратегії PxM, що дозволяє судновласникам і операторам: приймати оперативні рішення на основі відомого стану компонентів обладнання; оцінювати ризики для майбутніх контрактів на основі надійності компонентів обладнання; максимізувати експлуатаційну готовність обладнання, виконуючи капітальні ремонти тільки в разі потреби, значно знижуючи ймовірність незапланованих поломок і помилок в обслуговуванні; бути добре поінформованими про несправності до того, як вони призведуть до поломки; збільшити термін служби обладнання, маючи зворотний зв’язок в реальному часі щодо умов, які спричиняють надмірне спрацювання устаткування; знизити загальну вартість володіння та максимізувати рентабельність.

4. Із отриманих результатів оцінювання параметрів системи технічного обслуговування деяких суднових технічних засобів судна випливає, що рівень питомого ризику напряму впливає на обсяг планового технічного обслуговування. У випадку збільшення ризику до 0.05, співвідношення непланових витрат до планових має бути не більше 2:1. Порівняння результатів при встановленому резерві ресурсів у 10 % свідчить, що сумарні фактичні ризики для середньо-оборотних двигунів перевищують припустимі межі. Для мало-оборотних двигунів величина середньорічного ризику також наближається до неприпустимого рівня, що створює загрозу для існування планово-попереджувальної системи технічного обслуговування. Враховуючи це, корекція

неприпустимих ризиків для суден із середньо-оборотними двигунами має бути більш суттєвою. Також отримані результати вказують на те, що неприпустимий ризик для суден із середньо-оборотними двигунами приблизно у 2-3 рази менший, ніж середньорічний ризик, що може порушити баланс бюджету на технічне обслуговування.

5. В процесі проведення досліджень був отриманий результат суттєвого впливу цифрових стратегій на зміну параметрів системи технічного обслуговування та показники ефективності системи технічного обслуговування вантажного судна. Основний ефект досягається за рахунок поєднання виконання операцій технічного обслуговування з необхідним оглядом класифікаційним товариством. Після узгодження з класифікаційним товариством можна розглядати потенціал збільшення термінів між капітальними ремонтами окремих суднових технічних засобів або конструкцій до 50 %, при умові проведення обов'язкового контролю та прогнозування їх технічного стану. Це значно збільшує міжремонтні інтервали та підвищує ефективність системи технічного обслуговування за критерієм оптимізації використання ресурсів.

6. Для визначення ефективності технічного обслуговування вантажних суден шляхом порівняння стратегій системи КПТОВС із стратегією регламентного технічного обслуговування, найкращим варіантом є рішення, що призводить до підвищення ефективності та скорочення витрат. При співставленні стратегій відмічається зниження питомих витрат на 20,9 % у сукупності із підвищенням ефективності використання ресурсів на 29,7 %. Наукове обґрунтування доцільності впровадження нових об'єктів у систему технічного обслуговування повинно бути сфокусоване на критерії ефективності використання ресурсів. Отримані результати розрахунків вартості обладнання надають можливість аналізувати загальний ефект та приймати обґрунтовані рішення. Результатом процесу адаптивізації та динамічного корегування, сервісом shipmonitoring.org, параметрів системи технічного обслуговування вантажних суден є динамічно оновлюваний план технічного обслуговування.

Матеріали розділу 7 опубліковано в джерелах [118, 119, 120, 121, 122, 123, 124, 129, 143, 301, 307, 350, 362, 365, 385, 416, 418, 431].

ВИСНОВКИ

У дисертації виконано теоретичне узагальнення і нове вирішення наукової проблеми підвищення ефективності систем технічного обслуговування вантажних суден шляхом формування та впровадження інформаційної системи технічного обслуговування, що дозволяє прогнозувати та враховувати відмови суднових технічних засобів і наслідки прийнятих рішень для підвищення експлуатаційної ефективності вантажних суден в умовах експлуатації. Результати досліджень дозволили сформулювати основні теоретичні та науково-практичні висновки:

1. Аналіз умов, процесів і ефективності реалізацій шляхів підвищення ефективності системи технічного обслуговування вантажних суден в умовах експлуатації показує, що вони мають низку недоліків і не гарантують вирішення загальних проблем в повному обсязі. Крім того, вирішення означеної проблеми в цілому, суттєво залежить, з урахуванням існуючих вимог, від технічного стану СТЗіК, умов експлуатації вантажного судна та обраної стратегії обслуговування. Тому, при вирішенні вказаної проблеми виникає потреба у наявності повної інформації про предмет дослідження, яку можливо реалізувати створенням суднової інформаційної системи технічного обслуговування, наприклад, через поєднання систем ACMS та ShipDiMRO, в основу яких покладено інформаційну складову на основі відомостей про технічний стан СТЗ в умовах експлуатації та параметри системи технічного обслуговування вантажного судна на різних етапах його функціонування у життєвому циклі. Це, в свою чергу, дозволить уникнути недоліків систем технічного обслуговування.

2. Розроблено концепцію підвищення ефективності систем технічного обслуговування вантажних суден в умовах експлуатації на основі цифрових стратегій, в основу якої покладено інформаційну складову на основі відомостей про технічний стан суднових технічних засобів і конструкцій та показники ефективності системи технічного обслуговування на різних етапах експлуатації. Реалізація концепції базується на використанні системного підходу, аналізу інформаційних потоків суднових технічних засобів та параметрів системи

технічного обслуговування вантажних суден, чим забезпечується вирішення проблеми формування та оцінювання способів підвищення ефективності системи технічного обслуговування вантажних суден на різних етапах їх життєвого циклу, а саме на стадіях проектування і використання в умовах експлуатації. Для створення концептуального підходу, формалізації співвідношень основних загальних і локальних задач, розроблена і запропонована формалізована схема і модель системи КПТОВС, за допомогою якої забезпечується взаємодія основних управлінських рішень. Підвищення ефективності системи технічного обслуговування вантажних суден в умовах експлуатації на різних етапах життєвого циклу реалізується за допомогою системи КПТОВС у вигляді системної взаємодії складових інформаційної системи моніторингу СТЗіК та управління параметрами системи технічного обслуговування, а також комплексної математичної моделі.

3. Розроблено інформаційну систему оцінювання способів підвищення ефективності систем технічного обслуговування вантажних суден в умовах експлуатації з можливостями прогнозування параметрів технічного стану та параметрів системи технічного обслуговування у складі системи КПТОВС. Розроблена і сформована методика дослідження, аналітична та об’єктна модель предметної області для оцінки можливих шляхів підвищення ефективності систем ТО вантажних суден. Ця модель включає в себе можливості прогнозування стану системи ТО під час її експлуатації як складної системи. Були визначені основні етапи створення цієї моделі, включаючи виділення структурних елементів та їх взаємозв’язків і докладно визначена структура бази даних для системи моніторингу, діагностики та прогнозування показників ефективності ТО та стану СТЗіК. Це дало можливість при створені системи КПТОВС отримати єдиний підхід для формування предметної області інформаційної системи моніторингу і оцінювання способів підвищення ефективності системи технічного обслуговування вантажних суден, що в свою чергу дозволяє дистанційно враховувати, оцінювати, аналізувати і прогнозувати

вплив управлінських рішень на параметри системи технічного обслуговування та технічного стану СТЗіК.

4. Для забезпечення функціонування бортового і хмарного комплексу інтелектуальних транспортних систем розроблені алгоритми збору даних про ефективність системи ТО та стан СТЗіК, а також алгоритми діагностики стану та визначення несправностей у складі розробленої інформаційної системи. Також були розроблені алгоритми для прогнозування значень контрольованих параметрів в умовах експлуатації. На основі цієї інформаційної моделі і алгоритмів прогнозування були створені інформаційно-програмні комплекси "ShipDiMRO" і "ACMS" в рамках віртуального підприємства "shipmonitoring.org", яке здійснює технічне обслуговування вантажних суден.

5. Розроблено загальну методологію формування та оцінювання способів підвищення ефективності системи технічного обслуговування вантажного судна в умовах експлуатації на основі цифрових стратегій у складі системи КПТОВС. Для цього розроблено модель функціонування системи КПТОВС , яка базується на системних об’єктах і дозволяє структурувати потенційні стратегії технічного обслуговування та аналізувати вплив різних цифрових стратегій на підвищення ефективності системи технічного обслуговування в рамках розробленої моделі функціонування системи. Для її функціонування розроблено і обґрунтовано логічну структуру процесу оцінювання та вибору способу підвищення ефективності системи технічного обслуговування вантажного судна в умовах експлуатації, а також структуру методики, яка дозволяє формувати цикл підвищення ефективності системи технічного обслуговування вантажного судна в умовах експлуатації з використанням цифрових стратегій. Застосування системи дозволяє систематизувати можливі схеми цифрових стратегій за морфологічними ознаками, проводити синтез і аналіз існуючих і перспективних стратегій технічного обслуговування засобів транспорту.

6. Розроблено математичні моделі процесів технічного обслуговування і зміни технічного стану СТЗіК системи КПТОВС для оцінювання ефективності

управління параметрами системи технічного обслуговування в залежності від обраної стратегії і умов експлуатації.

7. Розроблено методику дослідження ефективності системи технічного обслуговування вантажних суден в процесі експлуатації. Застосування математичної моделі і розробленої методики дозволяє проводити оцінювання економічної ефективності прийнятих рішень під час управління системою технічного обслуговування, оцінювати стан системи технічного обслуговування та ефективність переходу на КПТОВС.

8. Для підтвердження розробленої концепції та проведення експериментальних випробувань суднових технічних засобів у складі системи КПТОВС розроблено автоматизований бортовий інформаційний комплекс ACMS та Web-сервіс ShipDiMRO. Це дало можливість забезпечити інформаційний обмін між інтелектуальними елементами, у межах їх сукупностей, для здійснення дистанційного моніторингу, діагностування, можливості прогнозування параметрів технічного стану СТЗіК, контролю та управління параметрами системи технічного обслуговування вантажних суден.

9. Проведено експериментальні дослідження ефективності процесів автоматичного оцінювання технічного стану суднових технічних засобів та адаптивізації параметрів системи технічного обслуговування в умовах експлуатації у складі цифрової стратегії. Експериментальне визначення параметрів системи технічного обслуговування для заданих умов їхньої адаптивізації у складі системи КПТОВС демонструє значний сумарний ефект у розмірі 289.68 дол.США/тис.год, як за результатами одного процесу зміни технічного стану допоміжного двигуна, так і у розмірі 28.45 дол.США/тис.год за результатами одночасного аналізу двох процесів зміни технічного стану баластного насосу.

10. У процесі експериментальних досліджень визначення параметрів системи технічного обслуговування для заданих умов динамічного корегування термінів технічного обслуговування вантажних суден у складі комплексної прескриптивної системи обслуговування судна отримано збільшення фактично

реалізованого ресурсу циліндрової втулки допоміжного двигуна з 74.6 % за регламентного методу технічного обслуговування до 93.7 % за прескриптивного методу технічного обслуговування із контролем і прогнозуванням технічного стану. Результатом процесу адаптивізації та динамічного корегування, сервісом shipmonitoring.org, параметрів системи технічного обслуговування вантажних суден є динамічно оновлюваний план технічного обслуговування.

11. Проведено оцінювання впливу характеристик цифрових стратегій на підвищення ефективності системи технічного обслуговування вантажних суден в умовах експлуатації. Був отриманий результат суттєвого впливу цифрових стратегій на зміну параметрів системи технічного обслуговування та показники ефективності системи технічного обслуговування вантажного судна. Основний ефект досягається за рахунок поєднання виконання операцій технічного обслуговування з необхідним оглядом класифікаційним товариством. Після узгодження з класифікаційним товариством можна розглядати потенціал збільшення термінів між капітальними ремонтами окремих суднових технічних засобів або конструкцій до 50 %, при умові проведення обов’язкового контролю та прогнозування їх технічного стану. Це значно збільшує міжремонтні інтервали та підвищує ефективність системи технічного обслуговування за критерієм оптимізації використання ресурсів.

12. Для визначення ефективності технічного обслуговування вантажних суден шляхом порівняння стратегій системи КПТОВС із стратегією регламентного технічного обслуговування, найкращим варіантом є рішення, що призводить до підвищення ефективності та скорочення витрат. При співставленні стратегій відмічається зниження питомих витрат на 20,9 % у сукупності із підвищенням ефективності використання ресурсів на 29,7 %. Наукове обґрунтування доцільності впровадження нових об’єктів у систему технічного обслуговування повинно бути сфокусоване на критерії ефективності використання ресурсів. Отримані результати розрахунків вартості обладнання надають можливість аналізувати загальний ефект та приймати обґрунтовані рішення.

13. Розроблено загальний метод адаптивізації параметрів системи технічного обслуговування шляхом застосування цифрових стратегій для підвищення ефективності системи технічного обслуговування вантажного судна в умовах експлуатації та узагальнення результатів досліджень. У цьому контексті була представлена структура алгоритму для вирішення задачі адаптивізації, де термін технічного обслуговування призначається, виходячи з максимуму різниці між кривими ймовірності досягнення незадовільного стану та відмови. Реалізація розробленої концепції і використання представленої системи дозволяють підвищувати ефективність системи технічного обслуговування за обраним критерієм.

14. Запропоновані методики адаптивізації системи технічного обслуговування спрямовані на максимізацію коефіцієнта технічного використання, ефективності використання ресурсів та встановлення оптимальної періодичності технічного обслуговування в рамках формування цифрової стратегії. Проведення досліджень за різними критеріями дозволяють обирати оптимальні параметри синтезу цифрової стратегії з урахуванням особливостей операцій і технології використання в умовах експлуатації, а також визначати вплив окремих факторів на ефективність системи технічного обслуговування вантажних суден в реальних умовах експлуатації. Метод адаптивного формування параметрів системи технічного обслуговування за ефективністю використання ресурсів дозволяє з’ясовувати причини незадовільного функціонування системи технічного обслуговування та аналізу її ефективності. Це в кінцевому підсумку сприяє надійному функціонуванню суднових технічних засобів та суттєвій оптимізації витрат на експлуатацію та технічне обслуговування судна.

15. Результати дисертаційної роботи прийняті до використання в PRESTIGE SHIPMANAGEMENT LTD, ТОВ «АКСОН ПОРТ СЕРВІС», НПП «ЛЕПТОН», ТОВ «ОДЕСЬКИЙ АВІАЦІЙНИЙ ЗАВОД» і в ОНМУ МОН України.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Abotaleb, M., Mindykowski, J., Dudojc, B., & Maśnicki, R. (2021). Digital Communication Links Cooperating with the Analog 4-20 mA Standard for Marine Applications. *Bulletin of the Polytechnic Institute of Iaşi. Electrical Engineering, Power Engineering, Electronics Section*, 67, 21 - 44. https://doi.org/10.2478/bipie-2021-0002

2. Afanasieva, O., & Pokora, Y. (2020). The formation of innovation policy of the seaport. *Rozvitok Metodìv Upravlìnnâ Ta Gospodarûvannâ Na Transportì*, 61–76. https://doi.org/10.31375/2226-1915-2020-3-61-76

3. Agarwal, R., Bruno, G., & Torchiano, M. (2000). An operational approach to the design of workflow systems. *Inf. Softw. Technol.*, 42, 547-555. https://doi.org/10.1016/S0950-5849(00)00096-3

4. Ahmed, U., Carpitella, S., & Certa, A. (2021). An integrated methodological approach for optimising complex systems subjected to predictive maintenance. *Reliab. Eng. Syst. Saf.*, 216, 108022. https://doi.org/10.1016/j.ress.2021.108022

5. Akyuz, E., & Celik, M. (2017). USING OF A'WOT TO DESIGN AN ENHANCED PLANNED MAINTENANCE SYSTEM (E-PMS) ON-BOARD SHIP. *Brodogradnja*, 68, 61-75. https://doi.org/10.21278/BROD68104

6. Akyuz, E., Akgun, I., & Celik, M. (2016). A fuzzy failure mode and effects approach to analyse concentrated inspection campaigns on board ships. Maritime Policy and Management, 43(7), 887 – 908. https://doi.org/10.1080/03088839.2016.1173737

7. Alcantud, J., Calle, R., & Cascón, J. (2013). On measures of cohesiveness under dichotomous opinions: Some characterizations of approval consensus measures. *Inf. Sci.*, 240, 45-55. https://doi.org/10.1016/j.ins.2013.03.061

8. Aldous, L., Smith, T., Bucknall, R., & Thompson, P. (2015). Uncertainty analysis in ship performance monitoring. *Ocean Engineering*, 110, 29-38. https://doi.org/10.1016/J.OCEANENG.2015.05.043

9. Aleksić, M., & Stanojević, P. (2007). Maintenance strategies selection modeling for naval systems. *Journal of Maritime Research*, 4(1), 37–50. https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=2504960

10. 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

11. Al-Shawa, M. (2011). Eliciting agents' preferences from contextual knowledge about their goals, constraints, priorities, emotions and attitudes using the Constrained Rationality framework. *2011 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics*, 173-178. https://doi.org/10.1109/ICSMC.2011.6083661

12. Al-Surmi, A., Bashiri, M., & Koliousis, I. (2021). AI based decision making: combining strategies to improve operational performance. *International Journal of Production Research*, 60, 4464 - 4486. https://doi.org/10.1080/00207543.2021.1966540

13. Alvesson, M., & Sandberg, J. (2011). Generating Research Questions Through Problematization. *Academy of Management Review*, 36, 247-271. https://doi.org/10.5465/AMR.2009.0188

14. Andreea, T., & Denisa, T. (2011). The Analysis of the Operational Efficiency. *Ovidius University Annals: Economic Sciences Series*, 2144-2147.

15. Andrews, J., & Fecarotti, C. (2017). System design and maintenance modelling for safety in extended life operation. *Reliab. Eng. Syst. Saf.*, 163, 95-108. https://doi.org/10.1016/j.ress.2017.01.024

16. Anis, M. D. (2018). Identifying a Mathematical Model to Optimize Pump Maintenance Planning Decisions - A Case of Irrigation Asset Management in K.S.A. *2018 Condition Monitoring and Diagnosis (CMD)*. https://doi.org/10.1109/cmd.2018.8535792

17. Arab, A., Ismail, N., & Lee, L. (2013). Maintenance scheduling incorporating dynamics of production system and real-time information from

workstations. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 24, 695-705. https://doi.org/10.1007/s10845-011-0616-3

18. Arno, R., Dowling, N., & Schuerger, R. (2015). Equipment Failure Characteristics and RCM for Optimizing Maintenance Cost. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 52, 1257-1264. https://doi.org/10.1109/ICPS.2015.7266415

19. Arsovski, Z., Pavlovic, A., Arsovski, S., & Mirovic, Z. (2009). Improving the Quality of Maintenance Processes by Using Information Technology. *Strojniški vestnik*, 55, 701-714.

20. Asuquo, M., Wang, J., Zhang, L., & Phylip-Jones, G. (2019). Application of a multiple attribute group decision making (MAGDM) model for selecting appropriate maintenance strategy for marine and offshore machinery operations. *Ocean Engineering*. https://doi.org/10.1016/J.OCEANENG.2019.02.065

21. Audet, C., Digabel, S., Cartier, D., Bigeon, J., & Salomon, L. (2018). Performance indicators in multiobjective optimization. *Eur. J. Oper. Res.*, 292, 397-422. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2020.11.016

22. Aven, T. (2010). On the Need for Restricting the Probabilistic Analysis in Risk Assessments to Variability. *Risk Analysis*, 30. https://doi.org/10.1111/j.1539-6924.2009.01314.x

23. Backlund, A. (2002). The concept of complexity in organisations and information systems. *Kybernetes*, 31, 30 - 43. https://doi.org/10.1108/03684920210414907

24. BahooToroody, A., Abaei, M. M., Banda, O. a. V., Montewka, J., & Kujala, P. (2022). On reliability assessment of ship machinery system in different autonomy degree; A Bayesian-based approach. *Ocean Engineering*, 254, 111252. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.111252

25. BahooToroody, A., Abaei, M.M., Banda, O.V., Kujala, P. et al., "Prognostic Health Management of Repairable Ship Systems through Different Autonomy Degree; From Current Condition to Fully Autonomous Ship," *Reliability Engineering & System Safety* 221 (2022): 108355, https://doi.org/10.1016/j.ress.2022.108355

26. Bakalov, I. (2019). A Contemporary Concept in Troubleshooting and Fixing Malfunctions Using an Engine Room Simulator in Augmented Reality Environment. *Universal Journal of Mechanical Engineering*. https://doi.org/10.13189/ujme.2019.070201

27. Barbera, F., Schneider, H., & Watson, E. (1999). A condition based maintenance model for a two-unit series system. *Eur. J. Oper. Res.*, 116, 281-290. https://doi.org/10.1016/S0377-2217(98)00189-1

28. Bard, A.J. and Faulkner, L.R., *Electrochemical Methods: Fundamentals and Applications* (New York: Wiley, 2000).

29. Batty, M., & Torrens, P. (2005). Modelling and prediction in a complex world. *Futures*, 37, 745-766. https://doi.org/10.1016/J.FUTURES.2004.11.003

30. Bayer, D., Aydın, O., & Celik, M. (2021). AN ICOR APPROACH TOWARDS SHIP MAINTENANCE SOFTWARE DEVELOPMENT. *International Journal of Maritime Engineering*, *160*(A1). https://doi.org/10.5750/ijme.v160ia1.1044

31. Bearman, C., Grunwald, J., Brooks, B., & Owen, C. (2015). Breakdowns in coordinated decision making at and above the incident management team level: an analysis of three large scale Australian wildfires. *Applied ergonomics*, 47, 16-25. https://doi.org/10.1016/j.apergo.2014.08.009

32. Beebe, R. S. (2004). Predicitive Maintenance of Pumps Using Condition Monitoring: Performance analysis and its application to optimise time for overhaul. In Elsevier eBooks (pp. 56–71). Elsevier BV. https://doi.org/10.1016/b978-185617408-4/50004-8

33. Beer, M., Ferson, S., & Kreinovich, V. (2013). Imprecise probabilities in engineering analyses. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 37, 4-29. https://doi.org/10.1016/J.YMSSP.2013.01.024

34. Benbya, H., & McKelvey, B. (2006). Toward a complexity theory of information systems development. *Inf. Technol. People*, 19, 12-34. https://doi.org/10.1108/09593840610649952

35. Benson, H. P. (2008). Multi-objective optimization: Pareto Optimal Solutions, properties. In *Springer eBooks* (pp. 2478–2481). https://doi.org/10.1007/978-0-387-74759-0_426

36. Bergveld, H.J., Kruijt, W.S., and Notten, P.H.L., "Battery Management Systems: Design by Modelling" *Springer Nature*, 2002. https://doi.org/10.1007/978-94-017-0843-2

37. Berrade, M., Cavalcante, C., & Scarf, P. (2012). Maintenance scheduling of a protection system subject to imperfect inspection and replacement. *Eur. J. Oper. Res.*, 218, 716-725. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2011.12.003

38. Bicen, S., Kandemir, C., & Celik, M. (2020). A Human Reliability Analysis to Crankshaft Overhauling in Dry-Docking of a General Cargo Ship. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment*, 235, 93 - 109. https://doi.org/10.1177/1475090220948338

39. Bielinska-Kwapisz, A. (2003). Sufficiency in Blackwell's theorem. *Math. Soc. Sci.*, 46, 21-25. https://doi.org/10.1016/S0165-4896(03)00004-0

40. Bilgili, L. (2023). Determination of the weights of external conditions for ship resistance. *Ocean Engineering*, 276, 114141. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.114141

41. Bonnín-Pascual, F., Garcia-Fidalgo, E., Company-Corcoles, J., & Ortiz, A. (2021). MUSSOL: A Micro-Uas to Survey Ship Cargo holds. *Remote. Sens.*, 13, 3419. https://doi.org/10.3390/rs13173419

42. Bourgeois, D. T. (2014). *Information Systems for Business and Beyond*.

43. Bratić, K., Pavić, I., Vukša, S., & Stazić, L. (2019). Review of Autonomous and Remotely Controlled Ships in Maritime Sector. *Transactions on Maritime Science*. https://doi.org/10.7225/toms.v08.n02.011

44. Brett, P., Agis, J., Ebrahimi, A., Erikstad, S., & Asbjørnslett, B. (2022). A Rational Approach to Handle Uncertainty and Complexity in Marine Systems Design. *Proceedings of the 14th International Marine Design Conference*. https://doi.org/10.5957/imdc-2022-270

45. Briš, R., Byczanski, P., Goňo, R., & Rusek, S. (2017). Discrete maintenance optimization of complex multi-component systems. *Reliab. Eng. Syst. Saf.*, 168, 80-89. https://doi.org/10.1016/j.ress.2017.04.008

46. Brugarolas, P., & Safonov, M. (2004). Learning about dynamical systems via unfalsification of hypotheses. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 14, 933-943. https://doi.org/10.1002/RNC.924

47. Brundage, M., Sexton, T., Hodkiewicz, M., Morris, K., Arinez, J., Ameri, F., Ni, J., & Xiao, G. (2019). Where Do We Start? Guidance for Technology Implementation in Maintenance Management for Manufacturing. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*. https://doi.org/10.1115/1.4044105

48. Bui, K. Q., Perera, L. P., & Emblemsvåg, J. (2021). Development of a Life-cycle Cost Framework for Retrofitting Marine Engines towards Emission Reduction in Shipping. *IFAC-PapersOnLine*, *54*(16), 181–187. https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2021.10.091

49. Burgess, M., Gray, W. A., & Fiddian, N. J. (2011). Quality measures and the information consumer. *In IGI Global eBooks* (pp. 213–242). https://doi.org/10.4018/978-1-59904-420-0.ch010

50. Burns, R. B. (2019). An introduction to research methods. In *Bloomsbury Academic eBooks*. https://doi.org/10.5040/9781350025875.ch-001

51. Button, R., Martin, B., Sollinger, J., & Tidwell, A. (2015). Assessment of Surface Ship Maintenance Requirements. *In RAND Corporation eBooks*. https://doi.org/10.7249/RR1155

52. Calabrese, F., Corallo, A., Margherita, A., & Zizzari, A. (2012). A knowledge-based decision support system for shipboard damage control. *Expert Syst. Appl.*, 39, 8204-8211. https://doi.org/10.1016/j.eswa.2012.01.146

53. CAN in Automation (CIA): CANOpen. Retrieved March 3, 2023, from https://www.can-cia.org/canopen/

54. Carlucci, A. P., Chiara, F., & Laforgia, D. (2006). Analysis of the relation between injection parameter variation and block vibration of an internal combustion

diesel engine. *Journal of Sound and Vibration*, *295*(1–2), 141–164. https://doi.org/10.1016/j.jsv.2005.12.054

55. Carpitella, S., Certa, A., Izquierdo, J., & Fata, C. (2018). A combined multi-criteria approach to support FMECA analyses: A real-world case. *Reliab. Eng. Syst. Saf.*, 169, 394-402. https://doi.org/10.1016/j.ress.2017.09.017

56. Cascetta, E., Cartenì, A., Pagliara, F., & Montanino, M. (2015). A new look at planning and designing transportation systems: a decision-making model based on cognitive rationality, stakeholder engagement and quantitative methods. *Transport Policy*, 38, 27-39. https://doi.org/10.1016/J.TRANPOL.2014.11.005

57. Cavagnaro, D., Gonzalez, R., Myung, J., & Pitt, M. (2013). Optimal Decision Stimuli for Risky Choice Experiments: An Adaptive Approach. *Management science*, 59 2, 358-375 . https://doi.org/10.1287/MNSC.1120.1558

58. Çebi, S., Celik, M., & Kahraman, C. (2008). ANALYZING THE NEEDS OF INTEGRATED MAINTENANCE MANAGEMENT FOR SHIPBOARD SYSTEMS. *Journal of Aeronautics and Space Technologies*, 3, 17-24.

59. Ćelić, J., & Cuculić, A. (2013). e-Maintenance for ship electrical propulsion plants. *2013 36th International Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics (MIPRO)*, 1202-1205.

60. Cetin, O., & Sogut, M. (2020). A new strategic approach of energy management onboard ships supported by exergy and economic criteria: A case study of a cargo ship. *Ocean Engineering*, 108137. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.108137

61. Chaal, M., Banda, O., Glomsrud, J., Basnet, S., Hirdaris, S., & Kujala, P. (2020). A framework to model the STPA hierarchical control structure of an autonomous ship. *Safety Science*. https://doi.org/10.1016/j.ssci.2020.104939

62. Chandroth, G. O. (2004). Condition monitoring: the case for integrating data from independent sources. *Journal of Marine Engineering & Technology*, *3*(1), 9–16. https://doi.org/10.1080/20464177.2004.11020175

63. Chang, C., Kontovas, C., Yu, Q., & Yang, Z. (2021). Risk assessment of the operations of maritime autonomous surface ships. *Reliab. Eng. Syst. Saf.*, 207, 107324. https://doi.org/10.1016/j.ress.2020.107324

64. Cheliotis, M., Lazakis, I., & Theotokatos, G. (2020). Machine learning and data-driven fault detection for ship systems operations. *Ocean Engineering*, 216, 107968. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.107968

65. Chen, Y., & Provan, G. (2001). Model-based control reconfiguration: a shipboard system example. *Proceeding of the 2001 IEEE International Symposium on Intelligent Control (ISIC '01) (Cat. No.01CH37206)*, 320-325. https://doi.org/10.1109/ISIC.2001.971529

66. Chen, Y., Wang, Y., Ren, P., Wang, M., & Rijke, M. (2022). Bayesian feature interaction selection for factorization machines. *Artif. Intell.*, 302, 103589. https://doi.org/10.1016/J.ARTINT.2021.103589

67. Choudhury, S., Varghese, G. T., Mohanty, S., Kolluru, V. R., Bajaj, M., Blažek, V., Prokop, L., & Mišák, S. (2023). Energy management and power quality improvement of microgrid system through modified water wave optimization. *Energy Reports*, *9*, 6020–6041. https://doi.org/10.1016/j.egyr.2023.05.068

68. Chybowski, L., Gawdzińska, K., & Laskowski, R. (2019). Assessing the Unreliability of Systems during the Early Operation Period of a Ship—A Case Study. *Journal of Marine Science and Engineering*. https://doi.org/10.3390/JMSE7070213

69. ClassNK, "Good Maintenance on Board Ships," 2017, accessed February 2023, https://www.classnk.or.jp/hp/pdf/info_service/psc/good_maintenance_on_board_ships_e2017.pdf

70. Coit, D., Evans, J., Vogt, N., & Thompson, J. (2005). A Method for Correlating Field Life Degradation with Reliability Prediction for Electronic Modules. *Quality and Reliability Engineering International*, 21. https://doi.org/10.1002/QRE.710

71. Costello, F., & Keane, M. (2000). Efficient creativity: Constraint-guided conceptual combination. *Cognitive Science*, 24, 299-349. https://doi.org/10.1016/S0364-0213(00)00020-3

72. Crane, T. (2012). What is the Problem of Non-Existence?. *Philosophia*, 40, 417-434. https://doi.org/10.1007/S11406-011-9354-1

73. Cucu, I. (2013). A Study Regarding the Use of the Functional Maintenance Model Using a Systemic Approach. *Annals of the University of Petrosani*, 13, 37-40. https://doaj.org/article/eb6e58104f2c493bbcff4d7e23d73f73

74. Cullum, J., Binns, J., Lonsdale, M., Abbassi, R., & Garaniya, V. (2018). Risk-Based Maintenance Scheduling with application to naval vessels and ships. *Ocean Engineering*, 148, 476 - 485. https://doi.org/10.1016/J.OCEANENG.2017.11.044

75. Ćwikła, G., Grabowik, C., & Janik, W. (2014). Case Study of Manufacturing Information Acquisition System (MIAS) in Automated Continuous Production System. *Applied Mechanics and Materials*, 657, 808 - 812. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.657.808

76. Dagkinis, I., Psomas, P., & Platis, A. (2022). Enhanced Ships Operation using Integrated Automation Systems. *Interdisciplinary Journal of Research and Development*. https://doi.org/10.56345/ijrdv9n4s208

77. Davies, J., Truong-Ba, H., Pardalos, P. M., & Will, G. (2021). Optimal inspections and maintenance planning for anti-corrosion coating failure on ships using non-homogeneous Poisson Processes. *Ocean Engineering*, *238*, 109695. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2021.109695

78. 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

79. Dean, A., Morris, M., Stufken, J., & Bingham, D. (2020). Handbook of Design and Analysis of Experiments. CRC Press.

80. Decò, A., Fragopol, D., & Okasha, N. (2011). Time-Variant Redundancy of Ship Structures. *Journal of Ship Research*, 55, 208-219. https://doi.org/10.5957/JSR.2011.55.3.208

81. Deeb, H., Mehdi, R., & Hahn, A. (2017). A review of damage assessment models in the maritime domain. *Ships and Offshore Structures*, 12, S31 - S54. https://doi.org/10.1080/17445302.2016.1278317

82. Designing and managing complex systems. (2023). In *Elsevier eBooks*. https://doi.org/10.1016/c2020-0-03424-9

83. Ding, F., & He, Z. (2010). Implementation of Maintenance Decision for Equipment Considering Condition Monitoring Information. *2010 International Conference on E-Product E-Service and E-Entertainment*, 1-4. https://doi.org/10.1109/ICEEE.2010.5660924

84. Dinu, O., & Ilie, A. (2015). Maritime vessel obsolescence, life cycle cost and design service life. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 95. https://doi.org/10.1088/1757-899X/95/1/012067

85. DNV, "Planned Maintenance System for Technical Ship Management—ShipManager Technical," 2021, accessed February 2023, https://www.dnv.com/services/plannedmaintenance-system-for-technical-ship-managementshipmanager-technical-1509.

86. Domschke, W., & Wagner, B. (2005). Models and methods for standardization problems. *Eur. J. Oper. Res.*, 162, 713-726. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2003.10.023

87. Du, S., Xu, R., & Li, L. (2018). Modeling and Analysis of Multiproduct Multistage Manufacturing System for Quality Improvement. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 48, 801 - 820. https://doi.org/10.1109/TSMC.2016.2614766

88. Duan, C., Li, Z., & Liu, F. (2020). Condition-based maintenance for ship pumps subject to competing risks under stochastic maintenance quality. Ocean Engineering, 218, 108180. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.108180

89. Duffuaa, S. O. (2000). Mathematical models in maintenance planning and scheduling. In *Springer eBooks* (pp. 39–53). https://doi.org/10.1007/978-1-4615-4329-9_2

90. Dyson, R. (2000). Strategy, performance and operational research. *Journal of the Operational Research Society*, 51, 5 - 11. https://doi.org/10.1057/palgrave.jors.2600916

91. Dzemyda, G., & Sakalauskas, L. (2011). Large-Scale Data Analysis Using Heuristic Methods. *Informatica*, 22, 1 - 10. https://doi.org/10.15388/INFORMATICA.2011.310

92. Ebersbach, S., Peng, Z., & Kessissoglou, N. (2006). The investigation of the condition and faults of a spur gearbox using vibration and wear debris analysis techniques. *Wear*, *260*(1–2), 16–24. https://doi.org/10.1016/j.wear.2004.12.028

93. Ellefsen, A., Æsøy, V., Ushakov, S., & Zhang, H. (2019). A Comprehensive Survey of Prognostics and Health Management Based on Deep Learning for Autonomous Ships. *IEEE Transactions on Reliability*, 68, 720-740. https://doi.org/10.1109/TR.2019.2907402

94. Ellsworth, W., & Clark, D. (1981). Ship design and the navy laboratory. *Naval Engineers Journal*, 93, 33-46. https://doi.org/10.1111/J.1559-3584.1981.TB01601.X

95. Emovon, I., Norman, R., & Murphy, A. (2018). Hybrid MCDM based methodology for selecting the optimum maintenance strategy for ship machinery systems. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 29, 519-531. https://doi.org/10.1007/s10845-015-1133-6

96. Epstein, B. J., & Weissman, I. (2008). Mathematical Models for Systems Reliability. https://doi.org/10.1201/9781420080834

97. Fan, C., Wróbel, K., Montewka, J., Gil, M., Wan, C., & Zhang, D. (2020). A framework to identify factors influencing navigational risk for Maritime Autonomous Surface Ships. *Ocean Engineering*, 202, 107188. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.107188

98. Fisher, W. (1990). Brief note: Markov process modelling of a maintenance system with spares, repair, cannibalization and manpower constraints. *Mathematical and Computer Modelling*, 13, 119-125. https://doi.org/10.1016/0895-7177(90)90134

99. Fitch, E. (1992). Maintenance Technology. Elsevier EBooks, 1–18. https://doi.org/10.1016/b978-1-85617-166-3.50004-4

100. Fitch, E. (1992). Proactive Maintenance for Mechanical Systems: The Proactive Approach. In Elsevier eBooks (pp. 287–317). Elsevier BV. https://doi.org/10.1016/b978-1-85617-166-3.50013-5

101. Fitch, E. (1992b). Wear Stability. Elsevier EBooks, 217–259. https://doi.org/10.1016/b978-1-85617-166-3.50011-1

102. Ford, D. N., Housel, T. J., & Mun, J. (2011). Ship Maintenance Processes with Collaborative Product Lifecycle Management and 3D Terrestrial Laser Scanning Tools: Reducing Costs and Increasing Productivity. *Proceedings of the ninth Annual Acquisition Research Symposium*. https://doi.org/10.21236/ada543988

103. Free, J. (2023). Fundamentals of Systemology: A New Thought for the 21st Century.

104. Friction and Wear. (1982). In *Elsevier eBooks*. https://doi.org/10.1016/c2013-0-03333-6

105. Gambo, H. (2015). The Impact of Training and Development on Workers Productivity. *Review of Public Administration and Management*, 2015, 1-4. https://doi.org/10.4172/2315-7844.1000160

106. Gao, W., Ji, H., Wang, Y., & Yang, T. (2019). A Nonlinear Preventive Maintenance Model with an Environmental Factor Based Weibull Distribution. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 521. https://doi.org/10.1088/1757-899X/521/1/012009

107. Gaonkar, R., Xie, M., Ng, K., & Habibullah, M. (2011). Subjective operational reliability assessment of maritime transportation system. *Expert Syst. Appl.*, 38, 13835-13846. https://doi.org/10.1016/j.eswa.2011.04.187

108. Garland, D., & Stainer, F. (1970). Modern Electronic Maintenance Principles: FAULT-FINDING GUIDES. https://doi.org/10.1016/b978-0-08-014188-6.50015-0

109. Geitner, F. K., & Bloch, H. P. (2012). Machinery Failure Analysis and Troubleshooting: The “Seven Cause Category Approach” to Root-Cause Failure

Analysis. In Elsevier eBooks. Elsevier BV. https://doi.org/10.1016/b978-0-12-386045-3.00009-x

110. George-Williams, H., & Patelli, E. (2017). Maintenance Strategy Optimization for Complex Power Systems Susceptible to Maintenance Delays and Operational Dynamics. *IEEE Transactions on Reliability*, 66, 1309-1330. https://doi.org/10.1109/TR.2017.2738447

111. Gharehbaghi, K., & Mcmanus, K. (2019). TIS condition monitoring using ANN integration: an overview. *Journal of Engineering, Design and Technology*. https://doi.org/10.1108/JEDT-07-2018-0117

112. Giannopoulos, G. (2004). The application of information and communication technologies in transport. *Eur. J. Oper. Res.*, 152, 302-320. https://doi.org/10.1016/S0377-2217(03)00026-2

113. Girdhar, P., & Scheffer, C. (2004). Practical Machinery Vibration Analysis and Predictive Maintenance: Machinery fault diagnosis using vibration analysis. In Elsevier eBooks (pp. 89–133). Elsevier BV. https://doi.org/10.1016/b978-075066275-8/50005-9

114. Gkerekos, C., Lazakis, I., & Theotokatos, G. (2016). Ship machinery condition monitoring using vibration data through supervised learning. In *Proceedings of the Int. Conf. on Maritime Safety and Operations* (pp. 103–110). https://pure.strath.ac.uk/portal/files/56484293/Gkerekos_etal_MSO2016_Ship_machinery_condition_monitoring.pdf

115. Gkerekos, C., Lazakis, I., & Theotokatos, G. (2017). Ship machinery condition monitoring using performance data through supervised learning. In *Proceedings of Int. Conf. on Smart Ship Technology* (Vol. 14, pp. 105–111). https://pureportal.strath.ac.uk/en/publications/ship-machinery-condition-monitoring-using-performance-data-throug

116. Go, H., Kim, J., & Lee, D. (2013). Operation and preventive maintenance scheduling for containerships: Mathematical model and solution algorithm. *Eur. J. Oper. Res.*, 229, 626-636. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2013.04.005

117. Golovan, A. (2023) Peculiarities of development of modern mooring systems: innovations in control systems, International scientific conference “Features of innovative development in the field of technology: the comparative experience of Ukraine and the European Union”, Wloclawek, the Republic of Poland, September 6–7, 2023 https://doi.org/10.30525/978-9934-26-340-8-15

118. Golovan, A., Gritsuk, I., and Honcharuk, I., “Reliable Ship Emergency Power Source: A Monte Carlo Simulation Approach to Optimize Remaining Capacity Measurement Frequency for Lead-Acid Battery Maintenance,” SAE Int. J. Elect. Veh. 13(2):2024, doi:10.4271/14-13-02-0009 https://doi.org/10.4271/14-13-02-0009

119. Golovan, A., Gritsuk, I., Honcharuk, I. (2023). Principles of transport means maintenance optimization: equipment cost calculation. Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu, (5), 077 – 084. https://doi.org/10.33271/nvngu/2023-5/077

120. Golovan, A., Gritsuk, I., Kurtsev, M., Ischuka, O., & Vrublevskyi, R. (2020). Aspects of remote monitoring of the transport vessel under operating conditions. In *Lecture notes in intelligent transportation and infrastructure*. https://doi.org/10.1007/978-3-030-39688-6_37

121. Golovan, A., Gritsuk, I., Popeliuk, V.P., Sherstyuk, O. et al., “Features of Mathematical Modeling in the Problems of Determining the Power of a Turbocharged Engine According to the Characteristics of the Turbocharger,” *SAE Int. J. Engines* 13, no. 1 (2020): 5-16. https://doi.org/10.4271/03-13-01-0001

122. Golovan, A., Gritsuk, I., Rudenko, S., Saravas, V., Shakhov, A., & Shumylo, O. (2019). Aspects of Forming the Information V2I Model of the Transport Vessel. In *2019 IEEE International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES)*. https://doi.org/10.1109/mees.2019.8896595

123. Golovan, A., Honcharuk, I., Deli, O., Kostenko, O., & Nykyforov, Y. (2021). System of Water Vehicle Power Plant Remote Condition Monitoring. *IOP Conference Series*, *1199*(1), 012049. https://doi.org/10.1088/1757-899x/1199/1/012049

124. Golovan, A., Rudenko, S., Gritsuk, I., Shakhov, A. et al. (2018) Improving the Process of Vehicle Units Diagnosis by Applying Harmonic Analysis to the Processing of Discrete Signals, SAE Technical Paper 2018-01-1774. https://doi.org/10.4271/2018-01-1774

125. Goossens, A. (2015). Maintenance Policy Selection for Ships: An investigation using the Analytic Hierarchy Process [PhD dissertation, University of Twente]. https://doi.org/10.3990/1.9789036539272

126. Goossens, A., & Basten, R. (2015). Exploring maintenance policy selection using the Analytic Hierarchy Process; An application for naval ships. *Reliab. Eng. Syst. Saf.*, 142, 31-41. https://doi.org/10.1016/j.ress.2015.04.014

127. Goulielmos, A.M. (2020) An Anatomy of Cycles in Shipping Industry, 1946 - 2020, *Modern Economy,* 11,1671 - 1695. https://doi.org/10.4236/me.2020.1110116

128. 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

129. Gritsuk, I.V., Zenkin E.Y., E., Bulgakov, N., Golovan, A. et al., (2018) The Complex Application of Monitoring and Express Diagnosing for Searching Failures on Common Rail System Units, *SAE Technical Paper*, 2018-01-1773. https://doi.org/10.4271/2018-01-1773

130. Hall, D., & Davis, R. (2007). Engaging multiple perspectives: A value-based decision-making model. *Decis. Support Syst.*, 43, 1588-1604. https://doi.org/10.1016/j.dss.2006.03.004

131. Hammer, R., Edwards, J., & Tapinos, E. (2012). Examining the strategy development process through the lens of complex adaptive systems theory. *Journal of the Operational Research Society*, 63, 909-919. https://doi.org/10.1057/jors.2011.97

132. Harp, D., & Vesselinov, V. (2011). Contaminant remediation decision analysis using information gap theory. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 27, 159-168. https://doi.org/10.1007/s00477-012-0573-1

133. Harris, S. M., & Bronner, L. (2018). Extension of the System Development Life Cycle (SDLC) for the analysis of complex problems. *International Journal for Science Technology and Engineering*, 5(1), 102–107. http://www.ijste.org/articles/IJSTEV5I1015.pdf

134. Harrison, F. (2011). Getting started with meta-analysis. *Methods in Ecology and Evolution*, 2. https://doi.org/10.1111/j.2041-210X.2010.00056.x

135. Hartmann, P. (2014). Methodology and research design. *In Springer eBooks* (pp. 61–76). https://doi.org/10.1007/978-3-658-06047-3_3

136. Hasanspahić, N., Vujičić, S., Čampara, L., & Piekarska, K. (2021). Sustainability and environmental challenges of modern shipping industry. *Journal of Applied Engineering Science*, 19(2), 369–374. https://doi.org/10.5937/jaes0-28681

137. Haseltalab, A., & Negenborn, R. (2019). Model predictive maneuvering control and energy management for all-electric autonomous ships. *Applied Energy*. https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2019.113308

138. Hayes, R. M. (1993). Measurement of information. *Information Processing and Management*, 29(1), 1–11. https://doi.org/10.1016/0306-4573(93)90019-a

139. He, X., Wang, Y., Shen, Z., & Huang, X. (2008). A simplified CREAM prospective quantification process and its application. *Reliability Engineering and System Safety*, 93(2), 298–306. https://doi.org/10.1016/j.ress.2006.10.026

140. Hilbert, M. (2012). How to Measure "How Much Information"? Theoretical, methodological, and statistical challenges for the social sciences. *International Journal of Communication*, 1042–1055. https://ijoc.org/index.php/ijoc/article/viewFile/1318/746

141. Hogg, R. V., McKean, J. W., & Craig, A. T. (2018). Introduction to Mathematical Statistics.

142. 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

143. Honcharuk, I., Golovan, A., Voloshyn, A., Deli, O., & Kostenko, O. (2021). Increase of Technical Condition Control Efficiency of Marine Railways, 1199(1), 012051. https://doi.org/10.1088/1757-899x/1199/1/012051

144. Hooff, B. (2004). Electronic coordination and collective action: use and effects of electronic calendaring and scheduling. *Inf. Manag.*, 42, 103-114. https://doi.org/10.1016/j.im.2003.12.006

145. Hortua, A., El-Halwagi, M., Ng, D., & Foo, D. (2013). Integrated Approach for Simultaneous Mass and Property Integration for Resource Conservation. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 1, 29-38. https://doi.org/10.1021/SC300008N

146. Hou, X., Wang, Y., Dai, L., Yang, Y., Du, J., Wang, Y., & Wan, H. (2023). Study on the corrosion and wear behaviors of cylinder liner in marine diesel engine burning low sulfur fuel oil. *Engineering Failure Analysis*, *147*, 107151. https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2023.107151

147. Hovorushchenko, T. (2018). Methodology of Evaluating the Sufficiency of Information for Software Quality Assessment According to ISO 25010. *Journal of information and organizational sciences*. https://doi.org/10.31341/JIOS.42.1.4

148. Huang, B., & Zhang, P. (2018). Application of Man-Machine-Environment System Engineering in Shipboard Equipment. *Man-Machine-Environment System Engineering*. https://doi.org/10.1007/978-981-13-2481-9_82

149. Huet, F., "A Review of Impedance Measurements for Determination of the State-of-Charge or State-of-Health of Secondary Batteries," Journal of Power Sources 70, no. 1 (1998): 59-69, https://doi.org/10.1016/s0378-7753(97)02665-7

150. Hutchings, I., & Shipway, P. (2017). *Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials*. Butterworth-Heinemann.

151. Huynh, K., Barros, A., & Bérenguer, C. (2012). Adaptive condition-based maintenance decision framework for deteriorating systems operating under variable environment and uncertain condition monitoring. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part O: Journal of Risk and Reliability*, 226, 602 - 623. https://doi.org/10.1177/1748006X12465718

152. Ichimura, Y., Dalaklis, D., Kitada, M., & Christodoulou, A. (2022). Shipping in the era of digitalization: Mapping the future strategic plans of major maritime commercial actors. *Digital Business*, *2*(1), 100022. https://doi.org/10.1016/j.digbus.2022.100022

153. Igder, M., Rafiei, M., Boudjadar, J., & Khooban, M. (2021). Reliability and Safety Improvement of Emission-Free Ships: Systemic Reliability-Centered Maintenance. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 7, 256-266. https://doi.org/10.1109/

154. Ighravwe, D., & Oke, S. (2014). A non-zero integer non-linear programming model for maintenance workforce sizing. *International Journal of Production Economics*, 150, 204-214. https://doi.org/10.1016/J.IJPE.2014.01.004

155. Im, I., Shin, D. R., & Jeong, J. (2018). Components for smart autonomous ship architecture based on intelligent information technology. *Procedia Computer Science*, 134, 91–98. https://doi.org/10.1016/j.procs.2018.07.148

156. IMO, Regulation: 43, Part: D, II-1 "The Requirement for Emergency Power Onboard the Ship" International Convention for the Safety of Life at Sea (SOLAS), 1974, accessed February 2023, https://www.imo.org/en/About/Conventions/Pages/International-Convention-for-the-Safety-of-Life-at-Sea-(SOLAS),-1974.aspx

157. Iqbal, A., Khan, A., Abdullah, J., Kulathuramaiyer, N., & Senin, A. (2021). Blended system thinking approach to strengthen the education and training in university-industry research collaboration. *Technology Analysis & Strategic Management*, 34, 447 - 460. https://doi.org/10.1080/09537325.2021.1905790

158. IRCLASS, "Ship Maintenance Checklist," 2016, accessed February 2023, https://www.irclass.org/media/2807/ship-maintenance-checklist-rev4.pdf

159. Islam, R., Khan, F., Abbassi, R., & Garaniya, V. (2017). Human Error Probability Assessment During Maintenance Activities of Marine Systems. *Safety and Health at Work*, 9, 42 - 52. https://doi.org/10.1016/j.shaw.2017.06.008

160. Islam, R., Khan, F., Abbassi, R., & Garaniya, V. (2018). Human error assessment during maintenance operations of marine systems – What are the effective environmental factors?. *Safety Science*. https://doi.org/10.1016/J.SSCI.2018.04.011

161. Ivankevich, A., Piterska, V., Shakhov, A., Shakhov, V., & Yarovenko, V. (2019). A Proactive Strategy of Ship Maintenance Operations. *2019 IEEE 14th International Conference on Computer Sciences and Information Technologies (CSIT)*, 3, 126-129. https://doi.org/10.1109/STC-CSIT.2019.8929741.

162. Jain, M. (2016). Reliability Prediction of Repairable Redundant System with Imperfect Switching and Repair. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 41, 3717-3725. https://doi.org/10.1007/S13369-015-1865-9

163. Jardine, A. (2002). Optimizing condition based maintenance decisions. *Annual Reliability and Maintainability Symposium. 2002 Proceedings (Cat. No.02CH37318)*, 90-97. https://doi.org/10.1109/RAMS.2002.981625

164. Jardine, A., Lin, D., & Banjevic, D. (2006). A review on machinery diagnostics and prognostics implementing condition-based maintenance. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 20, 1483 - 1510. https://doi.org/10.1016/J.YMSSP.2005.09.012

165. Javaid, M., Haleem, A., Singh, R.P., and Suman, R., "An Integrated Outlook of Cyber–Physical Systems for Industry 4.0: Topical Practices, Architecture, and Applications," *Green Technologies and Sustainability* 1, no. 1 (2022): 100001, https://doi.org/10.1016/j.grets.2022.100001

166. Jerrelind, J., & Stensson, A. (2000). Nonlinear dynamics of parts in engineering systems. *Chaos Solitons & Fractals*, *11*(15), 2413–2428. https://doi.org/10.1016/s0960-0779(00)00016-3

167. Jeyaraj, A., & Zadeh, A. (2020). Evolution of information systems research: Insights from topic modeling. *Information & Management*, *57*(4), 103207. https://doi.org/10.1016/j.im.2019.103207

168. Jian, L., Guo, J., & Ma, H. (2022). Research on the Impact of Digital Innovation Driving the High-Quality Development of the Shipping Industry. *Sustainability*. https://doi.org/10.3390/su14084648

169. Jiang, H., Wang, X., & Wang, L. (2015). Failure analysis of ship power system based on improved fuzzy analytic hierarchy process. *2015 IEEE International*

Conference on Cyber Technology in Automation, Control, and Intelligent Systems (CYBER), 213-216. https://doi.org/10.1109/CYBER.2015.7287937

170. Jiang, H., Xiong, Z., Lowey, J., Suh, E., & Dougherty, E. R. (2004). Optimal number of features as a function of sample size for various classification rules. *Bioinformatics*, *21*(8), 1509–1515. https://doi.org/10.1093/bioinformatics/bti171

171. Jianjun, C., Peilin, Z., Guoquan, R., & Jianping, F. (2007). Decentralized and overall condition monitoring system for large-scale mobile and complex equipment. *Journal of Systems Engineering and Electronics*, 18, 758-763. https://doi.org/10.1016/S1004-4132(08)60016-X

172. Jimenez, V., Bouhmala, N., & Gausdal, A. (2020). Developing a predictive maintenance model for vessel machinery. *Journal of Ocean Engineering and Science*, 5, 358-386. https://doi.org/10.1016/j.joes.2020.03.003

173. Jones, A., Takahashi, T., Fleming, H., Griffith, B., Harris, P., & Lee, M. (2021). Quantifying the value of on-farm measurements to inform the selection of key performance indicators for livestock production systems. *Scientific Reports*, 11. https://doi.org/10.1038/s41598-021-96336-1

174. Jonge, B., & Scarf, P. (2020). A review on maintenance optimization. *Eur. J. Oper. Res.*, 285, 805-824. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2019.09.047

175. Kalajdžić, M., & Momčilović, N. (2020). A STEP TOWARD THE PRELIMINARY DESIGN OF SEAGOING MULTI-PURPOSE CARGO VESSELS. *Brodogradnja*. https://doi.org/10.21278/brod71205

176. Kandemir, C., & Celik, M. (2019). A human reliability assessment of marine auxiliary machinery maintenance operations under ship PMS and maintenance 4.0 concepts. *Cognition, Technology & Work*, 22, 473 - 487. https://doi.org/10.1007/s10111-019-00590-3

177. Kandemir, C., & Celik, M. (2021). Determining the error producing conditions in marine engineering maintenance and operations through HFACS-MMO. Reliability Engineering and System Safety, 206, 107308. https://doi.org/10.1016/j.ress.2020.107308

178. Kandemir, C., Celik, M., Akyuz, E., & Aydin, O. (2019). Application of human reliability analysis to repair & maintenance operations on-board ships: The case of HFO purifier overhauling. Applied Ocean Research, 88, 317–325. https://doi.org/10.1016/j.apor.2019.04.019

179. Kanellos, F., Tsekouras, G., & Hatziargyriou, N. (2014). Optimal Demand-Side Management and Power Generation Scheduling in an All-Electric Ship. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 5, 1166-1175. https://doi.org/10.1109/TSTE.2014.2336973

180. 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

181. Karatuğ, Ç., Arslanoğlu, Y., & Soares, C. G. (2023). Design of a decision support system to achieve condition-based maintenance in ship machinery systems. *Ocean Engineering*, *281*, 114611. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.114611

182. Karim, R., Westerberg, J., Galar, D., & Kumar, U. (2016). Maintenance Analytics – The New Know in Maintenance. *IFAC-PapersOnLine*, 49, 214-219. https://doi.org/10.1016/J.IFACOL.2016.11.037

183. Ke, Y., Fan, S., & Yao, Y. (2019). Research on Maintenance Support System Based on Complex Network. *MATEC Web of Conferences*. https://doi.org/10.1051/matecconf/201929602001

184. Keizer, M., Flapper, S., & Teunter, R. (2017). Condition-based maintenance policies for systems with multiple dependent components: A review. *Eur. J. Oper. Res.*, 261, 405-420. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2017.02.044

185. Khabutdinov, A. (2019). Risk-regulatory increase of trajectory safety, productivity and energy efficiency of motor transport operations in conditions of uncertainty. *MATEC Web of Conferences*. https://doi.org/10.1051/matecconf/201929401012

186. Kibik, O., Khaiminova, I., Kotlubay, V., Redina, I., & Belous, E. (2018). Development potential of Ukrainian maritime enterprises. *International Journal of Engineering & Technology*. https://doi.org/10.14419/IJET.V7I4.3.19917

187. Kim, T., & Song, J. (2018). Generalized Reliability Importance Measure (GRIM) using Gaussian mixture. *Reliability Engineering & System Safety*, *173*, 105–115. https://doi.org/10.1016/j.ress.2018.01.005

188. Kim, Y., Sting, F., & Loch, C. (2014). Top-down, bottom-up, or both? Toward an integrative perspective on operations strategy formation. *Journal of Operations Management*, 32, 462-474. https://doi.org/10.1016/J.JOM.2014.09.005

189. Kiriya, N. (2001). Statistical Study on Reliability of ship equipment and Safety management -Reliability Estimation for failures on main engine system by Ship Reliability Database system-. *Bulletin of the Marine Engineering Society in Japan*, *29*(2), 64–70.

190. Kister, T. C., & Hawkins, B. L. (2006). Metrics: Measuring Planning and Scheduling Performance. Maintenance Planning and Scheduling. https://doi.org/10.1016/b978-075067832-2/50012-4

191. Kister, T. C., & Hawkins, B. L. (2006). Performing the Maintenance Scheduling Function. Maintenance Planning and Scheduling, 189–210. https://doi.org/10.1016/b978-075067832-2/50009-4

192. Kister, T. C., & Hawkins, B. L. (2006). Planning and Scheduling Fundamentals—Self-Test. Maintenance Planning and Scheduling. https://doi.org/10.1016/b978-075067832-2/50013-6

193. Kister, T. C., & Hawkins, B. L. (2006). Special Case: Maintenance Planning and Scheduling for Maintenance Outages — The Plant Shutdown. Maintenance Planning and Scheduling. https://doi.org/10.1016/b978-075067832-2/50010-0

194. Klenke, A. (2020). Probability theory: A Comprehensive Course. Springer Nature.

195. Kłos, S., & Patalas‐Maliszewska, J. (2017). Using a simulation method for intelligent maintenance management. *In Advances in intelligent systems and computing* (pp. 85‐95). https://doi.org/10.1007/978-3-319-64465-3_9

196. Kobbacy, K. (2004). On the evolution of an intelligent maintenance optimization system. *Journal of the Operational Research Society*, 55, 139-146. https://doi.org/10.1057/palgrave.jors.2601696

197. Koboević, Ž., Bebić, D., & Kurtela, Ž. (2018). New approach to monitoring hull condition of ships as objective for selecting optimal docking period. *Ships and Offshore Structures*, 14, 103 - 95. https://doi.org/10.1080/17445302.2018.1481631

198. Kocsis, Z. A., Brownlee, A. E. I., Swan, J., & Senington, R. (2015). Haiku - A Scala Combinator toolkit for semi-automated composition of metaheuristics. *In Lecture Notes in Computer Science* (pp. 125–140). https://doi.org/10.1007/978-3-319-22183-0_9

199. Kołowrocki, K., & Soszyńska-Budny, J. (2011). Complex technical system operation processes identification. *In Springer series in reliability engineering*, 171–216. https://doi.org/10.1007/978-0-85729-694-8_4

200. Kolus, A., El-Khalifa, A., Al-Turki, U. M., & Duffuaa, S. O. (2020). An integrated mathematical model for production scheduling and preventive maintenance planning. *International Journal of Quality & Reliability Management*, *37*(6/7), 925–937. https://doi.org/10.1108/ijqrm-10-2019-0335

201. Kotsiantis, S.B., Kanellopoulos, D.N., & Pintelas, P.E. (2007). Data Preprocessing for Supervised Leaning. *International Journal of Computer, Electrical, Automation, Control and Information Engineering*, 1, 4104-4109.

202. Krynke, M., Ivanova, T., & Revenko, N. (2022). Factors, Increasing the Efficiency of Work of Maintenance, Repair and Operation Units of Industrial Enterprises. *Management Systems in Production Engineering*, 30, 91 - 97. https://doi.org/10.2478/mspe-2022-0012

203. Kulshrestha, R., Shekhar, C., Jain, M., & Chakravarthy, S. R. (2020). Mathematical modeling and computation of Real-Time problems: An Interdisciplinary Approach.

204. Lan-Pin, L. (2015). Compromise ratio method for hesitant fuzzy multi-attribute decision making. *Journal of Qiqihar University*. http://en.cnki.com.cn/Article_en/CJFDTOTAL-QQHE201501015.htm

205. Latka, M., & Hadaj, P. (2016). Technical and statistical analysis of the failure of overhead lines and its impact on evaluating the quality of the power supply. *2016 Progress in Applied Electrical Engineering (PAEE)*, 1-5. https://doi.org/10.1109/PAEE.2016.7605117

206. Lautenschläger, K., & Olive, D. (1983). Technology and the Evolution of Naval Warfare. *International Security*, 8, 3 - 51. https://doi.org/10.2307/2538594

207. Lazakis, I., & Ölçer, A. I. (2015). Selection of the best maintenance approach in the maritime industry under fuzzy multiple attributive group decision-making environment. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment*, *230*(2), 297–309. https://doi.org/10.1177/1475090215569819

208. Lazakis, I., & Ölçer, A. I. (2016). Selection of the best maintenance approach in the maritime industry under fuzzy multiple attributive group decision-making environment. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment*, *230*(2), 297–309. https://doi.org/10.1177/1475090215569819

209. Lazakis, I., Dikis, K., Michala, A. L., & Theotokatos, G. (2016). Advanced Ship Systems Condition Monitoring for Enhanced Inspection, Maintenance and Decision Making in Ship Operations. Transportation Research Procedia, 14, 1679–1688. https://doi.org/10.1016/j.trpro.2016.05.133

210. Lazakis, I., Gkerekos, C., & Theotokatos, G. (2018). Investigating an SVM-driven, one-class approach to estimating ship systems condition. *Ships and Offshore Structures*, 14, 432 - 441. https://doi.org/10.1080/17445302.2018.1500189.

211. Lazakis, I., Raptodimos, Y., & Varelas, T. (2017). Predicting ship machinery system condition through analytical reliability tools and artificial neural networks. *Ocean Engineering*, 152, 404-415. https://doi.org/10.1016/J.OCEANENG.2017.11.017

212. Lazakis, I., Turan, O., & Aksu, S. (2010). Increasing ship operational reliability through the implementation of a holistic maintenance management strategy. *Ships and Offshore Structures*, *5*(4), 337–357. https://doi.org/10.1080/17445302.2010.480899

213. Lee, C., & Johnson, R. (2013). Operational efficiency. In *Industrial innovation series* (pp. 17–44). https://doi.org/10.1201/b15964-5

214. Lee, K.S., Gao, R.X., and Schneeman, R., "Sensor Network and Information Interoperability Integrating IEEE 1451 with MIMOSA and OSA-CBM," in Instrumentation and Measurement Technology Conference, Anchorage, AK, 2002, https://doi.org/10.1109/imtc.2002.1007145

215. Lee, P., Kwon, O., & Ruan, X. (2019). Sustainability Challenges in Maritime Transport and Logistics Industry and Its Way Ahead. *Sustainability*. https://doi.org/10.3390/SU11051331

216. Lee, S., Wong, T., & Kim, H. (2012). Improving manageability through reorganization of routing-policy configurations. *Comput. Networks*, 56, 3192-3205. https://doi.org/10.1016/j.comnet.2012.06.014

217. Lee, W., Mendis, G., & Sutherland, J. (2019). Development of an Intelligent Tool Condition Monitoring System to Identify Manufacturing Tradeoffs and Optimal Machining Conditions. *Procedia Manufacturing*. https://doi.org/10.1016/J.PROMFG.2019.04.031

218. Lees, M. (2004). Maintaining Effectiveness While Chasing Efficiency. *Healthcare Management Forum*, 17, 36 - 37. https://doi.org/10.1016/S0840-4704(10)60316-X

219. Lenahan, T. (2005). Turnaround, Shutdown and Outage Management. Effective Planning and Step-by-Step Execution of Planned Maintenance Operations: Cost control. https://doi.org/10.1016/b978-075066787-6/50010-9

220. Li, G., Deng, X., Zhou, M., Zhu, Q., Lan, J., Xia, H., & Mitrouchev, P. (2020). Research on data Monitoring System for Intelligent Ship. *In Lecture notes in electrical engineering* (pp. 234–241). https://doi.org/10.1007/978-981-15-2341-0_29

221. Li, L., Yi, P., Wang, Z., Liu, K., & Li, F. (2022). Research on Simulation Method of Ship Equipment maintenance Support process. *Proceedings of the 2nd International Conference on Algorithms, High Performance Computing and Artificial Intelligence (AHPCAI)*. https://doi.org/10.1109/ahpcai57455.2022.10087716

222. Li, Z., Xie, G., & Li, Z. (2008). Efficient and Scalable Consistency Maintenance for Heterogeneous Peer-to-Peer Systems. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, 19, 1695-1708. https://doi.org/10.1109/TPDS.2008.46

223. Li, Z., Xu, Y., Wu, L., & Zheng, X. (2021). A Risk-Averse Adaptively Stochastic Optimization Method for Multi-Energy Ship Operation Under Diverse Uncertainties. *IEEE Transactions on Power Systems*, 36, 2149-2161. https://doi.org/10.1109/TPWRS.2020.3039538

224. Liao, H., Zhang, X., Zeng, X., & Merigó, J. M. (2015). Qualitative decision making with correlation coefficients of hesitant fuzzy linguistic term sets. Knowledge - Based Systems, 76, 127 – 138. https://doi.org/10.1016/j.knosys.2014.12.009

225. Lin, M., Wang, C., & Tang, Z. (2021). Prediction method of ship planned maintenance cost based on case-based reasoning. *Zhongguo Jianchuan Yanjiu*, 17, 1-5. https://doi.org/10.19693/J.ISSN.1673-3185.02294

226. Lin, T. R., Tan, A., Howard, I., Pan, J., Crosby, P. A., & Mathew, J. (2011). Development of a diagnostic tool for condition monitoring of rotating machinery. ICOMS Asset Management Conference Proceedings, 10, 1–9. https://eprints.qut.edu.au/41753/

227. Lind, M., Brödje, A., Haraldson, S., Hägg, M., & Watson, R. T. (2015). Digitalisation for sustainable sea transports. *In Institution of Engineering and Technology eBooks*, 187–218. https://doi.org/10.1049/pbtr001e_ch9

228. Linden, D. and Reddy, T., *Handbook of Batteries* (New York: McGraw-Hill Professional, 2002).

229. Ling-Chin, J., & Roskilly, A. (2016). Investigating the implications of a new-build hybrid power system for Roll-on/Roll-off cargo ships from a sustainability

perspective – A life cycle assessment case study. *Applied Energy*, 181, 416-434. https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2016.08.065

230. Lisowski, J. (2022). Artificial Intelligence Methods in Safe Ship Control Based on Marine Environment Remote Sensing. *Remote. Sens.*, 15, 203. https://doi.org/10.3390/rs15010203

231. Liu, L., Shibasaki, R., Zhang, Y., Kosuge, N., Zhang, M., & Hu, Y. (2023). Data-driven framework for extracting global maritime shipping networks by machine learning. *Ocean Engineering*, *269*, 113494. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.113494

232. Liu, S., Chen, H., Shang, B., & Papanikolaou, A. (2022). Supporting Predictive Maintenance of a Ship by Analysis of Onboard Measurements. *Journal of Marine Science and Engineering*. https://doi.org/10.3390/jmse10020215

233. Liu, X., Zhang, Q., Wang, S., Cheng, X., & Tang, J. (2015). Research of Ship Maintenance Management Platform Based on Cloud Computing. *Proceedings of the 4th International Conference on Mechatronics, Materials, Chemistry and Computer Engineering*. https://doi.org/10.2991/ICMMCCE-15.2015.580

234. Liu, Y., Ishibuchi, H., Yen, G., Nojima, Y., & Masuyama, N. (2020). Handling Imbalance Between Convergence and Diversity in the Decision Space in Evolutionary Multimodal Multiobjective Optimization. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 24, 551-565. https://doi.org/10.1109/TEVC.2019.2938557

235. López, J., Rider, M., & Wu, Q. (2019). Parsimonious Short-Term Load Forecasting for Optimal Operation Planning of Electrical Distribution Systems. *IEEE Transactions on Power Systems*, 34, 1427-1437. https://doi.org/10.1109/TPWRS.2018.2872388

236. Łosiewicz, Z., & Mikula, T. (2018). Analysis of factors affecting the durability and reliability of selected components of ship engines - in the aspect of technical operation. *Technika, Eksploatacja, Systemy Transportowe*. https://doi.org/10.24136/ATEST.2018.445

237. Luerkens, D. W. (1991). *Theory and application of morphological analysis: Fine Particles and Surfaces*. CRC Press.

238. Lund‐Thomsen, P., Poulsen, R. T., & Ackrill, R. (2016). Corporate social responsibility in the international shipping industry: state-of-the-art, current challenges and future directions. *Journal of Sustainable Mobility*, 3(2), 3‐13. https://doi.org/10.9774/gleaf.2350.2016.de.00002

239. Luo, X., Yang, Y., Ge, Z., Wen, X., & Guan, F. (2015). Maintainability-based facility layout optimum design of ship cabin. *International Journal of Production Research*, 53, 677 - 694. https://doi.org/10.1080/00207543.2014.919416

240. Lyu, Z., Ma, K., & Liu, F. (2015). Military ship's subdivision optimization for reinforcement of anti-wind capacity after damage. *Journal of Marine Science and Technology*, 20, 579-589. https://doi.org/10.1007/S00773-015-0313-6

241. MacPherson, D., & Boyd, E. (2016). Understanding and Optimizing Vessel Propulsive Power and Fuel Use Using Duty Cycle Analysis Computations. *Journal of ship production and design*, 32, 174-185. https://doi.org/10.5957/JSPD.2016.32.3.174

242. Madala, H. R. (2017). Inductive learning algorithms for complex systems modeling. CRC Press.

243. Madusanka, N. S., Fan, Y., Yang, S., & Xia, X. (2023). Digital twin in the Maritime Domain: A review and Emerging trends. *Journal of Marine Science and Engineering*, 11(5), 1021. https://doi.org/10.3390/jmse11051021

244. Mahar, A., Cobigo, V., & Stuart, H. (2013). Conceptualizing belonging. *Disability and Rehabilitation*, 35, 1026 - 1032. https://doi.org/10.3109/09638288.2012.717584

245. Mallam, S., Lundh, M., & MacKinnon, S. (2017). Evaluating a digital ship design tool prototype: Designers' perceptions of novel ergonomics software. *Applied ergonomics*, 59 Pt A, 19-26. https://doi.org/10.1016/j.apergo.2016.08.026

246. Manea, E., Militaru, C., Remus, Z., & Chitu, M. (2015). Improving organizational performance through the application of integrated management systems in maintenance activities in the shipyards. *Constanta Maritime University Annals*, 24. https://trid.trb.org/view/1418972

247. Manov, M., & Kalinov, T. (2019). Augmentation of ship's operational availability through innovative reconditioning technologies. *Journal of Physics: Conference Series*, 1297. https://doi.org/10.1088/1742-6596/1297/1/012002

248. Martelli, M., Virdis, A., Gotta, A., Cassará, P., & Summa, M. (2022). An Outlook on the Future Marine Traffic Management System for Autonomous Ships. *IEEE Access*, PP, 1-1. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3130741

249. Mathematical Statistics with Applications in R. (2021). In *Elsevier eBooks*. https://doi.org/10.1016/c2018-0-02285-9

250. Mathew, J. (1987). Machine condition monitoring using vibration analysis. *Journal of the Australia Acoustical Society*, 15(1), 7-13.

251. Mayer, P., & LeFrancois, D. (1991). SURFWEAR-EXPERT SYSTEM FOR ENGINEERING OF WEAR RESISTANT SURFACES AND FOR WEAR PROBLEM DIAGNOSIS. Proceedings of Metallurgical Society of Canadian Institute of Mining and Metallurgy. https://doi.org/10.1016/b978-0-08-041441-6.50029-1

252. Mead, R. (1990). The design of experiments: Statistical Principles for Practical Applications. Cambridge University Press.

253. Medne, A., & Lapiņa, I. (2019). Sustainability and Continuous Improvement of Organization: Review of Process-Oriented Performance Indicators. *Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity*. https://doi.org/10.3390/JOITMC5030049

254. Meneghetti, A., & Zan, E. (2016). Technicians and Interventions Scheduling for the Maintenance Service of Container Ships. *Procedia CIRP*, 47, 216-221. https://doi.org/10.1016/J.PROCIR.2016.03.078

255. Mihanović, L., Ristov, P., & Belamarić, G. (2016). Use of new information technologies in the maintenance of ship systems. *Pomorstvo: Scientific Journal of Maritime Research*, 30, 38-44. https://doi.org/10.31217/P.30.1.5

256. Milana, M., Khan, M., & Munive-Hernandez, J. (2017). Design and development of Knowledge Based System for Integrated Maintenance Strategy and Operations. *Concurrent Engineering*, 25, 18 - 5. https://doi.org/10.1177/1063293X16665662

257. Milovanovic, Z., Papić, L. R., Milovanovic, V., Milovanović, S., Dumonjić-Milovanović, S., & Branković, D. (2021). Methods of modeling the maintenance of a steam turbine based on condition assessment. Elsevier EBooks, 135–177. https://doi.org/10.1016/b978-0-12-819582-6.00007-1

258. MIMOSA, "MIMOSA OSA-CBM," accessed February 2023, https://www.mimosa.org/mimosa-osa-cbm/.

259. Mobley, R. K. (2004). Maintenance Fundamentals (Second Edition): Planning and Scheduling. https://doi.org/10.1016/b978-075067798-1/50025-x

260. Mohamed, M., Chabok, H., Awwad, E., El-Sherbeeny, A., El-Meligy, M., & Ali, Z. (2020). Stochastic and distributed scheduling of shipboard power systems using MθFOA-ADMM. *Energy*, 206, 118041. https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.118041

261. Montoro-Cazorla, D., & Pérez-Ocón, R. (2012). A shock and wear system under environmental conditions subject to internal failures, repair, and replacement. *Reliab. Eng. Syst. Saf.*, 99, 55-61. https://doi.org/10.1016/j.ress.2011.10.009

262. Montwiłł, A., Kasińska, J., & Pietrzak, K. (2018). Importance of key phases of the ship manufacturing system for efficient vessel life cycle management. *Procedia Manufacturing*, 19, 34-41. https://doi.org/10.1016/J.PROMFG.2018.01.006

263. Moon, D., & Woo, J. (2014). The impact of port operations on efficient ship operation from both economic and environmental perspectives. *Maritime Policy & Management*, 41, 444 - 461. https://doi.org/10.1080/03088839.2014.931607

264. Morales-Fusco, P., Saurí, S., & Lago, A. (2012). Potential freight distribution improvements using motorways of the sea. *Journal of Transport Geography*, 24, 1-11. https://doi.org/10.1016/J.JTRANGEO.2012.05.007

265. Morris, B. (2021). A Framework for Identifying and Managing New Operational Requirements during Naval Vessel Batch-Building Programs. *INCOSE International Symposium*, 31. https://doi.org/10.1002/j.2334-5837.2021.00864.x

266. Muchiri, P., Pintelon, L., Gelders, L., & Martin, H. (2011). Development of maintenance function performance measurement framework and indicators.

International Journal of Production Economics, 131, 295-302. https://doi.org/10.1016/J.IJPE.2010.04.039

267. Muchiri, P., Pintelon, L., Martin, H., & Chemweno, P. (2014). Modelling maintenance effects on manufacturing equipment performance: results from simulation analysis. *International Journal of Production Research*, 52, 3287 - 3302. https://doi.org/10.1080/00207543.2013.870673

268. Muller, A., Suhner, M., & Iung, B. (2008). Formalisation of a new prognosis model for supporting proactive maintenance implementation on industrial system. *Reliab. Eng. Syst. Saf.*, 93, 234-253. https://doi.org/10.1016/j.ress.2006.12.004

269. Murthy, D. N. P., & Jack, N. (2014). System degradation and maintenance. *In Springer series in reliability engineering* (pp. 23–46). https://doi.org/10.1007/978-1-4471-6440-1_2

270. Nadrljanski, D., Pavlinović, M., & Sanader, A. (2020). Maritime Processes and Communications management. *In Smart innovation, systems and technologies*, 553–563. https://doi.org/10.1007/978-981-15-5584-8_46

271. Nelson, M., & Jordan, P. (2012). Automatic Reconfiguration of a Ship's Power System Using Graph Theory Principles. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 51, 2651-2656. https://doi.org/10.1109/TIA.2014.2365622

272. Neumann, K., & Morlock, M. (1993). Operations research. *Journal of the Franklin Institute*, 268(3), 245. https://doi.org/10.1016/s0016-0032(59)90411-9

273. Ng, Q. A., Loo, N. L., Chiew, Y. S., Tan, C. P., Ralib, A., & Nor, M. B. M. (2020). Mechanical ventilation monitoring: development of a network data acquisition system. *IFAC-PapersOnLine*. https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2020.12.290

274. Nguyen, L., & Goulet, J. (2019). Real-time anomaly detection with Bayesian dynamic linear models. *Structural Control and Health Monitoring*, 26. https://doi.org/10.1002/stc.2404

275. Nguyen, S.T., Chen, P.G., and Du, Y., "Risk Assessment of Maritime Container Shipping Blockchain-Integrated Systems: An Analysis of Multi-Event Scenarios," *Transportation Research Part E-Logistics and Transportation Review* 163 (2022): 102764, https://doi.org/10.1016/j.tre.2022.102764

276. Nichols, J., Fackler, P., Pacifici, K., Murphy, K., & Nichols, J. (2014). Reducing fatigue damage for ships in transit through structured decision making. *Marine Structures*, 38, 18-43. https://doi.org/10.1016/J.MARSTRUC.2014.04.002

277. Niculita, O., Nwora, O., and Skaf, Z., "Towards Design of Prognostics and Health Management Solutions for Maritime Assets," Procedia *CIRP* 59 (2017): 122-132, https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.10.128

278. 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.

279. Niu, G. and Pecht, M., "A Framework for Cost-Effective and Accurate Maintenance Combining CBM RCM and Data Fusion," in *International Conference on Reliability, Maintainability and Safety*, Chengdu, China, 2009, https://doi.org/10.1109/icrms.2009.5270119

280. Oderanti, F., & Wilde, P. (2010). Dynamics of business games with management of fuzzy rules for decision making. *International Journal of Production Economics*, 128, 96-109. https://doi.org/10.1016/J.IJPE.2010.06.002

281. Oikonomou, S., Lazakis, I., & Papadakis, G. (2020). An innovative machine learning system for real time condition monitoring of ship machinery. *In Lecture notes in civil engineering* (pp. 753–768). https://doi.org/10.1007/978-981-15-4672-3_47

282. Omidkar, A., Xu, H., Li, Z., Haddadian, K., & Song, H. (2023). Techno-economic and life cycle assessment of renewable diesel production via methane-assisted catalytic waste cooking oil upgrading. *Journal of Cleaner Production*, *414*, 137512. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.137512

283. Oneto, L., Wang, J., Frangopol, D., Savio, S., Anguita, D., Figari, M., Cipollini, F., & Theotokatos, G. (2023). Review of maintenance strategies for ship machinery systems. *Journal of Marine Engineering & Technology*, 22, 233 - 247. https://doi.org/10.1080/20464177.2023.2180831

284. Oostveen, M. (2016). Identifiability and the Applicability of Data Protection to Big Data. *Cybersecurity*. https://doi.org/10.1093/IDPL/IPW012

285. Pająk, M. (2018). Identification of the operating parameters of a complex technical system important from the operational potential point of view. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering*, 232, 62 - 78. https://doi.org/10.1177/0959651817735771

286. Palmer, D. (2006). Maintenance planning and scheduling handbook. In *McGraw-Hill eBooks*. https://ci.nii.ac.jp/ncid/BA74804460

287. Pan, H., Yan, J., Gao, X., Fang, J., & Yao, Z. (2022). Reliability assessment of integrated energy systems based on complex network theory. *Engineering Reports*, 5. https://doi.org/10.1002/eng2.12592

288. Panasonic, "Technical Handbook Industrial Batteries for Professionals," 2017, accessed February 2023, https://eu.industrial.panasonic.com/sites/default/pidseu/files/downloads/files/panasonic-batteries-vrla-for-professionals_interactive.pdf

289. Panić, I., Ćelić, J., & Cuculić, A. (2018). Wireless Condition Monitoring of Machinery and Equipment in Maritime Industry. *Pomorstvo*. https://doi.org/10.31217/P.32.2.5.

290. Papaefthymiou, G., & Kurowicka, D. (2009). Using Copulas for Modeling Stochastic Dependence in Power System Uncertainty Analysis. *IEEE Transactions on Power Systems*, 24, 40-49. https://doi.org/10.1109/PES.2009.5275265

291. Park, H., Sun, J., Pekarek, S., Stone, P., Opila, D., Meyer, R., Kolmanovsky, I., & Decarlo, R. (2015). Real-Time Model Predictive Control for Shipboard Power Management Using the IPA-SQP Approach. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 23, 2129-2143. https://doi.org/10.1109/TCST.2015.2402233

292. 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

293. Park, J., & Oh, J. (2023). Anomalistic Symptom Judgment Algorithm for Predictive Maintenance of Ship Propulsion Engine Using Machine Learning. *Applied Sciences*. https://doi.org/10.3390/app132111818

294. Parker, G., Rennie, C., & Droste, R. (2011). Model structure and uncertainty for stochastic non-point source modelling applications. *Hydrological Sciences Journal*, 56, 870 - 882. https://doi.org/10.1080/02626667.2011.586350

295. Pellerin, R., & Perrier, N. (2018). A review of methods, techniques and tools for project planning and control. *International Journal of Production Research*, 57, 2160 - 2178. https://doi.org/10.1080/00207543.2018.1524168

296. Percy, D. F. (2008). Preventive maintenance models for complex systems. *In Springer eBooks* (pp. 179–207). https://doi.org/10.1007/978-1-84800-011-7_8

297. Perry, O., Jaffe, E., & Bitan, Y. (2019). Measuring the amounts of information during mass casualty incidents. *Proceedings of the International Symposium of Human Factors and Ergonomics in Healthcare*. https://doi.org/10.1177/2327857919081068

298. Pieretti, R., Silva, M., Lesme, D., & Almeida, M. (2020). Analyze of individual performance indicators applied to industrial maintenance. *Research, Society and Development*, 9, 129963660. https://doi.org/10.33448/rsd-v9i6.3660

299. Pinter, C. C. (2014). A book of set theory. Courier Corporation.

300. Pires, C., Da Silva Lopes, I., & Basto, L. P. (2019). Mathematical model for maintenance planning of machine tools. *Procedia Manufacturing*, *38*, 1197–1204. https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.01.210

301. Podrigalo M, Klets D, Sergiyenko O and Gritsuk I 2018 Improvement of the assessment methods for the braking dynamics with ABS malfunction SAE Technical Paper 2018-01-1881 https://doi.org/10.4271/2018-01-1881

302. Puppe, C. (1996). An Axiomatic Approach to "Preference for Freedom of Choice". *Journal of Economic Theory*, 68, 174-199. https://doi.org/10.1006/JETH.1996.0009

303. Qin, G., Zhang, P., Hou, X., Wu, S., & Wang, Y. (2020). Risk assessment for oil leakage under the common threat of multiple natural hazards. *Environmental Science and Pollution Research*, 27, 16507-16520. https://doi.org/10.1007/s11356-020-08184-7

304. Qin, X. M. (2004). Fostering scientific and technological cooperation and speeding up innovation. *Chinese Journal of Hospital Administration*. http://en.cnki.com.cn/Article_en/CJFDTOTAL-ZHYG200404000.htm

305. R.E. Barlow, L.C. Hunter, "Mathematical models for system reliability", Sylvanica Electronic Defense Labs., Rept. No. EDL-E35, Aug 1959.

306. R.E. Barlow, L.C. Hunter, "Mathematical models for system reliability, part II", The Sylvania Technologist, vol. 13, 1960, pp. 55-65.

307. Rabinovich E, Gritsuk I, Zuiev V and Zenkin E 2018 Evaluation of the powertrain condition based on the car acceleration and coasting data *SAE Technical Paper* 2018-01-1771 https://doi.org/10.4271/2018-01-1771

308. Ramachandran, B., & Lau, K. (1991). Functional equations in probability theory. In *Elsevier eBooks*. https://doi.org/10.1016/c2013-0-11048-3

309. Ramos, M., Thieme, C., Utne, I., & Mosleh, A. (2020). Human-system concurrent task analysis for maritime autonomous surface ship operation and safety. *Reliab. Eng. Syst. Saf.*, 195, 106697. https://doi.org/10.1016/j.ress.2019.106697

310. Raptodimos, Y., Lazakis, I., Theotokatos, G., Salinas, R., & Moreno, A. D. (2016). Collection and analysis of data for ship condition monitoring aiming at enhanced reliability and safety. In *Proceedings of the 26th Int. Conf. on Ocean and Polar Engineering* (pp. 828 – 835). https://pure.strath.ac.uk/portal/files/66806787/Raptodimos_etal_ISOPE_2017_Collection_and_analysis_of_data_for_ship_condition_monitoring.pdf

311. Raza, Z., Woxenius, J., Vural, C.A., and Lind, M., "Digital Transformation of Maritime Logistics: Exploring Trends in the Liner Shipping Segment," *Computers in Industry* 145 (2023): 103811, https://doi.org/10.1016/j.compind.2022.103811

312. Reslan, M., Last, N., Mathur, N., Morris, K. C., & Ferrero, V. (2022). Circular Economy: A product life cycle perspective on engineering and manufacturing practices. *Procedia CIRP*, *105*, 851–858. https://doi.org/10.1016/j.procir.2022.02.141

313. Ritchey, T. (2011). Wicked problems – social messes: Decision Support Modelling with Morphological Analysis. Springer.

314. Roccazzella, F., Gambetti, P., & Vrins, F. (2022). Correction to: Optimal and robust combination of forecasts via constrained optimization and shrinkage. *International Journal of Forecasting*. https://doi.org/10.1016/j.ijforecast.2022.03.011

315. Rogerson, S., & Sallnäs, U. (2017). Internal coordination to enable high load factor. *The International Journal of Logistics Management*, 28, 1142-1167. https://doi.org/10.1108/IJLM-02-2016-0031

316. Ryan, J., & Jons, O. (1992). Improving the ship design, acquisition and construction process. *Naval Engineers Journal*, 104, 39-57. https://doi.org/10.1111/J.1559-3584.1992.TB00723.X

317. Sabri-Laghaie, K., & Noorossana, R. (2016). Reliability and Maintenance Models for a Competing-Risk System Subjected to Random Usage. *IEEE Transactions on Reliability*, 65, 1271-1283. https://doi.org/10.1109/TR.2016.2570574

318. Sancak, E., & Salman, F. (2011). Multi-item dynamic lot-sizing with delayed transportation policy. *International Journal of Production Economics*, 131, 595-603. https://doi.org/10.1016/J.IJPE.2011.02.004

319. Sánchez-Herguedas, A., Mena-Nieto, A., & Rodrigo-Muñoz, F. (2021). A new analytical method to optimise the preventive maintenance interval by using a semi-Markov process and z-transform with an application to marine diesel engines. Reliability Engineering and System Safety, 207, 107394. https://doi.org/10.1016/j.ress.2020.107394

320. Sauter, T. (2007). The continuing evolution of integration in manufacturing automation. *IEEE Industrial Electronics Magazine*, 1, 10-19. https://doi.org/10.1109/MIE.2007.357183

321. Saxena, A.K., Celaya, J.R., Balaban, E.P., Goebel, K. et al., "Metrics for Evaluating Performance of Prognostic Techniques," in *IEEE Conference on Prognostics and Health Management*, Denver, CO, 2008, https://doi.org/10.1109/phm.2008.4711436

322. Schlüter, M., Baeza, A., Dressler, G., Frank, K., Groeneveld, J., Jager, W., Janssen, M., McALLISTER, R., Müller, B., Orach, K., Schwarz, N., & Wijermans, N. (2017). A framework for mapping and comparing behavioural theories in models of

social-ecological systems. *Ecological Economics*, 131, 21-35. https://doi.org/10.1016/J.ECOLECON.2016.08.008

323. Schøyen, H., & Bråthen, S. (2015). Measuring and improving operational energy efficiency in short sea container shipping. *Research in transportation business and management*, 17, 26-35. https://doi.org/10.1016/J.RTBM.2015.10.004

324. Schreier, P. J., & Scharf, L. L. (2010). Performance bounds for parameter estimation. *In Cambridge University Press eBooks* (pp. 151–176). https://doi.org/10.1017/cbo9780511815911.008

325. Schröer, C., Kruse, F., and Gómez, J.M., "A Systematic Literature Review on Applying CRISP-DM Process Model," *Procedia Computer Science* 181 (2021): 526-534, https://doi.org/10.1016/j.procs.2021.01.199

326. Schuëller, G., & Pradlwarter, H. (2009). Uncertain linear systems in dynamics: Retrospective and recent developments by stochastic approaches. *Engineering Structures*, 31, 2507 - 2517. https://doi.org/10.1016/J.ENGSTRUCT.2009.07.005

327. Selvi, M., Rajendran, L., & Abukhaled, M. (2021). Estimation of Rolling Motion of Ship in Random Beam Seas by Efficient Analytical and Numerical Approaches. *Journal of Marine Science and Application*, 20, 55 - 66. https://doi.org/10.1007/s11804-020-00183-x

328. Semeraro, C., Aljaghoub, H., Abdelkareem, M.A., Alami, A.H. et al., "Digital Twin in Battery Energy Storage Systems: Trends and Gaps Detection through Association Rule Mining," *Energy* 273 (2023): 127086, https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.127086

329. Sharma, A., Kosasih, E.E., Zhang, J., Brintrup, A. et al., "Digital Twins: State of the Art Theory and Practice, Challenges, and Open Research Questions," *Journal of Industrial Information Integration* 30 (2020): 100383, https://doi.org/10.1016/j.jii.2022.100383

330. Shaw, H., & Lin, C. (2021). Marine big data analysis of ships for the energy efficiency changes of the hull and maintenance evaluation based on the ISO

19030 standard. *Ocean Engineering*. https://doi.org/10.1016/J.OCEANENG.2021.108953

331. Skolnick, D., & Skolnick, P. (1991). Small Ships, Advanced Technology and Warfighting Performance. *Naval Engineers Journal*, 103, 30-45. https://doi.org/10.1111/J.1559-3584.1991.TB00936.X

332. Slatvinskaia, V., & Vasilenko, N. (2021). RISK FACTORS ON WATER TRANSPORT. *Priority areas for development of scientific research: domestic and foreign experience*. https://doi.org/10.30525/978-9934-26-049-0-34

333. Soliman, M., Frangopol, D., & Mondoro, A. (2016). A probabilistic approach for optimizing inspection, monitoring, and maintenance actions against fatigue of critical ship details. *Structural Safety*, 60, 91-101. https://doi.org/10.1016/J.STRUSAFE.2015.12.004

334. Soukup, A., Maitah, M., & Svoboda, R. (2014). The Concept of Rationality in Neoclassical and Behavioural Economic Theory. *Mathematical Models and Methods in Applied Sciences*, 9, 1. https://doi.org/10.5539/MAS.V9N3P1

335. Stankov, I., Stefanova-Stoyanova, V., & Tsochev, G. (2022). An Overview of Intelligent Information Transport Management Systems in Rail and Water Transport. *2022 10th International Scientific Conference on Computer Science (COMSCI)*, 1-4. https://doi.org/10.1109/COMSCI55378.2022.9912605

336. Stevens, B., Dubey, A., & Santoso, S. (2015). On Improving Reliability of Shipboard Power System. *IEEE Transactions on Power Systems*, 30, 1905-1912. https://doi.org/10.1109/TPWRS.2014.2354638

337. Stone, G., Culbert, I., Boulter, E. A., & Dhirani, H. (2014). *Electrical insulation for rotating machines*. https://doi.org/10.1002/9781118886663

338. Sui, C., Stapersma, D., Visser, K., Vos, P., & Ding, Y. (2019). Energy effectiveness of ocean-going cargo ship under various operating conditions. *Ocean Engineering*. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2019.106473

339. Sullivan, B., Rossi, M., Desai, S., Solé, J. et al., “Maritime 4.0 – Opportunities in Digitalization and Advanced Manufacturing for Vessel

Development," *Procedia Manufacturing* 42 (2020): 246-253, https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.02.078

340. Szostak, R. (2009). Emergent properties of the system of causal links. *In Springer eBooks* (pp. 285–304). https://doi.org/10.1007/978-3-540-92282-7_10

341. Szymanek, B. (1989). Introduction to morphological Analysis.

342. Thalheim, B. (2011). The science of conceptual modelling. *In Lecture Notes in Computer Science* (pp. 12–26). https://doi.org/10.1007/978-3-642-23088-2_2

343. The Handbook of Reliability, Maintenance, and System Safety through Mathematical Modeling. (2021). In *Elsevier eBooks*. https://doi.org/10.1016/c2019-0-00129-x

344. Thoft-Christensen, P. (1992). Reliability and optimization of structural systems '91. In *Springer eBooks*. https://doi.org/10.1007/978-3-642-84753-0

345. Trung, D., & Thinh, H. (2021). A multi-criteria decision-making in turning process using the MAIRCA, EAMR, MARCOS and TOPSIS methods: A comparative study. *Advances in Production Engineering & Management*. https://doi.org/10.14743/apem2021.4.412

346. Tsujikawa, T. and Matsushima, T., "Remote Monitoring of VRLA Batteries for Telecommunications Systems," *Journal of Power Sources* 168, no. 1 (2007): 99-104, https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2006.12.062

347. Tuominen, M., Rajala, A., & Möller, K. (2004). How Does Adaptability Drive Firm Innovativeness. *Journal of Business Research*, 57, 495-506. https://doi.org/10.1016/S0148-2963(02)00316-8

348. Turan, O., Lazakis, I., Judah, S., & Incecik, A. (2011). Investigating the reliability and criticality of the maintenance characteristics of a diving support vessel. *Quality and Reliability Engineering International*, 27. https://doi.org/10.1002/qre.1182

349. Utne, I., Rokseth, B., Sørensen, A., & Vinnem, J. (2020). Towards supervisory risk control of autonomous ships. *Reliab. Eng. Syst. Saf.*, 196, 106757. https://doi.org/10.1016/j.ress.2019.106757

350. V Vychuzhanin, N Rudnichenko, Z Sagova, M Smieszek, V Cherniavskyi, A Golovan, M Volodarets "Analysis and structuring diagnostic large volume data of technical condition of complex equipment in transport" 2020 IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 776 012049 https://doi.org/10.1088/1757-899X/776/1/012049

351. Vamvoudakis, K. G., & Jagannathan, S. (2016). *Control of complex systems*. https://doi.org/10.1016/c2015-0-02422-4

352. Vanem, E., Puisa, R., & Skjong, R. (2009). Standardized Risk Models for Formal Safety Assessment of Maritime Transportation. *Proceedings of 28th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering*, 51-61. https://doi.org/10.1115/OMAE2009-79062

353. Vanem, E., Salucci, C.B., Bakdi, A., and Alnes, Ø.Å., "DataDriven State of Health Modelling—A Review of State of the Art and Reflections on Applications for Maritime Battery Systems," *Journal of Energy Storage* 43 (2021): 103158, https://doi.org/10.1016/j.est.2021.103158

354. Velasco-Gallego, C. and Lazakis, I., "RADIS: A Real-Time Anomaly Detection Intelligent System for Fault Diagnosis of Marine Machinery," *Expert Systems with Applications* 204 (2022): 117634, https://doi.org/10.1016/j.eswa.2022.117634

355. Velasco-Gallego, C., & Lazakis, I. (2022). A real-time data-driven framework for the identification of steady states of marine machinery. Applied Ocean Research, 121, 103052. https://doi.org/10.1016/j.apor.2022.103052

356. Velasco-Gallego, C., De Maya, B. N., Molina, C. M., Lazakis, I., & Mateo, N. C. (2023). Recent advancements in data-driven methodologies for the fault diagnosis and prognosis of marine systems: A systematic review. *Ocean Engineering*, *284*, 115277. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.115277

357. Verhagen, W.J., Curran, R., and De Boer, L., "ComponentBased Data-Driven Predictive Maintenance to Reduce Unscheduled Maintenance Events," in *Transdisciplinary Engineering: A Paradigm Shift—Proceedings of the 24th ISPE Inc. International Conference on Transdisciplinary Engineering, TE 2017*, Singapore, 2017, Vol. 5, 3-10, https://doi.org/10.3233/978-1-61499-779-5-3

358. Verma, A. K., Srividya, A., Rana, A., & Khattri, S. K. (2012). OPTIMIZATION OF MAINTENANCE SCHEDULING OF SHIP BORNE MACHINERY FOR IMPROVED RELIABILITY AND REDUCED COST. *International Journal of Reliability, Quality and Safety Engineering*, *19*(03), 1250014. https://doi.org/10.1142/s0218539312500143

359. Villeta, M., Rubio, E. M., Valencia, J. L., & Pérez, M. Á. S. (2012). Integrating the continuous improvement of measurement systems into the statistical quality control of manufacturing processes: A novel link. *CIRP Annals*, *61*(1), 507–510. https://doi.org/10.1016/j.cirp.2012.03.017

360. Visvikis, I., & Panayides, P. M. (2017). Shipping Operations Management. In *WMU studies in maritime affairs*. https://doi.org/10.1007/978-3-319-62365-8

361. Volkov, V., Gritsuk, I., Gritsuk, Y., Volkova, T., Kashkanov, V., & Volkov, Y. (2019). Features of the construction of an information system for assessing the parameters of the technical condition of vehicles in operating conditions. *Journal of Mechanical Engineering and Transport*. https://doi.org/10.31649/2413-4503-2019-10-2-10-15

362. Volodarets M, Gritsuk I, Chygyryk N and Belousov E 2019 Optimization of vehicle operating conditions by using simulation modeling software SAE Technical Paper 2019-01-0099 https://doi.org/10.4271/2019-01-0099

363. Vujanovic, D., Momčilović, V., Bojovic, N. J., & Papić, V. (2012). Evaluation of vehicle fleet maintenance management indicators by application of DEMATEL and ANP. *Expert Systems With Applications*, *39*(12), 10552–10563. https://doi.org/10.1016/j.eswa.2012.02.159

364. Vychuzhanin, V., Rudnichenko, N., Boyko, V., Shibaeva, N., & Konovalov, S. (2016). Devising a method for the estimation and prediction of technical condition of ship complex systems. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6, 4-11. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.85605.

365. Vychuzhanin, V., Rudnichenko, N., Gritsuk, I., Golovan, A. et al., "Cognitive Model of the Internal Combustion Engine," SAE Technical Paper 2018-01-1738, 2018, https://doi.org/10.4271/2018-01-1738

366. Wang, C., Zhou, B., Li, P., & Li, P. (2017). Study on Maintenance Progress FMECA for Ship Equipment. *2017 International Conference on Computer Technology, Electronics and Communication (ICCTEC)*, 308-312. https://doi.org/10.1109/ICCTEC.2017.00073

367. Wang, F., Zhang, Z., Ericsen, T., Raju, R., Burgos, R., & Boroyevich, D. (2015). Advances in Power Conversion and Drives for Shipboard Systems. *Proceedings of the IEEE*, 103, 2285-2311. https://doi.org/10.1109/JPROC.2015.2495331

368. Wang, K., Hu, Q., & Liu, J. (2022). Digital Twin-Driven Approach for Process Management and Traceability towards Ship Industry. *Processes*. https://doi.org/10.3390/pr10061083

369. Wang, L., Ren, Q., Ma, Y., & Wu, D. (2019). Optimal Maintenance Design-Oriented Nonprobabilistic Reliability Methodology for Existing Structures Under Static and Dynamic Mixed Uncertainties. *IEEE Transactions on Reliability*, 68, 496-513. https://doi.org/10.1109/TR.2018.2868773

370. Wang, Y., Zhao, C., & Zhao, R. (2019). The impact of modern educational technology on college teaching and its application strategies. In *Advances in intelligent systems and computing* (pp. 999–1006). https://doi.org/10.1007/978-3-030-15740-1_129

371. Weeds, H. (2002). Strategic Delay in a Real Options Model of R&D Competition. *The Review of Economic Studies*, 69, 3, 729–747. https://doi.org/10.1111/1467-937X.T01-1-00029

372. Widodo, A., & Yang, B. (2007). Support vector machine in machine condition monitoring and fault diagnosis. *Mechanical Systems and Signal Processing*, *21*(6), 2560–2574. https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2006.12.007

373. Wijesinghe, D., & Mallawarachchi, H. (2019). A systematic approach for maintenance performance measurement. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*. https://doi.org/10.1108/jqme-03-2017-0022

374. Willmott, P., & McCarthy, D. D. (2001). Total Productivity Maintenance (Second Edition): Assessing the true costs and benefits of TPM. In Elsevier eBooks (pp. 17–22). Elsevier BV. https://doi.org/10.1016/b978-075064447-1/50005-9

375. Witkowski, K., & Wysocki, J. (2020). The possibilities of detecting failures and defects in the injection system of a marine diesel engine. *SAE International Journal of Engines*, *13*(5). https://doi.org/10.4271/03-13-05-0046

376. Wong, E., Jardine, A., & Banjevic, D. (2011). Incorporating repair information into maintenance optimization models for repairable systems. *2011 Proceedings - Annual Reliability and Maintainability Symposium*, 1-5. https://doi.org/10.1109/RAMS.2011.5754498

377. Wright, L., & Davidson, S. (2020). How to tell the difference between a model and a digital twin. *Advanced Modeling and Simulation in Engineering Sciences*, 7. https://doi.org/10.1186/s40323-020-00147-4

378. Xiang-Bin, L. (2007). A research on asset appraisal Method of Forestland resource. *Journal of Harbin University of Commerce*. https://en.cnki.com.cn/Article_en/CJFDTOTAL-HLJC200702012.htm

379. Xiao, H., & Peng, R. (2014). Optimal allocation and maintenance of multi-state elements in series-parallel systems with common bus performance sharing. *Comput. Ind. Eng.*, 72, 143-151. https://doi.org/10.1016/j.cie.2014.03.014

380. Xu, J., & Xu, L. (2017). Affordability and Life-Cycle Costs Analysis. *In Elsevier eBooks* (pp. 433–450). https://doi.org/10.1016/b978-0-12-812207-5.00009-2

381. Yamashiro, M., Satoh, M., & Yuasa, Y. (1992). Parallel-series and series-parallel redundant systems consisting of units having two kinds of failure rates. Microelectronics Reliability, 32(5), 611–613. https://doi.org/10.1016/0026-2714(92)90615-r

382. Yang, H. (2020). General Technology of Cargo ship. *In Space Science and Technologies* (pp. 57–98). https://doi.org/10.1007/978-981-15-4898-7_3

383. Yao, Z., Xu, Y., Zhang, Y., & Xiong, L. (2018). Overall Assessment of Technical Conditions for Vessels. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 394. https://doi.org/10.1088/1757-899X/394/4/042067

384. Yue, S., Chua, T., & Fan, J. (2022). DigiShip - Digitalisation of ship operations. *Journal of Physics: Conference Series*, 2311. https://doi.org/10.1088/1742-6596/2311/1/012001

385. Zaharchuk V, Gritsuk I, Zaharchuk O and Golovan A 2018 The choice of a rational type of fuel for technological vehicles *SAE Technical Paper* 2018-01-1759 https://doi.org/10.4271/2018-01-1759

386. Zaraphonitis, G., Marzi, J., Papanikolaou, A., Harries, S., & Brunswig, J. (2018). HOLISTIC Ship Design for Life Cycle. *All Days*. https://doi.org/10.5957/some-2018-009

387. Zerbst, U., & Beretta, S. (2011). Failure and damage tolerance aspects of railway components. *Engineering Failure Analysis*, 18, 534-542. https://doi.org/10.1016/J.ENGFAILANAL.2010.06.001

388. Zhang, B., Ma, X., Liu, L., Yu, H., Morina, A., & Lu, X. (2023). Study on the sliding wear map of cylinder liner - piston ring based on various operating parameters. *Tribology International*, *186*, 108632. https://doi.org/10.1016/j.triboint.2023.108632

389. Zhang, C., Zhu, H., Wu, J., Cheng, Y., Deng, Y., & Liu, C. (2018). An Economical Optimization Model of Non-Periodic Maintenance Decision for Deteriorating System. *IEEE Access*, 6, 55149-55161. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2872348

390. Zhang, Y., Ren, S., Liu, Y., & Si, S. (2017). A big data analytics architecture for cleaner manufacturing and maintenance processes of complex products. *Journal of Cleaner Production*, *142*, 626–641. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.07.123

391. Zhao, J., Cui, S., Chen, Y., & Zhou, X. (2013). A fleet Technical Condition management system for connected ships. *Chemical engineering transactions*. https://doi.org/10.3303/cet1333134

392. Zhao, X., Gaudoin, O., Doyen, L., & Xie, M. (2018). Optimal inspection and replacement policy based on experimental degradation data with covariates. *IISE Transactions*, 51, 322 - 336. https://doi.org/10.1080/24725854.2018.1488308

393. Zheng, H. (2002). Ship maintenance management system based on modern communication technology. *Journal of Dalian Maritime University*. https://en.cnki.com.cn/Article_en/CJFDTOTAL-DLHS200201015.htm

394. Zheng, Z., Zhou, W., Zheng, Y., & Wu, Y. (2016). Optimal maintenance policy for a system with preventive repair and two types of failures. *Comput. Ind. Eng.*, 98, 102-112. https://doi.org/10.1016/j.cie.2016.05.007

395. Zhi-Pin, Z. (2006). Systematic research on reliability centered maintenance of ship power station. *Journal of Zhejiang Ocean University*.

396. Zhou, X., Liu, Z., Wang, F., & Wu, Z. (2021). A system-theoretic approach to safety and security co-analysis of autonomous ships. *Ocean Engineering*, 222, 108569. https://doi.org/10.1016/J.OCEANENG.2021.108569

397. Zhu, W., Gu, T., Wu, J., & Liang, Z. (2023). Advanced State Estimation Approach for Partially Observable Shipboard Power Systems. *Journal of Marine Science and Engineering*. https://doi.org/10.3390/jmse11122380

398. Головань А. (2023). Особливості методики моделювання та інформаційної системи моніторингу показників ефективності системи технічного обслуговування вантажних суден. *Водний транспорт*, 2(38), 27-37. https://doi.org/10.33298/2226-8553.2023.2.38.03

399. Головань А. І. Дистанційний контроль параметрів роботи суднової дизельної енергетичної установки: дис. канд. техн. наук: 05.22.20 / Головань Андрій Ігорович. – Одеса, 2013. – 274 с.

400. Головань А.І. (2019) Застосування спектрального аналізу в процесах діагностики вузлів транспортного засобу, Міжнародна науково-практична конференція «Сучасні енергетичні установки на транспорті, технології та обладнання для їх обслуговування СЕУТТОО-2019», 12 – 13 вересня 2019 року, м. Херсон

401. Головань А.І. (2020) Розв’язання задачі пошуку оптимальних режимів роботи системи очищення від оксидів азоту вихлопних газів транспортного судна, II Міжнародна науково-практична морська конференція кафедри СЕУ і ТЕ Навчально-Наукового Інституту Морського Флоту Одеського Національного Морського Університету 24-28 квітня 2020 року

402. Головань А.І. (2020) Застосування інтегрованої системи управління для контролю шкідливих викидів транспортного судна, Міжнародна науково-практична конференція «Сучасні енергетичні установки на транспорті, технології та обладнання для їх обслуговування СЕУТТОО-2020», м. Херсон

403. Головань А.І. (2020) Розв’язання задачі пошуку оптимальних моделей контролю системи очищення від оксидів азоту вихлопних газів транспортного судна, Одинадцята Міжнародна науково-практична конференція «Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті MINTT-2020» 27 – 29 травня 2020 року м. Херсон

404. Головань А.І. (2021) Комплексне застосування безперервного контролю технічного стану та оперативної діагностики суднового роторного обладнання, Перша міжнародна науково-технічна конференція «Прогресивні технології засобів транспорту»

405. Головань А.І. (2021) Методологічні аспекти контролю та прогнозування технічного стану суднoремонтної транспортної техніки, Міжнародна науково-практична конференція «Сучасні енергетичні установки на транспорті, технології та обладнання для їх обслуговування СЕУТТОО-2021», м. Херсон

406. Головань А.І. (2021) Місце і роль штучного інтелекту в процесі експлуатації засобів водного транспорту, Перша міжнародна науково-технічна конференція «Прогресивні технології засобів транспорту»

407. Головань А.І. (2021) Напрямки підвищення ефективності контролю технічного стану суднопіднімальних гідротехнічних споруд, Дванадцята Міжнародна науково-практична конференція «Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті MINTT-2021» м. Херсон

408. Головань А.І. (2022) Постановка задачі вибору оптимального закону управління ефективністю експлуатації морських суден з гвинтами регульованого кроку, II Міжнародна науково-практична конференція Проблеми сталого розвитку морської галузі (PSDMI-2022), Херсон, Україна

409. Головань А.І. (2022) Удосконалення методу розрахунку параметрів і управління технічним станом обладнання засобів транспорту, Міжнародна науково-практична конференція «Сучасні енергетичні установки на транспорті, технології та обладнання для їх обслуговування СЕУТТОО-2022», м. Одеса

410. Головань А.І. (2022) Формування інтелектуальної системи технічного обслуговування та ремонту засобів водного транспорту, II Міжнародна науково-практична конференція Проблеми сталого розвитку морської галузі (PSDMI-2022), Херсон, Україна

411. Головань А.І. (2022) Штучний інтелект як ключовий елемент цифрової трансформації процесу технічного обслуговування водного транспорту, Міжнародна наукова конференція «Інтелектуальні Транспортні Системи: Екологія, Безпека, Якість, Комфорт». – К.: НТУ, 2022, м. Київ

412. Головань А.І. (2023) Особливості моделювання та побудови інформаційної системи моніторингу показників ефективності технічного обслуговування вантажних суден, IV Міжнародна науково-практична конференція «ДНІПРОВСЬКІ ЧИТАННЯ-2023», Київ, Україна

413. Головань А.І. (2023). Концептуальна модель планування та оптимізації графіків технічного обслуговування вантажних суден. *Водний транспорт*, 1(37), 107-115. https://doi.org/10.33298/2226-8553.2023.1.37.12

414. Головань А.І. (2023). Методи кількісної оцінки ефективності систем технічного обслуговування вантажних суден. *Розвиток транспорту*, 3(18), 113-122. https://doi.org/10.33082/td.2023.3-18.09

415. Головань А.І. (2023). Перспективні напрямки та інноваційні підходи управління системою технічного обслуговування вантажних суден. *Розвиток транспорту*, 2(17), 42-55. https://doi.org/10.33082/td.2023.2-17.04

416. Головань А.І. (2024). Дослідження впливу комплексної прескриптивної системи та цифрових стратегій на ефективність системи технічного обслуговування вантажних суден. *Водний транспорт*, 1(39), 112-123. https://doi.org/10.33298/2226-8553.2024.1.39.11

417. Головань А.І. (2024). Дослідження процесів адаптивізації системи технічного обслуговування за результатами зміни стану суднових технічних засобів. *Системи управління, навігації та зв'язку. Збірник наукових праць*, 2(76), 18-23. https://doi.org/10.26906/SUNZ.2024.2.018

418. Головань А.І. (2024). Особливості оцінювання ефективності систем технічного обслуговування вантажних суден. *Системи управління, навігації та зв'язку. Збірник наукових праць*, 1(75), 5-10. https://doi.org/10.26906/SUNZ.2024.1.005

419. Головань А.І., Грицук І.В. (2023). Основні принципи дослідження ефективності технічного обслуговування судна. *Розвиток Транспорту*, *1(16)*, 47–60. https://doi.org/10.33082/td.2023.1-16.04

420. Головань, А. (2020). Розробка і дослідження комплексу технічних засобів управління експлуатаційною ефективністю морських транспортних засобів: автоматичний збір і обробка інформації в інтелектуальній системі (0122U200855). https://nddkr.ukrintei.ua/view/rk/bcc80ca42569ba921b95b38af1cd260d

421. Головань, А. (2020). Розроблення програмного забезпечення інформаційно-аналітичної системи контроля і прогнозування рівня надійності суднових технічних систем і комплексів вантажного судна на основі цифрових двійників (0123U102142). https://nddkr.ukrintei.ua/view/rk/8cc95840fc313e7bd53c2ef64e18000a

422. Головань, А. (2021). Розробка структури, складових і призначення інформаційно-аналітичної системи оцінювання експлуатаційної ефективності морських транспортних засобів (0122U200854). https://nddkr.ukrintei.ua/view/rk/9e73ea40b5915e219761480d26a22af3

423. Головань, А. (2021). Розроблення автоматизованої інформаційної системи обґрунтування раціональної програми і управління технічним обслуговуванням вантажних суден (0123U102204). https://nddkr.ukrintei.ua/view/rk/abcc2282dd939e459a0a1ea7bed177d8

424. Головань, А. (2021). Розроблення автоматизованої системи розпізнавання несправностей та інформаційного забезпечення процесу технічної експлуатації суднових технічних комплексів вантажного судна (0123U102178). https://nddkr.ukrintei.ua/view/rk/af9bf74085869b45562e6b17295b2fd8

425. Головань, А. (2022). Розроблення комплексної автоматизованої системи контроля і прогнозування показників надійності засобів морського транспорту (0123U102241). https://nddkr.ukrintei.ua/view/rk/534c26605e7cb1c98b9aa898e2995d4e

426. Головань, А. (2022). Розроблення комплексної системи інформаційного забезпечення процесу технічної експлуатації суднових технічних систем: автоматизований пошук несправностей і підтримка прийняття рішень (0123U102286). https://nddkr.ukrintei.ua/view/rk/b531e7a6bfb28fc3204f9bbaa5d14e1f

427. Головань, А. (2023). Оптимізація технічного обслуговування вантажних суден – моделювання нелінійних процесів зміни технічного стану суднових технічних засобів. *Вісник Одеського національного морського університету*, 4 (71), 140-151. https://doi.org/10.47049/2226-1893-2023-4-140-151

428. Головань, А. (2023). Особливості моделювання процесів зміни технічного стану з складовою випадковості. *Вісник Одеського національного морського університету*, (70), 71-83. https://doi.org/10.47049/2226-1893-2023-3-71-83

429. Головань, А. (2023). Розроблення систем інформаційного забезпечення підтримки технічної придатності суден торгового флоту України на основі цифрових двійників і аналізу даних в реальному часі (0123U102159). https://nddkr.ukrintei.ua/view/rk/d1025734d23e9a0005f89ffa7dc9a215

430. Головань, А. (2023). Формування оптимальних параметрів системи технічного обслуговування вантажних суден за рахунок цифрових стратегій. *Вісник Приазовського Державного Технічного Університету. Серія: Технічні науки*, (47), 297–305. https://doi.org/10.31498/2225-6733.47.2023.300116

431. Головань, А. (2023). Формування цифрових стратегій для вирішення задач підвищення ефективності систем технічного обслуговування вантажних суден. *Вісник Приазовського Державного Технічного Університету. Серія: Технічні науки*, (46), 149–158. https://doi.org/10.31498/2225-6733.46.2023.288184

432. Гончарук І. П. Методи діагностики і підвищення ефективності контролю технічного стану суднопіднімальних гідротехнічних споруд: дис. канд. техн. наук: 05.22.20 / Гончарук Ірина Павлівна. – Одеса, 2021. – 202 с.

433. Грицук І. В. Концепція забезпечення оптимального температурного стану двигунів і транспортних засобів в умовах експлуатації: дис. док. техн. наук: 05.22.20 / Грицук Ігор Валерійович. – Харків, 2016. – 553 с.

434. Грицук, І., Головань, А., Поліщук, О., Літвінов, М., & Головащенко, О. (2023). Особливості алгоритмів моніторингу показників експлуатації засобів транспорту. *Вісник Приазовського Державного Технічного Університету. Серія: Технічні науки*, (47), 312–324. https://doi.org/10.31498/2225-6733.47.2023.300118

435. КНД 31.2.002.01–96 «Правила технічної експлуатації морських і річкових суден». Міністерство транспорту України. 01.02.97

436. КНД 31.2.007–96 «Положення про технічну експлуатацію морських і річкових суден». Міністерство транспорту України. 01.01.97

437. КНД 31.5.001-96 «Керівництва з технічного спостереження за ремонтом суден для різних суднових технічних засобів та їхніх вузлів». Міністерство транспорту України. 01.01.97

438. Морські операції пошуку і рятування: управління, планування і координація : монографія / А.І. Головань, А.О. Волошин, І.П. Гончарук, та ін. – Одеса : НУ «ОМА», 2023. – 200 с. ISBN 978-617-7857-24-1

439. Правила експлуатації суден флоту рибної промисловості. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z2200-12

440. Стратегії і техніки управління ризиками в морській безпеці : монографія / І.П. Гончарук, А.І. Головань, Є.В. Калініченко та ін. – Одеса: НУ «ОМА», 2023. – 208 с. ISBN 978-617-7857-25-8

441. Сучасні технології і методи моделювання інформаційних процесів в галузі водного транспорту з оглядом на морську безпеку : монографія / А.І. Головань, Є.В. Калініченко, І.П. Гончарук, та ін. – Одеса : НУ «ОМА», 2023. – 244 с. ISBN 978-617-7857-26-5

442. Худяков І. В. Удосконалення методів оперативного контролю технічного стану транспортного засобу в умовах експлуатації: дис. канд. техн. наук: 05.22.20 / Худяков Ігор Валентинович. – Харків, 2021. – 240 с.

ДОДАТОК А

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

*Наукові праці, у фахових виданнях **категорії «Б» 271** – Морський та внутрішній водний транспорт, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації*:

1. Головань А.І., Грицук І.В. (2023). Основні принципи дослідження ефективності технічного обслуговування судна. *Розвиток Транспорту*, 1(16), 47–60. https://doi.org/10.33082/td.2023.1-16.04 (фахове видання **категорія «Б» 271** – Морський та внутрішній водний транспорт)
2. Головань А.І. (2024). Дослідження впливу комплексної прескриптивної системи та цифрових стратегій на ефективність системи технічного обслуговування вантажних суден. *Водний транспорт*, 1(39), 112-123. https://doi.org/10.33298/2226-8553.2024.1.39.11 (фахове видання **категорія «Б» 271** – Морський та внутрішній водний транспорт)
3. Головань А.І. (2024). Особливості оцінювання ефективності систем технічного обслуговування вантажних суден. *Системи управління, навігації та зв'язку. Збірник наукових праць*, 1(75), 5-10. https://doi.org/10.26906/SUNZ.2024.1.005 (фахове видання **категорія «Б» 271** – Морський та внутрішній водний транспорт)
4. Головань, А. (2023). Формування оптимальних параметрів системи технічного обслуговування вантажних суден за рахунок цифрових стратегій. *Вісник Приазовського Державного Технічного Університету. Серія: Технічні науки*, (47), 297–305. https://doi.org/10.31498/2225-6733.47.2023.300116 (фахове видання **категорія «Б» 271** – Морський та внутрішній водний транспорт)
5. Головань А.І. (2023). Перспективні напрямки та інноваційні підходи управління системою технічного обслуговування вантажних суден. *Розвиток транспорту*, 2(17), 42-55. https://doi.org/10.33082/td.2023.2-17.04 (фахове видання **категорія «Б» 271** – Морський та внутрішній водний транспорт)
6. Головань А.І. (2023). Методи кількісної оцінки ефективності систем технічного обслуговування вантажних суден. *Розвиток транспорту*, 3(18), 113-122. https://doi.org/10.33082/td.2023.3-18.09 (фахове видання **категорія «Б» 271** – Морський та внутрішній водний транспорт)
7. Головань А.І. (2023). Концептуальна модель планування та оптимізації графіків технічного обслуговування вантажних суден. *Водний транспорт*, 1(37), 107-115. https://doi.org/10.33298/2226-8553.2023.1.37.12 (фахове видання **категорія «Б» 271** – Морський та внутрішній водний транспорт)
8. Головань, А. (2023). Особливості моделювання процесів зміни технічного стану з складовою випадковості. *Вісник Одеського національного морського університету*, (70), 71-83. https://doi.org/10.47049/2226-1893-2023-3-71-83 (фахове видання **категорія «Б» 271** – Морський та внутрішній водний транспорт)
9. Головань, А. (2023). Формування цифрових стратегій для вирішення задач підвищення ефективності систем технічного обслуговування вантажних

суден. *Вісник Приазовського Державного Технічного Університету. Серія: Технічні науки*, (46), 149–158. https://doi.org/10.31498/2225-6733.46.2023.288184 (фахове видання **категорія «Б» 271** – Морський та внутрішній водний транспорт)

10. Головань, А. (2023). Оптимізація технічного обслуговування вантажних суден – моделювання нелінійних процесів зміни технічного стану суднових технічних засобів. *Вісник Одеського національного морського університету*, 4 (71), 140-151. https://doi.org/10.47049/2226-1893-2023-4-140-151 (фахове видання **категорія «Б» 271** – Морський та внутрішній водний транспорт)

11. Головань А.І. (2023). Особливості методики моделювання та інформаційної системи моніторингу показників ефективності системи технічного обслуговування вантажних суден. *Водний транспорт*, 2(38), 27-37. https://doi.org/10.33298/2226-8553.2023.2.38.03 (фахове видання **категорія «Б» 271** – Морський та внутрішній водний транспорт)

12. Головань А.І. (2024). Дослідження процесів адаптивізації системи технічного обслуговування за результатами зміни стану суднових технічних засобів. *Системи управління, навігації та зв'язку. Збірник наукових праць*, 2(76), 18-23. https://doi.org/10.26906/SUNZ.2024.2.018 (фахове видання **категорія «Б» 271** – Морський та внутрішній водний транспорт)

13. Golovan, A., Honcharuk, I., Voloshyn, A., Shumylo, O., Nykyforov, Y., & Shamov, O. (2023). Дослідження шляхів зменшення забруднення повітря від судноплавства. *Розвиток транспорту*, 4(15), 15-23. https://doi.org/10.33082/td.2022.4-15.02 (фахове видання **категорія «Б» 271** – Морський та внутрішній водний транспорт)

*Наукові праці, у наукових періодичних виданнях інших держав із напряму, з якого підготовлено дисертацію, зокрема індексовані в **SCOPUS або Web of Science**, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації*:

14. Golovan, A., Honcharuk, I., Deli, O., Kostenko, O., & Nykyforov, Y. (2021). System of Water Vehicle Power Plant Remote Condition Monitoring. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, 1199(1), 012049. https://doi.org/10.1088/1757-899x/1199/1/012049 (**ISSN: 1757-8981**, **E-ISSN: 1757-899X**, **іноземне фахове видання**)

15. Golovan, A., Gritsuk, I., Popeliuk, V. et al., "Features of Mathematical Modeling in the Problems of Determining the Power of a Turbocharged Engine According to the Characteristics of the Turbocharger," *SAE Int. J. Engines* 13(1):2020, https://doi.org/10.4271/03-13-01-0001 (**ISSN: 1946-3936**, **E-ISSN: 1946-3944**, індексація в **SCOPUS Q1 та WoS**)

16. Golovan, A., Gritsuk, I., and Honcharuk, I., "Reliable Ship Emergency Power Source: A Monte Carlo Simulation Approach to Optimize Remaining Capacity Measurement Frequency for Lead-Acid Battery Maintenance," *SAE Int. J. Elect. Veh.* 13(2):2024, doi:10.4271/14-13-02-0009 https://doi.org/10.4271/14-13-02-0009 (**ISSN: 2691-3747**, **E-ISSN: 2691-3755**, індексація в **SCOPUS Q3 та WoS**)

17. Golovan, A., Rudenko, S., Gritsuk, I., Shakhov, A. et al., "Improving the

Process of Vehicle Units Diagnosis by Applying Harmonic Analysis to the Processing of Discrete Signals," *SAE Technical Paper* 2018-01-1774, 2018, doi:10.4271/2018-01-1774 (**ISSN: 0148-7191**, **E-ISSN: 2688-3627**, індексація в **SCOPUS Q2**)

18. Vychuzhanin, V., Rudnichenko, N., Gritsuk, I., Golovan, A. et al., "Cognitive Model of the Internal Combustion Engine," *SAE Technical Paper* 2018-01-1738, 2018, doi:10.4271/2018-01-1738 (**ISSN: 0148-7191**, **E-ISSN: 2688-3627**, індексація в **SCOPUS Q2**)

19. Gritsuk, I.V., Zenkin E.Y., E., Bulgakov, N., Golovan, A. et al., "The Complex Application of Monitoring and Express Diagnosing for Searching Failures on Common Rail System Units," *SAE Technical Paper* 2018-01-1773, 2018, doi:10.4271/2018-01-1773 (**ISSN: 0148-7191**, **E-ISSN: 2688-3627**, індексація в **SCOPUS Q2**)

20. V Vychuzhanin, N Rudnichenko, Z Sagova, M Smieszek, V Cherniavskyi, A Golovan, M Volodarets (2020). Analysis and structuring diagnostic large volume data of technical condition of complex equipment in transport. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 776 012049 doi:10.1088/1757-899X/776/1/012049 (**ISSN: 1757-8981**, **E-ISSN: 1757-899X,** індексація в **SCOPUS Q2**)

21. Golovan, A., Gritsuk, I., Kurtsev, M., Ischuka, O., & Vrublevskyi, R. (2020). Aspects of remote monitoring of the transport vessel under operating conditions. *In Lecture notes in intelligent transportation and infrastructure*. https://doi.org/10.1007/978-3-030-39688-6_37 (**ISSN: 2523-3440**, **E-ISSN: 2523-3459** індексація в **SCOPUS Q3**)

22. Golovan, A., Gritsuk, I., Honcharuk, I. (2023). Principles of transport means maintenance optimization: equipment cost calculation. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, (5), 077 – 084. https://doi.org/10.33271/nvngu/2023-5/077 (**ISSN: 2071-2227**, **E-ISSN: 2223-2362**, індексація в **SCOPUS Q3**)

Монографії, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

23. Сучасні технології і методи моделювання інформаційних процесів в галузі водного транспорту з оглядом на морську безпеку : монографія / А.І. Головань, Є.В. Калініченко, І.П. Гончарук, та ін. – Одеса : НУ «ОМА», 2023. – 244 с. ISBN 978-617-7857-26-5

24. Стратегії і техніки управління ризиками в морській безпеці : монографія / І.П. Гончарук, А.І. Головань, Є.В. Калініченко та ін. – Одеса: НУ «ОМА», 2023. – 208 с. ISBN 978-617-7857-25-8

Наукові праці, які додатково відображають наукові результати дисертації:

25. Очеретяний, Ю.О., Головань, А. і Федорова, Ю. 2020. Оптимізація експлуатації суднових систем комфортного кондиціонування повітря за рахунок використання програмованих логічних контролерів. *Automation of technological and business processes*. 12, 1 (Бер 2020), 55-67. DOI: https://doi.org/10.15673/atbp.v12i1.1704 (фахове видання **категорія «Б» 122, 123, 151**)

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

26. Головань А.І. (2023) Особливості моделювання та побудови

інформаційної системи моніторингу показників ефективності технічного обслуговування вантажних суден, IV Міжнародна науково-практична конференція «ДНІПРОВСЬКІ ЧИТАННЯ-2023», Київ, Україна

27. Головань А.І. (2022) Штучний інтелект як ключовий елемент цифрової трансформації процесу технічного обслуговування водного транспорту, Міжнародна наукова конференція «Інтелектуальні Транспортні Системи: Екологія, Безпека, Якість, Комфорт». – К.: НТУ, 2022, м. Київ

28. Головань А.І. (2019) Застосування спектрального аналізу в процесах діагностики вузлів транспортного засобу, Міжнародна науково-практична конференція «Сучасні енергетичні установки на транспорті, технології та обладнання для їх обслуговування СЕУТТОО-2019», 12 – 13 вересня 2019 року, м. Херсон

29. Golovan, A., Gritsuk, I., Rudenko, S., Saravas, V., Shakhov, A., & Shumylo, O. (2019). Aspects of Forming the Information V2I Model of the Transport Vessel. *In 2019 IEEE International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES)*. https://doi.org/10.1109/mees.2019.8896595 (**ISBN:** 978-1-7281-2569-5, індексація в **SCOPUS Q2 та WoS**)

30. Грицук І.В., Головань А.І., Гончарук І.П. (2024) Метод оптимізації плану технічного обслуговування для підвищення ефективності експлуатації суднових термоелектричних генераторів, Міжнародна науково-практична конференція «Енергетичні установки та альтернативні джерела енергії» (ESAES – 2024), 11-12 березня 2024 року, Харків, Україна

31. Головань А.І., Варгатюк С.О. (2023) Аналіз впливу умов праці на ефективність несення вахти членами екіпажу морських суден, Міжнародна науково-практична конференція «Сучасні енергетичні установки на транспорті, технології та обладнання для їх обслуговування СЕУТТОО-2023», м. Одеса

32. Honcharuk I., Golovan, A. (2023) Peculiarities of development of modern mooring systems: innovations in control systems, International scientific conference “Features of innovative development in the field of technology: the comparative experience of Ukraine and the European Union”, Wloclawek, the Republic of Poland, September 6–7, 2023 https://doi.org/10.30525/978-9934-26-340-8-15

33. Головань А.І., Гончарук І.П. (2022) Формування інтелектуальної системи технічного обслуговування та ремонту засобів водного транспорту, II Міжнародна науково-практична конференція Проблеми сталого розвитку морської галузі (PSDMI-2022), Херсон, Україна

34. Головань А.І., Борисенко С.М. (2022) Постановка задачі вибору оптимального закону управління ефективністю експлуатації морських суден з гвинтами регульованого кроку, II Міжнародна науково-практична конференція Проблеми сталого розвитку морської галузі (PSDMI-2022), Херсон, Україна

35. Головань А.І., Гончарук І.П. (2022) Удосконалення методу розрахунку параметрів і управління технічним станом обладнання засобів транспорту, Міжнародна науково-практична конференція «Сучасні енергетичні установки на транспорті, технології та обладнання для їх обслуговування СЕУТТОО-2022», м. Одеса

36. Руденко С.В., Головань А.І. (2021) Місце і роль штучного інтелекту в процесі експлуатації засобів водного транспорту, Перша міжнародна науково-технічна конференція «Прогресивні технології засобів транспорту», м. Харків.

37. Руденко С.В., Головань А.І., Гончарук І.П. (2021) Комплексне застосування безперервного контролю технічного стану та оперативної діагностики суднового роторного обладнання, Перша міжнародна науково-технічна конференція «Прогресивні технології засобів транспорту», м. Харків.

38. Головань А.І., Гончарук І.П. (2021) Методологічні аспекти контролю та прогнозування технічного стану суднoремонтної транспортної техніки, Міжнародна науково-практична конференція «Сучасні енергетичні установки на транспорті, технології та обладнання для їх обслуговування СЕУТТОО-2021», м. Херсон

39. Головань А.І., Гончарук І.П. (2021) Напрямки підвищення ефективності контролю технічного стану суднопіднімальних гідротехнічних споруд, Дванадцята Міжнародна науково-практична конференція «Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті MINTT-2021» м. Херсон

40. Костенко О.А., Головань А.І. (2020) Застосування інтегрованої системи управління для контролю шкідливих викидів транспортного судна, Міжнародна науково-практична конференція «Сучасні енергетичні установки на транспорті, технології та обладнання для їх обслуговування СЕУТТОО-2020», м. Херсон

41. Zaharchuk, V., Gritsuk, I., Golovan, A. et al. (2018) The Choice of a Rational Type of Fuel for Technological Vehicles, *Proceedings of International Power trains, Fuels and Lubricants (IPF&L) Meeting 2018*, Heidelberg, Germany

42. Костенко О.А., Головань А.І. (2020) Розв’язання задачі пошуку оптимальних моделей контролю системи очищення від оксидів азоту вихлопних газів транспортного судна, Одинадцята Міжнародна науково-практична конференція «Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті MINTT-2020» 27 – 29 травня 2020 року м. Херсон

43. Костенко О.А., Головань А.І. (2020) Рішення задачі пошуку оптимальних режимів роботи системи очищення від оксидів азоту вихлопних газів транспортного судна, ІІ Міжнародна науково-практична морська конференція кафедри СЕУ і ТЕ Одеського Національного Морського Університету 24-28 квітня 2020 року.

ДОДАТОК Б

ТЕРМІНОЛОГІЯ, ЯКА ВИКОРИСТАНА В ДИСЕРТАЦІЙНІЙ РОБОТІ

Цей додаток містить ключові поняття та визначення які є подальшим розвитком теорії управління процесами технічного обслуговування.

Предиктивна теорія – це система методів аналізу даних, що зосереджуються на прогнозуванні майбутньої поведінки об'єктів і суб'єктів з метою ухвалення оптимальних рішень. Предиктивна теорія використовує статистичні методи, методи інтелектуального аналізу даних, теорії ігор, машинне навчання, аналізує поточні та історичні факти для складання прогнозів про майбутні події. У транспорті прогнозні моделі використовують патерни, знайдені в історичних і оперативних даних, щоб ідентифікувати ризики і резерви. Моделі фіксують зв'язки серед багатьох факторів, щоб уможливити оцінку ризиків або потенціалу, пов'язаного з конкретним набором умов, керуючи ухваленням рішень.

Прескриптивна теорія - це система методів аналізу, спрямованих на формування коригувальних заходів і способів усунення виявлених відхилень та надає рекомендації: що потрібно зробити, щоб досягти бажаного (необхідного) результату. Ці методи «організовують» мислення людини і приписують їй, як слід поводитися в процесі прийняття рішень. Нині розроблено велику кількість різноманітних методів і процедур, які покликані допомогти людям розібратися в складній ситуації та у своїх перевагах, правильно сформулювати цілі, обмеження, альтернативи, оцінити їхні наслідки та ухвалити якісне рішення. В основі всіх цих методів лежить певна концепція прийняття рішень людиною. Прескриптивна теорія рішень базується на двох основних концепціях - максимізації корисності та обмеженої раціональності.

Цифрова стратегія технічного обслуговування вантажного судна – комплекс адаптивних правил, процедур та інструментів управління технічним станом судна, спрямований на ефективне використання цифрових технологій та рішень з метою оптимізації технічного обслуговування та забезпечення надійності і безпеки судна.

Система технічного обслуговування вантажних суден – сукупність взаємопов'язаних засобів, документації технічного обслуговування і ремонту та виконавців, необхідних для підтримання та відновлення якості засобів водного транспорту, що входять до цієї системи.

Система комплексного прескриптивного технічного обслуговування вантажних суден – це організована структура, що включає в себе взаємопов'язані засоби, документацію технічного обслуговування і ремонту, а також виконавців, і спрямована на забезпечення ефективного функціонування і підтримку якості вантажних суден за допомогою методів прескриптивної теорії рішень.

Ефективність системи технічного обслуговування вантажних суден - це підтримання засобів водного транспорту у технічно справному стані та належному зовнішньому вигляді, забезпечення надійності, економічності,

безпеки використання та екологічної безпеки за мінімальних витрат ресурсів і часу. Поняття ефективності є фундаментальним поняттям теорії ефективності та спільно з поняттям мети, операції та системи утворює вихідну базу для формування системи основних понять та інших компонентів цієї теорії.

Під *метою* розуміють ідеальне уявлення бажаного (необхідного) результату, досяжного в межах деякого інтервалу часу.

Якщо фактичний результат (стан) не відповідає бажаному, то має місце *проблема* - розбіжність між дійсним і бажаним.

Комплекс умов, у яких існує проблема, узагальнено називають *ситуацією*.

Сукупність проблеми та ситуації утворює *проблемну ситуацію*.

Аналіз діяльності з технічного обслуговування вантажних суден дає змогу виявити проблемну ситуацію, тобто встановити наявність проблеми і визначити ситуацію, в якій виникла або може виникнути проблема. Опис і подальший аналіз проблемної ситуації з широким залученням формальних та евристичних методів є найважливішим етапом процесу дослідження ефективності системи технічного обслуговування засобів водного транспорту. Одне з основних завдань цього етапу - отримання необхідної інформації для формування мети, досягнення якої в даній ситуації може розв'язати проблему, тобто гранично зменшити або зовсім усунути відмінність між бажаним і дійсним.

Мета вважається досягнутою, якщо в підсумку вжитих дій отримано результат, що відповідає цій меті. Отже, щоб перевірити досягнута мета чи ні, її необхідно формалізувати. У теорії ефективності питання формалізації мети має принципове значення і вирішується зазвичай шляхом введення безлічі параметрів цілепокладання Y_{req}, що задають бажаний (необхідний) результат. Перелік і значення (кількісні або якісні) цих параметрів визначаються за результатами аналізу проблемної ситуації. Така форма завдання цілей відповідає вимогам чіткості та конкретності їх формулювань.

Необхідний (бажаний) результат може бути отримано лише шляхом перетворення деяких ресурсів, тобто за рахунок сукупності певних дій, у процесі виконання яких ресурси перетворюються на необхідний результат, що відповідає поставленій меті. Таку сукупність дій прийнято називати операцією. Причому зі змістового погляду ці дії можуть бути найрізноманітнішої природи, головне - вони мають бути цілеспрямованими.

Таким чином, *операція* - це впорядкована сукупність взаємопов'язаних дій, об'єднаних спільним задумом і спрямованих на досягнення цілком певної мети. Саме цю мету називають *метою операції* і у формалізованому вигляді виражають необхідним (бажаним) результатом Y_{req}.

Реальний результат Y операції (фактичний або очікуваний) є той результат, який отримано або може бути отримано під час проведення операції. Унаслідок дії різного роду чинників реальний результат Y операції може відрізнятися від необхідного (бажаного) результату Y_{req}. Про успішність операції судять за ступенем відмінності між реальним її результатом Y і необхідним (бажаним) Y_{req} тобто за ступенем досягнення мети операції.

Очевидно, чим менша відмінність між Y і Y_{req} , тим успішніше проведена операція, або, як кажуть у цьому випадку, тим вона ефективніша.

Ефективність операції технічного обслуговування є ступінь відповідності реального (фактичного або очікуваного) результату операції необхідному (бажаному) або, іншими словами, ступінь досягнення мети операції.

У цьому визначенні підкреслюється, з одного боку, що ефективність – це властивість дії, точніше – цілеспрямованої дії (операції) давати ефект (результат), а з другого - наголошується, що ефективність операції можна оцінювати як після її проведення (за фактичним результатом), так і до початку проведення (за очікуваним результатом, який отримують на основі його моделювання).

Щоб уникнути неточності у розумінні сутності ефективності, необхідно коротко розглянути взаємовідношення понять якості та ефективності. Як відомо, *якість* - це об'єктивна і загальна характеристика об'єктів, яка виявляється в сукупності їхніх властивостей. Поняття якості може бути віднесено до будь-яких об'єктів і в цьому сенсі кожен досліджуваний об'єкт має властивості, сукупність яких обумовлює, зокрема, його придатність для використання за призначенням. Так, наприклад, можна говорити про якість операції, якість результатів операції, якість системи, що реалізує операцію, тощо.

Об'єкти, володіючи тими чи іншими властивостями, можуть проявляти їх із різною інтенсивністю. За наявністю інтенсивності та характером її зміни властивості поділяють на точкові (нульового виміру), лінійні (одновимірні) і векторні (багатовимірні). Точкова властивість не має інтенсивності: об'єкт може або володіти нею, або ні. Міру інтенсивності прояву лінійної або векторної властивості об'єкта називають показником цієї властивості, а множину можливих значень показника - його шкалою.

Залежно від ступеня досконалості шкал розрізняють такі їхні типи: метричні, порядкові (рангові) та класифікаційні (номінальні). Своєю чергою, серед метричних шкал виокремлюють абсолютні шкали, шкали відношень й інтервальні шкали. Показники, що мають метричні шкали, називають кількісними, а ті, що мають порядкові та класифікаційні шкали, - якісними.

Показник якості системи технічного обслуговування є вектор, компонентами якого є показники властивостей системи технічного обслуговування, істотних для використання її за призначенням. Значення показника якості характеризує рівень якості об'єкта, а значення показника властивості – рівень якості об'єкта щодо цієї властивості. Введення показників якості та властивостей об'єкта дає змогу враховувати їх у формалізованому вигляді. Для різних об'єктів зміст понять якості буде різним. Будуть різні, наприклад, склад властивостей і зв'язки між ними, їхня кількість, показники властивостей, шкали показників тощо.

Якість операції як цілеспрямованого процесу може бути визначена лише в рамках системи вищого рівня стосовно розглянутого засобу транспорту. У цьому сенсі ефективність операції вимагає встановлення динамічного взаємозв'язку між властивостями засобу транспорту, що характеризують його якість,

способами й умовами проведення операції та метою операції, що визначається вищою системою. Таким чином, ефективність операції не може бути повністю визначена тільки властивостями засобу транспорту та операції загалом.

Ефективність є визначальною і найзагальнішою комплексною властивістю операції технічного обслуговування, оскільки вона характеризує пристосованість процесу до досягнення мети операції та залежить практично від усіх чинників, що впливають на перебіг і результат операції. Саме ця особливість ефективності як властивості операції, що характеризує успішність її проведення, ставить завдання дослідження ефективності на одне з провідних місць у загальному комплексі досліджень із визначення та обґрунтування раціональних шляхів розв'язання проблем, що виникають перед транспортною галуззю.

Як і будь-яка властивість, ефективність має певну інтенсивність свого прояву. Міру інтенсивності прояву ефективності називають *показником ефективності* W. Отже, згідно з даним вище визначенням ефективності операції показник ефективності W є міра ступеня відповідності реального результату Y операції необхідному Y_{req} або, іншими словами, міра ступеня досягнення мети операції.

З формального погляду, будь-яка операція є обміном, унаслідок якого сторона, що проводить операцію, за набуту для себе користь, тобто за отриманий корисний ефект (цільовий результат) g розплачується деякою кількістю витрачених ресурсів C (матеріальних, енергетичних, інформаційних тощо) і витратами часу T на проведення операції. У принципі час T - це теж витрата ресурсів (часових), і в низці випадків можливий їхній взаємний обмін (за принципом: швидше - дорожче, дешевше - повільніше тощо), проте функціональна значущість часу під час дослідження ефективності операції вимагає роздільного розгляду векторів C і T.

Сторона, що оперує, якщо вона діє свідомо і раціонально, повинна організувати і провести операцію так, щоб зазначений обмін був для неї гранично вигідним. З цього погляду ефективність операції - це не просто здатність давати цільовий результат g, а саме дієвість такої здатності, тобто результативність g, співвіднесена з витратами всіх видів ресурсів C (ресурсоємністю операції) і часу T (оперативністю операції).

Це положення є конкретним вираженням системного підходу до дослідження ефективності операції технічного обслуговування і має принципове значення для розвитку методологічних основ теорії ефективності.

Відповідно до цього положення результат Y операції технічного обслуговування характеризується не тільки корисним ефектом (цільовим результатом) g заради одержання якого власне й проводять операцію, а й витратами ресурсів C і часу T. Отже, показник якості реального результату Y операції технічного обслуговування є у загальному випадку m-вимірний вектор, який містить три відповідні групи компонентів: $m = m_1 + m_2 + m_3$, $Y^{\langle m \rangle} = \langle g^{\langle m_1 \rangle}, C^{\langle m_2 \rangle}, T^{\langle m_3 \rangle} \rangle$.

Оскільки мета первинна, то вектор $Y_{req}^{\langle m \rangle}$ може бути остаточно сформований лише після того, як мету операції сформульовано, формалізовано і представлено вектором параметрів цілепокладання, що задають необхідний результат Y_{req} операції. Зі свого боку, завдання векторів $Y^{\langle m \rangle}$ і $Y_{req}^{\langle m \rangle}$ необхідне для введення показника ефективності W операції, основною вимогою до якого є відповідність показника меті операції. Тому одним із найважливіших питань під час дослідження ефективності, що визначає практичну значущість одержуваних результатів, є коректне формулювання та формалізація мети операції.

Змістовно мету операції можна визначати по-різному, проте в усіх випадках її формулювання має бути таким, щоб для виконавця, якому цю мету ставлять і який несе відповідальність за її досягнення, було зрозуміло, хоча б у принципі, який цільовий результат, за рахунок яких ресурсів і до якого часу необхідно отримати.

Метод технічного обслуговування (ремонту) – сукупність технологічних та організаційних правил виконання операцій технічного обслуговування (ремонту) засобів водного транспорту.

Метод технічного обслуговування спеціалізованою організацією – метод виконання технічного обслуговування організацією, спеціалізованою на операціях технічного обслуговування засобів водного транспорту.

Метод технічного обслуговування спеціалізованим персоналом – метод виконання технічного обслуговування персоналом, спеціалізованим на виконанні операцій технічного обслуговування засобів водного транспорту.

Метод технічного обслуговування експлуатаційним персоналом – метод виконання технічного обслуговування персоналом, який працює на даному засобі водного транспорту, під час використанні його за призначенням. Персонал, який виконує технічне обслуговування, може бути спеціалізованим за видами об’єктів, марками об’єктів, видами операцій і видами технічного обслуговування засобів водного транспорту.

Обсяг технічного обслуговування – характеристика технічного обслуговування засобу водного транспорту, що визначає номенклатуру операцій, тривалість їхнього виконання і необхідні трудові, матеріальні та фінансові витрати.

Операція технічного обслуговування – закінчена частина технічного обслуговування засобу водного транспорту, що являє собою сукупність прийомів, які виконуються на одному робочому місці одним або групою виконавців, установленими для виконуваної операції засобами технічного обслуговування.

План технічного обслуговування (ремонту) документ, що встановлює стратегію, кількісні характеристики видів технічного обслуговування (ремонту), порядок їхнього коригування протягом терміну служби з початку експлуатації до списання засобу водного транспорту.

Ремонт за технічним станом – плановий ремонт, під час якого контроль технічного стану виконують із періодичністю та обсягом, установленими в

нормативно-технічній документації, а обсяг і момент початку ремонту визначають технічний стан засобу водного транспорту.

Система експлуатації – сукупність взаємопов'язаних засобів водного транспорту, засобів їх експлуатації, виконавців і документації, взаємодія яких відбувається відповідно до завдань кожного етапу експлуатації цих засобів водного транспорту.

Засоби технічного обслуговування – засоби експлуатації, призначені для технічного обслуговування засобів водного транспорту.

Засоби ремонту – будівлі, споруди, технічні пристрої, запасні частини та матеріали, призначені для здійснення всіх видів ремонту виробів.

Засоби експлуатації – будівлі, споруди, технічні пристрої, запасні частини та матеріали, призначені для здійснення робіт на засобах водного транспорту на всіх етапах експлуатації.

Стратегія технічного обслуговування (ремонту) – система правил управління технічним станом засобу водного транспорту в процесі технічного обслуговування (ремонту).

Технічне обслуговування – комплекс операцій або операція з підтримання працездатності або справності засобу водного транспорту під час використання за призначенням, очікування, зберігання і транспортування. Технічне обслуговування містить регламентовані в конструкторській документації операції для підтримання працездатності або справності засобу водного транспорту протягом його терміну служби. У технічне обслуговування можуть входити контроль технічного стану, очищення, змащування, кріплення болтових з'єднань, заміна деяких складових частин виробу (наприклад, фільтрувальних елементів), регулювання тощо.

Технічне обслуговування під час використання – технічне обслуговування під час підготовки засобу водного транспорту до використання за призначенням, під час використання за призначенням, а також безпосередньо після його закінчення.

Технічне обслуговування з безперервним контролем – технічне обслуговування, передбачене в нормативно-технічній документації та виконуване за результатами безперервного контролю технічного стану засобу водного транспорту.

Технічне обслуговування з періодичним контролем – технічне обслуговування, під час якого контроль технічного стану виконують за встановленими в нормативно-технічній документації періодичністю та обсягом, а обсяг решти операцій визначають технічним станом засобу водного транспорту в момент початку технічного обслуговування.

Технічний стан – сукупність властивостей засобу водного транспорту, що змінюються під час його технічного використання, технічного обслуговування та ремонту, що характеризується в певний момент часу значеннями показників і (або) якісними ознаками, встановленими в експлуатаційній і ремонтній документації.

Умови експлуатації – сукупність факторів, що впливають на засіб водного транспорту під час його експлуатації. До умов експлуатації належать: кліматичні та гідрометеорологічні умови, кваліфікація обслуговуючого персоналу, забезпеченість матеріалами тощо.

Цикл технічного обслуговування – найменші повторювані інтервали часу або напрацювання засобу водного транспорту, протягом яких виконуються в певній послідовності відповідно до вимог нормативно-технічної документації всі встановлені види періодичного технічного обслуговування. В окремому випадку початком відліку циклу технічного обслуговування може бути початок використання засобу водного транспорту.

Експлуатація – стадія життєвого циклу засобу водного транспорту з моменту прийняття його судноплавною компанією від заводу-виготовлювача або ремонтного підприємства, що є сукупністю етапів введення в експлуатацію, приведення у встановлений ступінь готовності до використання за призначенням, підтримання у встановленому ступені готовності до цього використання, використання за призначенням, зберігання і транспортування.

Якість системи технічного обслуговування вантажних суден – сукупність властивостей системи технічного обслуговування, що зумовлюють її придатність щодо підтримання працездатності або справності вантажних суден.

Показник якості системи технічного обслуговування вантажних суден – кількісна характеристика однієї або декількох властивостей системи технічного обслуговування, що становлять її якість, яку розглядають стосовно певних умов її створення та експлуатації.

Контроль технічного стану – технічний контроль засобу водного транспорту для одержання інформації про фактичні значення параметрів, що характеризують технічний стан засобу водного транспорту, зіставлення його із заздалегідь встановленими вимогами в технічних умовах, експлуатаційній і ремонтній документації та визначення виду технічного стану засобу водного транспорту.

Контроль функціонування – контроль виконання об’єктом частини або всіх властивих йому функцій.

Комплексний показник якості системи технічного обслуговування – показник якості системи технічного обслуговування, що характеризує кілька її властивостей.

Коефіцієнт вагомості показника якості системи технічного обслуговування – кількісна характеристика значущості даного показника якості системи технічного обслуговування серед інших показників її якості.

Прогнозування якості системи технічного обслуговування – визначення ймовірних значень показників якості системи технічного обслуговування, які можуть бути досягнуті до заданого моменту або протягом заданого інтервалу часу.

Безпека – властивість, що характеризується здатністю засобу водного транспорту перешкоджати нанесенню шкоди або обмежувати його величину.

Показники безпеки – показники якості (кількісні характеристики), що характеризують особливості засобу водного транспорту, які зумовлюють під час його використання безпеку обслуговуючого персоналу, а також інших об'єктів.

Одиничний показник безпеки – показник, що належить до однієї і тільки однієї з груп показників, які характеризують безпеку.

Комплексний показник безпеки – показник, що належить до кількох груп показників, які характеризують безпеку.

Таким чином, в аспекті введених понять *середня величина збитку* – це одиничний показник, а *ризик* – комплексний показник безпеки, оскільки він пов'язаний з усіма групами факторів.

Ризик небажаних наслідків (ризик) – це ймовірність настання заздалегідь визначених небажаних наслідків, наприклад аварії з чітко обумовленим збитком. Ризик є найважливішим показником безпеки, оскільки характеризує в імовірнісному аспекті об'єкт з погляду його здатності перешкоджати отриманню збитків. Що вищим є ризик, то небезпечнішою (менш безпечною) буде розглянута система.

Крім того, у зв'язку із завданнями аналізу безпеки доцільно розглянути два показники, які характеризують готовність об'єкта, тобто його здатність виконати необхідні функції з урахуванням витрат часу на технічне обслуговування і ремонт.

Коефіцієнт готовності (стаціонарний), характеризуючи готовність об'єкта до функціонування, визначається як імовірність того, що об'єкт опиниться в працездатному стані в довільний момент часу, причому цей момент не можна обирати на тих інтервалах, де застосування об'єкта за призначенням заздалегідь не передбачають (інтервали планових технічних обслуговувань і ремонтів, запланованого зберігання або транспортування).

Коефіцієнт оперативної готовності – це ймовірність того, що об'єкт опиниться в працездатному стані в довільний момент часу (окрім планованих періодів, упродовж яких застосування об'єкта за призначенням не передбачають) і, починаючи з цього моменту, працюватиме безвідмовно протягом заданого інтервалу часу.

Слід зазначити, що обидва коефіцієнти готовності є загальними для теорій безпеки, ефективності та надійності. Іншими словами, підтримуючи високий рівень готовності вантажного судна до використання за призначенням, справедливо стверджувати, що використання судна є безпечним, ефективним і надійним.

ДОДАТОК В
ФОРМАЛЬНИЙ ОПИС, МОВОЮ ПРОГРАМУВАННЯ SQL, АЛГОРИТМУ СТВОРЕННЯ ІНФОРМАЦІЙНОЇ МОДЕЛІ ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ ПІДСИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ ПОКАЗНИКІВ ЕФЕКТИВНОСТІ СИСТЕМИ ТО І УМОВ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ВАНТАЖНОГО СУДНА

```
CREATE TABLE "public.khronologich_monitor_pokaz_to_vs" (
        "id_zapysu_monitoringu" int NOT NULL,
        "id_pokaznika" int NOT NULL,
        "id_sudna" int NOT NULL,
        "data_monitoringu" DATE NOT NULL,
        "pokazniki_efektyvnosti_to" varchar(255) NOT NULL,
        CONSTRAINT "khronologich_monitor_pokaz_to_vs_pk" PRIMARY KEY ("id_zapysu_monitoringu"))
WITH (OIDS=FALSE);
CREATE TABLE "public.otsinka_optimiz_i_prohnoz_to_vs" (
        "id_otsinki" int NOT NULL,
        "id_sudna" int NOT NULL,
        "parametri_otsinki" varchar(255) NOT NULL,
        "granichni_znachennya_pokaznikiv" varchar(255) NOT NULL,
        "prognoz_znachennya_pokaznikiv" varchar(255) NOT NULL,
        CONSTRAINT "otsinka_optimiz_i_prohnoz_to_vs_pk" PRIMARY KEY ("id_otsinki")) WITH
(OIDS=FALSE);
CREATE TABLE "public.perevirka_pokaznikiv_to" (
        "id_perevirki" int NOT NULL,
        "id_sudna" int NOT NULL,
        "parametri_perevirki" varchar(255) NOT NULL,
        "rezultat_vidpovidnosti" varchar(255) NOT NULL,
        CONSTRAINT "perevirka_pokaznikiv_to_pk" PRIMARY KEY ("id_perevirki")) WITH (OIDS=FALSE);
CREATE TABLE "public.pokazniki_efektyvnosti_sistemi_to_vs" (
        "id_pokaznika" int NOT NULL,
        "id_sudna" int NOT NULL,
        "nazva_pokaznika" varchar(255) NOT NULL,
        "znachennia_pokaznika" varchar(255) NOT NULL,
        CONSTRAINT "pokazniki_efektyvnosti_sistemi_to_vs_pk" PRIMARY KEY ("id_pokaznika")) WITH
(OIDS=FALSE);
CREATE TABLE "public.kharakteristiki_sistemi_to_vs" (
        "id_kharakteristiki" int NOT NULL,
        "id_sudna" int NOT NULL,
        "opis_kharakteristiki" varchar(255) NOT NULL,
        "parametri_sistemi_to" varchar(255) NOT NULL,
        CONSTRAINT "kharakteristiki_sistemi_to_vs_pk" PRIMARY KEY ("id_kharakteristiki")) WITH
(OIDS=FALSE);
CREATE TABLE "public.parametri_sistemi_to_vs" (
        "id_parametru" int NOT NULL,
        "id_sudna" int NOT NULL,
        "nazva_parametru" varchar(255) NOT NULL,
        "znachennia_parametru" varchar(255) NOT NULL,
        CONSTRAINT "parametri_sistemi_to_vs_pk" PRIMARY KEY ("id_parametru")) WITH (OIDS=FALSE);
CREATE TABLE "public.roztashuvannia_stzik" (
        "id_STZiK" int NOT NULL,
        "id_roztashuvannia" int NOT NULL,
        "opis_roztashuvannia" varchar(255) NOT NULL,
        CONSTRAINT "roztashuvannia_stzik_pk" PRIMARY KEY ("id_roztashuvannia")) WITH (OIDS=FALSE);
CREATE TABLE "public.mistse_provadzhennia_robit_to" (
        "id_mistse" int NOT NULL,
```

```
	"id_roboti_to" int NOT NULL,
	"id_STZiK" int NOT NULL,
	"id_roztashuvannia_STZiK" int NOT NULL,
	"opis_mstsya_provadzhennia" varchar(255) NOT NULL,
	CONSTRAINT "mistse_provadzhennia_robit_to_pk" PRIMARY KEY ("id_mistse")) WITH (OIDS=FALSE);
CREATE TABLE "public.STZiK" (
	"id_sudna" int NOT NULL,
	"id_STZiK" int NOT NULL,
	"typ_STZiK" varchar(255) NOT NULL,
	"opis_STZiK" TEXT NOT NULL,
	CONSTRAINT "STZiK_pk" PRIMARY KEY ("id_STZiK")
) WITH (OIDS=FALSE);
CREATE TABLE "public.parametri_tekhnichnogo_stanu_stzik" (
	"id_parametru" int NOT NULL,
	"id_sudna" int NOT NULL,
	"id_STZiK" int NOT NULL,
	"nazva_parametru" varchar(255) NOT NULL,
	"znachennia_parametru" varchar(255) NOT NULL,
	"data_zberezhennia" DATE NOT NULL,
	CONSTRAINT "parametri_tekhnichnogo_stanu_stzik_pk" PRIMARY KEY ("id_parametru")) WITH
(OIDS=FALSE);
CREATE TABLE "public.opis_robot_to" (
	"opis_roboti_to" varchar(255) NOT NULL,
	"typ_roboti" varchar(50) NOT NULL,
	"id_sudna" int NOT NULL,
	"id_STZiK" int NOT NULL,
	"mistsce_provadzhennia_robt" int NOT NULL,
	"id_roboti" int NOT NULL,
	CONSTRAINT "opis_robot_to_pk" PRIMARY KEY ("id_roboti")
) WITH (OIDS=FALSE);
CREATE TABLE "public.rozklad_provedennia_robit_to" (
	"id_zapysu_rozkladu" int NOT NULL,
	"id_roboti" int NOT NULL,
	"data_provedennia" DATE NOT NULL,
	"prioritetnist" int NOT NULL,
	CONSTRAINT "rozklad_provedennia_robit_to_pk" PRIMARY KEY ("id_zapysu_rozkladu")) WITH
(OIDS=FALSE);
CREATE TABLE "public.neobhidni_resursy_dlia_to" (
	"id_resursu" int NOT NULL,
	"id_roboti" int NOT NULL,
	"nazva_resursu" varchar(100) NOT NULL,
	"kilkist_resursu" int NOT NULL,
	CONSTRAINT "neobhidni_resursy_dlia_to_pk" PRIMARY KEY ("id_resursu")) WITH (OIDS=FALSE);
CREATE TABLE "public.status_vykonannia_robit_to" (
	"id_statusu" int NOT NULL,
	"id_roboti" int NOT NULL,
	"status_vykonannia" varchar(50) NOT NULL,
	"data_vykonannia" DATE NOT NULL,
	CONSTRAINT "status_vykonannia_robit_to_pk" PRIMARY KEY ("id_statusu")) WITH (OIDS=FALSE);
CREATE TABLE "public.umovy_ekspluatatsii_sudna" (
	"id_umov_ekspluatatsii" int NOT NULL,
	"id_sudna" int NOT NULL,
	"typ_umov" varchar(255) NOT NULL,
	"opis_umov" TEXT NOT NULL,
	CONSTRAINT "umovy_ekspluatatsii_sudna_pk" PRIMARY KEY ("id_umov_ekspluatatsii")) WITH
(OIDS=FALSE);
CREATE TABLE "public.ships" (
	"id_sudna" int NOT NULL,
	"nazva_sudna" varchar(255) NOT NULL,
	"kharakteristiki_sudna" varchar(255) NOT NULL,
	"kilkist_STZiK" int NOT NULL,
	CONSTRAINT "ships_pk" PRIMARY KEY ("id_sudna")) WITH (OIDS=FALSE);
```

```
ALTER TABLE "khronologich_monitor_pokaz_to_vs" ADD CONSTRAINT
"khronologich_monitor_pokaz_to_vs_fk0" FOREIGN KEY ("id_pokaznika") REFERENCES
"pokazniki_efektyvnosti_sistemi_to_vs"("id_pokaznika");
ALTER TABLE "khronologich_monitor_pokaz_to_vs" ADD CONSTRAINT
"khronologich_monitor_pokaz_to_vs_fk1" FOREIGN KEY ("id_sudna") REFERENCES "ships"("id_sudna");
ALTER TABLE "otsinka_optimiz_i_prohnoz_to_vs" ADD CONSTRAINT "otsinka_optimiz_i_prohnoz_to_vs_fk0"
FOREIGN KEY ("id_sudna") REFERENCES "ships"("id_sudna");
ALTER TABLE "perevirka_pokaznikiv_to" ADD CONSTRAINT "perevirka_pokaznikiv_to_fk0" FOREIGN KEY
("id_sudna") REFERENCES "ships"("id_sudna");
ALTER TABLE "pokazniki_efektyvnosti_sistemi_to_vs" ADD CONSTRAINT
"pokazniki_efektyvnosti_sistemi_to_vs_fk0" FOREIGN KEY ("id_sudna") REFERENCES "ships"("id_sudna");
ALTER TABLE "kharakteristiki_sistemi_to_vs" ADD CONSTRAINT "kharakteristiki_sistemi_to_vs_fk0" FOREIGN
KEY ("id_sudna") REFERENCES "ships"("id_sudna");
ALTER TABLE "parametri_sistemi_to_vs" ADD CONSTRAINT "parametri_sistemi_to_vs_fk0" FOREIGN KEY
("id_sudna") REFERENCES "ships"("id_sudna");
ALTER TABLE "roztashuvannia_stzik" ADD CONSTRAINT "roztashuvannia_stzik_fk0" FOREIGN KEY
("id_STZiK") REFERENCES "STZiK"("id_STZiK");
ALTER TABLE "mistse_provadzhennia_robit_to" ADD CONSTRAINT "mistse_provadzhennia_robit_to_fk0"
FOREIGN KEY ("id_STZiK") REFERENCES "STZiK"("id_STZiK");
ALTER TABLE "mistse_provadzhennia_robit_to" ADD CONSTRAINT "mistse_provadzhennia_robit_to_fk1"
FOREIGN KEY ("id_roztashuvannia_STZiK") REFERENCES "roztashuvannia_stzik"("id_roztashuvannia");
ALTER TABLE "STZiK" ADD CONSTRAINT "STZiK_fk0" FOREIGN KEY ("id_sudna") REFERENCES
"ships"("id_sudna");
ALTER TABLE "parametri_tekhnichnogo_stanu_stzik" ADD CONSTRAINT
"parametri_tekhnichnogo_stanu_stzik_fk0" FOREIGN KEY ("id_sudna") REFERENCES "ships"("id_sudna");
ALTER TABLE "parametri_tekhnichnogo_stanu_stzik" ADD CONSTRAINT
"parametri_tekhnichnogo_stanu_stzik_fk1" FOREIGN KEY ("id_STZiK") REFERENCES "STZiK"("id_STZiK");
ALTER TABLE "opis_robot_to" ADD CONSTRAINT "opis_robot_to_fk0" FOREIGN KEY ("id_sudna")
REFERENCES "ships"("id_sudna");
ALTER TABLE "opis_robot_to" ADD CONSTRAINT "opis_robot_to_fk1" FOREIGN KEY ("id_STZiK")
REFERENCES "STZiK"("id_STZiK");
ALTER TABLE "opis_robot_to" ADD CONSTRAINT "opis_robot_to_fk2" FOREIGN KEY
("mistsce_provadzhennia_robt") REFERENCES "mistse_provadzhennia_robt_to"("id_mistse");
ALTER TABLE "rozklad_provedennia_robit_to" ADD CONSTRAINT "rozklad_provedennia_robit_to_fk0"
FOREIGN KEY ("id_roboti") REFERENCES "opis_robot_to"("id_roboti");
ALTER TABLE "neobhidni_resursy_dlia_to" ADD CONSTRAINT "neobhidni_resursy_dlia_to_fk0" FOREIGN KEY
("id_roboti") REFERENCES "opis_robot_to"("id_roboti");
ALTER TABLE "status_vykonannia_robit_to" ADD CONSTRAINT "status_vykonannia_robit_to_fk0" FOREIGN
KEY ("id_roboti") REFERENCES "opis_robot_to"("id_roboti");
ALTER TABLE "umovy_ekspluatatsii_sudna" ADD CONSTRAINT "umovy_ekspluatatsii_sudna_fk0" FOREIGN
KEY ("id_sudna") REFERENCES "ships"("id_sudna");
```

ДОДАТОК Г

ФОРМАЛЬНИЙ ОПИС, МОВОЮ ПРОГРАМУВАННЯ SQL, АЛГОРИТМУ СТВОРЕННЯ ІНФОРМАЦІЙНОЇ МОДЕЛІ ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ ПІДСИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ СТЗ І К, ПРИСТРОЇВ МОНІТОРИНГУ І УМОВ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ВАНТАЖНОГО СУДНА

```
CREATE TABLE "public.granichni_znachennia" ("id_granichnih_znachen" int NOT NULL, "id_STZiK" int NOT NULL, "id_parametru_tehnichnogo_stanu" int NOT NULL, "granichni_znachennia_parametriv" varchar(255) NOT NULL, CONSTRAINT "granichni_znachennia_pk" PRIMARY KEY ("id_granichnih_znachen")) WITH (OIDS=FALSE);
CREATE TABLE "public.perevirka_vidpovidnosti" ( "id_perevirki" int NOT NULL, "id_STZiK" int NOT NULL, "parametri_perevirki" varchar(255) NOT NULL, "rezultat_vidpovidnosti" varchar(255) NOT NULL, "inspector" TEXT NOT NULL, CONSTRAINT "perevirka_vidpovidnosti_pk" PRIMARY KEY ("id_perevirki")) WITH (OIDS=FALSE);
CREATE TABLE "public.diagnostuvannia" (
	"id_diagnostyki" int NOT NULL,
	"id_STZiK" int NOT NULL,
	"parametri_diagnostyki" varchar(255) NOT NULL,
	"rezultat_diagnostyki" varchar(255) NOT NULL,
	"diagnost" TEXT NOT NULL,
	CONSTRAINT "diagnostuvannia_pk" PRIMARY KEY ("id_diagnostyki")
) WITH (OIDS=FALSE);
CREATE TABLE "public.inspekciyi" (
	"id_inspekciyi" int NOT NULL,
	"inspector" TEXT NOT NULL,
	"data_inspekcii" DATE NOT NULL,
	"rezultati_inspekcii" TEXT NOT NULL,
	"id_STZiK" int NOT NULL,
	CONSTRAINT "inspekciyi_pk" PRIMARY KEY ("id_inspekciyi")
) WITH (OIDS=FALSE);
CREATE TABLE "public.istorii_obslugovuvannia" (
	"id_istorii_obslugovuvannia" int NOT NULL,
	"id_STZiK" int NOT NULL,
	"data_obslugovuvannia" DATE NOT NULL,
	"vykonani_roboty" TEXT NOT NULL,
	"inzhener_vykonav_roboty" varchar(255) NOT NULL,
	CONSTRAINT "istorii_obslugovuvannia_pk" PRIMARY KEY ("id_istorii_obslugovuvannia")
) WITH (OIDS=FALSE);
CREATE TABLE "public.ships" (
	"id_sudna" int NOT NULL,
	"nazva_sudna" varchar(255) NOT NULL,
	"harakteristiki_sudna" varchar(255) NOT NULL,
	"kilkist_STZiK" int NOT NULL,
	CONSTRAINT "ships_pk" PRIMARY KEY ("id_sudna")
) WITH (OIDS=FALSE);
CREATE TABLE "public.vykonavec_roboty" (
	"id_vykonavcia" int NOT NULL,
	"prizvyzhe_vykonavcia" TEXT NOT NULL,
	"imia_vykonavcia" TEXT NOT NULL,
	"posada_vykonavcia" TEXT NOT NULL
) WITH (OIDS=FALSE);
CREATE TABLE "public.optimizaciia_prognozuvannia" (
	"id_optimizacii" int NOT NULL,
	"id_STZiK" int NOT NULL,
	"parametri_optimizacii" varchar(255) NOT NULL,
```

```
	"prognozovanii_znachennia_parametriv" varchar(255) NOT NULL,
	CONSTRAINT "optimizaciia_prognozuvannia_pk" PRIMARY KEY ("id_optimizacii")) WITH
(OIDS=FALSE);
CREATE TABLE "public.STZiK" (
	"id_sudna" int NOT NULL,
	"id_STZiK" int NOT NULL,
	"typ_STZiK" varchar(255) NOT NULL,
	"opis_STZiK" TEXT NOT NULL,
	CONSTRAINT "STZiK_pk" PRIMARY KEY ("id_STZiK")
) WITH (OIDS=FALSE);
CREATE TABLE "public.prystroji_monitoryngu" (
	"id_prystroju" int NOT NULL,
	"id_STZiK" int NOT NULL,
	"typ_prystroju" varchar(255) NOT NULL,
	"opis_prystroju" TEXT NOT NULL,
	CONSTRAINT "prystroji_monitoryngu_pk" PRIMARY KEY ("id_prystroju")
) WITH (OIDS=FALSE);
CREATE TABLE "public.umovy_ekspluatatsii_sudna" (
	"id_umov_ekspluatatsii" int NOT NULL,
	"id_sudna" int NOT NULL,
	"typ_umov" varchar(255) NOT NULL,
	"opis_umov" TEXT NOT NULL,
	CONSTRAINT "umovy_ekspluatatsii_sudna_pk" PRIMARY KEY ("id_umov_ekspluatatsii")
) WITH (OIDS=FALSE);
CREATE TABLE "public.parametri_tehnichnogo_stanu_STZiK" (
	"id_parametru" int NOT NULL,
	"id_STZiK" int NOT NULL,
	"nazva_parametru" TEXT NOT NULL,
	"znachennia_parametru" varchar(255) NOT NULL,
	"data_oholoshennia_parametru" DATE NOT NULL,
	CONSTRAINT "parametri_tehnichnogo_stanu_STZiK_pk" PRIMARY KEY ("id_parametru")) WITH
(OIDS=FALSE);
ALTER TABLE "granichni_znachennia" ADD CONSTRAINT "granichni_znachennia_fk0" FOREIGN KEY
("id_STZiK") REFERENCES "STZiK"("id_STZiK");
ALTER TABLE "granichni_znachennia" ADD CONSTRAINT "granichni_znachennia_fk1" FOREIGN KEY
("id_parametru_tehnichnogo_stanu") REFERENCES "parametri_tehnichnogo_stanu_STZiK"("id_parametru");
ALTER TABLE "perevirka_vidpovidnosti" ADD CONSTRAINT "perevirka_vidpovidnosti_fk0" FOREIGN KEY
("id_STZiK") REFERENCES "STZiK"("id_STZiK");
ALTER TABLE "perevirka_vidpovidnosti" ADD CONSTRAINT "perevirka_vidpovidnosti_fk1" FOREIGN KEY
("inspector") REFERENCES "vykonavec_roboty"("id_vykonavcia");
ALTER TABLE "diagnostuvannia" ADD CONSTRAINT "diagnostuvannia_fk0" FOREIGN KEY ("id_STZiK")
REFERENCES "STZiK"("id_STZiK");
ALTER TABLE "diagnostuvannia" ADD CONSTRAINT "diagnostuvannia_fk1" FOREIGN KEY ("diagnost")
REFERENCES "vykonavec_roboty"("id_vykonavcia");
ALTER TABLE "inspekciyi" ADD CONSTRAINT "inspekciyi_fk0" FOREIGN KEY ("inspector") REFERENCES
"vykonavec_roboty"("id_vykonavcia");
ALTER TABLE "inspekciyi" ADD CONSTRAINT "inspekciyi_fk1" FOREIGN KEY ("id_STZiK") REFERENCES
"STZiK"("id_STZiK");
ALTER TABLE "istorii_obslugovuvannia" ADD CONSTRAINT "istorii_obslugovuvannia_fk0" FOREIGN KEY
("id_STZiK") REFERENCES "STZiK"("id_STZiK");
ALTER TABLE "istorii_obslugovuvannia" ADD CONSTRAINT "istorii_obslugovuvannia_fk1" FOREIGN KEY
("inzhener_vykonav_roboty") REFERENCES "vykonavec_roboty"("id_vykonavcia");
ALTER TABLE "optimizaciia_prognozuvannia" ADD CONSTRAINT "optimizaciia_prognozuvannia_fk0" FOREIGN
KEY ("id_STZiK") REFERENCES "STZiK"("id_STZiK");
ALTER TABLE "STZiK" ADD CONSTRAINT "STZiK_fk0" FOREIGN KEY ("id_sudna") REFERENCES
"ships"("id_sudna");
ALTER TABLE "prystroji_monitoryngu" ADD CONSTRAINT "prystroji_monitoryngu_fk0" FOREIGN KEY
("id_STZiK") REFERENCES "STZiK"("id_STZiK");
ALTER TABLE "umovy_ekspluatatsii_sudna" ADD CONSTRAINT "umovy_ekspluatatsii_sudna_fk0" FOREIGN
KEY ("id_sudna") REFERENCES "ships"("id_sudna");
ALTER TABLE "parametri_tehnichnogo_stanu_STZiK" ADD CONSTRAINT
"parametri_tehnichnogo_stanu_STZiK_fk0" FOREIGN KEY ("id_STZiK") REFERENCES "STZiK"("id_STZiK");
```

ДОДАТОК Ґ

ФОРМАЛЬНИЙ ОПИС АЛГОРИТМУ ПРОГРАМИ НА МОВІ ПРОГРАМУВАННЯ С++, ЯКИЙ ВИКОРИСТОВУЄ МЕТОД МОНТЕ-КАРЛО ДЛЯ ГЕНЕРАЦІЇ ВИПАДКОВИХ ПРИРОЩЕНЬ У ЗАДАНОМУ ДІАПАЗОНІ

Цей код генерує і виводить 100 випадкових прирощень у діапазоні від -10 до 10. У разі необхідності можна змінити діапазон і кількість прирощень відповідно до потреб.

Цей код використовує генератор випадкових чисел зі стандартної бібліотеки C++, який генерує числа з рівномірним розподілом. Якщо потрібно використовувати інший розподіл, можна замінити std::uniform_real_distribution<> на відповідний клас розподілу зі стандартної бібліотеки C++.

```
#include <iostream>
#include <random>

// Функція для генерації випадкового нарощення
double generateIncrement(double min_val, double max_val) {
   // Створюємо генератор випадкових чисел
   std::random_device rd;
   std::mt19937 gen(rd());
   std::uniform_real_distribution<> dis(min_val, max_val);

   // Генеруємо і повертаємо випадкове прирощення
   return dis(gen);
}

int main() {
   // Визначаємо діапазон прирощень
   double min_val = -10.0;
   double max_val = 10.0;

   // Генеруємо і виводимо випадкові прирощення
   for (int i = 0; i < 100; i++) {
      double increment = generateIncrement(min_val, max_val);
      std::cout << "Increment " << i+1 << ": " << increment << std::endl;
   }

   return 0;}
```

ДОДАТОК Д
ІЛЮСТРАЦІЇ ДО ПРОЦЕСУ ОБСЛУГОВУВАННЯ СУДНОВОГО ГОЛОВНОГО РОЗПОДІЛЬЧОГО ЩИТА (ГРЩ)

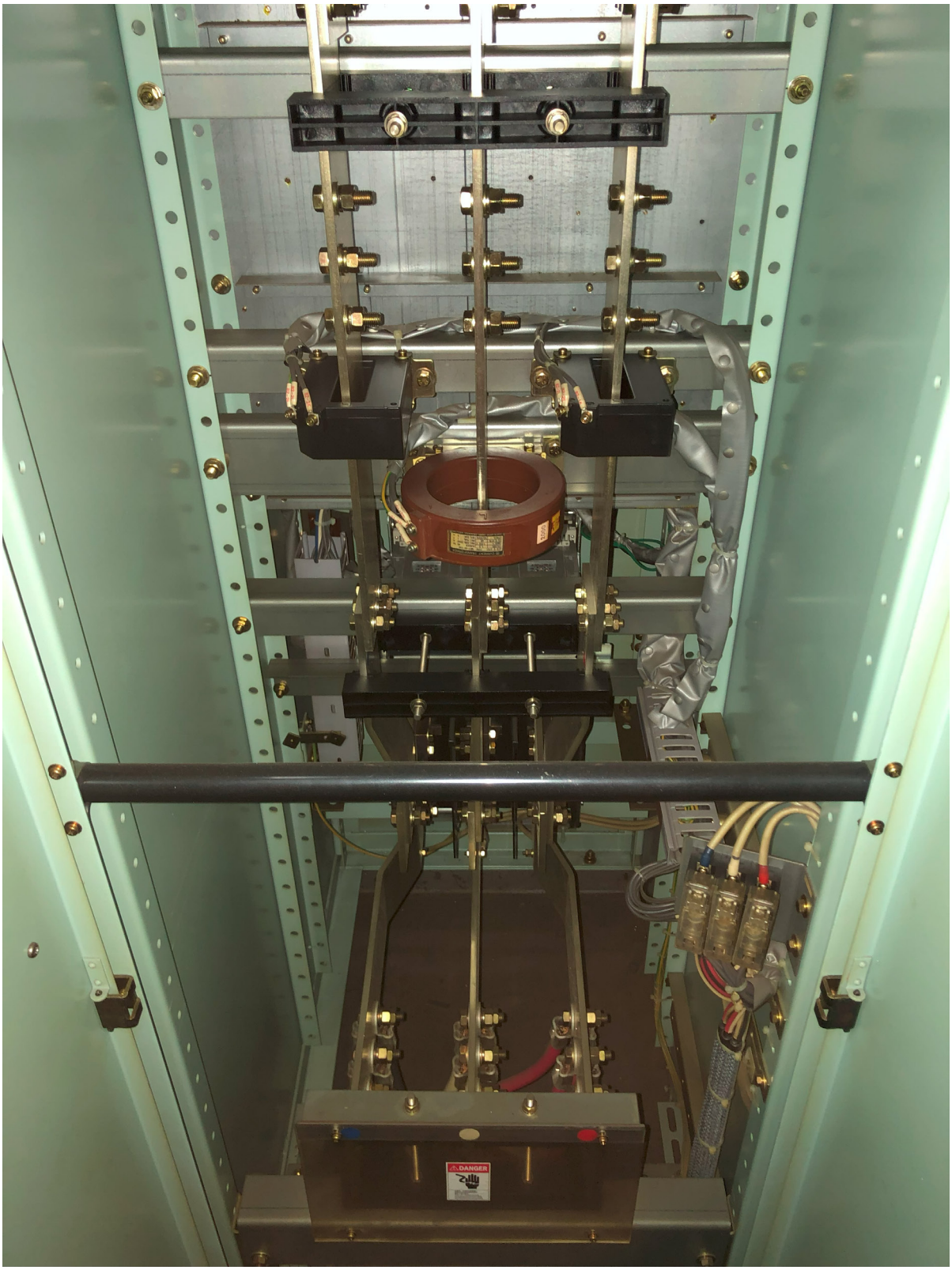


Рисунок Д.1 – Зображення шин ГРЩ

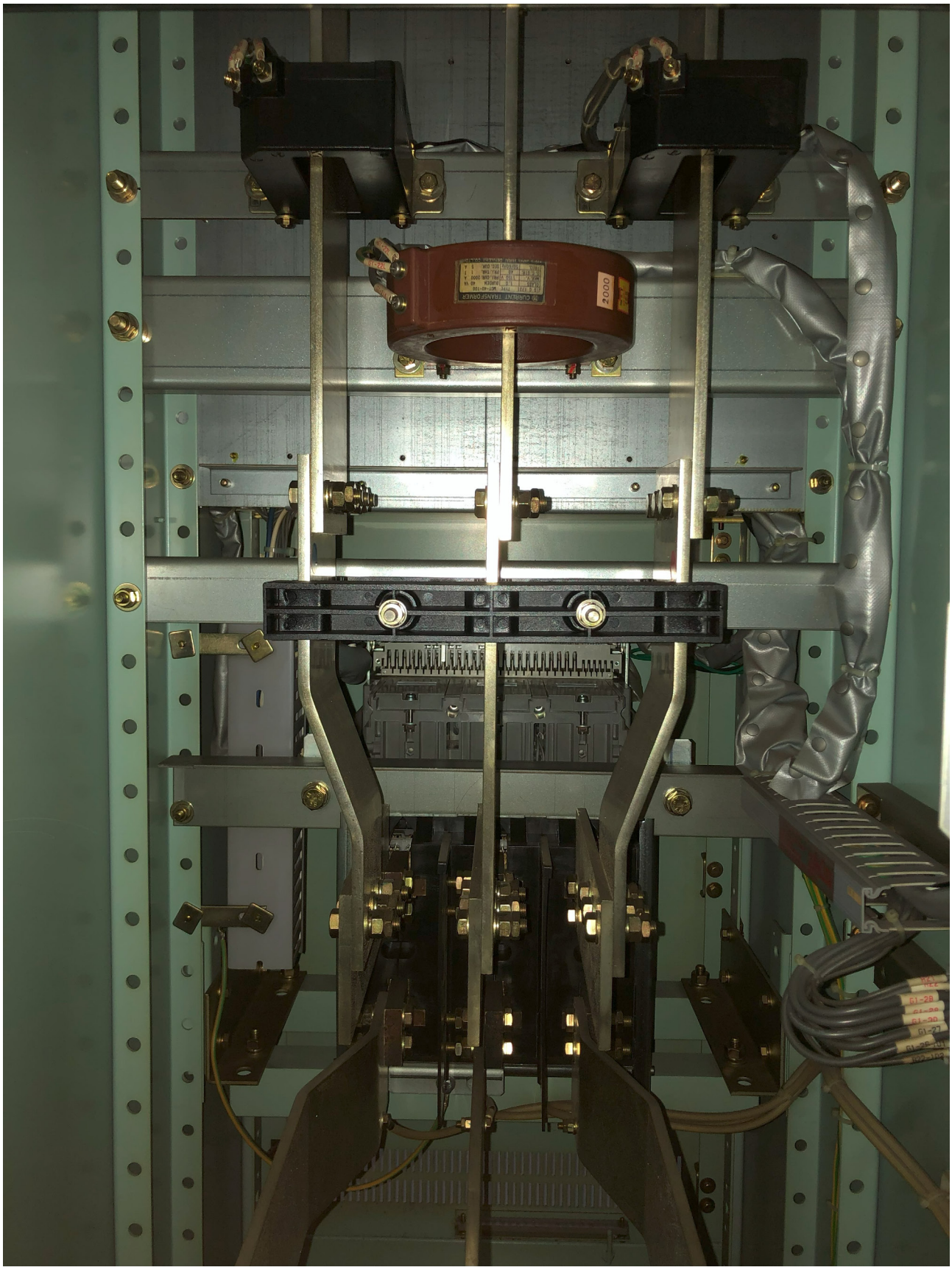


Рисунок Д.2 – Трифазний вимикач (зворотна сторона)

Д.2.1 Дослідження процесів автоматичного оцінювання технічного стану суднових технічних засобів на основі методів машинного навчання для аналізу великих обсягів інформації з бази даних

Для забезпечення процесів підвищення ефективності систем технічного обслуговування вантажних суден на основі цифрової стратегії технічного обслуговування суднових технічних засобів досліджувались операційні процеси в технічному обслуговуванні, а також конфігурація температурного простору властива судновому технічному засобу.

Програма експериментального дослідження включала в себе наступні етапи:

1. Постановка завдання. Визначення об’єкта дослідження (судновий технічний засіб). Формулювання завдання: розробка алгоритмів системи автоматичного оцінювання технічного стану на основі методів машинного навчання.

2. Збір даних. Вибір джерел даних (сенсори, записи у базу даних, інші системи моніторингу). Збір та попередня обробка даних з бази даних.

3. Підготовка даних. Вибір атрибутів (фізичні параметри – температурний стан шини ГРЩ). Обробка та очищення даних. Визначення цільової змінної (показників технічного стану – температури).

4. Вибір моделей. Вибір підходящих моделей машинного навчання (Таблиця Л.6 – класифікація, регресія). Розробка або вибір відповідних алгоритмів.

5. Навчання моделей. Розділення даних на тренувальну та тестову вибірки. Навчання моделей на тренувальних даних.

6. Оцінка моделей. Оцінка ефективності моделей за допомогою відповідних метрик (точність, чутливість, специфічність). Порівняння різних моделей та вибір найкращої.

7. Валідація моделей. Перевірка ефективності на тестовій вибірці. Аналіз результатів та визначення можливостей покращення моделей.

8. Імплементація моделі. Розробка програмного забезпечення для впровадження моделі в реальне середовище.

Методика експериментального дослідження включала в себе наступні етапи:

1. Визначення об’єкта дослідження. Судновий технічний засіб та його параметри – мідна шина ГРЩ, 2х4см.

2. Збір та обробка даних. Збір даних про технічний стан суднових технічних засобів з використанням доступних джерел (сенсорів, бази даних). Обробка та попередня підготовка даних для подальшого використання у моделях машинного навчання.

3. Навчання та оцінка моделей. Вибір моделей машинного навчання. Розділення даних на тренувальну та тестову вибірки. Навчання та оцінка моделей на тренувальних та тестових даних. Вибір оптимальної моделі за критеріями ефективності.

4. Валідація моделей. Валідація найкращої моделі на нових, незалежних даних. Перевірка стійкості та адаптивності моделі до змін у вихідних даних.

5. Імплементація та використання. Розробка програмного забезпечення для впровадження розробленої моделі в реальне середовище. Тестування та використання моделі для автоматичного оцінювання технічного стану суднових технічних засобів.

За описаними програмою та методикою було проведено систематичні досліди та реалізовано процес автоматичного оцінювання технічного стану суднових технічних засобів за допомогою методів машинного навчання та аналізу великих обсягів інформації з бази даних, який впроваджено у програмне забезпечення серверу віртуального підприємства експлуатації вантажних суден shipmonitoring.org із системою ShipDiMRO.

Д.2.2 Дослідження процесів автоматичного оцінювання технічного стану на основі прескриптивного аналізу режимних параметрів суднових технічних засобів

З метою забезпечення процесів підвищення ефективності систем технічного обслуговування вантажних суден на основі цифрової стратегії технічного обслуговування суднових технічних засобів досліджувались процеси автоматичного оцінювання технічного стану суднового дизель-генератора за допомогою прескриптивного аналізу режимних параметрів.

Програма експериментального дослідження включала в себе наступні етапи:

1. Постановка завдання. Визначення об’єкта дослідження (синхронна машина суднового дизель-генератора). Формулювання завдання: розробка системи автоматичного оцінювання технічного стану на основі прескриптивного аналізу режимних параметрів.

2. Збір даних. Встановлення сенсорів та засобів моніторингу для збору режимних параметрів суднового дизель-генератора. Запуск системи збору даних та запису інформації про роботу машини.

3. Підготовка даних. Обробка та фільтрація зібраних даних. Вибір та визначення ключових режимних параметрів для аналізу.

4. Прескриптивний аналіз. Розробка алгоритмів для аналізу режимних параметрів та виявлення відхилень від нормального режиму роботи. Визначення критичних значень параметрів, що вказують на можливі проблеми.

5. Вибір методів машинного навчання. Вибір відповідних методів машинного навчання для побудови моделей оцінювання технічного стану.

6. Навчання моделей. Розробка та навчання моделей на підготовлених даних.

7. Оцінка ефективності моделей. Оцінка точності та надійності розроблених моделей на основі тестових даних. Порівняння різних моделей та вибір найкращої.

8. Валідація моделей. Перевірка ефективності найкращої моделі на нових, незалежних даних. Аналіз результатів та визначення можливостей покращення моделей.

9. Імплементація та використання. Розробка програмного забезпечення для впровадження розробленої моделі в реальне середовище суднового дизель-генератора. Тестування та використання моделі для автоматичного оцінювання технічного стану суднового дизель-генератора.

Методика експериментального дослідження включала в себе наступні етапи:

1. Визначення об’єкта дослідження. Синхронна машина суднового дизель-генератора та її режимні параметри.

2. Збір та обробка даних. Збір даних про роботу суднового дизель-генератора з використанням доступних датчиків та системи моніторингу ACMS. Обробка та попередня підготовка даних для подальшого використання у прескриптивному аналізі.

3. Прескриптивний аналіз. Аналіз режимних параметрів машини для виявлення аномалій та ненормальних відхилень.

4. Вибір та навчання моделей. Вибір підходящих методів машинного навчання для побудови моделей оцінювання технічного стану. Навчання моделей на підготовлених даних.

5. Оцінка ефективності та валідація моделей. Оцінка точності та надійності моделей на тестових даних. Валідація найкращої моделі на нових, незалежних даних.

6. Імплементація та використання. Розробка програмного забезпечення для впровадження розробленої моделі в установку суднового дизель-генератора. Тестування та використання моделі для автоматичного оцінювання технічного стану суднового дизель-генератора.

Описані програма та методика використано для систематичного дослідження та реалізації процесу автоматичного оцінювання технічного стану суднового дизель-генератора на основі прескриптивного аналізу режимних параметрів, який впроваджено у апаратне і програмне забезпечення системи ACMS та програмне забезпечення серверу віртуального підприємства експлуатації вантажних суден shipmonitoring.org із системою ShipDiMRO.

Д.2.3 Дослідження процесів адаптивізації параметрів системи технічного обслуговування за результатами одного процесу зміни технічного стану

З метою забезпечення процесів підвищення ефективності систем технічного обслуговування вантажних суден на основі цифрової стратегії технічного обслуговування суднових технічних засобів досліджувались процеси адаптивізації параметрів обслуговування суднового дизель-генератора та суднового баластного відцентрового насосу на основі аналізу та прогнозування зміни їх технічного стану.

Програма експериментального дослідження включала в себе наступні етапи:

Дослідження №1: Масляні кільця суднового дизель-генератора.

1. Постановка завдання. Визначення об’єкта дослідження (масляні кільця суднового дизель-генератора). Формулювання завдання: розробка процесів адаптивізації параметрів системи технічного обслуговування на основі аналізу процесів зміни технічного стану.

2. Збір даних. Встановлення сенсорів та засобів моніторингу для збору даних про роботу масляних кілець суднового дизель-генератора. Запуск системи збору даних та запису інформації про роботу масляних кілець.

3. Підготовка даних. Обробка та фільтрація зібраних даних. Визначення ключових параметрів для аналізу стану масляних кілець.

4. Аналіз процесів зміни технічного стану. Визначення залежностей між параметрами та станом масляних кілець. Виявлення змін у технічному стані та їх причин.

5. Розробка процесів адаптивізації параметрів системи технічного обслуговування. Визначення стратегій зміни параметрів обслуговування на основі результатів аналізу.

6. Тестування та оцінка ефективності. Тестування розроблених процесів на практиці. Оцінка ефективності нової системи технічного обслуговування.

Дослідження №2: Підшипники і робоче колесо суднового баластного відцентрового насосу.

1. Постановка завдання. Визначення об’єкта дослідження (підшипники і робоче колесо суднового баластного відцентрового насосу). Формулювання завдання: розробка процесів адаптивізації параметрів системи технічного обслуговування на основі аналізу процесів зміни технічного стану.

2. Збір даних. Встановлення сенсорів та засобів моніторингу для збору даних про роботу підшипників і робочого колеса суднового баластного відцентрового насосу. Запуск системи збору даних та запису інформації про роботу підшипників і робочого колеса.

3. Підготовка даних. Обробка та фільтрація зібраних даних. Визначення ключових параметрів для аналізу стану підшипників і робочого колеса.

4. Аналіз процесів зміни технічного стану. Визначення залежностей між параметрами та станом підшипників і робочого колеса. Виявлення змін у технічному стані та їх причин.

5. Розробка процесів адаптивізації параметрів системи технічного обслуговування. Визначення стратегій зміни параметрів обслуговування на основі результатів аналізу.

6. Тестування та оцінка ефективності. Тестування розроблених процесів на практиці. Оцінка ефективності нової системи технічного обслуговування.

Методика експериментального дослідження включала в себе наступні етапи:

1. Визначення об’єктів дослідження. Масляні кільця суднового дизель-генератора. Підшипники і робоче колесо суднового баластного відцентрового насосу.

2. Збір та обробка даних. Збір даних про роботу об’єктів дослідження з використанням сенсорів та систем моніторингу. Обробка та підготовка даних для подальшого аналізу.

3. Аналіз зміни технічного стану. Визначення ключових параметрів для аналізу стану об’єктів дослідження. Вивчення залежностей між параметрами та технічним станом.

4. Розробка та тестування процесів адаптивізації параметрів. Розробка стратегій зміни параметрів обслуговування на основі результатів аналізу. Тестування розроблених процесів на практиці.

5. Оцінка ефективності. Оцінка ефективності нових процесів адаптивного обслуговування. Порівняння регламентного обслуговування з новими стратегіями технічного обслуговування.

Наведені програма та методика забезпечують систематичне дослідження та реалізацію процесів адаптивізації параметрів систем технічного обслуговування згідно з результатами аналізу зміни технічного стану вказаних об’єктів дослідження, які впроваджено у апаратне і програмне забезпечення системи ACMS та програмне забезпечення серверу віртуального підприємства експлуатації вантажних суден shipmonitoring.org із системою ShipDiMRO.

Д.2.4 Дослідження процесів динамічного корегування термінів технічного обслуговування вантажних суден

Для забезпечення процесів підвищення ефективності систем технічного обслуговування вантажних суден на основі цифрової стратегії технічного обслуговування суднових технічних засобів досліджувались процеси динамічного корегування термінів обслуговування циліндрових втулок суднового дизель-генератора з метою підвищення ефективності, надійності та продуктивності вантажних суден.

Програма експериментального дослідження включала в себе наступні етапи:

1. Постановка завдання. Визначення об’єкта дослідження (циліндрові втулки суднового дизель-генератора). Формулювання завдання: розробка процесів динамічного корегування термінів технічного обслуговування на основі аналізу стану циліндрових втулок.

2. Збір даних. Встановлення сенсорів та засобів моніторингу для збору даних про стан циліндрових втулок. Запуск системи збору даних та запису інформації про роботу втулок.

3. Підготовка даних. Обробка та фільтрація зібраних даних. Вибір ключових параметрів для аналізу стану втулок.

4. Аналіз стану циліндрових втулок. Визначення структури даних та взаємозв’язків між параметрами втулок. Виявлення основних чинників, які впливають на технічний стан втулок.

5. Розробка процесів динамічного корегування термінів обслуговування. Розробка алгоритмів, що дозволяють динамічно коригувати терміни обслуговування втулок в залежності від їх стану. Визначення критеріїв, які вказують на необхідність технічного обслуговування.

6. Тестування та оцінка ефективності. Тестування розроблених процесів на практиці. Оцінка ефективності нової системи технічного обслуговування із динамічним корегуванням термінів обслуговування дизель-генераторів.

Методика експериментального дослідження включала в себе наступні етапи:

1. Визначення об’єкта дослідження. Циліндрові втулки суднового дизель-генератора.

2. Збір та обробка даних. Збір даних про стан циліндрових втулок з використанням сенсорів та систем моніторингу. Обробка та підготовка даних для подальшого аналізу.

3. Аналіз стану втулок. Визначення ключових параметрів для аналізу стану втулок. Вивчення залежностей між параметрами та технічним станом втулок.

4. Розробка процесів динамічного корегування термінів обслуговування. Розробка стратегій корегування термінів обслуговування втулок на основі результатів аналізу. Визначення критеріїв, за якими встановлюється необхідність обслуговування.

5. Тестування та оцінка ефективності. Тестування розроблених процесів на практиці. Оцінка ефективності нової системи технічного обслуговування із динамічним корегуванням термінів обслуговування дизель-генератора.

Представлена програма та методика дозволяють проводити наукове дослідження з метою вдосконалення систем технічного обслуговування вантажних суден за рахунок розробки процесів динамічного корегування термінів обслуговування циліндрових втулок суднового дизель-генератора, які впроваджено у програмне забезпечення серверу віртуального підприємства експлуатації вантажних суден shipmonitoring.org із системою ShipDiMRO.

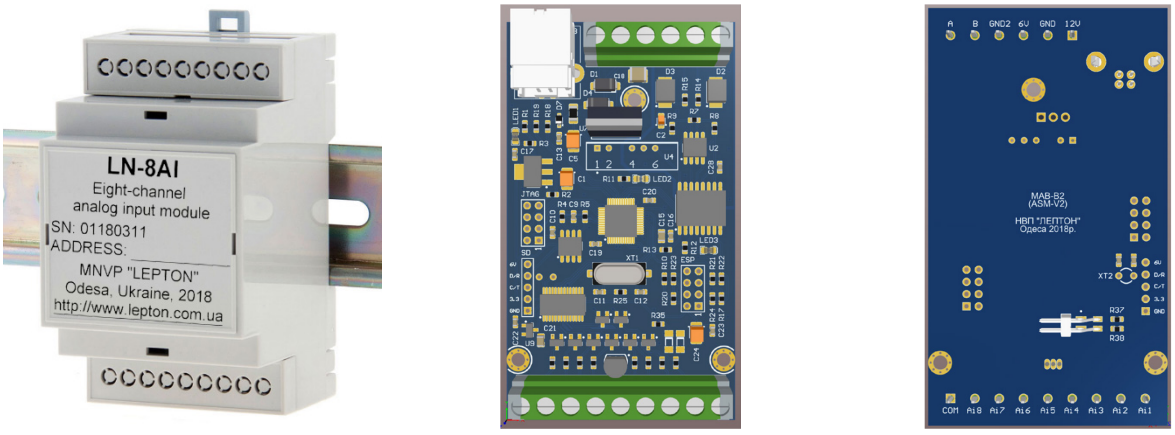
Д.3.1 Експериментальні установки для дослідження процесів автоматичного оцінювання технічного стану суднових технічних засобів на основі методів машинного навчання для аналізу великих обсягів інформації з бази даних

Дослідження процесів автоматичного оцінювання технічного стану суднових технічних засобів на основі методів машинного навчання для аналізу великих обсягів інформації з бази даних був використаний пристрій для моніторингу та діагностики (Рисунок Д.3), який було під’єднано, через термопари, до шин суднового головного розподільчого щита за наведеною схемою (Рисунок Д.4).

Основним призначенням модуля (Рисунок Д.3) є вимірювання різниці потенціалів на входах у "Вимірювач" і виведення результату обчислення в керуючий комп’ютер (контролер) у вигляді цифрового сигналу по лініях зв’язку

RS-485. Форма сигналу на вході в "Вимірювач" може бути синусоїдальною, П-подібною або пилкоподібною.

До 8-ми канального 24-х розрядного вимірювача аналогового сигналу діапазону від 0 до 5 В (Рисунок Д.3) підключено зв'язані між собою частини і системи: Датчики для збору даних про різні параметри технічного стану суднових технічних засобів, такі як температура, тиск, вібрація, тощо. Центральний обчислювальний блок, який відповідає за обробку та аналіз зібраних даних. Система збереження даних, яка забезпечує надійне зберігання історичних та поточних даних для подальшого аналізу та використання.



A B C

Рисунок Д.3 – Пристрій реєстрації аналогових сигналів для моніторингу та діагностики температурного простору суднового ГРЩ
А – фото пристрою на DIN-рейці; В, С – 3D візуалізація плати пристрою спроектованої автором дисертації у середовищі Altium Designer 18

Таблиця Д.1 - Електричні параметри вимірювального пристрою

Напруга живлення	10 ÷ 12 В	Постійного струму
Струм споживання	120 мА	
Діапазон вимірюваної напруги	0 ÷ 5.120 В	
Внутрішній імпеданс вимірювальних каналів	~17 МОм	
Потужність захисту за вимірювальними входами	1 Вт	
Максимальна напруга на вході в "Вимірювач"	15 В	
Фільтрація сигналу	50 Гц, 60 Гц	Задається програмно
Час вимірювання сигналу	0.0025 сек – 1 сек	Задається програмно

Вимірювальна система містить у собі: Датчики температури для вимірювання теплового режиму суднових технічних засобів. Датчики вібрації для виявлення можливих дефектів та аномалій у роботі обладнання. Датчики

тиску для контролю за рівнем тиску в різних системах та пристроях суднових технічних засобів.

Технічні дані. Експлуатаційні властивості пристрою (Рисунок Д.3): "Вимірювач" характеризується такими основними властивостями:

- Робочий температурний діапазон від -40 до 70 °С;
- Захисти від:
  - Зміни полярності джерела живлення;
  - Короткочасного перевищення напруги живлення;
  - Короткого замикання по входу;
  - Перевантаження за струмом навантаження;
  - Перенапруги за виходом;
  - Перегріву вихідних каскадів;
  - Електростатичних розрядів за входом, виходом та інтерфейсом RS-485;
  - Викидів напруги при індуктивному навантаженні;
  - Перегрівання вихідних каскадів інтерфейсу RS-485;
- Має можливість "гарячої заміни", без вимкнення живлення;
- Безперебійність роботи забезпечує внутрішній сторожовий таймер;
- Має ізоляцію інтерфейсу RS-485 з випробувальною напругою 1000 В. Середньоквадратичне значення постійно діючої напруги, прикладеної до ізоляції, не може бути більшим за 300 В;
- Напрацювання на відмову понад 100 000 годин;
- Маса "Обчислювача" становить 95 грам;
- Допустима похибка - 0.05% від верхньої межі діапазону вимірювань;
- Межі допустимої додаткової похибки, викликаної зміною температури на 10 °С - 0.02% від верхньої межі діапазону вимірювань.

Граничні умови експлуатації та зберігання

- Напруга живлення від +9.5 до +13 В;
- Відносна вологість не більше 95%;
- Амплітуда допустимої вібрації в діапазоні 10-55 Гц не більше 0.15 мм;
- Конденсація вологи на "Вимірювачі" не допускається;
- Не допускається експлуатація "Вимірювача" в середовищі газів, що викликають корозію металу;
- Термін служби виробу 10 років;
- Оптимальна температура зберігання +5 … +40°С

Необхідний рівень кваліфікації персоналу

"Вимірювач" спроектований таким чином, що жодні дії персоналу, в межах розумного, не можуть вивести його з ладу. "Вимірювач" не має ланцюгів, що перебувають під небезпечною для життя напругою.

Сигнали від пристроїв моніторингу (Рисунок Д.5) та діагностики температурного простору суднового ГРЩ (Рисунок Д.1 Додатку Д) передавались мережею RS-485 (Рисунок Д.6) через блок накопичення даних (Рисунок Д.7) до суднового локального сервера.

Судновий сервер, в автоматичному режимі, синхронізував локальну базу даних результатів вимірювання із базою даних серверу віртуального

підприємства експлуатації вантажних суден shipmonitoring.org для подальшого використання із системою ShipDiMRO.

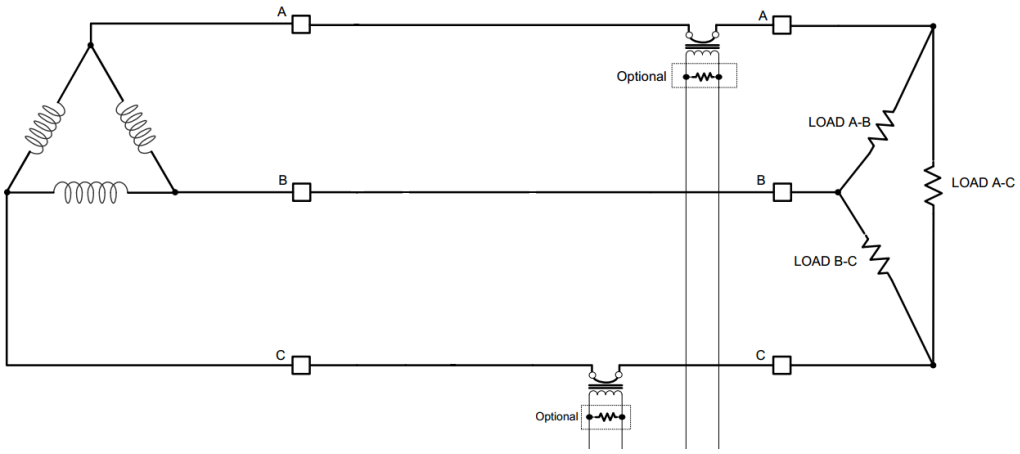


Рисунок Д.4 – Точки підключення термопар від пристрою для моніторингу та діагностики температурного простору суднового ГРЩ
A, B, C – точки вимірювання температури на відповідних шинах

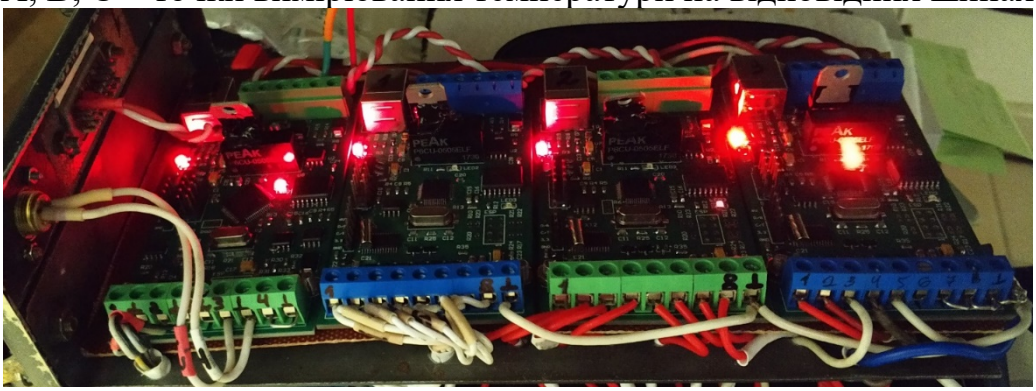


Рисунок Д.5 – Пристрої моніторингу температурного простору суднового ГРЩ

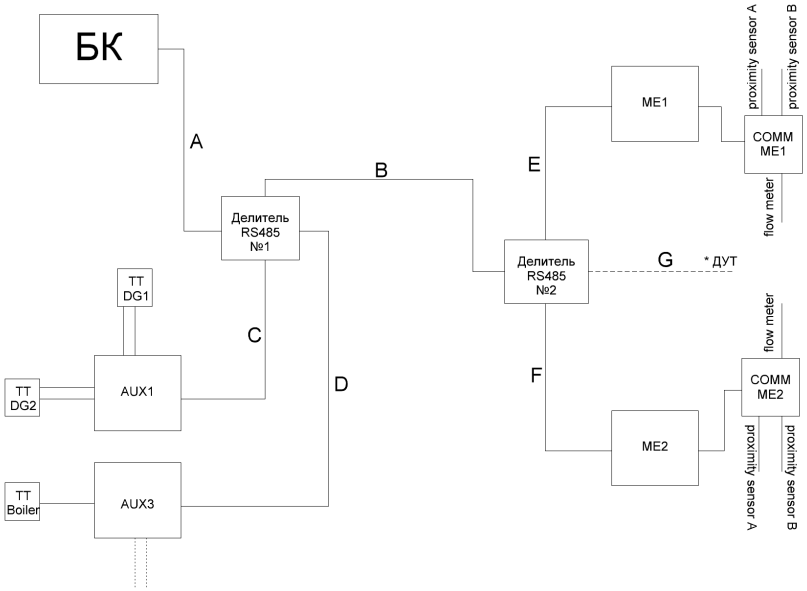


Рисунок Д.6 – Схема сегменту суднової мережі RS-485 для підключення пристроїв моніторингу та діагностики СТЗіК

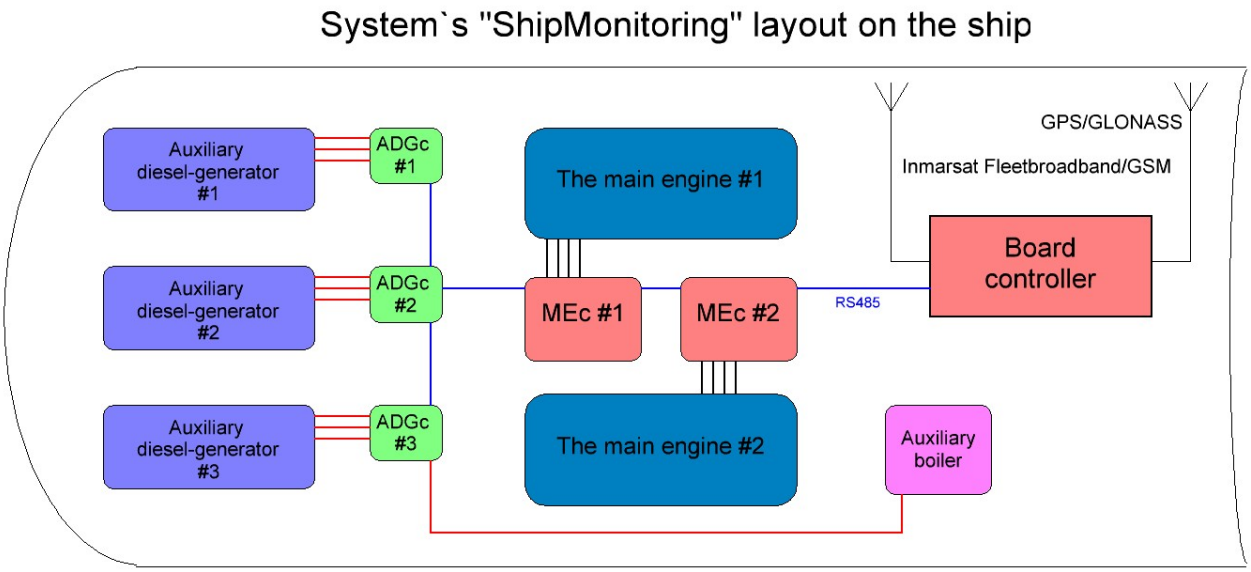


Рисунок Д.7 – Схема підключення блоку накопичення даних системи ACMS

Для вищезазначеного дослідження було використано наступну конфігурацію сервера:

Процесор: Intel Xeon. Для обробки великих обсягів даних і виконання складних обчислень може бути використаний потужний 12 ядерний процесор.

Пам’ять (RAM): 32 ГБ. Рекомендується велика обсяг оперативної пам’яті для швидкої обробки даних та запуску різних алгоритмів машинного навчання. Мінімум 32 ГБ, але може збільшуватися в залежності від розміру даних та вимог аналітичних завдань.

Сховище даних (SSD): 1 ТВ. Для зберігання великих обсягів інформації з бази даних рекомендується використовувати швидкий SSD накопичувач або RAID-масив із великим обсягом пам’яті для швидкого доступу та надійності.

Мережеві інтерфейси: 10 Гбіт/с. Сервер повинен мати вбудовані мережеві інтерфейси для підключення до локальної мережі або Інтернету для обміну даними та доступу до зовнішніх ресурсів.

Операційна система: Ubuntu Server 22.04. Рекомендується використання операційної системи з підтримкою великих обсягів даних та роботи з машинним навчанням, таких як Linux-дистрибутиви.

Забезпечення безпеки: Сервер захищений від несанкціонованого доступу та зберігає дані у безпечному режимі. Застосування брандмауеру, антивірусного програмного забезпечення та регулярне оновлення системних виправлень забезпечує безпеку даних.

Вимоги до бази даних для даного наукового дослідження:

База даних повинна бути здатна зберігати великі обсяги інформації про характеристики суднових технічних засобів, зокрема дані про температуру шини суднового головного розподільчого щита (ГРЩ) протягом тривалого періоду експлуатації.

Необхідно мати швидкий доступ до даних для виконання аналізу та машинного навчання. База даних повинна бути оптимізована для швидкого пошуку, сортування та фільтрації даних.

База даних повинна бути масштабованою, тобто здатною працювати з ростом обсягів даних без втрати продуктивності. Це особливо важливо для великих обсягів інформації.

База даних повинна бути надійною та забезпечувати доступність даних у будь-який час. Вона повинна мати механізми резервного копіювання, а також бути захищеною від втрати даних в разі відмови апаратного забезпечення чи програмного збою.

База даних повинна підтримувати складні запити для виконання аналітичних операцій та машинного навчання. Це включає в себе можливість виконання агрегатних функцій, групування даних, а також використання різноманітних алгоритмів аналізу.

База даних повинна підтримувати роботу з векторами даних, які використовуються у машинному навчанні для побудови моделей та прогнозування.

База даних повинна забезпечувати захист конфіденційності та цілісності даних. Це може включати в себе різні методи шифрування, автентифікації та авторизації користувачів, а також механізми аудиту доступу до даних.

База даних повинна бути сумісною з іншими системами, що використовуються в рамках дослідження, наприклад, з системами машинного навчання, системами моніторингу та діагностики, тощо.

За означеними критеріями було обрано базу даних PostgreSQL.

Д.3.2 Експериментальні установки для дослідження процесів автоматичного оцінювання технічного стану на основі прескриптивного аналізу режимних параметрів суднових технічних засобів

Дослідження процесів автоматичного оцінювання технічного стану на основі прескриптивного аналізу режимних параметрів суднових технічних засобів були використані пристрої для збору, моніторингу та аналізу даних про роботу технічних засобів на судні. Вони складаються зі зв’язаних між собою частин і систем: сенсорів для вимірювання різних параметрів технічного стану суднових обладнань, аналітичного програмного забезпечення для обробки та аналізу накопичених даних, а також інтегрованих систем збору даних та алгоритмів прескриптивного аналізу для визначення оптимальних стратегій технічного обслуговування. Вимірювальна система містить у собі сенсори для вимірювання різних параметрів роботи суднових технічних засобів, таких як напруга, струм, частота, оберти, вібрація та інші фізичні величини, які необхідні для виявлення аномалій та попередження можливих поломок.

Експериментальна установка для проведення наукового дослідження над синхронною машиною (генератором) суднового дизель-генератора, заснована на вимірюванні та подальшому аналізі комплексного (векторного) сигналу напруги, струму та частоти, складалась з наступних частин:

Дизель-генератор. Основною складовою експериментальної установки є судновий дизель-генератор (Рисунок Д.8, Рисунок Е.1 Додатку Е), який забезпечує електричну потужність для виконання випробувань. Аналогічний генератор, в лабораторних умовах, був підключений до елементів активного навантаження для імітації реальних умов експлуатації (Рисунок Д.9). Дві секції навантаження з'єднуються між собою електрично і механічно і мають 11 відводів для підключення до панелі управління. Величина омічного опору між відповідним відведенням і нейтраллю забезпечує такі величини активної потужності: 3 кВт, 5 кВт, 10 кВт, 15 кВт, 20 кВт, 25 кВт, 30 кВт, 36 кВт, 38,5 кВт, 40,5 кВт, 48 кВт.

Вимірювальні модулі. Для вимірювання напруги та струму використовуються вимірювальні модулі. Модуль LN-8AI (Рисунок Д.3) використовується для вимірювання напруги та струму, а модуль LN-2FC - для вимірювання частоти (Рисунок Д.10). Ці модулі були підключені до дизель-генератора для збору даних про режимні параметри його роботи. Точки підключення зображені на Рисунку Е.3 Додатку Е.

Таблиця Д.2. - Електричні параметри

Діапазон вимірюваних частот	1-100 кГц	Задається програмно. Кратною 1 Гц
Амплітуда вимірюваного сигналу (стандартна)	±20 мВ - ±2.0 В	
Потужність захисту за вимірювальними входами	1 Вт	
Максимальна напруга на вході в "Обчислювач"	15 В	
Максимальний струм навантаження нормованих виходів 0-5В	0.5 мА	Опція
Час обчислення частоти	Не менше двох періодів сигналу нижньої межі вимірювання 1с, 0.1с, 0.01с	Задається програмно

Основним призначенням модуля є обчислення частоти гармонійного сигналу на вході в "Обчислювач" і виведення результату обчислення в комп'ютер, що керує (контролер), у вигляді цифрового або аналогового сигналу.

Форма сигналу на вході в "Обчислювач" може бути синусоїдальною, П-подібною або пилкоподібною.

Датчики та датчикові системи. Для забезпечення точності та надійності вимірювань встановлюються датчики напруги, струму та частоти. Вони підключаються до вимірювальних модулів для передачі даних.

Комп'ютерна система та програмне забезпечення. Для збору, аналізу та обробки отриманих даних використовується комп'ютерна система з відповідним

програмним забезпеченням. Це може бути спеціалізоване програмне забезпечення для збору даних та аналізу параметрів суднових технічних засобів.



Рисунок Д.8 – Судновий допоміжний двигун (дизель-генератор)

Електричні навантаження. Для імітації реальних умов експлуатації дизель-генератора можуть бути підключені електричні навантаження (Рисунок Д.9). Ці навантаження дозволяють здійснювати різні режими роботи генератора та досліджувати його технічний стан при різних умовах.

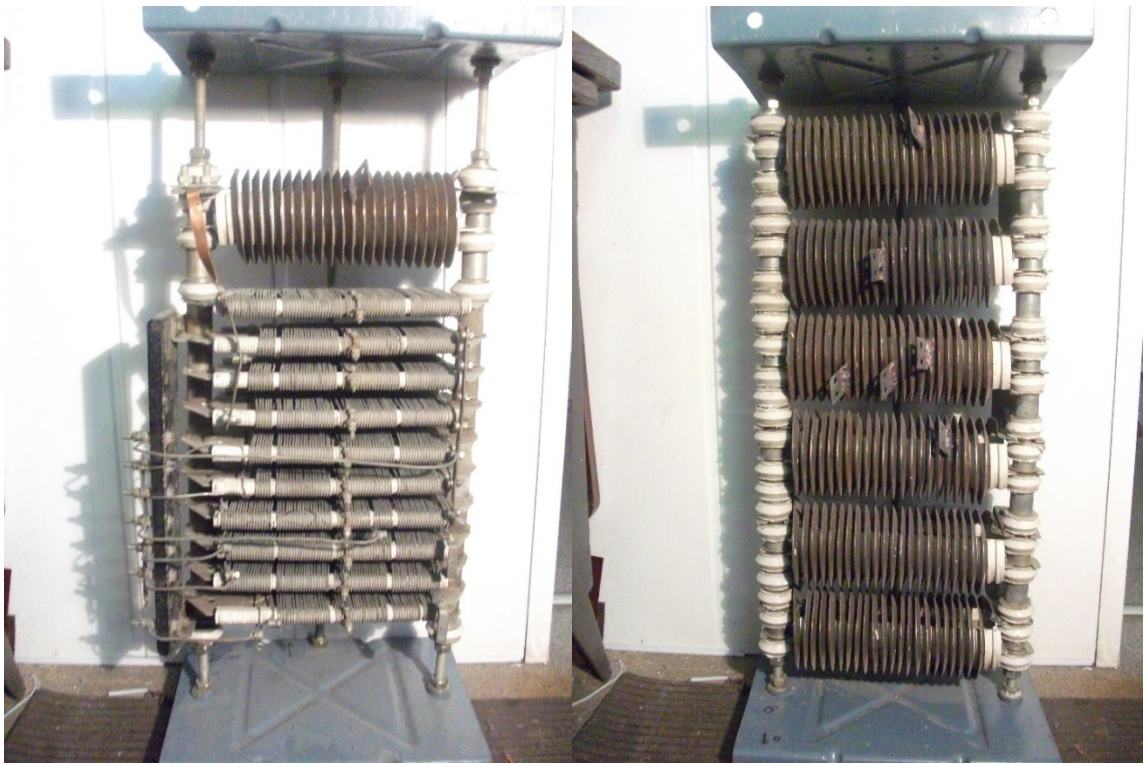
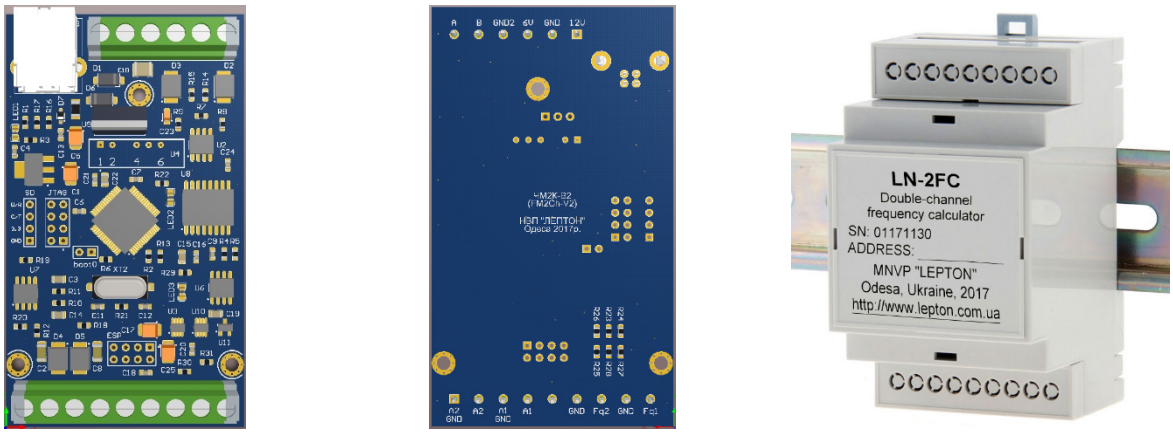


Рисунок Д.9 – Елементи активного навантаження



A B C

Рисунок Д.10 – Обчислювач частоти сигналу LN-2FC
A, B – 3D візуалізація плати пристрою спроектованої автором дисертації у середовищі Altium Designer 18, C – фото пристрою на DIN-рейці.

Технічні дані. Експлуатаційні властивості "Обчислювача" (Рисунок Д.10). "Обчислювач" характеризується такими основними властивостями: Робочий температурний діапазон від -40 до 70°C; Захисти від: Зміни полярності джерела живлення; Короткочасного перевищення напруги живлення; Короткого замикання по входу; Перевантаження за струмом навантаження; Перенапруги за виходом; Перегріву вихідних каскадів; Електростатичних розрядів за входом, виходом та інтерфейсом RS-485; Викидів напруги при індуктивному навантаженні; Перегрівання вихідних каскадів інтерфейсу RS-485; Має можливість "гарячої заміни", без вимкнення живлення; Безперебійність роботи забезпечує внутрішній сторожовий таймер; Має ізоляцію інтерфейсу RS-485 з випробувальною напругою 2500 В. Середньоквадратичне значення постійно діючої напруги, прикладеної до ізоляції, не може бути більшим за 300 В. Нормовані виходи 0-5В мають гальванічну ізоляцію від частини "Обчислювача", сполученого з інтерфейсом RS-485; Працює від джерела живлення з напругою 12 В ± 1 В; Напрацювання на відмову понад 100 000 годин; Маса "Обчислювача" становить 95 грам. Діапазон вимірювань 1-100кГц; Допустима похибка - 0.25% від вимірюваної величини Граничні умови експлуатації та зберігання: Напруга живлення від +11 до +13 В; Відносна вологість не більше 95%; Амплітуда допустимої вібрації в діапазоні 10-55 Гц не більше 0,15 мм; Конденсація вологи на "Обчислювачі" не допускається; Не допускається експлуатація "Обчислювача" в середовищі газів, що викликають корозію металу; "Обчислювач" розрахований на безперервну роботу протягом 10 років; Термін служби виробу 20 років; Оптимальна температура зберігання +5 … +40°C

Необхідний рівень кваліфікації персоналу.

"Обчислювач" спроектовано таким чином, що жодні дії персоналу, у межах розумного, не можуть вивести його з ладу. "Обчислювач" не має ланцюгів, що перебувають під небезпечною для життя напругою.

Така установка дозволила здійснити експериментальні дослідження та аналізувати режимні параметри суднових технічних засобів для подальшого вдосконалення систем технічного обслуговування.

Д.3.3 Експериментальні установки для дослідження процесів адаптивізації параметрів системи технічного обслуговування за результатами процесів зміни технічного стану

Дослідження процесів адаптивізації параметрів системи технічного обслуговування за результатами процесів зміни технічного стану були використані пристрої для збору, аналізу та інтерпретації даних про роботу обслуговуваного обладнання. Вони складаються зі зв'язаних між собою частин і систем: сенсорів для моніторингу параметрів технічного стану, аналітичного програмного забезпечення для обробки та аналізу даних, а також інтегрованих систем збору даних та алгоритмів адаптивного управління. Вимірювальна система містить у собі сенсори для вимірювання різних параметрів роботи обладнання, таких як температура, тиск, оберти, вібрація та інші фізичні величини, які дозволяють визначати стан технічного обладнання та вживати відповідних заходів для підтримки його ефективності.

Експериментальна установка для проведення наукового дослідження над двигуном суднового дизель-генератора, заснованого на вимірюванні і подальшому аналізі швидкостей зношування кілець, циліндрової втулки, зміни тиску та витрати палива і масла та складається із:

Дизель-генератор (ілюстрації у Додатку Е). Основною складовою експериментальної установки є судновий дизель-генератор, який служить об'єктом дослідження;

Датчики та вимірювальне обладнання. Для вимірювання швидкостей зношування кілець, циліндрової втулки, зміни тиску та витрати палива і масла проводяться відповідні інструментальні вимірювання. Додатково встановлено вимірювачі (Рисунок Д.3, Рисунок Д.10), датчики тиску, температури, витрати палива і масла, а також вимірювачі вібрації підключені за схемою на Рисунку 6.5

Дані та система збору. Отримані від датчиків дані про тиск, температури, витрати палива і масла, а також вимірювачі вібрації та вимірювання швидкості зношування і параметри роботи двигуна збираються системою збору даних ACMS, комп'ютерна система з відповідним програмним забезпеченням для збору, збереження і обробки отриманих даних;

Аналізатори та інструменти аналізу. Для подальшого аналізу даних використовуються спеціалізовані аналізатори та інструменти аналізу ShipDiMRO. Такі, як програмні засоби для статистичного аналізу, машинного навчання та моделювання, які дозволяють встановити взаємозв'язки між параметрами двигуна і швидкістю зношування його складових;

Контрольна система. Для забезпечення надійності та безпеки експерименту встановлена контрольна система, яка виконує функції моніторингу роботи установки та автоматично виконує заходи сигналізації в разі виявлення аномалій або перевищення допустимих значень параметрів.

Описана установка дозволяє проводити експерименти для адаптивізації параметрів системи технічного обслуговування на основі результатів процесів зміни технічного стану суднового дизель-генератора.

Д.3.4 Експериментальні установки для дослідження процесів динамічного корегування термінів технічного обслуговування вантажних суден

Дослідження процесів динамічного корегування термінів технічного обслуговування вантажних суден були використані пристрої для збору та аналізу даних щодо стану обладнання та його параметрів експлуатації. Вони складаються зі зв'язаних між собою частин і систем: сенсорів для моніторингу різних параметрів суднового обладнання (таких як тиск, температура, вібрація, струм, напруга тощо), аналітичного програмного забезпечення для обробки та аналізу накопичених даних, а також інтегрованих систем збору даних та алгоритмів динамічного адаптивного управління. Вимірювальна система містить у собі датчики та прилади для вимірювання різних параметрів роботи суднового обладнання, що дозволяє здійснювати постійний моніторинг та адаптивне управління процесами технічного обслуговування.

Експериментальна установка для проведення наукового дослідження над баластним насосом, заснованого на вимірюванні і подальшому аналізі швидкостей зношування підшипників і робочого колеса під час інспекцій, включає:

Баластний насос (ілюстрації у Додатку Є). Основною складовою експериментальної установки є сам баластний насос, який є об'єктом дослідження;

Датчики та вимірювальне обладнання. Для вимірювання швидкостей зношування підшипників і робочого колеса застосовуються інструментальні вимірювання та додатково встановлюються датчики тиску перед та після насосу та вимірювальне обладнання (Рисунок Д.3, Рисунок Д.10). Додатково контролювалась вібрація і температура корпусу насоса;

Дані та система збору. Отримані від датчиків дані про зношування та параметри роботи баластного насоса збираються системою збору даних. Комп'ютерна система з відповідним програмним забезпеченням для збору, збереження і обробки отриманих даних під'єднана за схемою Рисунок Д.7;

Аналізатори та інструменти аналізу. Для подальшого аналізу даних використовуються спеціалізовані аналізатори та інструменти аналізу ShipDiMRO. Такі як програмні засоби для статистичного аналізу, машинного навчання та моделювання, які дозволяють встановити взаємозв'язки між параметрами насоса та швидкістю зношування його складових;

Контрольна система. Для забезпечення надійності та безпеки експерименту була застосована контрольна система, яка виконує моніторинг роботи установки та автоматично виконує сигналізуючи дії в разі виявлення аномалій або перевищення допустимих значень параметрів.

Представлена установка дозволила провести експерименти для дослідження процесів динамічного корегування термінів технічного обслуговування вантажних суден на основі результатів процесів зміни технічного стану баластного насоса.

Д.3.5 Похибки вимірювань при випробуваннях

Під час прямих і непрямих одноразових вимірювань встановлено відповідність похибок вимірювань відповідно до похибок застосованих приладів. Інформація про характеристики обладнання та використану апаратуру, а також похибки приладів і вимірювального обладнання, використаного у дослідженнях, наведена у Таблицях 6.1 та 6.2 відповідно. Основні технічні параметри та характеристики аналого-цифрових перетворювачів визначалися згідно можливостей вимірювачів. Перелічена інформація свідчить про те, що застосовані прилади та вимірювальне обладнання відповідають встановленим вимогам щодо вимірювальної апаратури. У процесі проведення експериментальних досліджень виконувалися прямі та непрямі багаторазові вимірювання. При прямих вимірюваннях похибки визначалися шляхом визначення середнього арифметичного та середньоквадратичної абсолютної похибки за n вимірювань.

Середнє арифметичне (AM) похибки:

$$AM = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}|x_i - x_{av}|,$$

де x_i – значення похибки для кожного окремого вимірювання, x_{av} – середнє значення похибок за всіма вимірюваннями, а n – кількість вимірювань.

Середньоквадратична абсолютна (RMS) похибка:

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(x_i - x_{av})^2},$$

де x_i – значення похибки для кожного окремого вимірювання, x_{av} – середнє значення похибок за всіма вимірюваннями, а n – кількість вимірювань.

Шляхом аналізу середньоквадратичної абсолютної похибки встановлювалась верхня межа абсолютної похибки, перевищення якої вважалося малоймовірним. Перевагою використання цієї міри були її найбільш ймовірні абсолютні та відносні похибки. При одноразових вимірюваннях застосовувалась гранична абсолютна похибка, що визначалась як найменша поділка приладу. У випадках, коли параметр вимірювався за декількома замірями величинами, він розглядався як функція кількох аргументів. Гранична абсолютна похибка встановлювалась на підставі такої залежності:

$$MAE = \max(|\Delta x_1|, |\Delta x_2|, |\Delta x_3| \dots, |\Delta x_n|),$$

де Δx_i – абсолютна похибка вимірювання параметра за *i*-м заміром, *n* - кількість вимірювань.

Для оцінювання адекватності і точності отриманих моделей моніторингу, а також ступеня оптимальності структури моделі у підсистемах використовували залежності наведені у Розділі 5.9.

ДОДАТОК Е
ІЛЮСТРАЦІЇ ДО ПРОЦЕСУ ОБСЛУГОВУВАННЯ СУДНОВОГО ДОПОМІЖНОГО ДВИГУНА (ДИЗЕЛЬ-ГЕНЕРАТОРА)



Рисунок Е.1 – Генератор змінного струму



Рисунок Е.2 – Ротор генератора



Рисунок Е.3 – Силові кабелі, шини генератора змінного струму



Рисунок Е.4 – Поршні дизель-генератора без кілець



Рисунок Е.5 – Поршні дизель-генератора з новими кільцями



Рисунок Е.6 – Поршень дизель-генератора з новими кільцями встановлено у циліндр

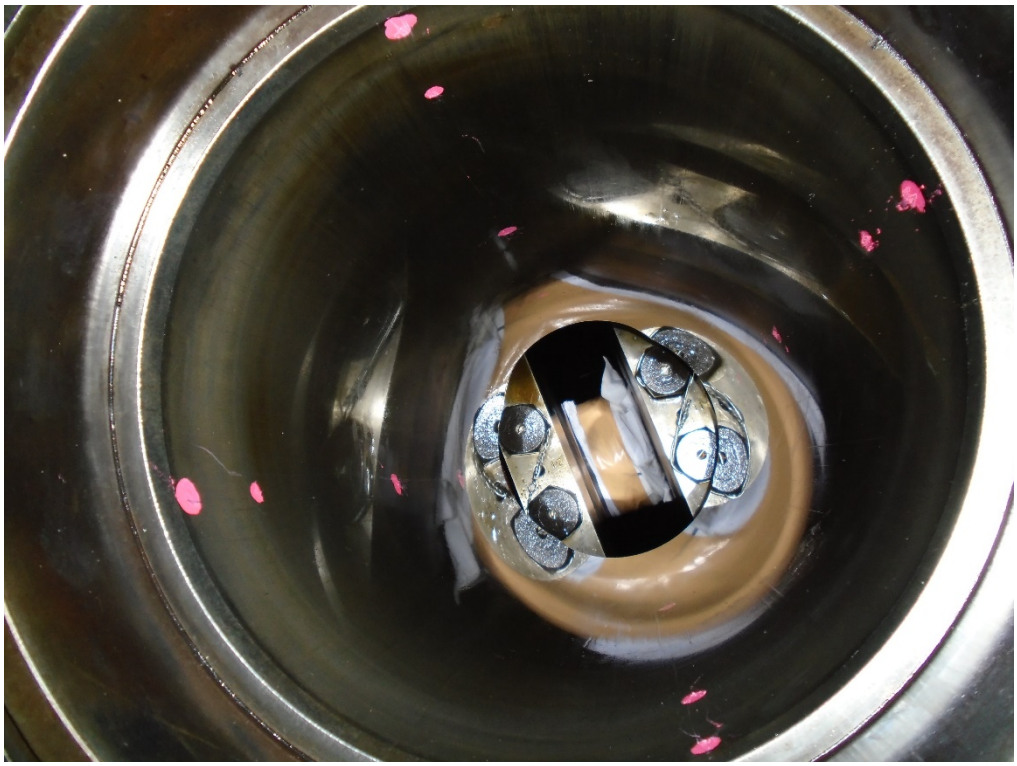


Рисунок Е.7 – Циліндрова втулка дизель-генератора

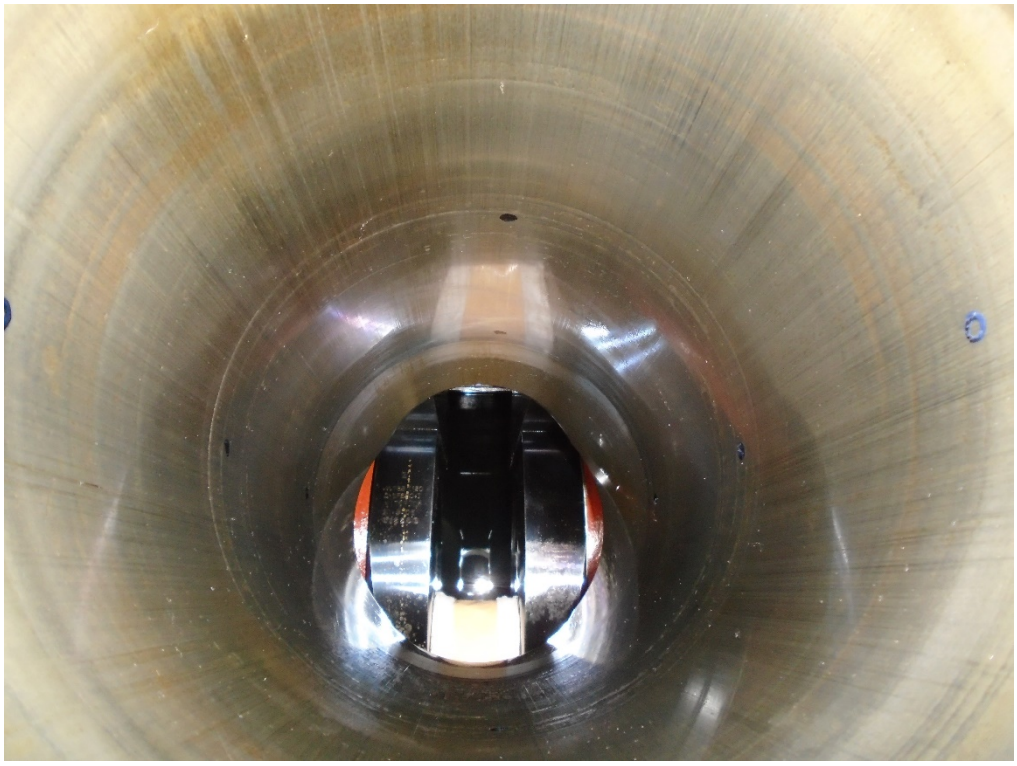
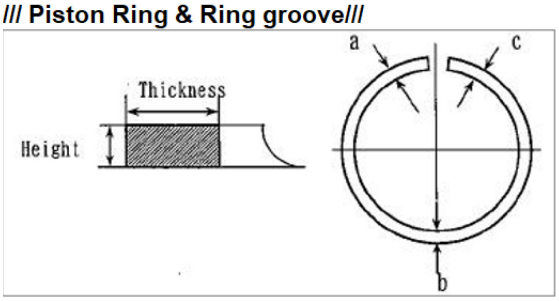


Рисунок Е.8 – Стан поверхні циліндрової втулки дизель-генератора

/// Piston Ring & Ring groove///





<<< Standard Data >>> **Unit : 1/100mm**

Ring	Piston ring				Clearance Ring and Groove	
	Height		Thickness			
	Standard	Limit	Standard	Limit	Standard	Limit
1	5				0.13-0.17	0.3
2	5				0.09-0.13	0.3
3	5				0.08-0.12	0.3
4	7				0.04-0.08	0.2
5	7				0.04-0.08	0.2

No.1 Cylinder

	Piston ring						Clearance between Ring and Groove				Remark
	Thickness			Height			with New Piston Ring				Piston rings renewed.
Position	a	b	c	a	b	c	F	A	P	S	
1	7.69	7.67	7.67	4.9	4.91	4.89	0.31	0.32	0.32	0.31	
2	7.73	7.56	7.61	4.96	4.91	4.97	0.15	0.15	0.15	0.15	
3	7.65	7.63	7.65	4.93	4.89	4.91	0.15	0.15	0.15	0.15	
4	5.2	5.19	5.17	6.74	6.86	6.81	0.07	0.06	0.07	0.07	
5	5.20	5.17	5.21	6.88	6.82	6.92	0.06	0.06	0.06	0.06	

No.2 Cylinder

	Piston ring						Clearance between Ring and Groove				Remark
	Thickness			Height			with New Piston Ring				Piston rings renewed.
Position	a	b	c	a	b	c	F	A	P	S	
1	7.75	7.61	7.59	4.87	4.91	4.88	0.32	0.34	0.35	0.31	
2	7.67	7.73	7.75	4.96	4.95	4.91	0.13	0.13	0.13	0.13	
3	7.68	7.64	7.65	4.89	4.88	4.88	0.15	0.13	0.15	0.13	
4	5.18	5.08	5.11	6.86	6.84	6.9	0.06	0.07	0.07	0.07	
5	5.19	5.18	5.2	6.91	6.93	6.89	0.06	0.06	0.07	0.06	

No.3 Cylinder

	Piston ring						Clearance between Ring and Groove				Remark
	Thickness			Height			with New Piston Ring				Piston rings renewed.
Position	a	b	c	a	b	c	F	A	P	S	
1	7.50	7.63	7.49	4.86	4.9	4.88	0.31	0.35	0.35	0.34	
2	7.69	7.76	7.71	4.9	4.94	4.95	0.14	0.15	0.15	0.13	
3	7.74	7.6	7.67	4.81	4.84	4.86	0.13	0.14	0.14	0.13	
4	5.17	5.11	5.16	6.88	6.9	6.87	0.07	0.06	0.07	0.07	
5	5.21	5.13	5.19	6.9	6.87	6.91	0.06	0.06	0.06	0.06	

Рисунок Е.9 – Звіт про інспекцію кілець та пазів циліндри 1-3

No.4 Cylinder

	Piston ring						Clearance between Ring and Groove				Remark
	Thickness			Height			with New Piston Ring				Piston rings renewed.
Position	a	b	c	a	b	c	F	A	P	S	
1	7.75	7.7	7.71	4.93	4.88	4.9	0.29	0.32	0.32	0.32	
2	7.76	7.73	7.76	4.92	4.96	4.95	0.13	0.13	0.14	0.13	
3	7.75	7.7	7.59	4.93	4.91	4.86	0.12	0.13	0.13	0.12	
4	5.14	5.22	5.25	6.82	6.81	6.9	0.07	0.07	0.07	0.07	
5	5.24	5.17	5.27	6.88	6.96	6.89	0.06	0.06	0.06	0.06	

No.5 Cylinder

	Piston ring						Clearance between Ring and Groove				Remark
	Thickness			Height			with New Piston Ring				Piston rings renewed.
Position	a	b	c	a	b	c	F	A	P	S	
1	7.59	7.77	7.72	4.92	4.89	4.9	0.31	0.32	0.32	0.32	
2	7.8	7.78	7.73	4.96	4.93	4.96	0.13	0.13	0.13	0.12	
3	7.63	7.72	7.58	4.89	4.89	4.91	0.14	0.15	0.15	0.14	
4	5.18	5.19	5.16	6.9	6.89	6.9	0.06	0.06	0.07	0.07	
5	5.14	5.13	5.23	6.85	6.92	6.91	0.06	0.06	0.06	0.06	

No.6 Cylinder

	Piston ring						Clearance between Ring and Groove				Remark
	Thickness			Height			with New Piston Ring				Piston rings renewed.
Position	a	b	c	a	b	c	F	A	P	S	
1	7.58	7.65	7.58	4.92	4.91	4.88	0.33	0.33	0.33	0.33	
2	7.73	7.75	7.77	4.93	4.92	4.94	0.14	0.13	0.14	0.14	
3	7.64	7.58	7.65	4.9	4.95	4.9	0.16	0.16	0.16	0.16	
4	5.2	5.18	5.22	6.91	6.9	6.89	0.06	0.06	0.06	0.06	
5	5.19	5.18	5.2	6.79	6.87	6.87	0.06	0.06	0.06	0.06	

No.7 Cylinder

	Piston ring						Clearance between Ring and Groove				Remark
	Thickness			Height			with New Piston Ring				Piston rings renewed.
Position	a	b	c	a	b	c	F	A	P	S	
1	7.66	7.64	7.67	4.89	4.83	4.9	0.26	0.26	0.26	0.26	
2	7.71	7.72	7.75	4.85	4.82	4.92	0.13	0.13	0.14	0.13	
3	7.56	7.61	7.6	4.88	4.8	4.88	0.13	0.14	0.14	0.13	
4	5.17	5.2	5.19	6.89	6.84	6.91	0.06	0.06	0.07	0.06	
5	5.16	5.18	5.19	6.89	6.84	6.87	0.06	0.06	0.06	0.06	

No.8 Cylinder

	Piston ring						Clearance between Ring and Groove				Remark
	Thickness			Height			with New Piston Ring				Piston rings renewed.
Position	a	b	c	a	b	c	F	A	P	S	
1	7.63	7.59	7.74	4.87	4.78	4.85	0.31	0.32	0.31	0.32	
2	7.7	7.68	7.72	4.84	4.9	4.94	0.12	0.12	0.12	0.12	
3	7.62	7.61	7.65	4.89	4.84	4.88	0.16	0.16	0.16	0.16	
4	5.22	5.18	5.12	6.87	6.86	6.89	0.06	0.6	0.06	0.06	
5	5.19	5.21	5.18	6.77	6.78	6.8	0.06	0.06	0.06	0.06	

Рисунок Е.10 – Звіт про інспекцію кілець та пазів циліндри 4-8

D/E Inspection Record (Cylinder Liner,Piston & Rings)

Vessel Name : Tianjin Highway
2nd Engineer :
Engine Type : 8DK-20
Chief Engineer :

Date	Place	Machine No	Total Working Hrs	Working Hrs since last O.H
24.July.2023	At Sea	1	63127	9057

/// Cylinder Liner ///

*** Measurment position by Ship's point gauge — Unit : 1/100mm

Cyl No	Direction	Dimension of cylinder liner: Original : 200 mm / Limit : 1 mm — B1	B2	B3	B4	Max wear down	Working Hrs since last O/H	Working Hrs since last renew
1	F - A	200.43	200.13	200.13	200.15	0.43	9057	63127
	P - S	200.4	200.18	200.09	200.1	0.4		
2	F - A	200.35	200.15	200.12	200.11	0.35	9057	63127
	P - S	200.45	200.11	200.11	200.08	0.45		
3	F - A	200.42	200.15	200.1	200.11	0.42	9057	63127
	P - S	200.33	200.1	200.08	200.12	0.33		
4	F - A	200.35	200.15	200.12	200.15	0.35	9057	63127
	P - S	200.47	200.13	200.09	200.17	0.47		
5	F - A	200.5	200.21	200.13	200.1	0.5	9057	63127
	P - S	200.36	200.05	200.06	200.1	0.36		
6	F - A	200.43	200.15	200.1	200.14	0.43	9057	63127
	P - S	200.46	200.15	200.08	200.1	0.46		
7	F - A	200.25	200.08	200.03	200.03	0.25	9057	63127
	P - S	200.45	200.15	200.14	200.09	0.45		
8	F - A	200.43	200.18	200.12	200.1	0.43	9057	63127
	P - S	200.43	200.23	200.11	200.1	0.43		

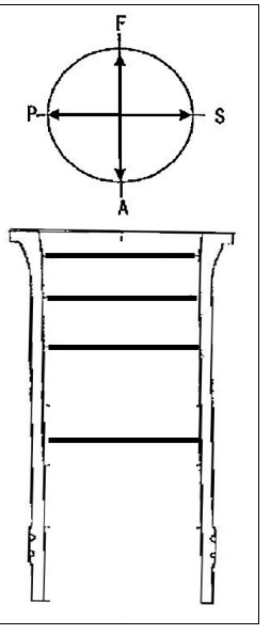


Рисунок Е.11 – Звіт про інспекцію циліндрової втулки

ДОДАТОК Є
ФОТОГРАФІЧНІ МАТЕРІАЛИ ТА ІЛЮСТРАЦІЇ ДО ПРОЦЕСУ ОБСЛУГОВУВАННЯ СУДНОВОГО БАЛАСТНОГО НАСОСУ

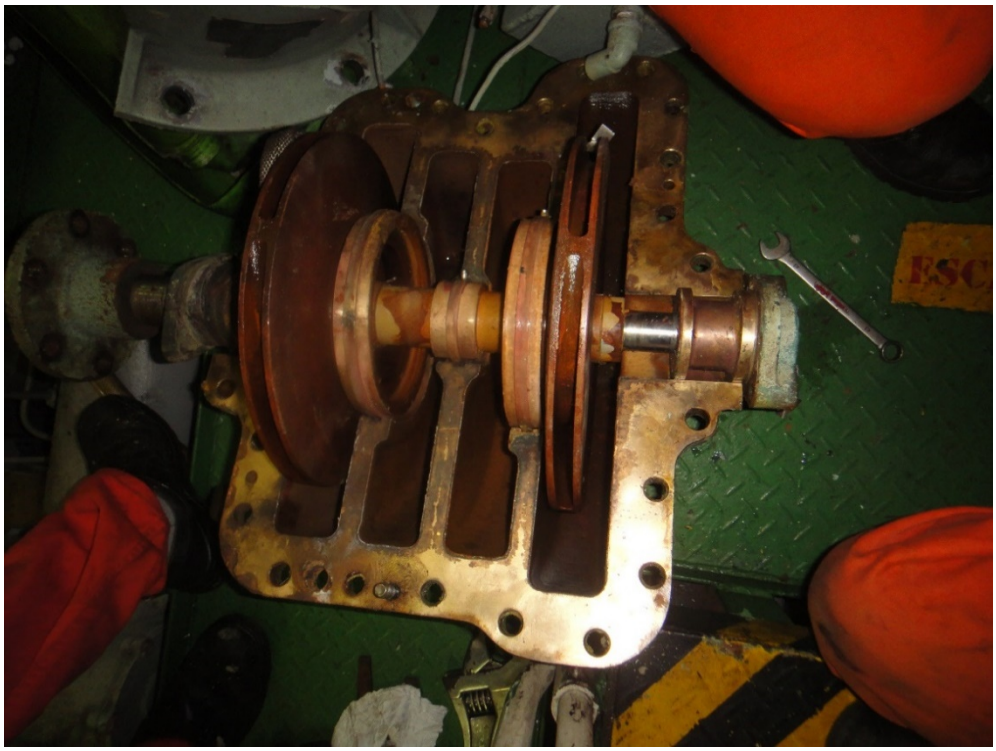


Рисунок Є.1 – Робоче колесо баластного насосу



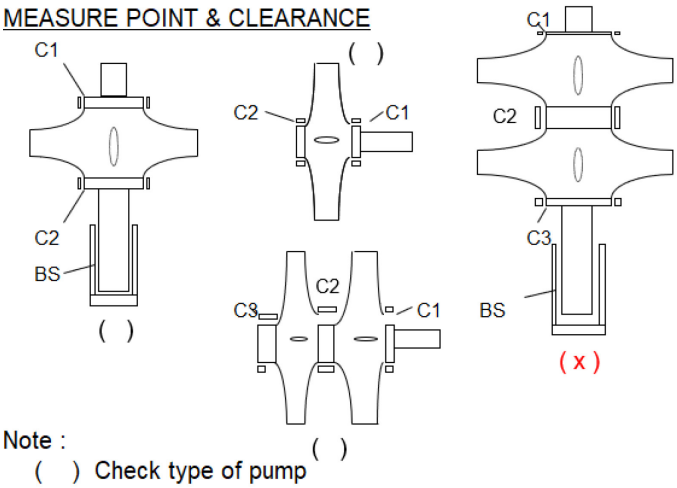
Рисунок Є.2 – Підшипник і робоче колесо баластного насосу

REPORT OF OPEN-UP INSPECTION

Ballast Pump

VESSEL NAME	*TIANJIN HIGHWAY*		
PUMP NAME	*Ballast Pump*	MAKER & TYPE	*SHINKO IND.LTD. RVX200S*
DATE OF OVERHAUL	*08-Dec-20*	DATE OF LAST O'HAUL	*NIL*

MEASURE POINT & CLEARANCE



				(C-I)/2 = Clearance
C1=	*165,2*	I1 =	*164,4*	*0,40*
C2=	*165,0*	I2=	*164,4*	*0,30*
C3=		I3=		
C4=		I4=		
C5=		I5=		
C6=		I6=		
B =	*35,7*	S =	*35,0*	*0,35*

I = Impeller O.D. Unit = 1/100 mm
C = Casing ring I.D.
S = Shaft sleeve O.D.
B = Bearing I.D.

Note :
( ) Check type of pump

CONDITION:

1. Impeller & Casing
GOOD

2. Casing Ring
GOOD

3. Shaft & Shaft Sleeve
GOOD

4. Bearing Metal
GOOD

Used Spare Parts:

Remarks:
Pump disassembled, cleaned, checked, measured and reassembled.

4. Bearing Metal
GOOD

5. Oil Seal
GOOD

6. Condition before & after o'haul:
(Del' & Suc' Press)
Before: Pdel = 0.8 MPa
After: Pdel = 0.8 MPa

Attached Photo :



Рисунок Є.3 – Звіт про інспекцію баластного насосу

ДОДАТОК Ж
РЕЗУЛЬТАТИ ПЕРЕВІРКИ КРИТЕРІЮ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ РЕСУРСІВ ТА МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ І СИСТЕМИ КПТОВС

Рисунки Ж.1 – Ж.6 представлені у цьому додатку містять поверхні які наближаються до експериментальних даних і описуються такою формулою:

$$\begin{aligned} Z = {} & C[0] + C[1] * X + C[2] * Y + C[3] * X^2 + C[4] * X * Y + \\ & + C[5] * Y^2 + C[6] * X^3 + C[7] * X^2 * Y + C[8] * X * Y^2 + C[9] * Y^3 + \\ & + C[10] * X^4 + C[11] * X^3 * Y + C[12] * X^2 * Y^2 + C[13] * X * Y^3 + \\ & + C[14] * Y^4 + C[15] * X^5 + C[16] * X^4 * Y + C[17] * X^3 * Y^2 + \\ & + C[18] * X^2 * Y^3 + C[19] * X * Y^4 + C[20] * Y^5 \end{aligned}$$

коефіцієнти цієї формули наведено у Таблицях Ж.1 і Ж.2.

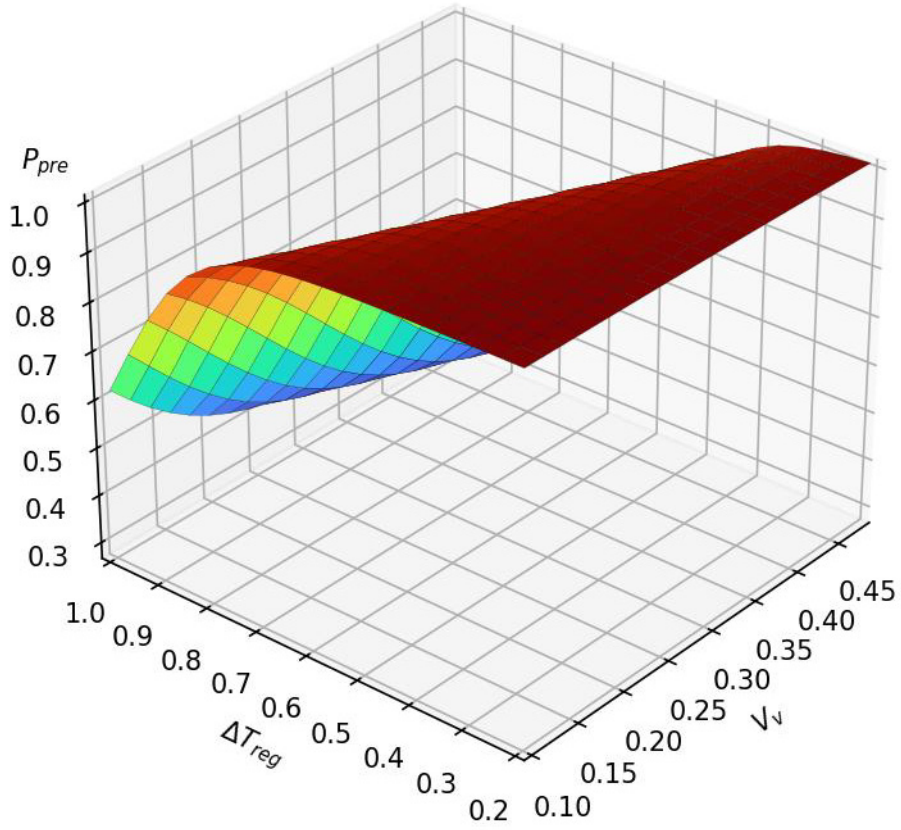


Рисунок Ж.1 – Ймовірність запобігання досягненню граничного стану $\left(R^2 = 0.997351, \quad V_v = X, \quad \Delta T_{reg} = Y, \quad P_{pre} = Z\right)$

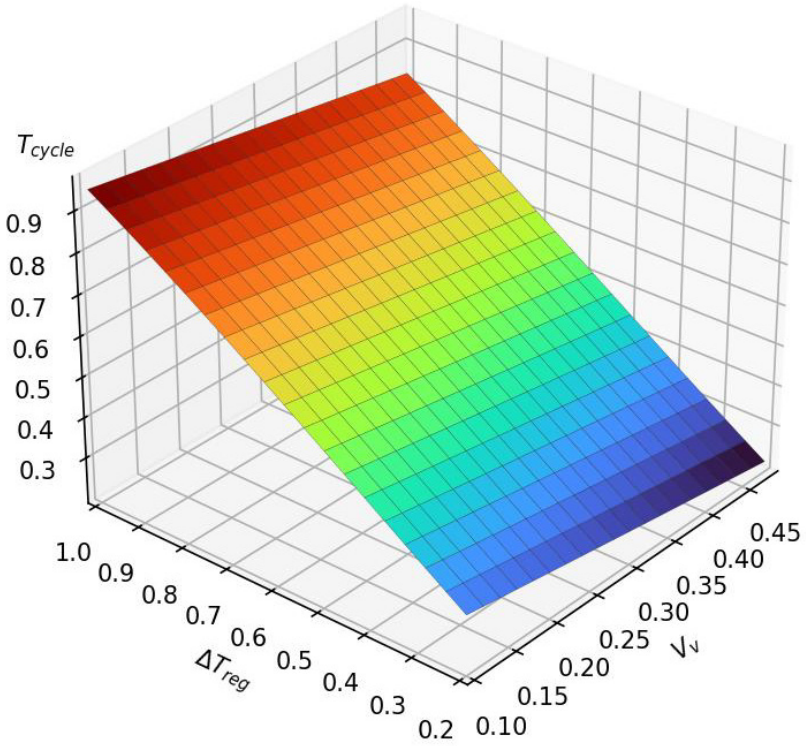


Рисунок Ж.2 – Тривалість циклу експлуатації
$\left(R^2 = 0.999967, \quad V_v = X, \quad \Delta T_{reg} = Y, \quad T_{cycle} = Z\right)$

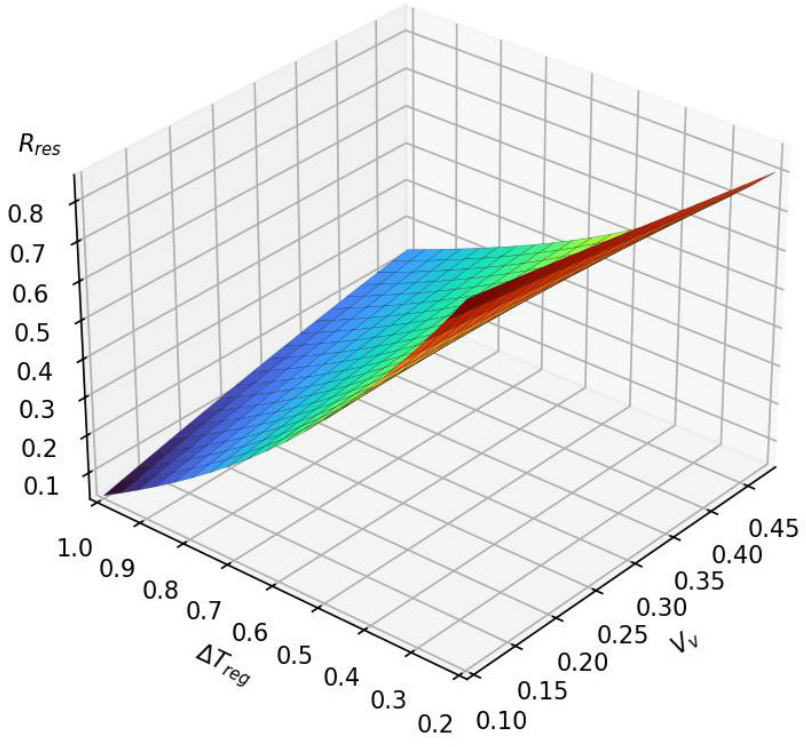


Рисунок Ж.3 – Залишковий ресурс СТЗ
$\left(R^2 = 0.999456, \quad V_v = X, \quad \Delta T_{reg} = Y, \quad R_{res} = Z\right)$

Таблиця Ж.1 – Коефіцієнти апроксимуючих функцій рисунків Ж.1 – Ж.3

Коеф.	Рис. Ж.1	Коеф.	Рис. Ж.2	Коеф.	Рис. Ж.3
C[0]	13,72342841	**C[0]**	2,28271298	**C[0]**	-1,05195843
C[1]	-20,47309503	**C[1]**	-15,55698180	**C[1]**	16,98464051
C[2]	-101,02416444	**C[2]**	-7,54845199	**C[2]**	5,99479381
C[3]	-201,85823774	**C[3]**	38,04923913	**C[3]**	-69,36400036
C[4]	382,20068388	**C[4]**	48,55740425	**C[4]**	-39,48654245
C[5]	229,63488656	**C[5]**	10,69575251	**C[5]**	-8,02370799
C[6]	717,12513057	**C[6]**	-31,19430414	**C[6]**	177,24083815
C[7]	-234,12233411	**C[7]**	-106,77183407	**C[7]**	83,57298751
C[8]	-798,00295317	**C[8]**	-42,99399226	**C[8]**	35,49785991
C[9]	-217,34882608	**C[9]**	-5,16028436	**C[9]**	2,06281643
C[10]	-810,24562410	**C[10]**	-12,87976350	**C[10]**	-245,26955058
C[11]	-488,25529244	**C[11]**	99,30791664	**C[11]**	-93,92942666
C[12]	758,74496170	**C[12]**	71,54670247	**C[12]**	-45,38461846
C[13]	543,14140099	**C[13]**	8,51554835	**C[13]**	-9,56478712
C[14]	89,70478965	**C[14]**	1,00108441	**C[14]**	1,50586020
C[15]	291,94376652	**C[15]**	23,05632754	**C[15]**	132,02954405
C[16]	447,55585748	**C[16]**	-29,64690861	**C[16]**	47,02555942
C[17]	-90,64418836	**C[17]**	-42,21629832	**C[17]**	25,58263184
C[18]	-333,44513260	**C[18]**	-9,69119049	**C[18]**	4,56800035
C[19]	-110,10918162	**C[19]**	1,73994200	**C[19]**	-0,05388498
C[20]	-13,88573179	**C[20]**	-0,28300497	**C[20]**	-0,60557356

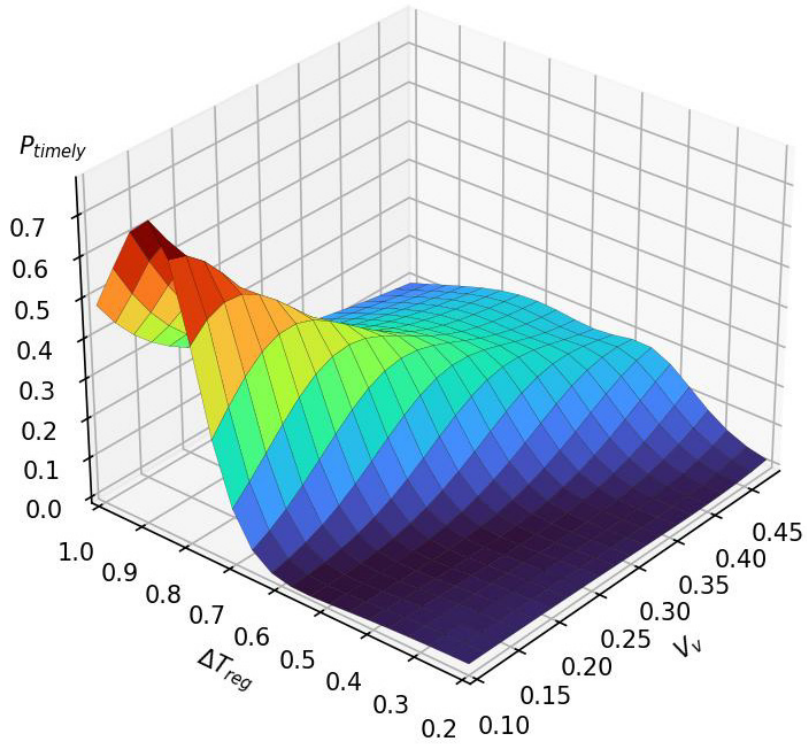


Рисунок Ж.4 – Ймовірність вчасно виконаного ТО

$\left(R^2 = 0.984017, \quad V_v = X, \quad \Delta T_{reg} = Y, \quad P_{timely} = Z\right)$

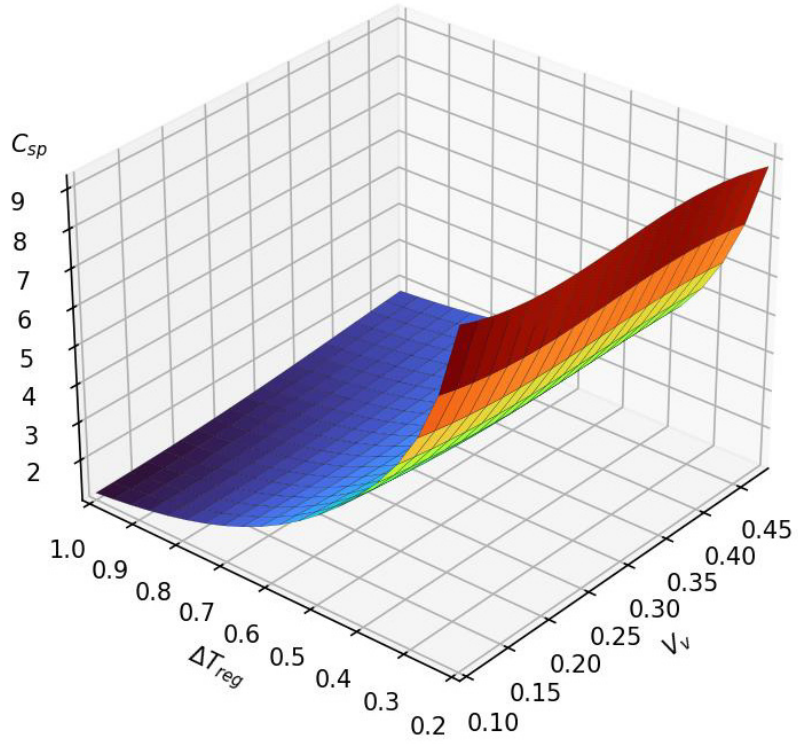


Рисунок Ж.5 – Витрати на змінно-запасні частини

$\left(R^2 = 0.999840, \quad V_v = X, \quad \Delta T_{reg} = Y, \quad C_{sp} = Z\right)$

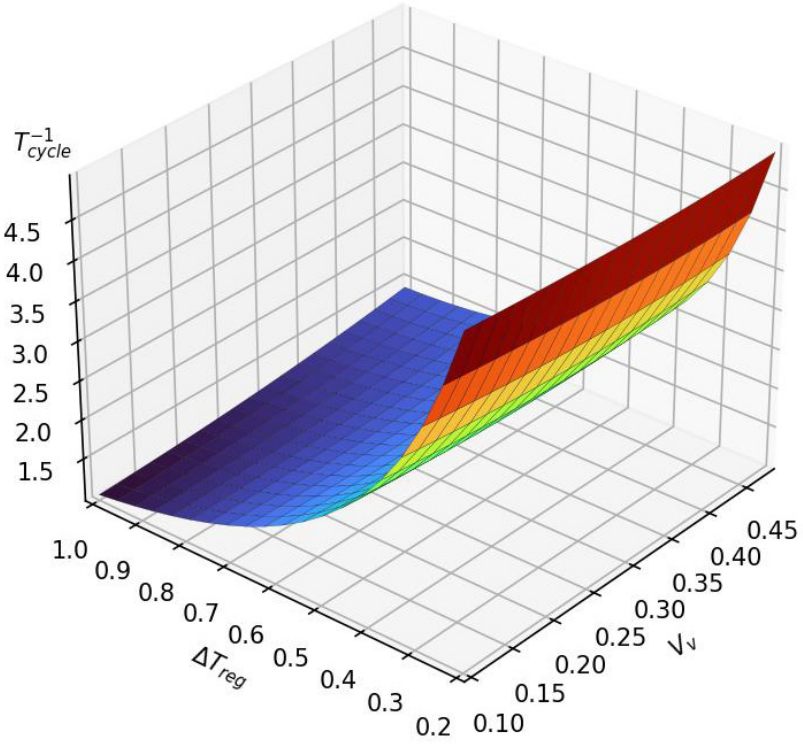


Рисунок Ж.6 – Частота виконання ТО

$\left(R^2 = 0.999918, \quad V_v = X, \quad \Delta T_{reg} = Y, \quad T_{cycle}^{-1} = Z\right)$

Таблиця Ж.2 – Коефіцієнти апроксимуючих функцій рисунків Ж.4 – Ж.6

Коеф.	Рис. Ж.4	Коеф.	Рис. Ж.5	Коеф.	Рис. Ж.6
C[0]	17,92496220	**C[0]**	13,52182167	**C[0]**	6,86105300
C[1]	3,37109525	**C[1]**	70,14508275	**C[1]**	36,03638076
C[2]	-140,37559138	**C[2]**	-80,28424733	**C[2]**	-37,65045221
C[3]	-475,13295954	**C[3]**	-161,36896342	**C[3]**	-69,99525354
C[4]	480,97588833	**C[4]**	-256,02778589	**C[4]**	-135,06618329
C[5]	283,69958665	**C[5]**	250,82252488	**C[5]**	118,12645515
C[6]	1393,82973388	**C[6]**	233,80402135	**C[6]**	28,64518817
C[7]	-58,45716745	**C[7]**	380,33975303	**C[7]**	229,16982958
C[8]	-1002,45933497	**C[8]**	345,00812198	**C[8]**	170,00122159
C[9]	-219,72506406	**C[9]**	-395,74695626	**C[9]**	-184,99232211
C[10]	-1388,16557362	**C[10]**	-245,38731466	**C[10]**	56,67836313
C[11]	-1214,01666070	**C[11]**	-243,92143649	**C[11]**	-157,45985165
C[12]	998,39465279	**C[12]**	-328,97533599	**C[12]**	-189,46023581
C[13]	583,07212660	**C[13]**	-198,57205030	**C[13]**	-90,51039598
C[14]	69,01296128	**C[14]**	300,26462351	**C[14]**	138,85628537
C[15]	394,94372694	**C[15]**	102,44450271	**C[15]**	-48,73507764
C[16]	954,72652917	**C[16]**	113,26317972	**C[16]**	30,96651807
C[17]	-56,72678194	**C[17]**	75,87464266	**C[17]**	77,02026334
C[18]	-452,29850632	**C[18]**	96,04464581	**C[18]**	43,73426311
C[19]	-74,60952338	**C[19]**	41,88982548	**C[19]**	18,65179767
C[20]	-9,34746979	**C[20]**	-87,68660167	**C[20]**	-40,18480500

Для перевірки адекватності критерію ефективності використання ресурсів необхідно порівняти операції технічного обслуговування, наведені в Таблиці Ж.3, ЕВР яких за визначенням однакова.

Припустимо, що на вхід чотирьох різних операцій технічного обслуговування надійшли вхідні ресурси, вартісна оцінка яких для кожної операції – 300 грошових одиниць. Час виконання кожної операції різний, але, як видно з таблиці, якщо моменти початку операцій технічного обслуговування збігаються, то сумарні вартісні оцінки вихідних продуктів процесу перетворення виходять однаковими.

Отже, якщо, наприклад, на 5, 7, 9 або 13 момент часу виконані операції технічного обслуговування дають однаковий абсолютний результат, значить їхня ЕВР теж має бути однаковою. Результати порівняння операцій наведено в Таблиці Ж.4. Аналіз даних дає змогу зробити висновок, що отримана модель адекватна. Похибка в розрахунках становить менше одного відсотка.

Для того щоб однозначно відповісти на запитання: «Яке управління більш ефективне?», необхідно ставити спеціальний натурний експеримент або досліджувати модель технічного обслуговування методами імітаційного моделювання. У будь-якому разі оцінити управління можна тільки, якщо початковий стан систем абсолютно однаковий і існує такий проміжний стан, коли результати операцій можна порівнювати.

Таблиця Ж.3 – Порівняльні оцінки чотирьох операцій технічного обслуговування різної рентабельності та тривалості, але однакової ефективності

	Рентабельність				
	1,10	1,464	1,331	1,21	
	Початковий стан				
	Операція 1	Операція 2	Операція 3	Операція 4	Час
Проміжний підсумок	300	300	300	300	1
					2
	330				3
					4
	363			363	5
					6
	399,3		399,3		7
					8
	439,23	439,23		439,23	9
					10
	483,153				11
					12
	531,468		531,468	531,468	13
					14
	584,615				15

Таблиця Ж.4 – Результати розрахунку EBP чотирьох операцій технічного обслуговування різної рентабельності та продуктивності

Операція	1	2	3	4
EBP	0,002147	0,002152	0,002158	0,002163

Найпростіше здійснювати порівняння технологічних процесів можна, спираючись на сфокусовані операції [343].

Розглянемо дві моделі технологічних процесів, які складаються з операцій технічного обслуговування. Причому параметри операцій технічного обслуговування, такі як тривалість і рентабельність, для кожного технологічного процесу є незмінними при зміні вартісної величини вхідних ресурсів процесу перетворення.

Це означає, що вартісна величина вихідного ресурсу може бути визначена з виразу: $p = r \cdot rent$, де $rent$ – рентабельність процесу перетворення.

Оскільки рентабельність процесу технічного обслуговування не залежить від величини вартісної оцінки вхідного ресурсу операції, то на вхід наступної операції технічного обслуговування може бути подано безліч вхідних ресурсів, вартісна величина яких кількісно дорівнює вартісній величині вихідних ресурсів перетворення, тощо.

Якщо вартісна величина вхідних ресурсів першої операції технічного обслуговування дорівнює 1000 грошових одиниць, рентабельність – 1.2, а тривалість - 3 одиниці, то через деякий проміжок часу (Таблиця Ж.5) вартісний стан (C) системи зміниться. У разі збільшення тривалості операції (Таблиця Ж.6)

і збереження колишньої рентабельності ефективність використання ресурсів буде нижчою, оскільки на момент $(n = 54)$ вартісний стан другої системи технічного обслуговування приблизно на порядок нижчий за вартісний стан першої системи технічного обслуговування.

Для управління системами технічного обслуговування, що працюють у режимі реального часу, математична модель критерію ефективності для узгоджених операцій технічного обслуговування може бути відображена у вигляді інтегрального виразу:

$$E = \frac{\int_{t_l}^{t_l+\Delta}\left[\int_{v_l}^{v}\left(\int_0^{\varepsilon}|p(\tau)|d\tau\right)d\varepsilon - \int_0^{v}\left(\int_0^{\varepsilon}|r(\tau)|d\tau\right)d\varepsilon\right]dv}{\int_0^{t_l}\left[\int_0^{v}\left(\int_0^{\varepsilon}|r(\tau)|d\tau\right)d\varepsilon - \int_0^{v}\left(\int_0^{\varepsilon}|p(\tau)|d\tau\right)d\varepsilon\right]dv}, \quad (5.63)$$

де E – показник ЕВР; t_l – момент логічного завершення операції технічного обслуговування; Δ – одиничний інтервал часу.

Для дискретних систем автоматизованого управління вираз (5.63) набуде вигляду відношення різницевих рівнянь:

$$E = \frac{\sum_{m=n_l}^{n_l+\Delta}\sum_{k=n_h}^{n}\sum_{g=n_h}^{n}\left(p_{k,m,g} - |r_{k,m,g}|\right)}{\sum_{m=n_h}^{n_l}\sum_{k=n_h}^{n}\sum_{g=n_h}^{n}\left(|r_{k,m,g}| - p_{k,m,g}\right)}, \quad (5.64)$$

де n_h – найближчий інтервал до моменту логічного завершення операції.

Таблиця Ж.5 – Зміна стану першої системи технічного обслуговування з тривалістю операцій у два часових інтервали

Номер операції	Вартість, (C)	Рентабельність, $rent$	Часовий індекс
1	1000	1,2	0
… … … …			
2	1200	1,2	3
… … … …			
19	26623	1,2	54
… … … …			
20	31948	1,2	57

Таблиця Ж.6 – Зміна стану другої системи технічного обслуговування з тривалістю операцій у вісім часових інтервалів

Номер операції	Вартість, (C)	Рентабельність, $rent$	Часовий індекс
1	1000	1,2	0
… … … …			
2	1200	1,2	9
… … … …			
7	2986	1,2	54
… … … …			
8	3583	1,2	63

Для дискретних систем, вхідні сигнали реєстрації яких згруповані в рамках одного інтервалу дискретизації, а вихідні - в рамках одного, наступного інтервалу дискретизації, показник ЕВР може бути виражений аналітично:

$$E = \frac{(p-r)^2}{p \cdot r \cdot \left(n_p - n_r\right)^2}, \tag{5.65}$$

де n_p – момент реєстрації перетворення вихідних ресурсів; n_r – момент реєстрації перетворення вхідних ресурсів.

Оскільки приклади, що розглядаються, спираються на сфокусовані операції, для оцінки їхніх ЕВР можна скористатися виразом (5.65). Тоді для першого процесу, обравши будь-яку операцію технічного обслуговування, наприклад, третю, можна розрахувати її ЕВР:

$$E = \frac{(p-r)^2}{p \cdot r \cdot \left(n_p - n_r\right)^2} = \frac{(1728-1440)^2}{1728 \cdot 1440 \cdot (9-6)^2} = 0{,}0037.$$

Ефективність другого процесу розрахуємо за першою операцією технічного обслуговування

$$E = \frac{(p-r)^2}{p \cdot r \cdot \left(n_p - n_r\right)^2} = \frac{(1200-1000)^2}{1200 \cdot 1000 \cdot (9)^2} = 0{,}000412.$$

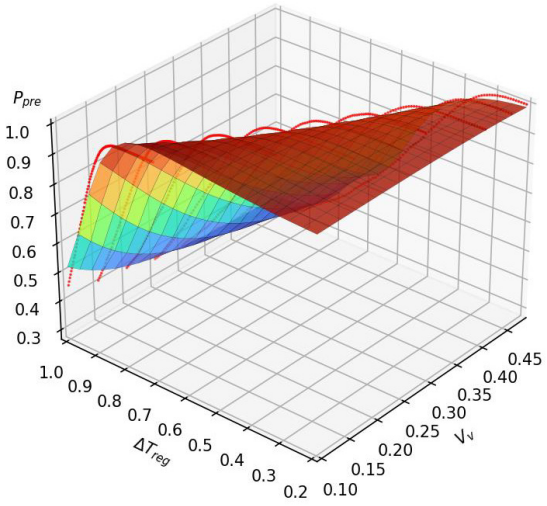
Оцінити ЕВР окремої системи технічного обслуговування, оцінюючи ефективність операцій технічного обслуговування, можна тільки лише тому, що всі операції технічного обслуговування ідентичні. Можна розрахувати ефективність будь-якої операції, наприклад, першої системи. Усі вони матимуть однакову ефективність використання ресурсів. Те саме можна сказати про будь-яку операцію другої системи технічного обслуговування. Як видно, ЕВР першої системи вищий за ефективність другої. Причому порядок цифр, отриманих як відношення абсолютного ефекту першої операції до абсолютного ефекту другої операції і відношенням значень ЕВР з використанням виразу (5.65), дуже близькі. Результати проведеної перевірки свідчать, що математичні залежності моделей адекватно описують реальні процеси в досліджуваній системі технічного обслуговування.

В проведеному дослідженні ефективність отриманих експериментальних і розрахункових графічних залежностей оцінювалась відповідно до методичних принципів, викладених у Розділі 3.3, використовуючи формули (3.38) - (3.43), а також у відповідності з положеннями Розділу 6.3.5. Для цього застосовувалися такі показники як середньоквадратичне відхилення, максимальне абсолютне відхилення та коефіцієнт множинної кореляції. Додатково застосовано оцінювання за критерієм Фішера:

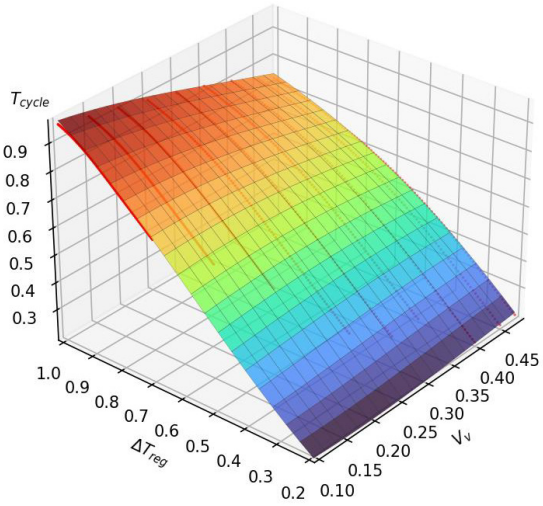
$$\varphi = \frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2\,(m-1)}{\sum_{i=1}^{m}(y_i - \bar{y})^2\,(n-1)},$$

де $\bar{x}, \bar{y}$ - вибіркові середніх вибірок x^n і y^m:

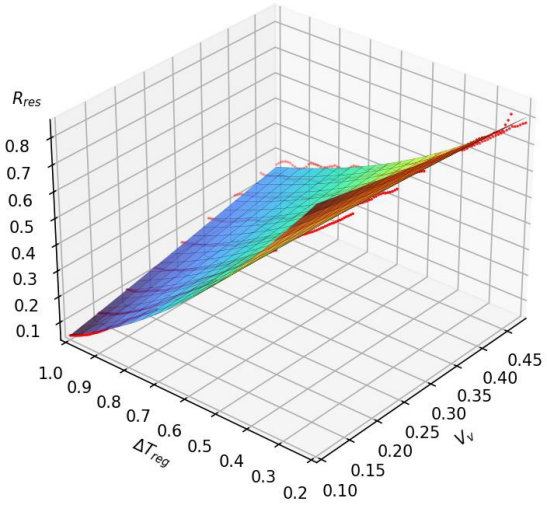
$$\bar{x} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} x_i\,, \qquad \bar{y} = \frac{1}{m}\sum_{i=1}^{m} y_i.$$



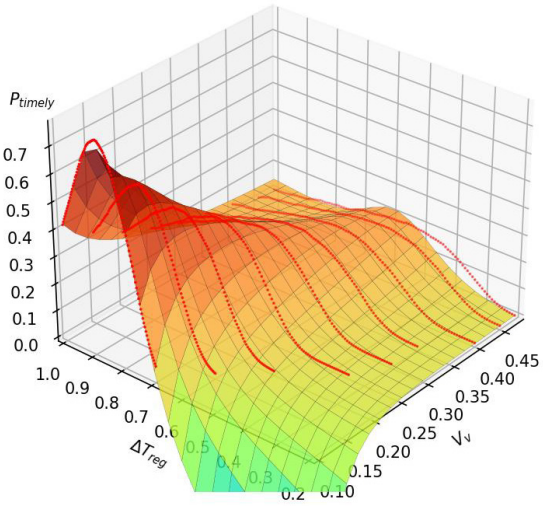
А) ймовірність запобігання досягненню граничного стану



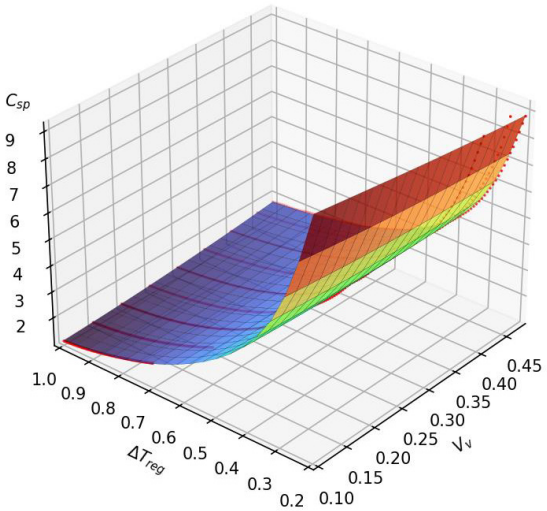
Б) тривалість циклу експлуатації



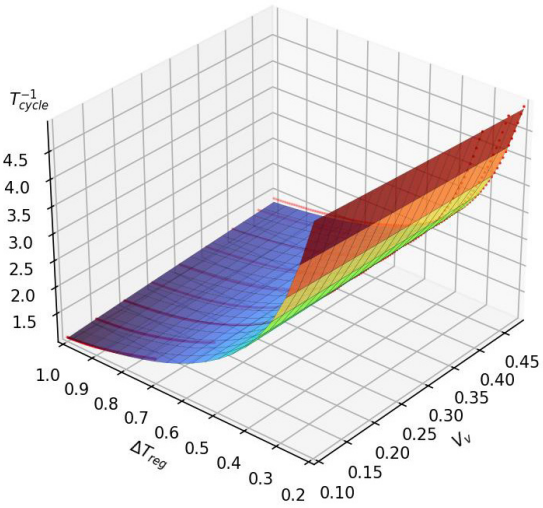
В) залишковий ресурс СТЗ



Г) ймовірність вчасно виконаного ТО



Ґ) витрати на змінно-запасні частини



Д) частота виконання ТО

Рисунок Ж.7 – Параметри системи технічного обслуговування яке виконується без можливого відхилення від адаптивно призначеного терміну

Адекватність моделі визначалась на основі порівняння отриманих значень φ-критерію з табличними даними. Модель вважалась адекватною з встановленою вірогідністю, якщо значення φ-критерію, отримане в результаті обчислення, не перевищувало табличні значення. У даному випадку перевірка адекватності здійснювалась за допомогою табличних даних критерію Фішера для рівня значущості 5%. Зазначено, що надійна вірогідність складала 95%.

Для оцінки адекватності та подальшого використання в наукових дослідженнях, були протестовані різноманітні параметри системи технічного обслуговування, яка застосовується під час експлуатації вантажного судна. Ці параметри включають ймовірність запобігання досягненню критичного стану, тривалість циклу експлуатації, залишковий ресурс технічних засобів, ймовірність своєчасного проведення технічного обслуговування, витрати на запасні частини, частоту проведення технічного обслуговування та інші відповідні параметри.

Результати співставлення розрахункових і експериментальних даних щодо параметрів системи технічного обслуговування (Рисунок Ж.7) підтверджують необхідну адекватність математичного моделювання параметрів в процесі експлуатації на рівні вище 95 %. У подальших наукових дослідженнях стає можливим використання складеної математичної моделі об’єктів комплексного прескриптивного технічного обслуговування судна для здійснення теоретичних досліджень, спрямованих на підвищення ефективності систем технічного обслуговування вантажних суден.

ДОДАТОК З

РЕЗУЛЬТАТИ ВІДПРАЦЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ СИСТЕМИ ТЕХНІЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ В УМОВАХ ЕКСПЛУАТАЦІЇ

Таблиця З.1 – Зведені дані. Початково встановлений зазор – 0,3 мм (Рис. Є.3)

	Технічний стан вузла ущільнювача після першої ревізії			
	Напрацювання до першої ревізії, год	**Виміряний зазор, δ мм**	**γ_{11} 10^{-3}, год$^{-1}$**	**T_{11}, год**
Насос 1	5400	0,70	0,148	6750
Насос 2	4800	0,60	0,084	11980
Насос 3	5200	0,55	0,096	10416
Насос 4	4800	0,45	0,063	15873
Середнє	5050	0,575	0,09775	11255
	Технічний стан вузла ущільнювача після другої ревізії			
	Напрацювання до другої ревізії, год	**Виміряний зазор, δ мм**	**γ_{12} 10^{-3}, год$^{-1}$**	**T_{12}, год**
Насос 1	11000	0,85	0,054	9703
Насос 2	11400	0,90	0,091	9596
Насос 3	11200	0,85	0,100	10200
Насос 4	11400	0,85	0,121	10585
Середнє	11250	0,8625	0,0915	10021
	Оцінка залишкового ресурсу робочого колеса після другої ревізії			
	Залишковий ресурс R_{2res}, год	**γ_2 10^{-3}, год$^{-1}$**	**T_2, год**	
Насос 1	7500	0,054	18500	
Насос 2	2500	0,072	13900	
Насос 3	6000	0,058	17200	
Насос 4	4500	0,061	15900	
Середнє	5125	0,06125	16375	

ДОДАТОК И
ДОВІРЧІ ГРАНИЦІ, ЙМОВІРНОСТІ, КОЕФІЦІЄНТИ РОЗПОДІЛУ, ЩО ВИКОРИСТОВУЮТЬСЯ В ПРОЦЕСІ ДИНАМІЧНОГО КОРИГУВАННЯ ТЕРМІНІВ ТЕХНІЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ ВАНТАЖНИХ СУДЕН

Таблиця И.1 – Формули розрахунку відносних довірчих границь

Формули для розрахунку довірчих відносних границь	Розподілення	
	Логнормальне	Вейбулла
Верхня границя δ_{hi}	$exp\left[\frac{U_\gamma\sqrt{\ln\left(1+{V_t}^2\right)}\sqrt{1+0.5\ln\left(1+{V_t}^2\right)}}{\sqrt{N}}\right]$	${r_1}^{1/b}$
Нижня границя δ_{low}	$exp\left[-\frac{U_\gamma\sqrt{\ln\left(1+{V_t}^2\right)}\sqrt{1+0.5\ln\left(1+{V_t}^2\right)}}{\sqrt{N}}\right]$	${r_3}^{1/b}$

Таблиця И.2 – Квантилі для різних значень довірчої ймовірності

Довірча ймовірність, β	Квантиль, U_γ
0.80	0.842
0.90	1.282
0.95	1.643

Таблиця И.3 – Коефіцієнти r_1 та r_3 розподілу Вейбулла [343]

Обсяг вибірки, *N*	Значення коефіцієнтів r_1 та r_3 при довірчій ймовірності β					
	$\beta = 0.80$		$\beta = 0.90$		$\beta = 0.95$	
	r_1	r_3	r_1	r_3	r_1	r_3
6	1,54	0,76	1,9	0,65	2,29	0,57
8	1,43	0,73	1,72	0,68	2,01	0,61
10	1,37	0,80	1,61	0,70	1,83	0,64
15	1,28	0,83	1,46	0,74	1,62	0,68
20	1,24	0,85	1,37	0,77	1,51	0,72
30	1,18	0,87	1,29	0,80	1,39	0,76
40	1,16	0,88	1,24	0,83	1,32	0,78
50	1,14	0,89	1,21	0,84	1,28	0,80

ДОДАТОК І

НЕПРИПУСТИМІ РИЗИКИ ДЛЯ РІЗНИХ ВАНТАЖНИХ СУДЕН

Судно	дедвейт	Вік	Неприпустимий ризик, $/год, більше за значення у клітинці	Неприпустимі ризики по деяким СТЗіК вантажного судна, $/год						
				Корпус	Суднові пристрої	Головний двигун	Допоміжні котли	ДГ та допоміж. мех.	Суднові системи	Електричне обладнання
Контейнеровоз	6270	20	62400	19906	7426	6302	6989	1310	12667	7800
Контейнеровоз	6314	20	70000	22330	8330	7070	7840	1470	14210	8750
Балкер	34995	15	94200	30050	11210	9514	10550	1978	19123	11775
Ro-Ro	6128	20	118000	37642	14042	11918	13216	2478	23954	14750
Ro-Ro	22147	19	130000	41470	15470	13130	14560	2730	26390	16250
Ro-Ro	4600	19	74600	23797	8877	7535	8355	1567	15144	9325
Ro-Ro	18461	18	122000	38918	14518	12322	13664	2562	24766	15250
Ro-Ro	4673	10	66000	21054	7854	6666	7392	1386	13398	8250
Ro-Lo	17850	1	102000	32538	12138	10302	11424	2142	20706	12750
Ro-Lo	5717	17	76000	24244	9044	7676	8512	1596	15428	9500
Контейнеровоз	11350	23	84000	26796	9996	8484	9408	1764	17052	10500
Суховантаж	12937	25	58000	18502	6902	5858	6496	1218	11774	7250
Суховантаж	12295	30	60000	19140	7140	6060	6720	1260	12180	7500
Суховантаж	12882	24	66000	21054	7854	6666	7392	1386	13398	8250
Лісовоз	3659	30	45000	14355	5355	4545	5040	945	9135	5625

Щодо забруднення довкілля виходитимемо з міркувань щодо реально можливих величин потрапляння за борт нафтопродуктів, при цьому слід дотримуватися політики підтримання відповідного іміджу судноплавної компанії як відповідальної в частині дотримання екологічних норм. Метою ранжування ризиків є визначення конфігурації або управлінських рішень щодо технічного обслуговування. При побудові прескриптивної системи управління технічним обслуговуванням автором було запропоновано такий алгоритм:

1. Прогнозування параметрів прескриптивної системи технічного обслуговування для всіх суднових технічних засобів та конструкцій вантажного судна на основі експлуатаційних даних.

2. Визначення рівня та категорії прогнозованого ризику для всіх суднових технічних засобів і конструкцій вантажного судна.

3. Встановлення зв'язку між рівнями, категоріями ризику та прийнятими рішеннями з управління системою технічного обслуговування:

А. У випадку неприпустимого ризику (> 500 тис. дол. США) передбачається прийняття одноразових заходів (one-time change) у частині зменшення неприпустимого ризику (зміна режимів навантаження, програми виведення на режим, паливо, що застосовуються, та мастило, виробники та постачальники змінно-запасних частин тощо);

Б. У разі високого ризику (50 – 500 тис. дол. США) приймається рішення про збільшення ймовірність попередження відмови системою технічного обслуговування, введенням додаткового виду технічного обслуговування або зменшенням періодичності наявного технічного обслуговування, моніторингу стану, введенням додаткового контролю (збільшення частоти, якщо він уже є) технічного стану та процесів зміни технічного стану, застосування превентивної заміни компонент суднових технічних засобів, конструкцій;

В. При помірному ризику (1 – 50 тис. дол. США) має бути виконана адаптивна зміна параметрів системи технічного обслуговування на основі економічної ефективності через зміну періодичності технічного обслуговування, моніторинг технічного стану;

Г. При низькому ризику (< 1 тис. дол. США) передбачається виконання реактивного технічного обслуговування (за відмовами).

4. Прийняття рішення по управлінню параметрами системи прескриптивного технічного обслуговування для всіх суднових технічних засобів і конструкцій вантажного судна з урахуванням категорії їх ризику.

Згідно з результатами дослідження [189] відмови деяких компонентів середньо-оборотних двигунів перебувають у сфері високих ризиків, особливо це стосується колінчастих валів. Більшість проблем із колінчастими валами як середньо-оборотних, так і мало-оборотних двигунів зумовлено недостатньою увагою з боку суднових екіпажів за станом фундаментів і фундаментних болтів. Як правило, про ці найважливіші компоненти, що визначають безвідмовність дизеля, обслуговуючий персонал згадує, коли під час підготовки до огляду класифікаційним товариством вимірюються розкепи і вони виходять за гранично допустимі значення. У цих ситуаціях зазвичай стан опорних поверхонь або

амортизаторів такий, що потрібен серйозний ремонт. Інструкції заводів-виготовлювачів не пов’язують необхідність вимірювання розкепів колінчастого валу до і після обтискання фундаментних болтів, анкерних зв’язків, кріплення кришок рамових підшипників, а відповідне розуміння з боку суднових механіків необхідності такої ув’язки часто відсутнє. Іншою, також відомою причиною пошкоджень колінчастих валів є відмова підшипників.

У ході дослідження автору відомі випадки, коли необхідність заміни колінчастих валів на суднах з середньо-оборотними двигунами виникала через відмову підшипників. Для мінімізації таких ризиків багатьма судноплавними компаніями було прийнято рішення щодо превентивної заміни підшипників колінчастих валів незалежно від їхнього технічного стану за ресурсом в 16-20 тисяч годин, що призвело до миттєвого позитивного ефекту. Тому, видається логічним, що система комплексного прескриптивного технічного обслуговування, у своїх алгоритмах, має спиратися на результати експлуатації.

Варто звернути увагу на той факт, що ризик, хоча й є можливим збитком, у той же час представляє собою потенційну витрату коштів. Під час експлуатації не можна ігнорувати, але скоріше важливо враховувати, що необхідність у вимушених роботах виникає систематично, і важливо, щоб як судно, так і компанія, мали належні ресурси для подолання кількох випадкових відмов. Якщо загальна потреба у вимушеному технічному обслуговуванні перевищить наявні резерви, існує ризик порушення планового підходу до системи технічного обслуговування. Іншими словами, кожен окремий ризик може перебувати в припустимому діапазоні, такому як помірний або високий, але разом вони можуть стати неприпустимими. Розглянемо, як можна врахувати це під час розробки прескриптивної системи технічного обслуговування.

ДОДАТОК Ї
СТРАХОВІ ВИМОГИ ТА РИЗИКИ ЗА ЕЛЕМЕНТАМИ ГОЛОВНИХ ДВИГУНІВ ВАНТАЖНИХ СУДЕН

За даними джерела [375]	Мало-оборотний двигун				Середньо-оборотний двигун				У середньому			
	%	Частота х10^{-3}, рік$^{-1}$	Вимога, $	Ризик, $/рік	%	Частота х10^{-3}, рік$^{-1}$	Вимога, $	Ризик, $/рік	%	Частота х10^{-3}, рік$^{-1}$	Вимога, $	Ризик, $/рік
Газотурбонагнітач	46,8	18	203230	3658	19,9	22	140400	3089	32,7	19	184313	3502
Втулка циліндра	18,7	7,3	165582	1209	5	5,6	182736	1023	11,6	6,5	169221	1100
Рамові та шатунні підшипники	7,9	3,1	333185	1032	12,1	3,7	617424	2284	9,9	5,4	505759	2731
Колінчастий вал шатун	0,7	0,27	630650	170	15,6	18	743810	13389	8,1	4,4	738890	3251
Поршень і шток	5,8	2,2	210272	463	9,2	10	414110	4141	7,4	4,1	336457	1379
Вихлопні клапани, штовхачі	-	-	-	-	14,2	16	175274	2804	7	3,9	175274	684
Паливний насос високого тиску	3,6	1,4	207737	291	6,4	7,2	120735	869	4,9	2,7	151807	410
Редуктор	-	-	-	-	3	3,3	566731	1870	3,2	3,3	566731	1870
Разом	-	-	-	6823	-	-	-	29469	-	-	-	14927

ДОДАТОК Й

ОРІЄНТОВНА ТАБЛИЦЯ ПАРАМЕТРІВ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ, КОНТРОЛЬОВАНИХ У ПРОЦЕСІ ТЕХНІЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ

Судновий технічний засіб	Вузол	Параметр технічного стану	Діагностичний параметр
Відцентровий насос	сальник	наявність нещільності	відсутній
	підшипники	1. Люфти: осевий, радіальний 2. Наявність ямковості доріжок і кульок або роликів	Віброшвидкість, Віброприскорення, Віброударний імпульс
	Ущільнювальна поверхня робочого колеса і кільця	Знос пари тертя робоче колесо-ущільнювальне кільце: зазор в ущільненні	Подача насоса, напір
	Робоче колесо	Знос поверхні робочого колеса	Віброшвидкість, Віброприскорення, Віброударний імпульс
Деталі ЦПГ малооборотного двигуна	Поверхня кепа, кільце за висотою	Знос пари кільце-кеп: зазор у кепі, висота кільця, висота канавки, швидкість зношення	Вимірювання витрати повітря пневмоіндикатором
	Робоча поверхня втулки, поршневі кільця	Зношення пари втулка-кільце: зазор у замку, діаметр втулки, ширина кільця, зовнішній вигляд робочої поверхні втулки і кільця, швидкість зношення	Візуально, вимірювання витрати повітря пневмоіндикатором
	поршневі кільця	Цілісність кілець Цілісність кілець Рухливість кілець Прилягання кілець	Візуально, вимірювання витрати повітря пневмоіндикатором
	Відкладення на робочих поверхнях	Характер нагару в кепах, у продувних вікнах	Візуально, вимірювання витрати повітря пневмоіндикатором
	Маслорозподільні канавки	Стан кромок канавок	Візуально
	Продувний ресивер	Характер відкладень	Візуально
	Головка поршня	Глибина пошкоджень головки, стан поверхні юбки, характер відкладень	Візуально

ДОДАТОК К
АНАЛІЗ МЕТОДІВ ТЕХНІЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ ВАНТАЖНИХ СУДЕН

У цьому додатку подано Таблицю К.1 із критеріями та результатами моделювання процесів технічного обслуговування при застосуванні різних методів технічного обслуговування. Слід враховувати, що коефіцієнти готовності та технічного використання можуть бути отримані при введенні додаткових вихідних даних про тривалість планового ТО і відновлення після відмови.

Таблиця К.1 – Аналіз методів ТО вантажних суден

Критерії	Результати моделювання по впровадженню різних методів технічного обслуговування			
	По відмовам	За регламентом	За технічним станом	Комплексний
Витрати за цикл експлуатації	+	+	+	+
Середнє напрацювання до відмови	+	+	+	+
Коефіцієнт готовності	+	+	+	+
Коефіцієнт технічного використання	+	+	+	+
Витрати на непланове ТО за цикл експлуатації	+	+	+	+
Ймовірність попередження відмови	+	+	+	+
Ймовірність своєчасного ТО	-	+	-	+
Ймовірність передчасного ТО	-	+	-	+
Тривалість циклу експлуатації	-	+	+	+
Використаний ресурс	-	+	+	+
Ймовірність регламентного ТО	-	-	-	+
Ймовірність ТО за станом	-	-	-	+
Питомі витрати на ТО за станом	-	-	+	+
Витрати на планове ТО за цикл експлуатації	-	+	+	+
Питомі витрати на ТО	+	+	+	+
Питомі витрати на планове ТО	-	+	+	+
Питомі витрати на непланове ТО	+	+	+	+
Питомі витрати на регламентне ТО	-	+	-	+
Питомі витрати на контроль технічного стану	-	-	+	+

ДОДАТОК Л

ТАБЛИЦІ ТИПІЗАЦІЇ ДАНИХ І АНАЛІТИЧНІ ФОРМУЛИ ОСНОВНИХ ІНФОРМАЦІЙНІЙНИХ ЕЛЕМЕНТІВ СИСТЕМИ КПТОВС

Таблиця Л.1 – Основні інформаційні елементи об’єктів автоматизації для системи ТО і умов експлуатації в підсистемі 1

№	Позначення	Найменування	Тип даних	Од. вимір.
Основні показники ефективності прескриптивної системи технічного обслуговування вантажного судна				
1	q_1	Ймовірність того, що судно технічно придатне до плавання протягом наступного періоду	double	-
2	q_2	Ймовірність перебування в процесі періодичної автоматизованої перевірки	double	-
3	q_3	Ймовірність перебування в процесі планового технічного обслуговування	double	-
4	q_4	Ймовірність перебування на позаплановому технічному обслуговуванні	double	-
5	q_5	Ймовірність перебування в процесі усунення відмов елементів суднових технічних засобів, технічний стан яких постійно контролюється	double	-
6	q_6	Ймовірність перебування в процесі ремонту пошкоджених елементів суднових технічних засобів, технічний стан яких постійно контролюється	double	-
7	q_7	Ймовірність перебування в стані помилкової відмови при ремонтно-відновлювальних роботах	double	-
8	q_8	Ймовірність перебування в стані прихованого пошкодження через відмову елементів суднових технічних засобів, технічний стан яких контролюється під час планового технічного обслуговування	double	-
9	q_9	Ймовірність перебування в стані прихованої відмови через втрату працездатності елементів суднових технічних засобів, технічний стан яких контролюється під час планового технічного обслуговування	double	-
10	q_{10}	Ймовірність перебування в процесі усунення несправностей і пошкоджень під час планового технічного обслуговування	double	-
11	q_{11}	Ймовірність перебування в стані прихованої відмови через втрату працездатності елементів суднових технічних засобів, технічний стан яких контролюється під час періодичної автоматизованої перевірки	double	-
12	q_{12}	Ймовірність перебування в стані прихованого пошкодження через відмову елементів суднових технічних засобів, технічний стан яких контролюється під час періодичної автоматизованої перевірки	double	-
13	q_{13}	Ймовірність перебування в процесі усунення відмов і пошкоджень під час періодичної автоматизованої перевірки	double	-
Допоміжні показники ефективності прескриптивної системи технічного обслуговування вантажного судна				
14	q_{14}	Параметр інтенсивності пошкодження елементів суднових технічних засобів, технічний стан яких контролюється під час планового технічного обслуговування	double	рік$^{-1}$
15	q_{15}	Параметр інтенсивності відмов елементів суднових технічних засобів, технічний стан яких контролюється під час планового технічного обслуговування	double	рік$^{-1}$
16	q_{16}	Параметр інтенсивності пошкодження елементів суднових технічних засобів, технічний стан яких контролюється під час періодичної автоматизованої перевірки	double	рік$^{-1}$
17	q_{17}	Параметр інтенсивності відмов елементів суднових технічних засобів, технічний стан яких контролюється під час періодичної автоматизованої перевірки	double	рік$^{-1}$
18	q_{18}	Параметр інтенсивності пошкодження елементів суднових технічних засобів, технічний стан яких постійно контролюється	double	рік$^{-1}$
19	q_{19}	Параметр інтенсивності відмов елементів суднових технічних засобів, технічний стан яких постійно контролюється	double	рік$^{-1}$

№	Позна-чення	Найменування	Тип даних	Од. вимір.
20	q_{20}	Параметр інтенсивності відмов і пошкоджень елементів суднових технічних засобів в навантаженому режимі під час планового технічного обслуговування	double	рік$^{-1}$
21	q_{21}	Параметр інтенсивності відмов і пошкоджень елементів суднових технічних засобів в навантаженому режимі під час періодичної автоматизованої перевірки	double	рік$^{-1}$
22	q_{22}	Інтенсивність помилок виконавців у процесі планового технічного обслуговування	double	рік$^{-1}$
23	q_{23}	Інтенсивність помилок виконавців у процесі періодичної автоматизованої перевірки	double	рік$^{-1}$
24	q_{24}	Ймовірність помилок першого роду	double	-
25	q_{25}	Ймовірність помилок другого роду	double	-
26	q_{26}	Тривалість планового технічного обслуговування	double	год
27	q_{27}	Тривалість періодичних автоматизованих перевірок	double	год
28	q_{28}	Тривалість позапланового технічного обслуговування	double	год
29	q_{29}	Частота періодичних автоматизованих перевірок	double	год$^{-1}$
30	q_{30}	Частота планового технічного обслуговування	double	рік$^{-1}$
31	q_{31}	Частота позапланового технічного обслуговування	double	рік$^{-1}$
32	q_{32}	Часові витрати на усунення відмов і пошкоджень під час планового технічного обслуговування	double	год
33	q_{33}	Часові витрати на усунення відмов і пошкоджень під час періодичних автоматизованих перевірок	double	год
34	q_{34}	Часові витрати на усунення відмов і пошкоджень елементів суднових технічних засобів, технічний стан яких постійно контролюється	double	год
Уточнюючі показники ефективності прескриптивної системи технічного обслуговування вантажного судна				
35	q_{35}	Тривалість використання інструменту моніторингу технічного стану (e) для кожної форми технічного обслуговування (m)	double	год
36	q_{36}	Тривалість робіт (s) для кожної форми технічного обслуговування (m)	double	год
37	q_{37}	Тривалість періоду між виконаними роботами (s) технічного обслуговування (m) для N СТЗ і К	double	год
38	q_{38}	Трудомісткість робіт (s) для кожної форми технічного обслуговування (m)	double	люд. год
39	q_{39}	Вартість виконання робіт (s) для кожної форми технічного обслуговування (m)	double	дол. США
40	q_{40}	Час до наступного виконання робіт (s) кожної форми технічного обслуговування (m) для N СТЗ і К (за часовим поясом GMT)	double	
Комплексні коефіцієнти ефективності прескриптивної системи технічного обслуговування вантажного судна				
41	q_{41}	A_R – Коефіцієнт технічної придатності судна до плавання	double	-
42	q_{42}	π – Узагальнений показник ефективності використання ресурсів у системі прескриптивного технічного обслуговування	double	-
Показники умов експлуатації судна				
43	q_{43}	Час збирання інформації (за часовим поясом GMT)	uint64	сек
44	q_{44}	Температура води навколо судна	double	℃
45	q_{45}	Навігаційний запас глибини під кілем судна	double	м
46	q_{46}	Атмосферний тиск	double	кПа
47	q_{47}	Висота хвиль	double	м
48	q_{48}	Частота хвиль	double	Гц
49	q_{49}	Температура повітря	double	℃
50	q_{50}	Позиція судна - широта по GPS	double	градус
51	q_{51}	Позиція судна - довгота по GPS	double	градус
52	q_{52}	Швидкість руху судна по GPS	double	вузлів
53	q_{53}	Швидкість руху судна за лагом	double	вузлів
54	q_{54}	Порівняння швидкостей	double	вузлів
Дані по судну				
55	q_{55}	Осадка судна	double	м
56	q_{56}	Витрати пального на певний проміжок часу (доба)	double	т

№	Позначення	Найменування	Тип даних	Од. вимір.
57	q_{57}	Залишок пального	double	т
58	q_{58}	Подолана відстань від початку вимірювань	double	морських миль
59	q_{59}	Подолана відстань за добу	double	морських миль
60	q_{60}	Потужність головного двигуна (двигунів)	double	кВт
61	q_{61}	Потужність суднової електростанції	double	кВт
62	q_{62}	IMO номер судна (ідентифікація судна)	uint64	-

Таблиця Л.2 – Основні інформаційні елементи об’єктів автоматизації для СТЗ і К, пристроїв моніторингу і умов експлуатації в підсистемі 2

№	Позначення	Найменування	Тип даних	Од. вимір.
63	q_{63}	Контрольовані робочі параметри N СТЗ і К (температура, тиск, потужність, шум, вібрація, частота обертання, подача (напір), розміри деталей об’єкту, зазори, суцільність та ін.)	double	…
64	q_{64}	Технічний стан N СТЗ і К	text	-
65	q_{65}	Залишковий ресурс N СТЗ і К	double	год
66	q_{66}	Напрацювання N СТЗ і К	double	год
67	q_{67}	Напрацювання до відмови N СТЗ і К	double	год
68	q_{68}	Опис попередньої відмови	text	-
69	q_{69}	Час попередньої відмови (за часовим поясом GMT)	double	сек
Показники умов експлуатації судна і пристроїв моніторингу				
70	q_{70}	Кількість повідомлень від пристроїв моніторингу	double	-
71	q_{71}	Стан пристроїв моніторингу	bool	-
72	q_{72}	Час збирання інформації (за часовим поясом GMT)	double	сек
73	q_{73}	Атмосферний тиск	double	кПа
74	q_{74}	Температура повітря	double	°C
75	q_{75}	Висота хвиль	double	м
76	q_{76}	Частота хвиль	double	Гц
Дані по судну				
77	q_{77}	IMO номер судна (ідентифікація судна)	uint64	-
78	q_{78}	Подолана відстань від початку вимірювань	double	морських миль
79	q_{79}	Подолана відстань за добу	double	морських миль
80	q_{80}	Потужність головного двигуна (двигунів)	double	кВт
81	q_{81}	Потужність суднової електростанції	double	кВт
82	q_{82}	Час подолання відстані від початку вимірювань	double	год
83	q_{83}	Час подолання відстані за добу	double	год
84	q_{84}	Час роботи головного двигуна (двигунів)	double	год
85	q_{85}	Час роботи суднової електростанції	double	год

Таблиця Л.3 – Система диференціальних рівнянь основних показників ефективності прескриптивної системи ТО вантажного судна в підсистемі 1

№	Диференціальне рівняння
1	$\frac{dq_1(t)}{dt} = -(i_{1-2} + i_{1-3} + i_{1-4} + i_{1-5} + i_{1-7} + i_{1-8} + i_{1-10} + i_{1-11} + i_{1-12})q_1(t) + +i_{2-1}q_3(t) + i_{3-1}q_2(t) + i_{10-1}q_5(t) + i_{11-1}q_6(t) + i_{12-1}q_4(t);$
2	$\frac{dq_2(t)}{dt} = i_{1-3}q_1(t) - (i_{3-1} + i_{3-9} + i_{3-13})q_2(t) + i_{9-3}q_{13}(t) + i_{13-3}q_7(t);$
3	$\frac{dq_3(t)}{dt} = i_{1-2}q_1(t) + (i_{2-1} + i_{2-6})q_3(t) + i_{6-2}q_{10}(t);$
4	$\frac{dq_4(t)}{dt} = i_{1-12}q_1(t) - i_{12-1}q_4(t);$
5	$\frac{dq_5(t)}{dt} = i_{1-10}q_1(t) - i_{10-1}q_5(t);$
6	$\frac{dq_6(t)}{dt} = i_{1-11}q_1(t) - i_{11-1}q_6(t);$
7	$\frac{dq_7(t)}{dt} = i_{3-13}q_2(t) - i_{13-3}q_7(t);$
8	$\frac{dq_8(t)}{dt} = i_{1-4}q_1(t) + i_{4-6}q_8(t);$
9	$\frac{dq_9(t)}{dt} = i_{1-5}q_1(t) + i_{5-6}q_9(t) + i_{6-5}q_{10}(t);$
10	$\frac{dq_{10}(t)}{dt} = i_{2-6}q_3(t) + i_{4-6}q_8(t) + i_{5-6}q_9(t) - (i_{6-2} + i_{6-5})q_{10}(t);$
11	$\frac{dq_{11}(t)}{dt} = i_{1-7}q_1(t) - i_{7-9}q_{11}(t) + i_{9-7}q_{13}(t);$
12	$\frac{dq_{12}(t)}{dt} = i_{1-8}q_1(t) - i_{8-9}q_{12}(t);$
13	$\frac{dq_{13}(t)}{dt} = i_{3-9}q_2(t) + i_{7-9}q_{11}(t) + i_{8-9}q_{12}(t) - (i_{9-3} + i_{9-7})q_{13}(t).$

Таблиця Л.4 – Можливі стани СТЗ (об’єкт контролю) в узагальненій моделі системи прескриптивного ТО

Позначення	Найменування стану
1	СТЗ знаходиться в стані готовності до роботи
2	Проводиться планове технічне обслуговування. Технічна придатність знижена.
3	Проводиться періодична автоматизована перевірка. Технічна придатність знижена.
4	СТЗ знаходиться в стані прихованого пошкодження з причини пошкодження його елементів, технічний стан яких контролюється під час планового технічного обслуговування.
5	СТЗ знаходиться в стані прихованої відмови з причини втрати працездатності його елементів, технічний стан яких контролюється під час планового технічного обслуговування.
6	Усунення пошкоджень і відмов під час планового технічного обслуговування. Технічна придатність знижена.
7	СТЗ знаходиться в стані прихованої відмови з причини втрати працездатності його елементів, технічний стан яких контролюється під час періодичної автоматизованої перевірки.
8	СТЗ знаходиться в стані прихованого пошкодження з причини пошкодження його елементів, технічний стан яких контролюється під час періодичної автоматизованої перевірки.
9	Усунення пошкоджень і відмов під час періодичної автоматизованої перевірки. Технічна придатність знижена.
10	Усунення відмов СТЗ, технічний стан яких технічний стан яких постійно контролюється. Технічна придатність знижена.
11	Усунення пошкоджень СТЗ, технічний стан яких технічний стан яких постійно контролюється. Технічна придатність знижена.
12	На СТЗ проводиться позапланове технічне обслуговування. Технічна придатність знижена.
13	СТЗ знаходиться в стані помилкової відмови, і щодо нього виконуються ремонтно-відновлювальні роботи. Технічна придатність знижена.

Таблиця Л.5 – Можливі переходи між станами СТЗ (об’єкт контролю) в узагальненій моделі системи прескриптивного ТО

Позначення	Найменування переходу між станами	Інтенсивність переходу між станами
i_{1-2}	Перехід готового до роботи СТЗ на планове технічне обслуговування.	$1/q_{30}$
i_{1-3}	Перехід готового до роботи СТЗ на періодичну автоматизовану перевірку.	$1/q_{29}$
i_{1-4}	Пошкодження які контролюються під час планового технічного обслуговування.	$q_{14} = (1-\gamma)\omega_{reg}$
i_{1-5}	Відмова елементів, технічний стан яких контролюється під час планового технічного обслуговування.	$q_{15} = \gamma\omega_{reg}$, $\omega_{reg} = b_{reg}\omega_{\Sigma}$
i_{1-7}	Відмова елементів, технічний стан яких контролюється під час періодичної автоматизованої перевірки.	$q_{17} = \gamma\omega_{pav}$, $\omega_{pav} = b_{pav}\omega_{\Sigma}$
i_{1-8}	Пошкодження які контролюються під час періодичної автоматизованої перевірки.	$q_{16} = (1-\gamma)\omega_{pav}$
i_{1-10}	Відмова елементів, технічний стан яких постійно контролюється.	$q_{18} = \gamma\omega_{cm}$, $\omega_{cm} = b_{cm}\omega_{\Sigma}$
i_{1-11}	Пошкодження елементів, технічний стан яких постійно контролюється.	$q_{18} = (1-\gamma)\omega_{cm}$
i_{1-12}	Перехід СТЗ на позапланове технічне обслуговування.	$1/q_{31}$
i_{2-1}	Перехід СТЗ після закінчення планового технічного обслуговування в стан технічної придатності до використання за призначенням.	$1/q_{26}$
i_{2-6}	Відмова СТЗ в процесі планового технічного обслуговування.	$q_{20} + q_{22}$, $q_{20} = 10^2 \div 10^3\omega_{reg}$
i_{3-1}	Перехід СТЗ після закінчення періодичної автоматизованої перевірки в стан технічної придатності до використання за призначенням.	$\frac{(1-q_{24})}{q_{27}}$
i_{3-9}	Відмова СТЗ в процесі періодичної автоматизованої перевірки.	$q_{21} + q_{23}$, $q_{21} = 10^2 \div 10^3\omega_{pav}$
i_{3-13}	Помилкова відмова СТЗ в процесі періодичної автоматизованої перевірки.	q_{24}/q_{27}
i_{4-6}	Перехід пошкодженого СТЗ на планове технічне обслуговування.	$\left[q_{30} - \frac{1-e^{-q_{14}q_{30}}}{q_{14}}\right]^{-1}$
i_{5-6}	Перехід СТЗ з відмовою на планове технічне обслуговування.	$\left[q_{30} - \frac{1-e^{-q_{15}q_{30}}}{q_{15}}\right]^{-1}$
i_{6-2}	Усунення відмов і пошкоджень СТЗ в процесі планового технічного обслуговування.	$\frac{(1-q_{25})}{q_{32}}$
i_{6-5}	Перехід СТЗ в стан прихованої відмови з причини помилкової відмови його елементів, технічний стан яких контролюється під час планового технічного обслуговування.	$\frac{q_{25}}{q_{32}}$
i_{7-9}	Перехід пошкодженого СТЗ на періодичну автоматизовану перевірку.	$\left[q_{29} - \frac{1-e^{-q_{17}q_{29}}}{q_{17}}\right]^{-1}$
i_{8-9}	Перехід СТЗ з відмовою на періодичну автоматизовану перевірку.	$\left[q_{29} - \frac{1-e^{-q_{16}q_{29}}}{q_{16}}\right]^{-1}$
i_{9-3}	Перехід СТЗ на підтверджуючу періодичну автоматизовану перевірку після усунення відмов і пошкоджень	$\frac{1-q_{25}}{q_{33}+q_{27}}$
i_{9-7}	Перехід СТЗ в стан прихованої відмови з причини помилкового пропущеним відмови його елементів, технічний стан яких контролюється під час періодичної автоматизованої перевірки.	$\frac{q_{25}}{q_{27}}$
i_{10-1}	Перехід СТЗ в стан технічної придатності після усунення відмов його елементів, технічний стан яких постійно контролюється	q_{34}^{-1}
i_{11-1}	Перехід СТЗ в стан технічної придатності після усунення пошкоджень його елементів, технічний стан яких постійно контролюється	q_{34}^{-1}
i_{12-1}	Перехід СТЗ в стан технічної придатності, після позапланового технічного обслуговування	q_{28}^{-1}
i_{13-3}	Перехід СТЗ на підтверджуючу періодичну автоматизовану перевірку після ремонтно-відновлювальних робіт на СТЗ із помилковою відмовою	q_{33}^{-1}

Таблиця Л.6 – Морфологічна матриця схем цифрових стратегій системи КПТОВС

Класифікаційна ознака		Альтернативні значення класифікаційних ознак			
Номер	Найменування	Номер	Найменування групи ознак	Номер	Найменування ознаки
1	Топологія даних, що лежить в основі цифрової стратегії	11	Цифрова модель	-	-
		12	Цифрова тінь	-	-
		13	Цифровий двійник	-	-
2	Методи предиктивної аналітики	21	Метод машинного навчання / інтелектуального аналізу даних	2101	Випадковий пошук
				2102	Дерево ухвалення рішень
				2103	Евристика на основі кластеризації
				2104	Розпізнавання образів
				2105	Випадковий ліс
				2106	Гауссівський процес
				2107	Дерево умовного висновку
				2108	Метод опорних векторів
				2109	Ансамблеве навчання
				2110	Штучна нейронна мережа
				2111	Метод k-найближчих сусідів
				2112	Методи ядра
				2113	Багатошаровий перцептрон
				2114	Дерево з градієнтним підсиленням
		22	Метод статистичного аналізу	2201	Лінійна регресія
				2202	Множинна лінійна регресія
				2203	Рангова регресія
				2204	Авторегресійне інтегроване ковзне середнє
				2205	Логістична регресія
				2206	Багатофакторна логістична регресія
				2207	Оцінювання щільності
				2208	Регресія за опорними векторами
		23	Ймовірнісні моделі	2301	Прихована марковська модель
				2302	Байєсівська мережа
				2303	Монте-Карло марковських ланцюгів
3	Методи прескриптивної аналітики	31	Метод машинного навчання / інтелектуального аналізу даних	3101	Кластеризація методом k-середніх
				3102	Навчання із підкріпленням
				3103	Збереження приватності
				3104	Машина Больцмана
				3105	Оцінка Надарая-Вотсона

Класифікаційна ознака		Альтернативні значення класифікаційних ознак			
Номер	Найменування	Номер	Найменування групи ознак	Номер	Найменування ознаки
				3106	Штучні нейронні мережі
		32	Метод імітаційного моделювання	3201	Симуляція у випадковому лісі
				3202	Оцінка ризиків
				3203	Стохастична симуляція
				3204	Сценарії «Що-якщо»
		33	Моделі на основі логіки	3301	Правила асоціації
				3302	Правила прийняття рішень
				3303	Правила на основі критеріїв
				3304	Нечіткі правила
				3305	Розподілені правила
				3306	Правила оцінювання
				3307	Функція бажаності
				3308	Рекомендації на основі графів
				3309	Метод Кіплінга (5W1H)
		34	Еволюційні обчислення	3401	Генетичний алгоритм
				3402	Еволюційна оптимізація
				3403	Жадібний алгоритм
				3404	Часткова оптимізація рою
		35	Ймовірнісні моделі	3501	Марковський процес прийняття рішень
				3502	Прихована марковська модель
				3503	Ланцюг Маркова
		36	Математичне програмування	3601	Змішано-цілочислове програмування
				3602	Лінійне програмування
				3603	Бінарне квадратичне програмування
				3604	Нелінійне програмування
				3605	Бінарне лінійне цілочислове програмування
				3606	Стохастична оптимізація
				3607	Умовна стохастична оптимізація
				3608	Обмежена Байєсова оптимізація
				3609	Нечітка лінійна оптимізація
				3610	Надійна та адаптивна оптимізація
				3611	Динамічне програмування
				3612	Оптимальний шлях пошуку

ДОДАТОК М

ОСНОВНІ ПРИНЦИПИ, ОПИСИ ПРОЦЕДУР, СХЕМ, ПІДСИСТЕМ, ФАКТОРІВ, КЛАСИФІКАЦІЇ, ОСОБЛИВОСТІ ПРОЦЕСІВ

М1. Вихідні дані аналізу стану ТО вантажних суден

Поняття ефективності системи технічного обслуговування відноситься до операції, під якою розуміють будь-яку узгоджену сукупність дій, об'єднаних спільним задумом і єдиною метою. Вантажне судно, яке розглядається як засіб транспорту або технічна система, в операції виступає активним засобом досягнення мети, і в цьому розумінні поняття ефективності операції ототожнюють із поняттям ефективності засобу транспорту або технічної системи. Ступінь відповідності реального результату операції потрібному називають ефективністю операції. Спосіб використання активних засобів в операції називають стратегією. Результат операції, а отже, і її ефективність визначаються якістю засобу транспорту або технічної системи, умовами та способами її застосування за цільовим призначенням.

У практиці дослідження ефективності зазвичай виокремлюють проблему оцінки ефективності та проблему вибору раціонального способу дій (вибору стратегій). Оцінка ефективності передбачає формулювання мети (необхідного результату) операції, вибір і обґрунтування показника ефективності, що кількісно виражає (вимірює) ступінь відповідності реального результату операції необхідному, обчислення значення обраного показника для заданих умов і стратегії.

Проблема вибору стратегії (раціональної поведінки) передбачає, окрім перелічених вище етапів, встановлення провідного принципу поведінки і формування на його основі критерію ефективності, тобто вирішального правила, що дає змогу зіставляти стратегії та здійснювати спрямований вибір стратегій із безлічі допустимих.

Надійність є складною властивістю, яка залежно від призначення виробу та умов його застосування складається з поєднання властивостей: безвідмовності, довговічності, ремонтної придатності та збереженості.

Для конкретних виробів і умов їхньої експлуатації ці властивості мають різну відносну значущість. Наприклад, надійність деяких елементів, що не ремонтуються, зводиться здебільшого до їхньої безвідмовності та довговічності, а для ремонтованих елементів особливо важливою може виявитися їхня ремонтопридатність.

Властивості безвідмовності та довговічності характерні тільки для царини понять надійності, а властивості збереженості та ремонтопридатності перетинаються з цариною понять надійності, маючи, крім того, і самостійне значення.

Кількісно надійність оцінюють відповідними показниками, номенклатуру яких обирають з урахуванням особливостей засобу транспорту, режимів, умов його експлуатації та наслідків відмов.

Для систем створення, експлуатації, технічного обслуговування засобів транспорту основною метою є досягнення необхідних експлуатаційних властивостей засобів транспорту, що створюються та експлуатуються, забезпечення та підтримання їхньої надійності. Отже, на ряду з ефективністю використання засобів транспорту, їх якість та надійність можуть бути використані для вимірювання вихідного ефекту таких систем і для формування показника їх ефективності.

Метою створення систем обслуговування та ремонту засобів транспорту є підтримання на належному рівні їхніх експлуатаційних властивостей шляхом реалізації тієї чи іншої стратегії обслуговування та ремонтів. Часто вдається цей аспект експлуатації засобів транспорту дослідити автономно з тим, щоб використати отримані інтегральні характеристики при подальшому комплексному дослідженні. Тим паче, що такі системи часто створюються для обслуговування кількох видів засобів транспорту. Для оцінювання якості роботи систем обслуговування часто використовують характеристики витрат часу, займаного ремонтом і обслуговуванням, з урахуванням очікування черги, різних пріоритетів тощо.

Широкий клас систем контролю охоплює: системи виробничого контролю, системи контролю та діагностики, що використовуються під час підготовки засобів транспорту до застосування, системи оперативного контролю та управління функціонуванням тощо. Це можуть бути багатоконтурні автоматизовані системи, що включають у контури операторів і ЕОМ. Корисний ефект від використання систем контролю може визначатися і зменшенням кількості відмов механізмів, і скороченням часу підготовки засобу транспорту до роботи, і підвищенням ефективності цільового контуру (для систем оперативного контролю та управління функціонуванням).

Цей підхід може бути пояснений, якщо розглянути загальну схему взаємозв’язків завдань, які розв’язуються в судноплавній компанії (Рисунок М1.2). Залежність рішення деяких завдань від даних, отриманих при вирішенні інших завдань, які здаються недостатньо пов’язаними між собою, призводить до того, що на практиці оцінюється та аналізується саме технічна експлуатація морських транспортних засобів, і відповідно до цього формуються показники ефективності саме технічної експлуатації. Однак, аналіз такої важливої складової, як системи технічного обслуговування морських транспортних засобів, часто залишається поза увагою.

Для оптимізації підходів до управління системами технічного обслуговування вантажних суден, необхідно розробити відповідні методики та інструменти, які дозволять проводити комплексний аналіз різних аспектів судноплавної діяльності, зокрема систем технічного обслуговування. Це може сприяти виявленню потенційних проблем та резервів для підвищення ефективності використання флоту вантажних суден та забезпечення сталого розвитку судноплавних компаній. [123]

Відповідно до світового досвіду, успішна експлуатація вантажних суден вимагає ретельного аналізу інформації про стан систем технічного

обслуговування та їх складових. На основі такого аналізу можна розробляти обґрунтовані висновки для впровадження відповідних заходів та контролю за їх виконанням у виробництві. Вирішити цю проблему без використання сучасних інформаційних технологій неможливо. [314]

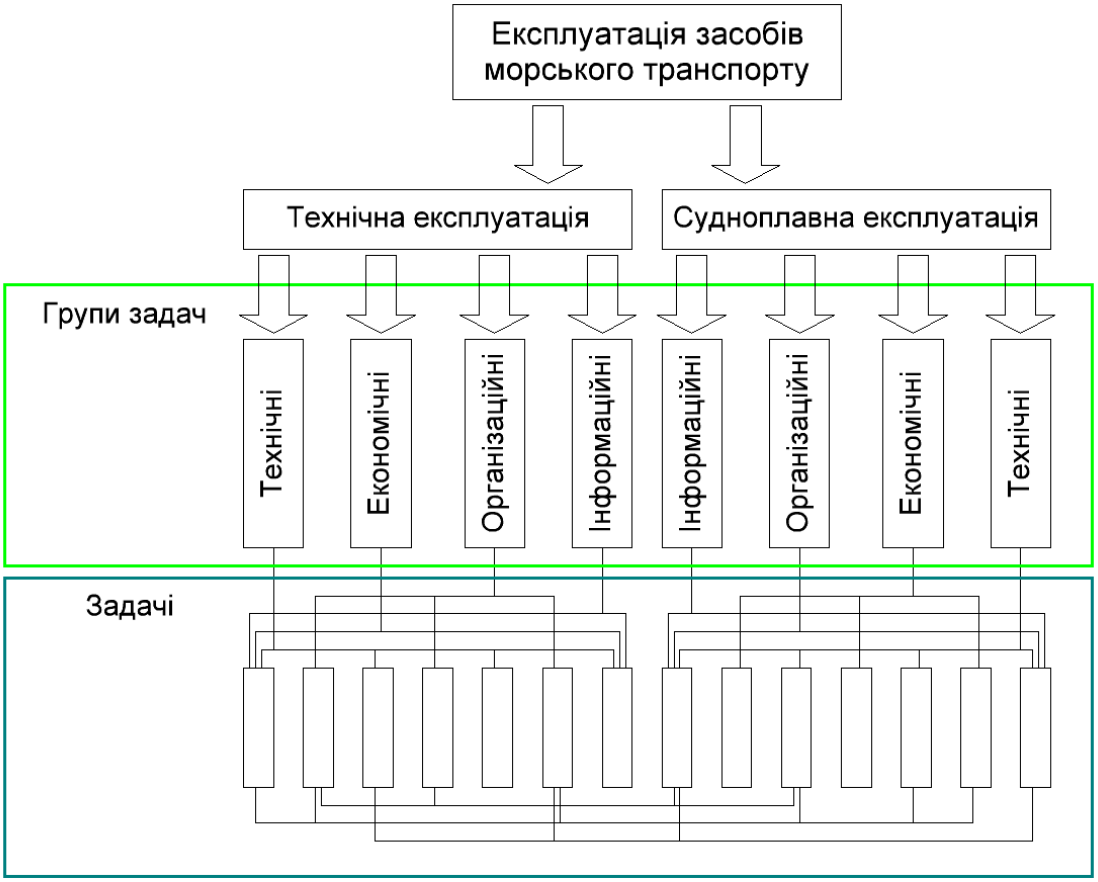


Рисунок М1.2 - Схема взаємозв'язків між виробничими задачами, пов'язаними з експлуатацією вантажних суден

В результаті виконаних досліджень розроблена структурно-функціональна модель ІКС з технічного обслуговування вантажних суден, яка лягла в основу розробленого і впровадженого комплексу програм і інформаційних систем [420, 421, 422, 423, 424, 425, 426, 429]. Цей комплекс дозволяє реалізувати:

1. Принцип безперервного відстеження динаміки зміни показників ефективності системи технічного обслуговування конкретного судна.
2. Методи виявлення ранніх стадій погіршення процесу технічного обслуговування вантажних суден.
3. Прогнозування рівня технічної придатності судна до використання за призначенням.
4. Оцінювання ефективності заходів, направлених на підтримку і підвищення рівня ефективності систем технічного обслуговування вантажних суден, зокрема технічної придатності до використання за призначенням.
5. Контроль рівня ефективності системи технічного обслуговування конкретного судна з метою мінімізації витрат на його технічне обслуговування.

Розроблено математичне забезпечення ІКС для судноплавства, яке базується на модифікованих методах з метою зниження трудомісткості

обчислювальних процедур обробки інформації. Проведені дослідження дозволили обґрунтувати і розробити метод розрахунку показників якості систем технічного обслуговування пасажирських суден та їхніх комплектуючих, призначені для оцінки і аналізу динаміки зміни процесу технічного обслуговування в конкретній судноплавній компанії.

Запропонована методика оцінки ефективності заходів, які впроваджуються з метою підтримання або підвищення рівня безпеки і регулярності плавання в галузі технічного обслуговування пасажирських суден, дозволяє забезпечити належний рівень якості обслуговування та безпеки пасажирів і екіпажу.

Спроби автоматизації збору, обробки та аналізу статистичних даних, накопичених в процесі експлуатації, почалися ще у 1960-х роках XX століття. Обчислювальна техніка, методики та алгоритми обробки інформації поступово вдосконалювались та ставали все більш доступними. [77]

На початковому етапі використовувалась централізована модель обробки даних на основі мейнфреймів, які переважали до середини 1980-х років XX століття. Протягом кількох років ця модель поступилася позиціями на користь розподіленої архітектури однорангових мереж персональних комп’ютерів (ПК). Однак, згодом спостерігалася тенденція до знову централізації ресурсів системи, і сьогодні у центрі уваги перебуває технологія клієнт/сервер на базі Інтернет-технологій, які ефективно поєднують переваги своїх попередників. Процес еволюції цих інформаційних систем (ІС) можна розглянути у вигляді послідовності чотирьох етапів. [167]

На першому етапі (1960-1970 роки) інформаційні системи (ІС) базувалися на мейнфреймах, дотримуючись принципу "одне підприємство - один центр обробки" та вирішували завдання, переважно пов’язані з накопиченням даних та їх простої обробки.

Другий етап (1970-1980 роки) характеризується децентралізацією ІС, в результаті чого користувачі почали застосовувати інформаційні технології на відділах підприємств за допомогою міні-комп’ютерів. Одночасно активно впроваджувалися високопродуктивні системи управління базами даних (СУБД) та комерційні пакети прикладних програм. Отже, ключовим нововведенням ІС другого етапу стала дворівнева модель організації системи "мейнфрейм - міні-комп’ютер відділень і офісів" з централізованою базою даних (БД) та прикладними пакетами. На цьому етапі було розроблено та впроваджено перші серйозні автоматизовані системи для інформаційної підтримки технічної експлуатації флоту суден у великих пароплавствах СРСР.

Третій етап (1980 - початок 1990-х років) пов’язаний з бумом розподіленої мережної обробки, головним драйвером якого став масовий перехід користувачів з мейнфреймів та міні-комп’ютерів на ПК. Корпоративна логіка вимагала об’єднання робочих місць у єдину ІС, внаслідок чого з’явилися обчислювальні мережі та розподілена обробка. Однак, вже на початку 1990-х років в однорангових мережах почали проявлятися перші ознаки ієрархічності – спочатку у вигляді виділених файл-серверів, серверів друку та телекомунікацій, а потім і серверів прикладних програм. На певному етапі зростаючу потребу в

концентрації ресурсів ІС, відповідальних за адміністрування системи, підтримку корпоративних БД та виконання з ними пов’язаного централізованого програмного забезпечення, вдалося задовольнити в моделі "середнього калібру" за рахунок використання UNIX-серверів.

Четвертий етап (починаючи з 1990-х років) характеризується подальшим розвитком технологій клієнт-сервер [433], що базуються на Інтернет-технологіях, які ефективно поєднують переваги попередніх етапів [399]. Завдяки широкому впровадженню веб-сервісів та хмарних технологій, розвитку мобільних пристроїв та інтернету речей (IoT), інформаційні системи стали все більш гнучкими, інтегрованими та доступними для користувачів [432].

В результаті цих етапів еволюції ІС, сучасні підходи до обробки та аналізу інформації включають інтеграцію великих обсягів даних з різних джерел, застосування штучного інтелекту та машинного навчання для оптимізації процесів, застосування цифрових двійників для оптимізації систем технічного обслуговування, а також розвиток спеціалізованих інформаційних систем для різних галузей, включаючи технічну експлуатацію флоту суден.

Доступність сучасної комп’ютерної техніки, її порівняно низька вартість, виникнення ефективних систем програмування, які дозволяють обмеженим колективам розробників у короткий час розробляти складні прикладні програми, призвели до появи значної кількості продуктів, які здебільшого реалізовані у формі так званих автоматизованих робочих місць, спрямованих на підтримку різноманітних процесів експлуатації засобів транспорту [433], зокрема водного транспорту [42]. Однак впровадження подібних систем не вдалося вирішити ключові проблеми технології обміну інформацією як між підрозділами судноплавних компаній, так і між судноплавними компаніями, адміністрацією судноплавства та підприємствами морської промисловості [152]. До них, в першу чергу, слід віднести:

- Відсутність стандартизації форматів та протоколів обміну даними, що ускладнює взаємодію різних інформаційних систем [86];
- Недостатній рівень інтеграції різних автоматизованих робочих місць, що призводить до неконтрольованого росту дублювання інформації, збільшення трудомісткості та витрат на підтримку різних програмних продуктів [320];
- Необхідність постійного оновлення даних про стан експлуатації засобів водного транспорту та відсутність єдиної системи контролю якості обміну інформацією [227];
- Відсутність єдиної методології обробки, аналізу та використання інформації, що може призвести до розриву між теоретичними знаннями та практичними задачами [132];
- Обмеження доступу до відповідних джерел інформації, які можуть бути критичними для безпеки та ефективності експлуатації засобів водного транспорту, через проблеми зі зберіганням та передачею даних між різними організаціями та інформаційними системами [270];

- Відсутність чіткої системи оцінки ризиків та прогнозування можливих наслідків для засобів водного транспорту, пов’язаних з різними факторами, такими як екологічні зміни, технічні дефекти та недоліки у підготовці персоналу [332];
- Недостатній рівень координації дій між різними суб’єктами судноплавства, включаючи адміністрацію судноплавства, підприємства морської промисловості, страхові компанії, порти та інші інфраструктурні об’єкти, що може призвести до збільшення витрат та зниження ефективності роботи судноплавних компаній [315];
- Неадекватне забезпечення конфіденційності даних, що може призвести до витоку інформації, компрометації комерційної таємниці та порушення правил міжнародної та національної безпеки [284];
- Низька оперативність системи проявляється у значному часовому запізненні оновлення бази даних (БД) після завершення робіт. У результаті, суднoремонтні заводи отримують актуальну інформацію зі згаданою затримкою приблизно одного місяця, тоді як для конструкторських бюро (КБ) цей часовий проміжок складає близько півроку. Така низька оперативність відіграє негативну роль у процесі аналізу аварійних ситуацій та прийнятті невідкладних рішень на основі результатів робіт, виконаних на аварійному об’єкті, що ускладнює ефективне управління та координацію робіт у відповідних організаціях [31];
- Відсутність комплексних даних щодо поточного ресурсного стану флоту суден у суднoремонтних заводах та КБ, а також відсутність інформації про наявні відхилення від технічних вимог, є значним науково-технічним обмеженням. Це ускладнює проведення аналітичної роботи, спрямованої на підвищення ефективності експлуатації та ремонту суден, а також розробку нових технологій та технічних рішень для підтримки забезпечення безпеки та екологічної стабільності морського транспорту [136];
- Відсутність доступу до інформації про календарні плани судноплавних компаній, які стосуються місць та термінів виконання робіт за бюлетенями, у суднoремонтних заводах та КБ, призводить до виникнення проблем у координації та плануванні робіт. Це ускладнює оптимальне розподілення ресурсів, ефективне планування та виконання ремонтних робіт, а також складання календарного плану суднoремонтного заводу, що може вплинути на загальну продуктивність та якість послуг, наданих судноплавним компаніям [144];
- Непередбачуваність оперативного контролю з боку зовнішніх організацій щодо виконання робіт за бюлетенями може призвести до підвищення ризиків у сфері безпеки судноплавства. Відсутність своєчасного нагляду та відповідних заходів корекції у процесі виконання робіт може стати причиною недотримання технічних вимог та стандартів, що, в свою чергу, може мати негативний вплив на рівень безпеки судноплавства та якість обслуговування водного транспорту [318];
- Використання текстового формату представлення інформації, що передається суб’єктами, призводить до ускладнення її систематизації та

наступного статистичного аналізу. Оскільки різні суб'єкти мають власні інформаційні системи, виникають складнощі, пов'язані з високою трудомісткістю повторного введення даних, які надходять від судноплавних компаній. Це збільшує ймовірність внесення помилок та може мати негативний вплив на точність та достовірність обробки та аналізу інформації, що має значення для ефективного управління процесами судноплавства та суднoремонтних послуг [169].

У зв'язку з вище наведеними проблемами, є важливим проведення наукових досліджень, спрямованих на розробку нових методів та технологій обробки, передачі та аналізу інформації у сфері водного транспорту, розробка стандартів та протоколів обміну даними, а також вдосконалення системи оцінки ризиків та координації дій між різними суб'єктами судноплавства [122].

Стан розвитку сфери водного транспорту в Україні характеризується складними проблемами та викликами. Однією з перешкод є активне введення в експлуатацію суден іноземного виробництва, що призводить до зниження інтересу національних судноплавних компаній до впровадження наукових розробок українських науково-дослідних центрів. Судноплавні компанії сподіваються, що програмні комплекси, які є складовими частинами сучасних суден, дозволять комплексно вирішити майбутні завдання.

Крім того, керівництво судноплавних компаній не зовсім розуміє необхідності постійного фінансування вдосконалення розроблених програмних комплексів. Для цього потрібно було об'єднання зусиль усіх українських судноплавних компаній. На сучасному етапі розвитку українських судноплавних компаній необхідно впровадження корпоративних інформаційних систем, які включали б декілька цифрових стратегій для різних аспектів діяльності, таких як судноплавна експлуатація, технічне обслуговування, маркетинг, менеджмент та інше.

Перехід від назви "автоматизовані системи управління" до "цифрові стратегії" не є лише зміною абревіатури, але відображає досвід, накопичений протягом попередніх років. Це також відображає особливості виробничих процесів у судноплавних компаніях, методів та підходів до створення інформаційних мереж, баз даних та спеціалізованого програмного забезпечення.

Сприйняття впровадження корпоративних інформаційних систем та ІКС у судноплавних компаніях як інтегральної частини їх діяльності може привести до покращення ефективності, якість управління та координації дій між різними підрозділами і сторонніми організаціями. Окрім того, це допоможе виявити та вирішити проблеми, пов'язані з низькою оперативністю системи, а також забезпечити більш надійну та систематичну обробку інформації для наступного статистичного аналізу.

Суттєвим аспектом корпоративних інформаційних систем для судноплавних компаній є необхідність інтеграції з Глобальною мережею аналізу та інформації (GAIN - Global Analysis and Information Network). Великі та провідні судноплавні компанії, які вже використовують GAIN у своїй діяльності, включають [231]:

1. A.P. Moller-Maersk Group (Maersk Line) - Данія
2. Mediterranean Shipping Company (MSC) - Швейцарія
3. China COSCO Shipping Corporation Limited - Китай
4. CMA CGM Group - Франція
5. Hapag-Lloyd AG - Німеччина
6. Ocean Network Express (ONE) - Японія
7. Evergreen Marine Corp. - Тайвань
8. Hyundai Merchant Marine (HMM) - Південна Корея
9. Yang Ming Marine Transport Corporation - Тайвань
10. ZIM Integrated Shipping Services Ltd. – Ізраїль

Ці компанії розуміють важливість взаємодії та обміну інформацією в межах глобальної мережі для забезпечення ефективності та конкурентоспроможності своїх операцій.

Корпоративні інформаційні системи не можна розглядати як просте об'єднання автоматизованих систем управління виробництвом відокремлених судноплавних компаній [75]. Інформаційні системи такого роду характеризуються значною складністю в організаційному, технічному та програмному забезпеченні [34]. Внаслідок цього, процес розробки та впровадження зазначених систем вимагає спільних зусиль науковців, що працюють над розробкою відповідних методологій та методів, а також активної співпраці провідних спеціалістів у галузях інформаційних технологій, економіки та, вкрай важливо, правових аспектів.

Аналіз існуючих автоматизованих систем управління виробництвом судноплавних компаній України, на базі яких мають бути сформовані корпоративні інформаційні системи, виявив, що однією з ключових і досі невирішених проблем є управління системами технічного обслуговування суден, зокрема вантажних суден. Методологічні засади такої системи представлені у другому розділі дисертації.

Управління системами технічного обслуговування вантажних суден має бути реалізоване у форматі ІКС для технічного обслуговування суден як інтегрованої складової корпоративних інформаційних систем судноплавних компаній. Така система повинна використовувати набутий досвід в цій області [420, 421, 422, 423, 424, 425, 426, 429] для забезпечення оптимального та ефективного управління процесами технічного обслуговування засобів морського транспорту.

Однією з відмінних характеристик ІКС в судноплавстві є ієрархічна структура, де централізована обробка та єдине керування ресурсами на верхньому рівні комбінуються з розподіленою обробкою на нижньому рівні. Цей підхід є синтезом відпрацьованих рішень у системах попередніх поколінь.

Така організація ІКС в судноплавстві представляє собою компроміс між прагненням використовувати переваги графічного інтерфейсу програмного забезпечення та вимогами щодо максимальної доступності даних для всіх користувачів системи. Водночас, такий підхід сприяє підвищенню швидкості обробки, спрощенню адміністрування та зниженню експлуатаційних витрат.

Цей науково-обґрунтований підхід до розробки та реалізації ІКС в судноплавних компаніях дозволяє досягти оптимального балансу між ефективністю управління ресурсами, доступністю інформації та зручністю використання системи для всіх зацікавлених сторін.

ІКС з технічного обслуговування вантажних суден, яка пропонується і впроваджується, має наступні ключові характеристики:

- Повне використання потенціалу персональних комп'ютерів та середовища розподіленої обробки [442].
- Модульна побудова системи, яка передбачає існування декількох різних типів архітектурних рішень у рамках єдиного комплексу з широким використанням Інтернет-технологій.
- Економія ресурсів системи завдяки централізації зберігання та обробки даних на верхніх рівнях ієрархії ІКС.
- Наявність ефективних централізованих засобів мережного та системного адміністрування, які дозволяють контролювати функціонування мережі та управління на всіх рівнях ієрархії, а також забезпечують необхідну гнучкість та динамічність змін конфігурації системи.
- Об'єднання корпоративних інформаційних систем судноплавних компаній, суднобудівних заводів та державних органів у глобальну інформаційну мережу на базі Інтернет-технологій.

Використання ІКС у сфері технічного обслуговування вантажних суден базується на розв'язанні експлуатаційних задач, які оптимально вирішуються на основі планування економічного експерименту та статистичної обробки обмежених обсягів даних. Це сприяє одержанню оцінок, хоча й неповних, але із чітко визначеними межами похибок. Відповідно, науковий підхід до реалізації ІКС забезпечує більш ефективне управління технічним обслуговуванням вантажних суден.

При розробці методичного забезпечення для ІКС з технічного обслуговування вантажних суден, важливо враховувати їх відмінність від інших технічних об'єктів. Однією з основних особливостей судноплавних транспортних засобів є те, що значна кількість відмов виявляється, але не усувається в процесі експлуатації суден [63]. Ця характеристика морських транспортних засобів суттєво змінює умови рішення задач технічного обслуговування вантажних суден, різко відрізняючи їх від умов рішення аналогічних задач для технічних виробів, що працюють безперебійно.

Класичним прикладом таких виробів є наземні енергетичні комплекси, у яких відпрацьовані рішення багатьох експлуатаційних задач, що вирішуються у рамках загальної теорії надійності складних систем [287]. Відтак, при формулюванні задач експлуатації вантажних суден варто також розглядати ергономічні аспекти [245]. З огляду на численність виконавців робіт та колективів людей, які займаються підготовкою вантажних суден до плавання і технічним обслуговуванням в процесі плавання, організації їхньої роботи слід приділяти особливу увагу [254]. Таким чином, науковий підхід до створення

методичного забезпечення для ІКС з технічного обслуговування вантажних суден дозволяє досягти більш оптимальних результатів у галузі судноплавства.

Однією з ключових передумов для рішення завдань технічного обслуговування вантажних суден є припущення про недостатність початкової інформації, яка не лише обмежує можливість вирішення задачі в детермінованій постановці, але й ускладнює формулювання ймовірнісної задачі [33]. В ІКС, пов'язаних з технічним обслуговуванням суден, слід використовувати статистичні оцінки параметрів систем на основі обмеженого обсягу вхідних даних, а також застосовувати цифрові двійники для детального моделювання та аналізу суднових систем [421].

Статистичні оцінки параметрів моделей, що використовуються в ІКС, повинні отримуватися з даних про попередню експлуатацію суден. Протягом усього періоду експлуатації параметри моделі мають зазнавати уточнень, оскільки судноплавні об'єкти регулярно модернізуються, а персонал, що експлуатує їх, постійно вдосконалює свої навички. Уточнення параметрів моделей для рішення завдань технічного обслуговування має базуватися на неперервному зборі відповідних даних та їхньому систематичному аналізі, а також на використанні цифрових двійників для детального моделювання та оптимізації суднових систем [429].

Такий науковий підхід до розробки та впровадження ІКС для технічного обслуговування вантажних суден забезпечує адекватне оцінювання та контроль стану технічних систем суден, а також підвищує ефективність експлуатації та безпеку плавання.

Алгоритми, реалізовані в ІКС [426], пов'язані з технічним обслуговуванням суден, повинні надавати рекомендації щодо часу наступного технічного обслуговування, його програми, наявних ресурсів судна в цілому та окремих його агрегатів і вузлів, дані для забезпечення суден запасними частинами, інструментами та іншим обладнанням, а також рекомендації (у вигляді, наприклад, технологічних графіків) з організації роботи технічного персоналу на судні.

Сукупність характеристик, які відображають ефективність системи технічного обслуговування суден, як було показано, є ієрархічною системою. Вона включає основні характеристики, що займають вищий ієрархічний рівень, оскільки вони визначають кінцеві результати застосування судна за призначенням, та характеристики підпорядкованих рівнів, що забезпечують основні характеристики.

Оцінку характеристик підпорядкованих рівнів у системі технічного обслуговування суден також проводять за числовими показниками. Їхня номенклатура значно ширша. Зазначені показники оцінки основних характеристик розраховують за показниками характеристик підпорядкованого рівня. Для обчислення та дослідження показників ефективності систем технічного обслуговування суден, зокрема, вирішують наступні завдання:

1. Контроль виконання вимог, встановлених діючими нормативно-технічними документами до ефективності систем технічного обслуговування суден;
2. Порівняння різних типів суден та їхніх модифікацій, що знаходяться в експлуатації;
3. Вивчення зміни ефективності систем технічного обслуговування та їхніх складових частин зі збільшенням обсягу робіт і календарного терміну експлуатації судна в різних умовах базування та використання;
4. Вироблення рішень про проведення організаційних та технічних заходів, спрямованих на поліпшення ефективності систем технічного обслуговування та конкурентоздатності судноплавних компаній. У це завдання включається також оцінка ефективності проведених заходів;
5. Накопичення довідкових даних про досягнуті рівні показників ефективності систем технічного обслуговування для обґрунтування нормативів на ці показники для існуючих типів суден та нових, що розробляються.

Вибір і оцінка показників усіх характеристик, які визначають ефективність систем технічного обслуговування суден, повинна базуватись на аналізі оптимальної моделі системи технічного обслуговування [208, 363]. Тому в науковому дослідженні [423] розглядаються завдання визначення оптимальної множини параметрів ефективності систем технічного обслуговування суден та їх комплектуючих, їхнього аналізу і прогнозування з метою побудови цифрової стратегії управління індивідуальними системами технічного обслуговування вантажних суден.

Впровадження в експлуатацію суден із розгалуженою системою бортового контролю, які дозволяють з високою вірогідністю виявляти відмови та пошкодження і тим самим дають змогу в реальному масштабі часу здійснювати формування обсягу чергового виду технічного обслуговування, вимагають розробки методів оперативного управління ходом технологічного графіку технічного обслуговування судна, оцінки показників аналізу ефективності цих технологічних графіків як складових частин ефективності всієї системи технічного обслуговування судна.

З метою контролю за діяльністю судноплавних компаній в галузі технічного обслуговування суден, сертифікації засобів морського транспорту, виявлення впливу різних експлуатаційних факторів на ефективність їхніх систем технічного обслуговування, необхідне постійне накопичення інформації про технічний стан суднової техніки та характеристики виконаних робіт на ній, з метою формування рішень, спрямованих на підтримку заданого рівня технічної придатності суден до технічного використання [429].

Усе це вимагає постійної розробки і впровадження в судноплавних компаніях відповідних заходів з удосконалення як самої суднової техніки, так і їхніх систем технічного обслуговування. З метою оцінки впливу впроваджених заходів потрібен постійний контроль і аналіз їхньої економічної ефективності та

економічної ефективності систем технічного обслуговування суден, який би базувався на сучасних методах прийняття рішень у сфері судноплавства.

М2. Класичні та сучасні публікацій в області математичного моделювання процесів технічного обслуговування вантажних суден

Класичні та сучасні публікацій в області математичного моделювання процесів технічного обслуговування засобів морського транспорту присвячено задачам пошуку, за обраним критерієм, оптимальних проміжків часу для проведення технічного обслуговування. У 1959 і 1960 роках Барлоу і Хантер опублікували дві статті на тему «Математичні моделі для надійності систем» [305, 306], в яких оптимальні проміжки часу для проведення технічного обслуговування визначаються з умови мінімізації середніх експлуатаційних витрат:

$$R = \sum_{i=0}^{\infty} \int_{t_i}^{t_{i+1}} [C_c t_c (i+1) + Z(t_{i+1} - \theta)] dF(\theta) + C_r t_r \,, \qquad (1.1)$$

де C_c - середні витрати в одиницю часу на роботи по контролю технічного стану; C_r - середні витрати в одиницю часу на відновлювальні роботи; t_r – тривалість відновлювальних робіт; t_c –тривалість контролю технічного стану; Z - середній збиток в одиницю часу через перебування засобу морського транспорту у стані прихованої відмови; θ - момент відмови засобу морського транспорту; t_i - момент проведення технічного обслуговування. В формулі (1.1) передбачається, що умовні ймовірності «помилкової відмови» - $\gamma(t)$ і «невиявленої відмови» - $\mu(t)$ при контролі технічного стану дорівнюють нулю $\gamma(t) = \mu(t) = 0$, $M = \infty$ і відмови засобу морського транспорту виявляються тільки під час технічного обслуговування.

Майже через 50 років, після Барлоу і Хантера у 2008 році, Епштейн та Вайсман продовжили роботу за цією тематикою та опублікували статтю також на тему «Математичні моделі для надійності систем» [96], в якій приведена формула для розрахунку середніх експлуатаційних витрат при експоненціальному законі розподілу напрацювання до відмови і $t_i = i\tau$:

$$R = \frac{C_c t_c + Z\tau}{1 - e^{-\lambda\tau}} - \frac{Z}{\lambda} + C_r t_r \,, \qquad (1.2)$$

де τ - періодичність технічного обслуговування; λ - інтенсивність відмов засобів морського транспорту. З формули (1.2) неважко отримаємо формулу (1.3) для розрахунку коефіцієнта готовності при ідеальній системі технічного обслуговування:

$$A_R = \frac{1 - e^{-\lambda\tau}}{\lambda[\tau + t_r(1 - e^{-\lambda\tau})]}, \qquad (1.3)$$

Фітч у статті на тему «Технологія технічного обслуговування» [99] отримав функцію визначення експлуатаційних витрат з урахуванням помилок контролю у наступному вигляді:

$$C_\theta = \begin{cases} \gamma \sum_{m=1}^{i} \omega^{m-1}(mc+s) + \chi\omega^i, \text{ коли } t_i < \theta \le t_{i+1} \\ \sum_{i=1}^{n} \omega^{i-1}\gamma(ic+s) + \omega^n\left(nc + Z(M-\theta)\right), \text{коли } t_n < \theta \le M, \\ \sum_{i=1}^{n} \omega^{i-1}\gamma(ic+s) + nc\omega^n, \text{ коли } \theta > M \end{cases} \quad (1.4)$$

де $c = C_c t_c$; n - число контрольних операцій всередині інтервалу *(0, T)*; $\chi = (1-\mu)\sum_{m=i+1}^{n} \mu^{m-i-1}\left(mc + Z(t_m - \theta)\right) + \mu^{n-i}\left(nc + Z(M-\theta)\right)$; s - штраф за визнання засобу морського транспорту непрацездатним тоді, як він є працездатним; M – середній ресурс; $\omega = 1 - \gamma$. Формула (1.4) отримана з наступних припущень - ймовірності "помилкової відмови" і "невиявленої відмови" не залежать від напрацювання засобу морського транспорту і результатів попереднього технічного обслуговування. В статті авторства Фітча [101] показано, що дані допущення справедливі тільки в тому випадку, коли закон розподілу напрацювання до відмови є експоненціальним, математичні очікування і дисперсія похибки виміру кожного з контрольованих параметрів не залежать від напрацювання.

В роботі Гарланда та Стейнера [108] отримана формула для коефіцієнту готовності засобів морського транспорту з періодичним контролем технічного стану при експоненціальному законі розподілу напрацювання до відмови:

$$A_R = \frac{1 - e^{-\lambda\tau}}{(1-e^{-\lambda\tau})\left(e^{-\lambda\tau} + \lambda\tau\frac{1}{\varpi}\right) + \lambda t_c\left[1 + \frac{1}{\varpi}(1-e^{-\lambda\tau})\right] + \lambda t_r[1 - \omega e^{-\lambda\tau}]}, \quad (1.5)$$

де $\omega = 1 - \gamma$; $\varpi = 1 - \mu$.

Якщо по аналогії з формулою (1.1) припустити що умовні ймовірності «помилкової відмови» - $\gamma(t)$ і «невиявленої відмови» - $\mu(t)$ при контролі технічного стану дорівнюють нулю $\gamma(t) = \mu(t) = 0$, то отримаємо формулу (1.6) для розрахунку коефіцієнту готовності при ідеальному технічному обслуговуванні:

$$A_R = \frac{1 - e^{-\lambda\tau}}{e^{-\lambda\tau}(1-e^{-\lambda\tau}) + \lambda t_c + \lambda[\tau + t_r(1-e^{-\lambda\tau})]}, \quad (1.6)$$

В роботі Моблі [259] приведене наступне вираження для розрахунку коефіцієнту готовності засобів морського транспорту непостійного використання, або таких, які знаходиться на збереженні:

$$A_R = \frac{1 - e^{-\lambda\tau}}{\lambda\left((\tau + t_c + \gamma t_r)qe^{-\lambda\tau} + \left[(\tau + t_r)\frac{1}{1-\mu} + t_r\right]\frac{1}{1-\alpha}(1 - qe^{-\lambda\tau})\right)}, \quad (1.7)$$

де α - ймовірність того що відновлення не завершене; q - ймовірність безвідмовної роботи засобів морського транспорту до моменту їх технічного обслуговування.

В роботі Фітча [100] визначена стратегія обслуговування засобів морського транспорту, що зберігається на інтервалі ресурсу (*M, 0*). Функція експлуатаційних витрат має вид:

$$C(\theta) = \begin{cases} \varpi(i+1)c + \varpi Z(t_{i+1} - \theta) + \chi, & \text{коли } t_i < \theta \le t_{i+1} \\ nc + Z(M - \theta), & \text{коли } t_n < \theta \le M \\ nc, & \text{коли } \theta > M \end{cases}, \qquad (1.8)$$

де $\chi = (1-\mu)\sum_{m=i-1}^{n-1} \mu^{m-i}\big((m+1)c + Z(t_{m+1} - \theta)\big) + \mu^{n-i}\big(nc + Z(M-\theta)\big)$; $\varpi = 1 - \mu$.

Формулу (1.9) для розрахунку коефіцієнту готовності засобів морського транспорту з періодичним контролем технічного стану отримано в роботах Ґірдхара, Шеффера, Бібе, Ґайтнера і Блока [32, 109, 113]:

$$A_R = \frac{t_1(1-\mu)\big(1 - P_s(\tau)\big)}{\tau + t_2\big(1 - P_{ms}(\tau)\big) + \Big(\gamma P_{ms}(\tau) - \mu t_2\big(1 - P_s(\tau)\big)\Big) + 2t_4 t_5\big(1 - P_s(\tau)\big) + t_6}, \qquad (1.9)$$

де $P_{ms}(\tau)$ і $P_s(\tau)$ - ймовірності того, що в засобі морського транспорту і засобі контролю не виникає жодного дефекту протягом напрацювання M відповідно; $t_1 \dots t_6$ - середні тривалості безвідмовної роботи засобу морського транспорту, відновлення засобу морського транспорту, відновлення засобу контролю, самоконтролю, технічного обслуговування засобу морського транспорту відповідно.

Середні експлуатаційні витрати пов'язані з технічним обслуговуванням засобів морського транспорту і з втратами внаслідок прихованих відмов визначені в роботі Ленахена [219]:

$$R = \sum_{i=0}^{\infty} \int_{t_i}^{t_{i+1}} \left[\int_0^{t_{i+1}-t} (ic + Zy)\, dG(y) + [c(i+1) + Z(t_{i+1} - t)]\bar{G}(t_{i+1} - t) \right] dF(t), \qquad (1.10)$$

де $\bar{G}(t) = 1 - G(y)$ - функція розподілу часу прояву відмови. Умови за яких отримана формула (1.10) - $\gamma(t) = \mu(t) = 0$ і $M = \infty$.

Показник ефективності запропонований в роботі Уілмотта і Маккарті [374] отриманий на основі прогнозування технічного стану засобів морського транспорту:

$$E(\tau) = \frac{W(\tau)}{C_i(\tau)}, \qquad (1.11)$$

де $W(\tau)$ - користь у середньому напрацюванні засобів морського транспорту за рахунок попередження відмов; $C_i(\tau)$ - середні витрати на прогнозування технічного стану, яке здійснюється з періодичністю τ. Недолік цього показника ефективності полягає в тому, що він не враховує характеристик ремонтопридатності і довговічності засобів морського транспорту, а також ймовірностей здійснення помилок у процесі прогнозування технічного стану.

Показник ефективності системи технічного обслуговування з тестовим контролем запропонований в роботі Майєра і ЛеФрансуа [251] у наступному вигляді:

$$E(t) = \frac{(1-\gamma(t_0))P(t)}{\big(1-\gamma(t_0)\big)P(t_0) + \mu(t_0)\big(1-P(t_0)\big)}, \text{коли } t \geq t_0 \qquad (1.12)$$

де $P(t)$ - ймовірність безвідмовної роботи протягом напрацювання t, t_0 - момент проведення технічного обслуговування. Показник ефективності (1.12) не враховує факту багаторазового проведення технічного обслуговування засобів морського транспорту в процесі експлуатації.

В роботі Хольнагеля [142] розглянута трирівнева стратегія технічного обслуговування засобів морського транспорту і визначені рекурентні моделі знаходження ймовірностей експлуатації суден із відмовами. Математична модель побудована при тих же граничних умовах про характер поводження показників ймовірності, що і в роботі Фітча на тему «Технологія технічного обслуговування» [99].

В статті Мілованович і Папіча [257] запропоновано ряд математичних моделей управління експлуатаційною надійністю засобів морського транспорту, які дозволяють виконувати аналіз впливу багатоетапного технічного обслуговування на характеристики безвідмовності засобів морського транспорту. В представлених моделях систем технічного обслуговування регенерація стану контрольованої частини судна виконується незалежно від результатів контролю його технічного стану, а характеристики ймовірності цього контролю в представлених моделях не враховуються.

Моделі з використанням напівмарківських процесів для розрахунку параметрів потоку відмов і коефіцієнту готовності при різних стратегіях контролю технічного стану засобів морського транспорту представлені в роботі Грабського [128]. Представлені залежності для розрахунку коефіцієнту готовності не враховують характеристик ймовірності результатів контрольних операцій.

Математичні моделі для розрахунку коефіцієнту готовності засобів морського транспорту з періодичним контролем технічного стану представлені в роботах Кістера і Хокінса [190, 191, 192, 193]. У вказаних моделях застосовано припущення ідеальності засобів контролю і забраковану, через відмову, систему заміняють на нову.

Формула для визначення ймовірність працездатності засобів морського транспорту у будь-який момент часу Δt після технічного обслуговування n отримана в роботі Веласко-Галлего та Лазакіса [355] для однорідного марківського процесу контролю і відновлення працездатності, і має вид:

$$P(t_n + \Delta t) = \prod_{i=1}^{s} P_i(t_n) P_{i\sigma}(\Delta t) \prod_{b=s+1}^{S} P_b(0) P_{b\sigma}(t_n + \Delta t) \qquad (1.13)$$

де $P_i(t_n)$ - ймовірність працездатності за контрольованим параметром i в момент t_n; $P_{i\sigma}(\Delta t)$ - ймовірність безвідмовної роботи за контрольованим параметром i за час Δt після технічного обслуговування; $P_b(0)$ - ймовірність початкової працездатності за неконтрольованим параметром b; $P_{b\sigma}(t_n + \Delta t)$ - ймовірність безвідмовної роботи за неконтрольованим параметром b за час $(t_n + \Delta t)$; s - число контрольованих параметрів; S – загальне число параметрів засобу

морського транспорту. $\gamma = \mu = 0$ - умови при яких було знайдено формулу (1.13).

Середні питомі витрати на технічне обслуговування розраховуються на основі Марківської моделі що представлена в роботі Санчес-Ергедаса, Мена-Ньєто та Родріго-Муньоса [319], і має вид:

$$E(C_0) = PE_1(C_0) + (1-P)E_2(C_0)\,, \qquad (1.14)$$

де P - ймовірність правильного визначення стану системи; $E_1(C_0)$ - математичне очікування витрат за один крок для випадку, коли збігаються дійсний і виміряний стани системи; $E_2(C_0)$ - математичне очікування витрат через похибки засобів контролю. Формула (1.14) не враховує багаторазового технічного обслуговування засобів морського транспорту в процесі експлуатації і не чутлива до внесення змін у періодичність технічного обслуговування.

В роботі Каратуга [180] приведений техніко-економічний показник ефективності стратегії технічного обслуговування за станом з контролем параметрів:

$$E(t) = \frac{C_M}{P[\omega C_c + \gamma C_{cM}] + q[\mu(C_c + C_b) + \varpi C_{cM}]} \qquad (1.15)$$

де C_M і C_c – відповідно середні витрати на технічне обслуговування і визначення технічного стану засобу морського транспорту; C_b – втрати через невиконання оперативної задачі; P – ймовірність працездатного стану засобу морського транспорту; $q = 1 - P$; $\omega = 1 - \gamma$; $\varpi = 1 - \mu$; $C_{cM} = C_c + C_M$. Цей показник надає змогу оцінювати ефективність одноразового виконання технічного обслуговування.

В статті Лазакіса, Дікіса, Міхала та Феотокатоса [209] приведена напівмарківська модель технічного обслуговування, яка дозволяє визначити середні питомі витрати на технічне обслуговування, коефіцієнт готовності і коефіцієнт технічного використання. В формулах для розрахунку показників ефективності технічного обслуговування враховані ймовірності γ – «помилкової відмови» і μ – «невиявленої відмови». Математична модель побудована при тих же граничних умовах про характер поводження показників ймовірності, що і в роботі Фітча на тему «Технологія технічного обслуговування» [99].

В роботі Дуан, Лі, Ліу [88] розглянута математична модель системи технічного обслуговування з періодичним обслуговуванням. Представлена наступна формула для розрахунку коефіцієнта готовності:

$$A_R = \sum_{n=1}^{\infty} P_n \prod_{m=0}^{n-1} \frac{1-\gamma_m}{\sum_{n=1}^{\infty}\left[P_n + (P_{n-1}P_n)\frac{\mu_n}{1-\gamma_n}\prod_{m=0}^{n}(1-\gamma_m)\right] + 1} \qquad (1.16)$$

де γ_n, μ_n - умовні ймовірності «помилкової відмови» і «невиявленої відмови» при технічному обслуговуванні n; P_n - ймовірність безвідмовної роботи засобів морського транспорту протягом напрацювання $n \cdot \Delta t$. Але ця формула не враховує характеристик ремонтопридатності і довговічності засобів морського транспорту. В розглянутій математичній моделі відсутня формалізація правила заміни забракованих елементів засобів морського транспорту, що надало б змогу

визначити кількісні характеристики суднових технічних засобів, які поступають на заміну.

В роботі Кандеміра і Целіка [177] досліджена стратегія проведення технічного обслуговування засобів морського транспорту, у якій виникають явні і приховані відмови. Передбачається, що відмови засобів морського транспорту можуть бути виявлені з ймовірністю $1-\mu$. При експоненціальному законі розподілу напрацювання до відмови отримано формулу для коефіцієнта готовності в якій прийнята нульова ймовірність «помилкової відмови» $\gamma = 0$.

В роботі Ямашіро, Сатох і Юаса [381] досліджена паралельна система, яка складається з двох блоків, відмови кожного з блоків якої можуть бути виявлені тільки під час технічного обслуговування. Виникнення відмов в кожному з блоків розподілені за експоненціальним законом. Формула для розрахунку коефіцієнта готовності отримана з використанням математичного апарата Марківських процесів.

В [178] на відміну від [177] передбачається миттєва індикація блоку, що відмовив. А в [6] вирішена задача визначення оптимальної періодичності ТО за критерієм максимуму коефіцієнта готовності для відновлюваної резервованої системи. В [139] побудована математична модель обслуговування резервованої системи з двох блоків, відмови якої виявляються тільки під час ТО. Вважається, що напрацювання системи до відмови розподілений за експонентним законом. В роботах [6, 139, 178, 381] передбачається нульова ймовірність «помилкової відмови» і «невиявленої відмови» $\gamma = \mu = 0$.

М3. Існуючі методи кількісної оцінки ефективності систем технічного обслуговування вантажних суден

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 [176]. 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:

$$\beta(m) = \begin{cases} 1, \text{за умови виконання задачі} \\ 0, \text{за умови невиконання задачі} \end{cases} \quad (1.17)$$

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

По результатам спостережень формується ряд значень $\beta(1), \ldots, \beta(m)$ за формулою (1.17). Середнє значення цих величин обчислюється за формулою (1.18).

$$\bar{\beta} = M^{-1} \cdot \sum_{m=1}^{M} \beta(m) = \frac{n}{M} \quad (1.18)$$

Оцінка ефективності системи технічного обслуговування вантажного судна зводиться до визначення ймовірності виконання задачі P за допомогою статистичної оцінки P^*, яка обчислюється за формулою (1.18), де n – кількість випадків успішного виконання задачі.

При збільшенні числа спостережень $(n \to \infty)$ оцінка P^* збігається з дійсним значенням ймовірності P. При малій кількості розглянутих періодів формула (1.18) дає лише деякі придатні оцінки умовної ефективності, для яких повинні визначатися довірчі інтервали [249].

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 (1.19 - 1.20) [249]:

$$m_x^* = M^{-1} \cdot \sum_{m=1}^{M} x_m \quad (1.19)$$

$$\sigma_x^* = \sqrt{(M-1)^{-1} \cdot \sum_{m=1}^{M} x_m^2 - (m_x^*)^2} \quad (1.20)$$

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:

$$P^* = M^{-1} \cdot \sum_{m=1}^{M} E(x_m) \quad (1.21)$$

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 [41]. 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 ($s = \overline{1,S}$) 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 (R_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:

$$P_{sg} = \frac{P_{Bg} R_{sg}}{R_{Bg}} \quad (1.22)$$

2) розраховуються середні статистичні значення показників ефективності розрахованих за формулою (1.22):

$$\overline{P_s} = G^{-1} \sum_{g=1}^{G} P_{sg} \tag{1.23}$$

3) оцінюється ступінь надійності отриманих результатів (1.23) варіацією:

$$\gamma_s = \overline{P_s}^{-1} \sqrt{(G-1)^{-1} \cdot \sum_{g=1}^{G} \left(P_{sg} - \overline{P_s}\right)^2} \tag{1.24}$$

За формулою (1.24) 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 ($\gamma_s < 0.2$) [249].

У разі наявності досвіду експлуатації аналогічних систем технічного обслуговування вантажних суден, то як вагові коефіцієнти (R_{sg}, R_{Bg}) у формулі (1.22) 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 (1.23) 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 (1.24) 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 ($\gamma_s \to 0$) , результати опитування не можна вважати абсолютно достовірними. Це пояснюється тим, що навіть якщо більшість експертів збігаються у своїх оцінках, це не завжди означає, що їх 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 ранжуванні 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 [308]. 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.

М4. Вихідні дані аналізу залежностей інтенсивності відмов, пошкоджень та станів суднових технічних засобів вантажних суден

З метою превентивної нейтралізації виникнення дефектів або мінімізації їхньої частоти в контексті експлуатації вантажного судна, проводиться обмеження критичного робочого навантаження контрольованого технічного об'єкту, іншими словами, встановлюється його операційний ресурс. Ресурс тут визначається як максимально допустиме навантаження, що є універсальним для всієї групи однорідних компонентів, в межах якого вони зберігають свою функціональну ефективність з високою, апріорно визначеною ймовірністю. При досягненні обмеження операційного ресурсу настає критичний стан, після чого експлуатація даного технічного засобу припиняється.

Враховуючи, що суднові технічні засоби характеризуються різноманітними операційними ресурсами, які часто не корелюють з ресурсом вантажного судна і зазвичай мають суттєво нижчі значення, для вантажних суден, що експлуатуються залежно від ресурсу, вводиться ресурс до першого технічного обслуговування та проміжний ресурс (вони часто відрізняються), досягнувши якого вантажне судно директивно направляється на капітальний ремонт з метою відновлення ресурсу. Після відновлення судно продовжує

експлуатацію до моменту, коли його робоче навантаження не досягне значення ресурсу до списання.

Проте, більш глибокий аналіз λ-характеристик вантажних суден виявив неможливість досягнення вимог до надійності суднових технічних засобів лише через обмеження робочого навантаження їхніх складових елементів. Реалізація методів дублювання, структурного та функціонального резервування ключових та відповідальних систем та їхніх компонентів вирвала або, принаймні, істотно знизила прямий зв'язок між дефектами елементів систем та їхніми функціональними відмовами. Таким чином, це знижує безпосередній негативний вплив дефектів багатьох технічних засобів вантажних суден на регулярність і безпеку судноплавства.

Паралельно з цим, неухильна необхідність постійного моніторингу резервних компонентів, збої яких, зазвичай, відносять до категорії прихованих, вимога зменшення витрат часу на виявлення та усунення відмов та пошкоджень в інтервалах між рейсами стали каталізаторами для інтенсивного розвитку суднових (бортових), включаючи вбудовані, засоби контролю технічного стану, як для суднових технічних систем в цілому, так і для їхніх компонентів та елементів конструкції.

Обмеженість тривалості життєвих циклів систем, їхніх компонентів, агрегатів та елементів конструкції, ресурсами до списання, потреба в проведенні трудомістких та дорогих капітальних ремонтів після вичерпання проміжних ресурсів, резервування компонентів суднових технічних систем, агрегатів та елементів конструкції, застосування розвинутих систем бортового контролю технічного стану систем, агрегатів і елементів конструкції у контексті постійного ускладнення конструкцій вантажних суден, зростання обсягів, складності та якісної зміни схематично-конструктивних рішень бортового обладнання призвели до значного зростання вартості технічного обслуговування. Це негативно вплинуло на економічну ефективність експлуатації вантажних суден настільки сильно, що спонукало виробничі компанії шукати шляхи радикальної перебудови програм технічного обслуговування вантажних суден з метою їхнього здешевлення і зниження трудомісткості.

Однією з ключових проблем ресурсної експлуатації, що передбачає призупинення експлуатації всієї сукупності однотипних суднових технічних засобів при виробленні ними встановленого ресурсу незалежно від їх фактичного технічного стану, , є значне невикористання індивідуальних ресурсів конкретних одиниць суднових технічних засобів. Така ситуація може виникнути внаслідок істотних відмінностей, що виникають через варіативність фізико-механічних властивостей матеріалів, з яких вони виготовлені, виробничі відхилення, нерівномірність умов експлуатації, різницю в якості технічного обслуговування, та інших факторів.

Згідно з досвідом експлуатації та спеціальними науковими дослідженнями [420, 421, 424], метод встановлення граничного стану для всіх технічних засобів вантажних суден за напрацюванням не тільки призводить до значних

економічних втрат, але також виявився неефективним і неспроможним ефективно попереджувати або знижувати інтенсивність відмов.

З Рисунків М4.3 і М4.4 видно, що типові залежності $\lambda = f(t)$ можна поділити на два класи: «X» і «Y». Зокрема, залежність λ-характеристики від напрацювання типу «X3», наведена на рисунку М4.3 і властива механічним виробам, є не типовою для більшості суднових технічних засобів вантажних суден. У технічних засобах, що відносяться до класу «X», інтенсивність відмов суттєво зростає зі збільшенням напрацювання, принаймні, починаючи з певного моменту (τ_2).

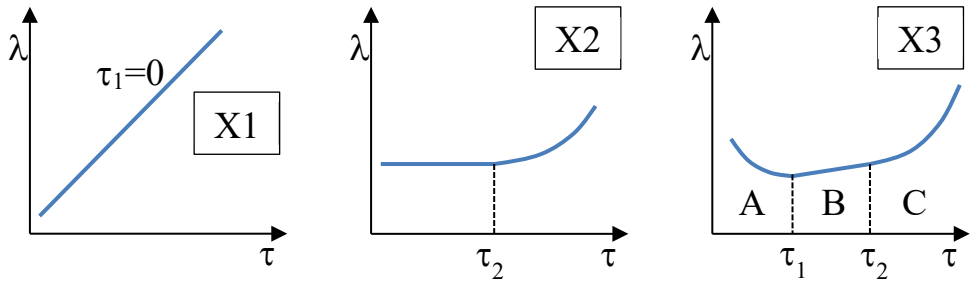


Рисунок М4.3 – Види залежностей $\lambda = f(\tau)$ інтенсивностей відмов λ від напрацювання суднових технічних засобів τ класу «X»

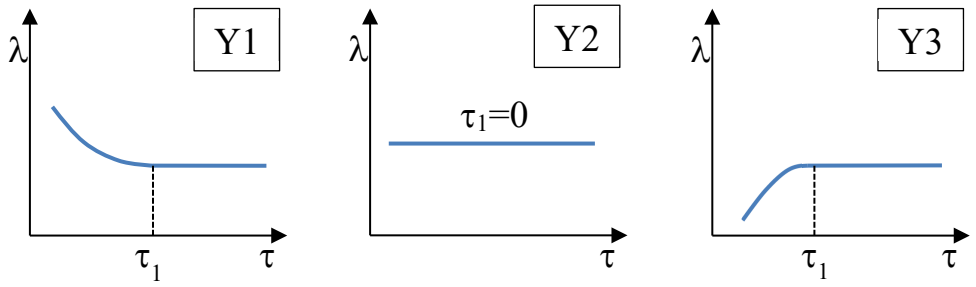


Рисунок М4.4 – Види залежностей інтенсивностей відмов від напрацювання суднових технічних засобів класу «Y»

Згідно з дослідженнями [278, 344] у морській техніці існує три області значень напрацювання зі специфічною зміною λ-характеристики. На початковому етапі, при малих напрацюваннях, спостерігаються так звані відмови припрацювання, обумовлені помилками проектування і виробництва [433]. Інтенсивність цих відмов порівняно швидко зменшується, що представлено у вигляді області А на Рисунку М4.3, тип X3.

Далі розташована область сталої експлуатації, де відмови припрацювання майже повністю відсутні, а процеси утоми, зносу та старіння в самій конструкції ще не мають великого розвитку і їхні негативні наслідки практично не проявляються або проявляються з дуже низькою інтенсивністю. Цю область позначаємо як область В.

Проте, при більш-менш значному напрацюванні суднових технічних засобів, негативні процеси посилюються, і частота відмов внаслідок цього суттєво зростає, може досягати неприпустимих значень і погіршувати функціонування системи. Цю область позначаємо як область С.

Така класифікація допомагає краще розуміти залежність між напрацюванням і інтенсивністю відмов та негативними процесами, що сприяє більш ефективному контролю технічного обслуговування вантажних суден та суднових технічних систем і комплексів.

На Рисунку М4.4 представлені різні види залежностей інтенсивності відмов суднових технічних засобів вантажних суден від напрацювання, що відносяться до класу «Y». Ці залежності характеризуються тим, що після певного напрацювання (τ_1) інтенсивність відмов залишається практично постійною, тобто вона перестає залежати від напрацювання.

З усього вищевикладеного випливає, що застосування ресурсних обмежень з метою регулювання надійності має доцільність лише для агрегатів класу «Y», оскільки встановлення ресурсів не має сенсу для агрегатів класу «X», які не піддаються впливу із-за характеристик безвідмовності. Важливо зауважити, що до класу «Y» належить близько 90 % всіх технічних систем і комплексів вантажних суден. З метою забезпечення захисту системи від функціональних відмов, що виникають у випадку відмов таких елементів, ефективно використовується їхнє резервування.

В цих умовах виявилося доцільним ввести ще один вид граничного стану елементів, цілком відповідний їх фактичному стану – «відмова», тобто знявши з цих елементів ресурсні обмеження.

Згідно з останніми досягненнями у розвитку методів та засобів контролю, можливо проводити більш глибоку оцінку технічного стану елементів і навіть прогнозувати зміни в майбутньому. Це дозволило впровадити в практику експлуатації третій вид граничного стану – «стан перед відмовою» (СПВ). Застосування цього виду граничного стану дозволяє більш повно використовувати запаси працездатності нерезервованих відповідальних технічних засобів вантажних суден, які мають рівень придатності до контролю, достатній для встановлення та своєчасного виявлення стану перед відмовою.

У сучасному контексті експлуатації вантажних суден, виявляється троїста класифікація граничних станів суднових технічних засобів, як це визначено в джерелах [128, 344]:

2. Граничний стан, обумовлений допустимим напрацюванням (ресурсом);
3. Граничний стан, що корелює з невиконанням своїх функцій (відмовою);
4. 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

[285]. На сучасних вантажних суднах, починаючи з 2020 року закладки, за цими методами експлуатується близько 90 % суднових технічних засобів [180]. Це обумовлено 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) [199]. 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 [180].

Аналізуючи дослідження [82, 351], можна виділити два основних методи технічного обслуговування вантажних суден за ФТСП:

1. з контролем рівня надійності;
2. з контролем параметрів об’єктів контролю.

За першим методом задача технічного обслуговування зводиться до управління рівнем надійності визначеної сукупності однотипних об’єктів контролю, за другим - до управління технічним станом кожного конкретного об’єкта контролю.

Здійснення технічного обслуговування за ФТСП з контролем рівня надійності вимагає оперативного збирання, обробки та аналізу даних про надійність і ефективність обслуговування набору однорідних об’єктів контролю на основі вибіркового контролю, а також прийняття рішень про необхідний обсяг профілактичних робіт для всієї множини контрольованих об’єктів. Паралельно, ФТСП із контролем параметрів передбачає постійний або періодичний контроль і вимір параметрів, що визначають технічний стан конкретних об’єктів контролю. Рішення про заміну або відновлення працездатності контрольованого об’єкту приймається, коли значення контрольованих параметрів наближаються до межі критичного рівня.

У Таблиці М4.1 представлено основні характеристики трьох методів технічної експлуатації, демонструючи, як у кожному з цих сценаріїв гарантується безпека судноплавства та регулярність рейсів. Також вказано, як здійснюється контроль надійності та прогнозування технічного стану суднових технічних засобів відповідно до напрацювання під час експлуатації, а також процес відновлення технічних засобів, які досягли критичного стану.

Прогрес у розробці автоматизованих систем контролю технічного стану обладнання вантажних суден, а також впровадження математичних моделей для прийняття рішень щодо технічного обслуговування на основі статистичних даних, які описують поведінку технічних засобів протягом повного життєвого циклу судна, привели до зростання наукового інтересу до систем технічного

обслуговування, які базуються на фактичному технічному стані з прогнозуванням (ФТСП) [421].

Таблиця М4.1 - Характеристика методів технічної експлуатації вантажних суден

Задачі в процесі експлуатації вантажних суден	Методи технічної експлуатації		
	за ресурсом	за станом	
		до стану перед відмовою	до відмови
Забезпечення безпеки судноплавства	В межах ресурсу мала ймовірність відмови	Контроль технічного стану кожного СТЗ	Відмова СТЗ не впливає на безпеку судноплавства
Забезпечення регулярності рейсів	В межах ресурсу мала ймовірність відмови	Визначення мінімально допустимого запасу працездатності в стані перед відмовою	Вибір оптимального моменту обслуговування технічних засобів, що відмовили
Прогнозування технічного стану СТЗ за напрацюванням	За частотою відмов для всієї сукупності однотипних елементів СТЗ	За значенням параметрів, які контролюються для кожного елемента СТЗ	Ймовірно-статистичне прогнозування для всієї сукупності однотипних елементів СТЗ
Визначення моменту заміни елемента СТЗ	Встановлення міжремонтного ресурсу (ресурсу до списання)	Індикація стану перед відмовою СТЗ	Індикація відмови СТЗ
Управління надійністю (безвідмовністю)	Зміна ресурсу	Перерахунок запасу працездатності на параметр, який контролюються	Реалізація заходів з покращення надійності при досягненні граничнодопустимої інтенсивності відмов
Відновлення запасу працездатності СТЗ	Заміна елементів СТЗ, які відпрацювали ресурс	Заміна елементів СТЗ, які досягли стану перед відмовою	Заміна елементів СТЗ, що перейшли у стан відмови
Параметри відновлення СТЗ, які контролюються в експлуатації	Параметр потоку дострокових обслуговувань з причини відмов	Параметри потоків обслуговувань в стані перед відмовою і обслуговування з причини відмови	Параметр потоку обслуговувань з причини відмов

Методи технічного обслуговування вантажних суден за ФТСП за своєю суттю є планово-попереджувальними. Плановаими тут є обсяг і періодичність оцінки технічного стану елементів суднових технічних засобів – об’єктів контролю (ОК). Попереджувальний аспект цих методів втілюється через постійний контроль їхнього рівня надійності, а в ряді випадків і технічного стану з метою раннього виявлення стану перед відмовою з наступною заміною або відновленням значень контрольованих параметрів до встановлених нормативних величин.

При реалізації задач, пов’язаних з організацією технічного обслуговування за ФТСП, може бути використаний метод аналізу середовища функціонування [292]. В цьому контексті, основні завдання включають: 1. Створення математичного забезпечення для прийняття рішень про впровадження системи технічного обслуговування за ФТСП. 2. Розробка технічних засобів контролю технічного стану, реєстрації і оперативної обробки інформації. 3. Визначення необхідного обсягу робіт для контролю технічного стану об’єктів контролю, враховуючи мінімально необхідне число однорідних об’єктів контролю (обсяг вибірки), а також число контрольованих параметрів, що містять достатньо інформації про їхній технічний стан. 4. Обґрунтування обсягу технічного обслуговування після контролю технічного стану конкретного об’єкту контролю. 5. Визначення періодичності виконання робіт з контролю технічного стану об’єктів контролю.

Як математичне забезпечення прийняття рішення щодо параметрів системи технічного обслуговування вантажних суден за ФТСП можуть бути застосовані, зокрема, типові моделі систем технічного обслуговування, які дозволяють виконати порівняльну оцінку різних систем технічного обслуговування. Особливістю оцінювання систем технічного обслуговування за ФТСП є необхідність врахування обсягу діагностичних перевірок, який значно зростає, і який характеризується ймовірностями помилок першого і другого роду (це ставить підвищені вимоги до надійності діагностичних засобів і їх технічного обслуговування), а також оцінки обсягу вибірки об’єктів контролю, яка піддається цим перевіркам. Ці питання детально досліджуються в наукових роботах [78, 142].

М5. Вихідні дані аналізу параметрів системи ТО вантажного судна

Управлінська (виконавча) складова процесу підвищення ефективності систем технічного обслуговування вантажних суден містить наступні елементи:

1. Цифрові стратегії. Вибір конкретної цифрової стратегії для управління системою технічного обслуговування.
2. Технологічний вибір. Процес вибору та впровадження певних комбінацій цифрових технологій, таких як цифрові моделі, цифрові тіні, цифрові двійники, прескриптивна (рекомендаційна) аналітика.
3. Планування. Коригування плану технічного обслуговування згідно з обраною цифровою стратегією.
4. Аналіз та оцінка. Використання різних методологій для аналізу та оцінки оптимальних параметрів системи технічного обслуговування.
5. Інтегровані системи. Використання сучасних інтегрованих систем, таких як «ShipDiMRO», для формування управлінських рішень.
6. Життєвий цикл судна. Урахування етапу життєвого циклу судна при виборі стратегії та технологій.
7. Тріада етапів. Процес управління включає планування і проведення контрольної експлуатації, обробку результатів, і схвалення рішень про параметри системи.

8. Адаптивність. Здатність до швидкого коригування управлінських рішень на основі зібраної інформації та аналізу.
9. Комплексний підхід. Управління може здійснюватися за різними методами ТО: за прогнозуванням технічного стану, за відмовами, за регламентом або за технічним станом.

Параметри системи ТО вантажного судна – це сукупність кількісних або якісних характеристик, які визначають функціонування, ефективність, надійність та безпеку технічних систем та обладнання судна. До параметрів належать:

1. Частота ТО – скільки разів і як часто повинні проводитися перевірки або обслуговування.

2. Витрати на ТО – заплановані бюджетні витрати на підтримку системи.

3. Обсяг робіт – які види робіт входять у планове та непланове ТО.

4. Відповідальні особи – хто відповідає за проведення ТО.

5. Стандарти якості – критерії та параметри, згідно з якими оцінюється якість робіт.

6. Ресурси – наявність необхідних матеріалів, запасних частин, інструментів для ТО.

7. Часові рамки – тривалість кожного виду ТО, а також періодичність їх проведення.

8. Надійність та безпека – параметри, що визначають мінімально допустимий рівень надійності та безпеки системи.

9. Документація – які документи повинні супроводжувати процес ТО (журнали, сертифікати, інструкції, звіти тощо).

10. Показники ефективності – метрики, за якими визначається успішність ТО (наприклад, тривалість експлуатації між відмовами, час на відновлення після відмови тощо).

Ці параметри допомагають структуровано підходити до питань технічного обслуговування, оптимізувати ресурси і підтримувати високий рівень надійності та безпеки вантажного судна.

Система технічного обслуговування вантажних суден може знаходитися в різних станах балансу, залежно від ряду факторів:

1. Баланс «Ефективність-Вартість»
- Ефективність – забезпечення високого рівня технічної придатності судна.
- Вартість – мінімізація витрат на ТО.
2. Баланс «Безпека-Продуктивність»
- Безпека – дотримання всіх норм і стандартів безпеки.
- Продуктивність – максимізація часу ефективної роботи судна.
3. Баланс «Реактивність-Проактивність»
- Реактивність – здатність швидко реагувати на відмови та інші проблеми.
- Проактивність – здатність передбачити та запобігти можливим проблемам.
4. Баланс «Централізація-Децентралізація»
- Централізація – усі рішення приймаються на вищому рівні управління.

- Децентралізація – рішення можуть прийматися на рівні окремих відділів або екіпажу судна.

5. Баланс «Короткостроковість-Довгостроковість»

- Короткостроковість – фокус на найближчих завданнях та операціях.
- Довгостроковість – стратегічне планування та розвиток системи ТО на довгий термін.

Ідеальний баланс залежить від конкретних цілей, ресурсів, та обставин і може вимагати постійної оцінки та корекції параметрів системи ТО (Рисунок 2.1). Така корекція доступна зокрема шляхом управління параметрами системи ТО в сучасних інтегрованих системах для формування управлінських рішень, таких як «ShipDiMRO».

З проведеного аналізу випливає, що системи ТО вантажних суден володіють технологічним, організаційним, фінансовим, екологічним і безпековим потенціалом удосконалення, який можна реалізувати в наступних напрямках:

1. Технологічний потенціал

- Цифрова трансформація – впровадження цифрових технологій для моніторингу, аналізу та управління.
- Автоматизація – використання автоматизованих систем для зменшення ручної роботи та підвищення ефективності.
- Інтелектуальні системи – використання штучного інтелекту та машинного навчання для прогнозування відмов та оптимізації робочих процесів.

2. Організаційний потенціал

- Оптимізація робочого часу – ефективне планування та розподіл робочого часу персоналу.
- Крос-функціональна співпраця – забезпечення ефективної комунікації та координації між різними відділами, суднами, компаніями.
- Навчання та розвиток – постійне навчання та професійний розвиток персоналу.

3. Фінансовий потенціал

- Бюджетування та контроль витрат – розробка стратегій для ефективного управління фінансовими ресурсами.
- ROI аналіз – оцінка повернення інвестицій в технології та процедури ТО.

4. Екологічний потенціал

- Енергоефективність – впровадження енергоефективних технологій та практик.
- Сталість – розробка та впровадження екологічно сталих методів ТО.

5. Безпека та здоров’я

- Системи моніторингу безпеки – впровадження сучасних систем моніторингу для забезпечення безпеки персоналу та обладнання.
- Проактивний підхід – використання аналітичних інструментів для прогнозування та запобігання інцидентам.

Навіть часткове використання цього потенціалу може допомогти не тільки підвищити ефективність системи ТО, але і зробити її більш адаптивною, безпечною, та надійною.

Сучасні умови експлуатації суден часто характеризуються високою стохастичністю гідрометеорологічних умов, що може призвести до непередбачуваних відмов та аварій. Система технічного обслуговування вантажних суден, як складна ергатична система, в різних умовах зовнішнього середовища вимагає пошуку нових технічних рішень, що підвищують його стійкість до впливів такої невизначеності і вимагає високої стійкості систем ТО, щоб забезпечити безперебійну роботу судна, збереження життя екіпажу та захист навколишнього середовища.

М6. Опис класифікації методів предиктивної аналітики

Машинне навчання / Інтелектуальний аналіз даних. Ця категорія включає широкий спектр методів, що базуються на використанні алгоритмів машинного навчання та інтелектуального аналізу даних. Вона враховує використання нейронних мереж, методів класифікації та кластеризації, ансамблів моделей, а також аналізу текстових даних та зображень. Важливим аспектом є здатність цих методів до автоматичного виявлення складних закономірностей у великих обсягах даних та передбачення на їхній основі.

Ймовірнісні моделі. Ця категорія враховує використання ймовірнісних методів та моделей для передбачення подій. Сюди входять методи, такі як байєсівська статистика, методи прогнозування на основі розподілів ймовірностей, а також Монте Карло марковських ланцюгів. Ймовірнісні моделі дозволяють враховувати невизначеність та варіабельність даних, що є важливим аспектом при передбаченні невизначених подій.

Статистичний аналіз. Ця категорія включає методи статистичного аналізу даних для виявлення зв’язків та залежностей між різними параметрами. Вона враховує використання регресійного аналізу, аналізу варіантності, кореляційного аналізу та інших статистичних методів. Ці методи дозволяють встановлювати та оцінювати статистичні взаємозв’язки між різними змінними.

Було проаналізовано різноманітні підходи, що вже існують у галузі технічного обслуговування вантажних суден. Основний акцент було зроблено на визначенні основних недоліків та викликів цих підходів, таких як нестабільність графіку обслуговування, недостатня точність передбачення поломок та високі витрати.

Було проведено дослідження ролі та важливості цифрових технологій у галузі морського транспорту. Зокрема, було розглянуто застосування даних з сенсорів та платформ для моніторингу стану обладнання, аналізу даних для передбачення поломок, а також використання аналітики даних для оптимізації ресурсів та планування обслуговування.

Розроблена класифікація є цінним інструментом, що допомагає структурувати та узагальнити різні підходи до передбачення подій у контексті технічного обслуговування вантажних суден. Вона сприяє кращому розумінню

основних категорій методів та допомагає вибирати оптимальний підхід для конкретних завдань.

Ця класифікація стала важливим компонентом проведеного дослідження, який відображає різнобічні підходи та методи, що використовуються для передбачення та прогнозування подій у галузі технічного обслуговування вантажних суден.

М7. Опис класифікації методів прескриптивної аналітики

Машинне навчання / Інтелектуальний аналіз даних. Ця категорія об'єднує методи, що базуються на застосуванні алгоритмів машинного навчання та інтелектуального аналізу даних для генерації рекомендацій. Вона включає в себе використання нейронних мереж, методів класифікації та кластеризації, рекомендуючі системи, а також аналіз текстових даних та обробку зображень для отримання інформації.

Еволюційне обчислення. Ця категорія містить доступні до використання методи, які моделюють еволюційні процеси в технічному обслуговуванні для вирішення оптимізаційних задач. Методи, такі як генетичні алгоритми, різні види еволюційних стратегій, допомагають знаходити оптимальні рішення на основі пошукових процесів.

Імітаційне моделювання. Ця категорія містить доступні до використання імітаційні моделі та симуляції для створення віртуальних середовищ, де можна аналізувати різні сценарії та вирішувати задачі оптимізації. Це може бути корисно для вирішення складних проблем, де важко використовувати аналітичні методи.

Ймовірнісні моделі. Ця категорія враховує використання ймовірнісних методів та моделей для надання рекомендацій. Це можуть бути методи, які враховують розподіл ймовірностей для прийняття рішень, враховуючи невизначеність та ризики.

Моделі на основі логіки. Ця категорія включає методи, що базуються на застосуванні логічних моделей для прийняття рішень. Це можуть бути різні види логічних систем, формальні методи дедукції та інші логічні підходи.

Математичне програмування. Ця категорія передбачає використання математичних методів та оптимізаційного програмування для знаходження оптимальних рішень. Це можуть бути методи лінійного програмування, динамічного програмування та інші.

Ця класифікація є важливим кроком у систематизації та розумінні різних підходів до надання рекомендацій та вирішення завдання прийняття рішень у галузі технічного обслуговування вантажних суден.

М8. Опис схеми системи комплексного прескриптивного технічного обслуговування вантажних суден

Система характеризується такими процесами її функціонування:

1. Збір даних, що має позначення 1 (Рисунок 2.12).

На першому етапі важливо отримати якісні та вичерпні дані, що будуть лягати в основу всієї системи прескриптивного технічного обслуговування. Система

активно збирає дані про параметри ТС СТЗ 2, а також інформацію з різних джерел 3, таких як сенсори, GPS, метеорологічні дані та сигнали AIS. Зібрані дані транслюються на локальні сервери на судні та в хмарні сховища.

2. Попередній аналіз 7 (Рисунок 2.12).

Центр обробки даних 4 виконує попередній аналіз даних 7, фільтруючи та обробляючи їх на локальних суднових серверах 5 і марних сховищах 6, перед тим, як передавати їх через модуль безпеки 8 до аналітичного центру 9 для детального аналізу. На цьому етапі зібрані дані піддаються глибокому аналізу з метою визначення потенційних проблем, тенденцій та можливостей для покращення. Цей процес включає в себе статистичний аналіз, а саме визначення основних статистичних характеристик зібраних даних, аналіз варіативності, кореляції та інших статистичних показників, виявлення аномалій та викидів і їх ідентифікація. Цей етап є критично важливим для визначення стратегій оптимізації та покращення, і він забезпечує необхідну базу для подальшого процесу прогнозування та прескрипції.

3. Прогнозування та прескрипція 12 (Рисунок 2.12).

Аналітичний центр 9, за допомогою алгоритмів 10 і модулів машинного навчання 13, аналізує дані для створення прогнозів та генерує прескриптивні рекомендації для технічного обслуговування використовуючи прескриптивні алгоритми 11 для планування робіт з ТО.

В центрі цієї системи знаходиться аналітичний центр 9, який не лише аналізує вхідні дані, але і використовує передові техніки, такі як машинне навчання, для створення точних прогнозів стану технічних засобів судна.

Алгоритми машинного навчання 10 навчаються на історичних даних та змінних умовах роботи для постійного удосконалення своїх прогнозів та прескрипцій.

Система інтегрує цифрові стратегії, а саме цифрові моделі, цифрові тіні, та цифрові двійники, у модулі машинного навчання 13 для створення детальних і точних віртуальних представлень реального судна та його компонентів. Цифрові моделі відтворюють структуру та функції суднових систем, дозволяючи аналітичному центру проводити точний аналіз та моделювання. Цифрові тіні представляють реальний стан систем у реальному часі, забезпечуючи аналітичний центр актуальною інформацією. Цифрові двійники дозволяють симулювати різні сценарії та умови для оцінки їх впливу на судно.

Прескриптивні алгоритми 11, на основі цих цифрових стратегій та аналізу даних, генерують конкретні рекомендації щодо технічного обслуговування. Це може включати рекомендації щодо оптимального часу для проведення обслуговування, змін у режимах роботи обладнання, а також специфікації заміни частин та компонентів.

Аналітика та прескрипція 13, забезпечені системою, враховують не тільки технічний стан судна, але й зовнішні умови та змінні, такі як погодні умови, навігаційний маршрут, та робочий навантаження. Все це дозволяє підтримувати оптимальний рівень продуктивності та безпеки, а також зменшує ризик непередбачених збоїв та поломок.

Така інтегрована система аналітики, прескрипції, та цифрових стратегій є ключовим елементом у підвищенні ефективності та надійності технічного обслуговування суднових технічних засобів вантажних суден.

4. Планування операцій ТО 15 (Рисунок 2.12).

На основі отриманих прогнозів та рекомендацій, планувальник ТО 14 створює оптимальний план для технічного обслуговування, враховуючи наявні ресурси та логістику. Цей етап включає в себе визначення оптимального плану технічного обслуговування на основі прескриптивних алгоритмів 11 та методів машинного навчання 10. Прескриптивні методи машинного навчання дозволяють аналізувати великі об'єми даних та формувати план ТО, що оптимально відповідає конкретним умовам та потребам. До таких методів входять оптимізаційні алгоритми 16 та алгоритми прийняття рішень 17, такі як reinforcement learning, які надають можливості оптимізувати склад робіт з ТО та їхню періодичність на основі вхідних даних про стан обладнання, робоче навантаження, зовнішні умови, та інші параметри.

Прескриптивні алгоритми аналізу і синтезу надають можливість аналізувати велику кількість факторів, включаючи динаміку зношування, історію відмов СТЗ і К, інтенсивність використання та стан замінних частин, для синтезу оптимальних параметрів системи ТО. Це може включати в себе оптимізацію частоти обслуговування, визначення оптимального складу робіт, та визначення необхідних ресурсів і запчастин 17.

Всі ці методи і алгоритми працюють разом для формування гнучкого плану ТО, який може адаптуватися до змінних умов та потреб судна, гарантуючи високу ефективність і надійність обслуговування. Таким чином, система планування ТО, реалізована через планувальник ТО 14, є ключовою складовою в схемі системи КПТОВС суднових технічних засобів вантажних суден.

5. Виконання операцій ТО 19 (Рисунок 2.12).

Цей етап відіграє критичну роль у комплексній системі прескриптивного технічного обслуговування, оскільки він забезпечує виконання запланованих завдань та постійний моніторинг стану суднових технічних засобів. Екіпаж судна отримує інструкції 21 через цифрову панель управління 18 та виконує необхідні операції ТО. Стан судна та результати ТО контролюються, модулем 20, в реальному часі для забезпечення високої ефективності та безпеки.

Відбувається пряме втілення планів та процедур технічного обслуговування суднових технічних засобів. Кожен пункт плану ТО виконується згідно з встановленими стандартами та процедурами. Використовуються спеціалізовані інструменти та обладнання для виконання конкретних задач.

Після виконання кожного пункту проводиться детальна перевірка якості робіт 20. Виправляються всі виявлені недоліки та помилки перед переходом до наступного пункту 20.

Усі роботи виконуються з дотриманням норм безпеки. Проводиться регулярна інструктаж з безпеки 23. Процеси та процедури стандартизовані для забезпечення високої якості робіт. Всі роботи відповідають вимогам міжнародних та національних стандартів.

Всі відхилення та проблеми, що виникають під час виконання робіт, виявляються вчасно. Здійснюється невідкладна реакція на всі виявлені проблеми для їх оперативного вирішення 20.

Проводиться постійний моніторинг та аналіз ходу виконання робіт 20. Аналізується ефективність використання ресурсів та часу на кожному етапі 22.

Результати виконання кожного пункту ТО документуються для створення повного звіту про виконані роботи 22. Всі виявлені проблеми та відхилення фіксуються в документації.

Після завершення всіх робіт формується звіт, який включає детальну інформацію про виконане ТО 23. Звіти аналізуються для виявлення можливостей оптимізації процесів ТО 22.

Цей етап важливий для забезпечення надійності та продовження терміну служби суднових технічних засобів та систем, а також для підтримання високого рівня безпеки на вантажних суднах.

6. Моніторинг та звітність 24 (Рисунок 2.12).

Під час та після виконання ТО, система моніторингу постійно слідкує за параметрами роботи обладнання та станом систем 22, використовуючи вбудовані сенсори та інші джерела даних. Дані з моніторингу 20 збираються та аналізуються для оцінки ефективності виконаного обслуговування та виявлення можливих проблем, які можуть виникнути у майбутньому.

7. Зворотний зв’язок та оптимізація за експлуатацією 25 (Рисунок 2.12).

Дані про виконання ТО та стан судна знову аналізуються аналітичним центром 9 для постійного удосконалення алгоритмів прогнозування та прескрипції 10, 11, 13. Отримання зворотного зв’язку від відповідальних осіб та користувачів обладнання щодо якості виконаних робіт. Виявлення областей для покращення на основі отриманого зворотного зв’язку 25. Внесення коректив у процеси ТО 14 на основі аналізу зворотного зв’язку та звітів про виконане ТО 19. Виконується постійний розвиток та вдосконалення процесів ТО 16, 17 з метою підвищення їх ефективності та якості. Проводиться аналіз результатів виконаного ТО 19. Визначається ефективність втілення плану ТО 10 та виявляються області для подальшого покращення.

На основі аналізу результатів формуються плани 14 на подальше технічне обслуговування та вдосконалення обладнання. Визначається необхідність у додаткових корекцій, виробляються рекомендації для подальшого обслуговування.

Результати моніторингу 24 та відгуки від екіпажу 23 використовуються для зворотного зв’язку та подальшого удосконалення системи прескриптивного технічного обслуговування. У випадку виявлення невідповідності або нових ризиків, система може коригувати наступні плани ТО 14 та адаптувати прескриптивні рекомендації 12 для кращого врахування змінених умов та потреб.

Отримана інформація також може бути використана для навчання та оптимізації моделей машинного навчання 13 та прескриптивних алгоритмів 11, що підтримують систему, у той час як цифрові двійники та інші цифрові моделі

можуть бути оновлені для точного відображення актуального стану технічних засобів судна.

8. Резервне копіювання даних 26 (Рисунок 2.12):

На цьому етапі створюються резервні копій усієї корисної інформації що міститься системи. Забезпечується інтегрованість та доступність даних.

Цифрова панель управління 18 (Рисунок 2.12) є ключовим інтерфейсом для екіпажу судна, де представлено актуалізовану інформацію про стан судна і рекомендації з технічного обслуговування. Вона слугує місцем для візуалізації даних, управління задачами, та комунікації між різними учасниками системи.

Цифрова панель управління відображає деталізовані дані про стан різних систем судна, отримані від сенсорів 2 та інших джерел даних 3. Вона дозволяє екіпажу відслідковувати ключові параметри роботи та отримувати сповіщення про потенційні проблеми.

На основі аналізу даних 9 та прескриптивної аналітики 12, панель управління надає конкретні рекомендації та інструкції з ТО 15, які екіпаж має впровадити для підтримки оптимального технічного стану судна 19.

Панель також обладнана інструментами для обміну інформацією між екіпажем 23, аналітичним центром, і іншими суднами чи береговими службами 22. Це забезпечує ефективну координацію та реагування на виникнення нестандартних ситуацій.

Цифрова панель управління 18 інтегрується з цифровими моделями, цифровими тінями та цифровими двійниками обладнання та систем судна для точного відтворення їхнього стану та динаміки роботи. Це дозволяє екіпажу мати точне уявлення про реальний стан суднових технічних засобів та приймати обґрунтовані рішення засновані на точних та актуальних даних.

Таким чином, цифрова панель управління 18 є не лише вікном для візуалізації даних та управління задачами, але й місцем для стратегічного планування та взаємодії, що базується на передових цифрових технологіях та стратегіях.

Модуль комунікації, що реалізовано через цифрову панель управління 18 (Рисунок 2.12), є основним засобом для обміну інформацією між різними компонентами системи та зовнішніми учасниками 22. Він розроблений для забезпечення ефективної та надійної комунікації між екіпажем судна 23, аналітичним центром, береговими службами, та іншими суднами 22.

Модуль комунікації включає в себе засоби для внутрішнього зв’язку між членами екіпажу та для зовнішнього зв’язку з береговими службами та іншими суднами. Це може включати радіозв’язок, супутникову комунікацію, електронну пошту, та інші сучасні засоби комунікації.

Модуль комунікації також включає систему сповіщень, яка інформує відповідних учасників про важливі події, зміни стану систем, або будь-які інші важливі події, що вимагають уваги або втручання.

Для забезпечення конфіденційності, цілісності та доступності інформації, модуль комунікації використовує сучасні криптографічні технології та

протоколи, які забезпечують захист від несанкціонованого доступу, втручання та атак.

Модуль комунікації тісно інтегрований з іншими складовими системами, такими як аналітичний центр 9 та планувальник ТО 14, для забезпечення безшовного обміну даними та інформацією між різними частинами комплексної системи.

Модуль розроблений таким чином, щоб бути гнучким та адаптивним до змін у технологіях комунікації, та сумісним з різноманітними стандартами та протоколами комунікації, що дозволяє легко інтегрувати нові технології та засоби комунікації, коли вони стають доступними.

Таким чином, модуль комунікації є важливим компонентом, який забезпечує ефективний обмін інформацією між різними елементами системи та зовнішніми учасниками, а також підтримує безпеку, адаптивність та сумісність в умовах постійної еволюції технологічного середовища.

Модуль управління запасами та логістики 18 (Рисунок 2.12) відповідає за оптимізацію процесів придбання, зберігання та доставки запасних частин, змащувальних матеріалів, палива та інших матеріалів, необхідних для технічного обслуговування судна.

Завдяки використанню передових алгоритмів та методів аналізу даних, система прескриптивного технічного обслуговування здатна прогнозувати потреби в запасних частинах та інших матеріалах, оптимізуючи запаси, щоб знизити витрати та забезпечити наявність необхідних компонентів, коли вони потрібні.

Система може автоматично формувати замовлення на поповнення запасів на основі прогнозування потреб, а також враховувати динаміку цін, терміни доставки та надійність постачальників, щоб визначити оптимальний момент для замовлення.

Враховуючи маршрути суден, порти завантаження/вивантаження, та інші логістичні фактори, система забезпечує оптимізацію логістичних процесів, включаючи доставку запасів до відповідних портів та координацію з береговою інфраструктурою.

Система тісно інтегрована з системами управління постачальників та логістичними платформами, що дозволяє забезпечити своєчасну та ефективну комунікацію, а також автоматизацію процесів замовлення та доставки.

У системі реалізовано функції для відстеження руху запасних частин та інших матеріалів, включаючи їхнє зберігання, транспортування та використання, що дозволяє максимально точно контролювати наявність та стан запасів.

Таким чином, модуль управління запасами та логістики є невід’ємною частиною комплексної системи, відіграючи ключову роль у забезпеченні ефективності та економічності процесів технічного обслуговування суднових технічних засобів вантажних суден.

Інновації та відмінності від існуючих систем технічного обслуговування вантажних суден.

Основні інновації та відмінності системи КПТОВС суднових технічних засобів вантажних суден полягають у впровадженні передових цифрових технологій, машинного навчання, аналітики даних та інтелектуальних алгоритмів.

Система втілює розроблені цифрові моделі, цифрові тіні та цифрові двійники, які є відображенням реальних об'єктів та процесів в цифровому середовищі. Ці інновації дозволяють глибоко аналізувати та моделювати різні аспекти системи, вивчаючи вплив змінних умов та параметрів на загальну ефективність та продуктивність системи ТО.

Використання прескриптивної аналітики та машинного навчання дозволяє системі не просто аналізувати інформацію, але й робити точні прогнози та генерувати оптимальні рекомендації щодо планування та виконання технічного обслуговування, формувати оптимізований план ТО, що підвищує ефективність та знижує витрати.

Система автоматизує численні процеси, від збору даних до виконання обслуговування, включаючи оптимізацію логістики та управління запасами. Це не тільки забезпечує зниження операційних витрат, але й гарантує високу точність та надійність процесів.

Система розроблена таким чином, що може адаптуватися до змін умов, масштабуватися та інтегруватися з іншими системами та платформами, що забезпечує гнучкість та перспективність рішення в довготривалій перспективі.

Система сприяє екологічності, допомагаючи оптимізувати використання ресурсів, зменшувати викиди та споживання палива, а також сприяє екологічної освіченості екіпажу та експлуатаційного персоналу через інформаційні панелі та звіти.

Завдяки цим інноваційним та унікальним властивостям, представлена система стає передовим рішенням у сфері технічного обслуговування суднових технічних засобів вантажних суден.

Переваги системи КПТОВС.

Система КПТОВС втілює ряд переваг, що роблять її вище традиційних систем у сфері технічного обслуговування:

Система спроможна адаптуватися до змінних умов та вимог, що дозволяє екіпажу та обслуговуючому персоналу ефективно реагувати на нові виклики та обставини.

Завдяки оптимізації та автоматизації процесів, система допомагає зменшити споживання ресурсів, таких як паливо, мастила та інші матеріали, що призводить до зниження витрат та поліпшення екологічної стійкості.

Використання прескриптивної аналітики та інтелектуальних алгоритмів дозволяє системі точно прогнозувати потреби та ризики, генерувати рекомендації та автоматично адаптувати плани технічного обслуговування з метою підвищення ефективності.

Система автоматизує та оптимізує логістичні процеси, враховуючи доступність запасних частин, ресурсів та персоналу, що забезпечує своєчасне та ефективне виконання обслуговування.

Система здатна масштабуватися для великих та малих суден та інтегруватися з іншими існуючими системами та платформами, надаючи гнучкість та спроможність адаптації до різних потреб та технологічних рішень.

Система забезпечує своєчасне виявлення та виправлення дефектів, а також запобігання несправностей, що покращує технічний стан та підвищує надійність суднових технічних засобів, забезпечуючи надійність, довший термін служби та безпеку експлуатації.

Завдяки цим перевагам, система КПТОВС є високоефективним та інноваційним рішенням, яке відповідає сучасним і перспективним вимогам та стандартам в сфері морського транспорту.

Система може бути впроваджена на суднах різного типу та призначення, включаючи вантажні, пасажирські, науково-дослідницькі судна, та на будь яких плавучих спорудах.

Система може бути інтегрована у логістичні процеси портів та терміналів для підвищення ефективності та оптимізації операцій з обслуговування суден.

Високий рівень автоматизації та оптимізації може бути корисним для плавучих бурових установок та інших морських споруд в нафтогазовій промисловості.

Система може бути використана для підтримки технічного стану та боєздатності військових кораблів, суден забезпечення та інших плавучих об’єктів.

Система може бути адаптована для обслуговування плавучих вітряних електростанцій та інших морських об’єктів відновлюваної енергетики.

Прескриптивне технічне обслуговування здатне оптимізувати експлуатацію та обслуговування плавучих ферм, риболовних суден та інших спеціалізованих об’єктів.

Для наукових суден та плавучих лабораторій система може забезпечувати надійність та ефективність обслуговування, що є критично для успішного виконання наукових місій.

Завдяки своїй гнучкості, масштабованості та адаптивності, система КПТОВС може бути налаштована та інтегрована для вирішення унікальних задач та викликів конкретних сфер застосування.

Висновки.

Система КПТОВС є перспективним і інноваційним рішенням, яке інтегрує різноманітні технології, методології та цифрові стратегії з метою автоматизації та оптимізації процесів технічного обслуговування суден.

1. Система втілює синергію аналітики, прескриптивної аналітики, планування, комунікацій, управління запасами, логістики, інновацій та цифрових стратегій, що дозволяє досягати високого рівня ефективності та надійності у технічному обслуговуванні суден.

2. Завдяки своїй модульній структурі та гнучкості, система може бути адаптована та масштабована згідно з потребами конкретних користувачів та сфер застосування, враховуючи специфіку, розмір та інші параметри суден та їхнього експлуатаційного середовища.

3. Використання цієї системи сприяє підвищенню ступеня безпеки судноплавства, оскільки ретельне та своєчасне технічне обслуговування зменшує ризик виникнення аварій та інцидентів.

4. Зниження витрат на ремонт та обслуговування, оптимізація запасів та логістичних процесів, підвищення продуктивності та ефективності судна веде до збільшення економічної ефективності та конкурентоспроможності судноплавних компаній.

5. Система відкриває нові горизонти для наукових досліджень, розвитку технологій та впровадження інноваційних рішень в галузі судноплавства та суднобудування.

Враховуючи вищезгадані аспекти, ця система виступає як стратегічний інструмент для компаній, організацій та держав, що прагнуть оптимізувати свої операції, забезпечити безпеку та стійкість, та стати лідерами в галузі судноплавства у XXI столітті.

М9. Особливості формування структури систем моніторингу СТЗ і К

У процесі створення системи КПТОВС і інтеграції загального підходу до розробки інформаційної системи моніторингу технічного стану різних технічних засобів, конструкцій, систем і комплексів в умовах інтелектуальних транспортних систем, для формування структури бортового комплексу ACMS з урахуванням його функціональних можливостей, було проведено аналіз, узагальнення та порівняння наявних даних щодо використання інтелектуальних транспортних систем у морському транспорті. Особлива увага була приділена важливості їх впровадження в контексті вантажних суден та загальної системи водного транспорту.

Для досягнення цієї мети була сформульована системна задача, яка передбачала розробку обґрунтованих стратегій для створення систем моніторингу вантажних суден. Основною метою цих систем є збір технічної інформації про окремі вантажні судна, які експлуатуються як в Україні, так і в різних частинах світу.

Важливою складовою концепції системи КПТОВС є її здатність постійно контролювати технічний стан судна, характеристики системи ТО, дії екіпажу, умови технічного використання судна, а також допомагати екіпажу найбільш ефективно та безпечно виконувати технічну експлуатацію суднових технічних засобів, конструкцій, систем і комплексів, зокрема в умовах максимальної складності.

Ця концепція передбачає наявність інтегрованого системного рішення, яке може функціонувати як комплексний помічник, визнаний також як "віртуальний екіпаж: стан СТЗіК". Відзначено, що цей віртуальний екіпаж сприяє ефективній та безпечній експлуатації суднових технічних засобів, конструкцій, систем і комплексів навіть в найбільш вимогливих ситуаціях [343]. Крім того, слід зауважити, що кожне вантажне судно вступає в постійну взаємодію з навколишнім середовищем, інфраструктурою водних шляхів та іншими суднами, які також рухаються по водних шляхах як частина транспортних

потоків. В цьому контексті важливо, що вантажні судна повинні ідентифікуватися з боку інфраструктури водних шляхів та брати участь у системі моніторингу їхніх технічних параметрів та характеристик. Ця інформація необхідна для належної координації руху суден і дотримання вимог міжнародного законодавства [190].

Наприкінці XX та початку XXI століття акцент у дослідженнях та розробках науковців та спеціалістів був спрямований на поліпшення технічних можливостей суден [94, 161, 179, 206, 240, 316, 331]. Особлива увага приділяється проблемі управління суднами, і ця увага не обмежується лише роллю судноводія, а також охоплює автономні системи судноводіння [43, 93, 137, 155, 248, 349, 396]. Розвиток інтелектуальних водних транспортних засобів знайшов поштовх від амбіційних проектів, спрямованих на створення "автономних суден" - Maritime Autonomous Surface Ships (MASS) [10, 63, 97, 118, 119, 123, 309]. Ці програми та проекти свідчать про можливість практичного впровадження інтелектуальних систем в засоби водного транспорту. Однак, на той момент, технічний рівень не був достатньо високим для масового виробництва таких систем, оскільки їх вартість виявилася надто великою для комерційного використання. Впродовж останнього часу ситуація змінилася: розвиток водного транспорту та доступність обчислювальної техніки дозволяють ефективно реалізовувати подібні проекти. При інтеграції інтелектуальних транспортних систем в існуючий судновий флот України виникає значна проблема через різницю в технічному рівні і віковій структурі суден, що експлуатуються. Серед них є як сучасні судна, так і ті, які були спроектовані та виготовлені у 70-80-х роках минулого століття, і всі вони можуть бути активними учасниками судноплавства. Для забезпечення ідентифікації і моніторингу цих суден необхідно адаптувати їх до можливостей використання інтелектуальних транспортних систем. Крім того, рівень негативного впливу суднових технічних засобів на навколишнє середовище в умовах великої концентрації суден на водних шляхах потребує зменшення шкідливого впливу на екосистему, включаючи флору та фауну [146].

Впровадження міжнародних екологічних стандартів для водного транспорту, зокрема MARPOL Annex VI «Tier III», з 1 січня 2020 року, не призвело до суттєвих перетворень у структурі світового морського транспорту. Більшість суден досягли відповідності зазначеним вимогам шляхом переведення на пальне з мінімальним вмістом сірки. Цей факт підтверджується висновками експертів в галузі [167, 187].

Щодо адаптованості існуючого світового суднового флоту до інформаційних умов інтелектуальних транспортних систем, можна відзначити, що існує потреба адаптувати значну частину цього флоту. Більшість суден, що відповідають стандартам, які розташовані нижче MARPOL Annex VI «Tier III», фактично не можуть бути включені в системи інтелектуальних транспортних систем без встановлення відповідних технічних засобів. Судна, що відповідають стандартам MARPOL Annex VI «Tier III», вже адаптовані для роботи в системах інтелектуальних транспортних систем і можуть бути ідентифіковані в них за

допомогою відповідних OBD-M сканерів-адаптерів або інших пристроїв. Можливість моніторингу технічних параметрів на цих суднах також може бути здійснена дистанційно, використовуючи ті ж самі відповідні OBD-M сканери-адаптери або інші технічні засоби. У загальному сенсі, всі ці судна можна поділити на такі категорії: перспективні судна, які знаходяться в процесі розробки та плануються до випуску; судна, які вже знаходяться в експлуатації та обладнані вбудованою мережею CANopen [53]; судна, які також знаходяться в експлуатації, але не оснащені вбудованою мережею CANopen.

У цій структурі судна передбачається можливість використання модуля зв'язку, який взаємодіє не лише з зовнішніми сервісами, але також може використовувати внутрішню бортову систему для ідентифікації, моніторингу та контролю параметрів суднових технічних засобів, конструкцій, систем і комплексів, а також для зберігання даних про технічний стан судна, умови його експлуатації, напрацювання і технічні впливи на судно і подібні параметри.

Це передбачає відстеження технічного стану та управління працездатністю суднових технічних засобів, конструкцій, систем і комплексів, а також для оперативного прийняття рішень з метою запобігання небезпечному рівню забруднення водних шляхів і навколишнього середовища. Інформація про технічний стан і умови експлуатації суден, а також дані про рівень забруднення водних шляхів і параметри судноплавства передаються до відповідних систем оцінки рівня забруднення навколишнього середовища на конкретних судноплавних маршрутах і систем ідентифікації та моніторингу вантажних суден в транспортному потоці.

Конструкція судна має передбачити можливість використання модулів зв'язку, які можуть взаємодіяти не лише з внутрішньою бортовою системою ідентифікації, моніторингу та контролю параметрів суднових технічних засобів, а також локальні сервери і системи зберігання даних про працездатність суднових технічних засобів, їхнє напрацювання і технічний стан, тощо.

Також, конструкція судна повинна забезпечувати можливість при виконанні ідентифікації судна в транспортному потоці використовувати не тільки систему ближньої автоматичної ідентифікації Automatic Identification System (AIS), а і систему дальньої ідентифікації і спостереження за суднами Long Range Identification and Tracking (LRIT) (супутникової ідентифікації). Передача інформаційних потоків з судна в процесі його функціонування до єдиної системи моніторингу суден повинна відбуватися засобами Inmarsat, AIS, Internet, Starlink.

Як підсумок, запропоновано системний підхід для вирішення завдання створення єдиної системи моніторингу технічного стану суден, незалежно від їх статусу (нові або вже експлуатовані). Цей підхід передбачає створення структури бортового комплексу інтелектуальних транспортних систем та може бути використаний як методичний інструмент для обґрунтування технічних вимог при розробці та впровадженні систем моніторингу суден у водних транспортних потоках у всьому світі.

М10. Особливості формування структури систем моніторингу показників ефективності системи ТО

Для цієї мети була вирішена системна задача, яка полягала у розробці аргументованих стратегій для створення систем моніторингу вантажних суден з метою збору інформації про системи ТО окремих вантажних суден, що експлуатуються як в Україні, так і у різних частинах світу.

Основна концепція системи КПТОВС полягає в її здатності постійно контролювати характеристики системи ТО, показники ефективності системи ТО, дії екіпажу, умови технічного використання судна, а також допомагати екіпажу найбільш ефективно та безпечно виконувати технічну експлуатацію суднових технічних засобів, конструкцій, систем і комплексів, зокрема в умовах максимальної складності.

Запропонована концепція передбачає наявність додаткового інтегрованого системного рішення, яке може функціонувати як комплексний помічник, визнаний також як "віртуальний екіпаж: ефективність ТО". Відзначено, що цей елемент віртуального екіпажу сприяє ефективному та безпечному обслуговуванню суднових технічних засобів, конструкцій, систем і комплексів навіть в найбільш вимогливих ситуаціях [343].

До того ж, важливо враховувати, що вантажні судна постійно перебувають в активному взаємодії з навколишнім середовищем, водними шляхами та іншими суднами, що також пересуваються в межах транспортних потоків. У цьому контексті надзвичайно важливо, що вантажні судна здатні точно ідентифікуватися з боку інфраструктури водних шляхів і приймати активну участь у системі моніторингу технічних параметрів та характеристик. Ця інформація відіграє критичну роль у забезпеченні ефективної координації руху суден та виконанні вимог міжнародного законодавства [190].

З метою впровадження описаних у розділі присвяченому створенню автоматизованого бортового комплексу ACMS підходів у реальну практику водного транспорту та формування єдиної системи моніторингу суден у складі аналітичного центру ShipDiMRO, враховуючи раніше проведені наукові дослідження [209, 212, 413, 415, 431], рекомендується [120], в тому числі в комплексній системі прескриптивного технічного обслуговування, передбачити не тільки модуль визначення параметрів технічного стану суднових засобів, телематики супутникової навігації та зв’язку, а і замкнути всі інформаційні системи судна: екіпаж, бортову систему контролю з накопиченням даних і засоби автоматичної ідентифікації судна, на виробничі інформаційні системи водного транспорту, геоінформаційні системи оцінювання рівня шкідливого забруднення середовища водних шляхів конкретних водних шляхів, на процес моніторингу показників ефективності системи ТО через аналіз експлуатаційних характеристик системи ТО. Підходи до вирішення вказаної задачі для вже існуючих суден, які оснащені вбудованою мережею CANopen – можна знайти на Рисунку 3.6; для суден, що не оснащені вбудованою мережею CANopen – на Рисунку 3.7. Особливістю структури, що представлено на Рисунку 3.6, є здійснення об’єднання всіх інформаційних потоків що містять інформацію про експлуатаційні характеристики системи ТО через використання вбудованої мережі CANopen судна. В даному контексті, для контролю системи ТО в процесі

експлуатації застосовується бортова система моніторингу, що відповідає стандарту OBD-M, а також інтегрована захищена система моніторингу і технічної діагностики, яка включає контролери-сканери, комунікатори, трекери і, за необхідності, відповідні датчики для контролю експлуатаційних характеристик системи ТО.

В даній структурі судна передбачається можливість використання модуля зв'язку, який співпрацює не лише з зовнішніми сервісами, а також може взаємодіяти з внутрішньою бортовою системою для ідентифікації, моніторингу та контролю експлуатаційних характеристик системи технічного обслуговування вантажних суден. Крім того, цей модуль призначений для зберігання даних про ефективність системи технічного обслуговування вантажного судна, умови його експлуатації, напрацювання та технічні впливи на судно, а також подібні параметри.

Крім того, враховуючи взаємодію суден з іншими суднами в морських маршрутах, їх ідентифікацію в транспортному потоці можна здійснювати за допомогою системи AIS, яка встановлюється безпосередньо на суднах. Процес передачі інформаційних потоків із суден здійснюється постійно в процесі їх технічної експлуатації та включає в себе використання засобів Inmarsat, GPS, AIS, Internet, Intranet для передачі даних до віртуальної судноплавної компанії «shipmonitoring.org» – підприємства, яке займається обслуговуванням водного транспорту. Це передбачає відстеження експлуатаційних характеристик системи ТО та управління параметрами системи ТО, а також для оперативного прийняття рішень з метою запобігання небезпечному рівню забруднення водних шляхів і навколишнього середовища. Інформація про технічний стан і умови технічного обслуговування суден, а також дані про рівень забруднення водних шляхів і параметри судноплавства передаються до відповідних систем оцінки рівня забруднення навколишнього середовища на конкретних судноплавних маршрутах і систем ідентифікації та моніторингу вантажних суден в транспортному потоці.

Особливістю структури, що представлено на Рисунку 3.7, є те, що об'єднання всіх інформаційних потоків, що містять інформацію про експлуатаційні характеристики системи ТО відбувається шляхом використання уніфікованих захищених промислових протоколів для контролю системи ТО, які безпосередньо впроваджуються на судні.

В структурі судна має бути передбачена можливість використання модуля зв'язку, локальних серверів і засобів передачі інформаційних потоків що містять інформацію про експлуатаційні характеристики системи ТО із судна до єдиної системи моніторингу вантажних суден. Ця система функціонує аналогічно описаним вище компонентам бортового комплексу інтелектуальних транспортних систем на судні, які оснащені вбудованою мережею CANopen [53].

Розроблена процедура обґрунтування комплексу функцій інтелектуальних транспортних систем може стати корисним методичним інструментом для обґрунтування технічних вимог та завдань щодо розробки і створення систем

моніторингу, спрямованих на збір технічної інформації про експлуатаційні характеристики системи ТО окремих вантажних суден по всьому світу.

Додатково, конструкція судна повинна передбачати можливість при виконанні ідентифікації судна в транспортному потоці використовувати не тільки центр обробки даних на судні, а й хмарні обчислення в аналітичному центрі із залученням модуля планування ТО.

Передача інформаційних потоків з судна в процесі його функціонування до єдиної системи моніторингу суден повинна відбуватися засобами Inmarsat, AIS, Internet, Starlink безпосередньо модулями кібербезпеки.

М11. Опис схеми інформаційного обміну між елементами вимірювального комплексу

Ця схема включає в себе наступні компоненти: суднові технічні засоби, конструкції, системи і комплекси, електронні блоки керування СТЗ, штатні датчики, датчики, що встановлені додатково для вимірювання параметрів СТЗ і К (на прикладі датчиків температури, тиску, вібрації, частоти обертання, швидкості потоку, кількості робочого тіла, тощо), лінії системи стандарту OBD-M, адаптер (сканер) OBD-M [42, 77, 122, 123, 138, 415, 419]; контролер сканер-комунікатор [42, 123, 415, 419]; з’єднання з іншими пристроями через фізичні або радіо інтерфейси; система моніторингу стану СТЗ і К вантажного судна (ACMS); блок моніторингу характеристик системи ТО судна (ShipDiMRO); використання Inmarsat, GPS, AIS, Internet, Intranet, Starlink, Web-сервісу, бази даних, необхідного програмного забезпечення, а також інтелектуальних програмних комплексів для планування ТО, що ґрунтуються на прескриптивній аналітиці і ймовірнісних математичних моделях; оперативна інформація, що передається через мережі передачі даних Inmarsat, GPS, AIS, Internet, Intranet, Starlink, учасникам процесу обслуговування СТЗ і К судна; і автоматизоване робоче місце для планування операцій ТО. З метою спрощення створення та використання вимірювального комплексу, який поєднує моніторинг стану СТЗ і К судна (ACMS) з моніторингом характеристик системи ТО судна (ShipDiMRO), датчики, лінії системи стандарту OBD-M та додаткові датчики, утворюють інтегровану систему внутрішніх суднових мереж (зображену на Рисунку 3.9).

Електронні управляючі блоки суднових технічних засобів, якщо судно обладнане системами стандарту OBD-M, використовуються для отримання інформації щодо параметрів СТЗ, систем і комплексів (див. Рисунок 3.5). Ця інформація зібрана зі стандартних датчиків, розташованих на СТЗ, і передається через адаптер OBD-M до цифрової панелі управління, що з’єднана з іншими пристроями через фізичний або радіо інтерфейс. Після цього отримані дані передаються до Web-сервісу та бази даних через Inmarsat, GPS, AIS, Internet і Intranet. Залежно від поставленої завдання, ця інформація може бути використана в процесі дослідження параметрів системи технічного обслуговування і передана на автоматизоване робоче місце для планування операцій технічного обслуговування.

За допомогою блока ShipDiMRO, призначеного для моніторингу характеристик систем технічного обслуговування, і системи ACMS, яка призначена для моніторингу стану суднових технічних засобів і конструкцій, якщо датчики ACMS не входять до складу системи стандарту OBD-M, використовується для отримання інформації про параметри СТЗ та характеристики системи ТО (див. Рисунок 3.9). Ця інформація збирається з додаткових датчиків, встановлених окремо, і подається до аналітичного центру через мережі Inmarsat, GPS, AIS, Internet, Intranet і Starlink. Після цього отримані дані передаються до Web-сервісу та бази даних і, в залежності від завдання, в процесі дослідження параметрів системи ТО - на автоматизоване робоче місце для планування операцій технічного обслуговування.

Залежно від того, чи включена (або виключена) автоматизована система планування операцій технічного обслуговування до внутрішньої мережі вимірювального комплексу для дистанційного дослідження ефективності системи ТО в комплексній системі прескриптивного технічного обслуговування, цей комплекс може працювати у трьох різних режимах: ручному, автоматизованому та автоматичному. Головна відмінність полягає в тому, чи використовуються інтелектуальні програмні комплекси для планування ТО, чи проводиться коригування оцінки умов експлуатації судна та чи відбувається управління параметрами системи ТО в режимі реального часу (у автоматичному або ручному (автоматизованому) режимі за допомогою алгоритмів аналізу та синтезу оптимальних параметрів системи ТО.

У цьому випадку, інформація, отримана з Web-сервісу і бази даних, передається до програмного забезпечення, і, через мережі Inmarsat, GPS, AIS, Internet, Intranet та Starlink, до інтелектуальних програмних комплексів для планування ТО та до учасників процесу обслуговування суднових технічних засобів та комплексів судна. Основний принцип роботи цього обладнання базується на можливості точного визначення фактичних характеристик системи ТО судна, технічних параметрів стану його суднових технічних засобів, конструкцій, систем та комплексів, а також точного визначення місця розташування та точного часу за параметрами, отриманими від навігаційних супутникових систем, зокрема, від GPS-приймача, і обміну цією інформацією з автоматизованим робочим місцем для планування операцій ТО.

Для забезпечення управління ефективністю системи технічного обслуговування, використовується блок управління оптимальними параметрами системи ТО під назвою ShipDiMRO. Цей блок, у спільності з його складовими компонентами (детально представленими на Рисунку 3.9), виконує завдання системи КПТОВС і передає важливу інформацію до цифрової панелі управління процесом ТО у створену систему обміну інформацією [118, 123, 415, 431]. Обмін інформацією в цьому комплексі відбувається через різноманітні засоби, такі як Inmarsat, GPS, AIS, Internet, Intranet, Starlink, і включає як цифрові та відеодані, так і аудіо дані.

Блок управління оптимальними параметрами системи ТО ShipDiMRO є інтелектуальним пристроєм, здатним самостійно контролювати технічні

параметри суднових технічних засобів, конструкцій, систем і комплексів, а також експлуатаційні характеристики системи ТО під час експлуатації судна. Внутрішня пам'ять блока ShipDiMRO містить вихідні дані для роботи інтелектуальних програмних комплексів для планування ТО, включаючи параметри суднових технічних засобів і конструкцій. Порівняння інформації про положення судна та заданих показників ефективності системи ТО дозволяє блоку управління оптимальними параметрами системи ТО ShipDiMRO автоматично приймати рішення про інформування як екіпажу, так і оператору автоматизованого робочого місця для планування операцій ТО та учасникам процесу обслуговування суднових технічних засобів, систем та комплексів судна щодо будь-яких відхилень від заданих параметрів. Для забезпечення оперативного управління, зв'язок в цьому комплексі реалізується в двосторонньому режимі.

М12. Опис особливостей предметної області інформаційної системи оцінювання способів підвищення ефективності систем ТО

Знання кількості інформації важливо, оскільки це сприяє раціональному прийняттю рішень та ефективному управлінню ресурсами. По-перше, це дозволяє розуміти обсяг і склад інформації, що доступний, і визначати, наскільки вона відповідає поставленим завданням. По-друге, знання кількості інформації важливе для оптимізації процесів збору, аналізу та зберігання даних, що зменшує зайві витрати часу та ресурсів. Також, це сприяє структуруванню та організації інформації, полегшуючи її подальше використання. Враховуючи масштаби сучасного світу, де інформація постійно зростає, знання кількості інформації стає необхідністю для досягнення успіху в багатьох сферах життя.

Також, знання кількості інформації, важливо для контролю за її якістю та достовірністю. Визначення кількості інформації може допомогти у виявленні дублікатів, помилок, а також у підтримці узгодженості та актуальності даних. Крім того, знання кількості інформації сприяє легшому виявленню та управлінню перевантаженням інформацією, що може призвести до стресу та недооцінки важливих аспектів. Отже, відомості про кількість інформації допомагають створювати більш обґрунтовані, продуктивні та збалансовані стратегії обробки та використання інформації в сучасному інформаційному суспільстві.

На думку авторів статей і досліджень існують різні методи вимірювання кількості інформації, а обробка інформації може розглядатися як форма технології, подібна до обробки матеріальних ресурсів. Гілберт [140] надає огляд історії та проблем вимірювання інформації, тоді як Хейз [138] пропонує набір показників інформації, заснованих на обробці даних. Берджесс [49] пропонує методологію використання критеріїв якості для допомоги в пошуку інформації, а Перрі [297] зосереджується на кількісній оцінці та вимірюванні обміну інформацією під час інцидентів з масовими жертвами. Загалом, ці роботи свідчать про те, що вимірювання кількості інформації є складним і багатогранним завданням, яке вимагає врахування різних факторів, зокрема

контексту, в якому використовується інформація, а також методів, що застосовуються для обробки і структурування даних та вимагає ретельного розгляду теоретичних і методологічних питань. Поєднання представлених підходів дає комплексне уявлення про технічний об'єкт як складну інформаційно-технологічну систему.

З урахуванням структури інформаційної системи на DFD-діаграмі, важливими джерелами первинних даних про показники ефективності системи ТО і технічний стан СТЗ і К є пристрої для збирання та передачі інформації про базу даних, учасників процесу обслуговування, умови експлуатації тощо, які розглядаються як «зовнішні сутності» [42, 358]. Серед функціональних завдань «Інформаційної системи моніторингу» визначаються ідентифікація, моніторинг та прогнозування ефективності системи ТО, технічних параметрів СТЗ і К, а також діагностування та прогнозування параметрів технічного стану СТЗ і К, а також судна в цілому.

Для виконання визначених завдань були розроблені системи під назвами «ACMS» і «ShipDiMRO» [419]. Ці системи відкривають можливість успішної інтеграції у будь-яку інтелектуальну транспортну систему, забезпечуючи вирішення її традиційних функцій. Однак їх основним завданням є діагностика та контроль характеристик системи технічного обслуговування, параметрів робочих процесів СТЗ і К вантажного судна в умовах експлуатації [99, 102, 108, 113, 123] за допомогою електронних блоків керування із функцією діагностики OBD-M та/або додатково встановлених датчиків. Складовими технічними засобами цього комплексу є автоматизований бортовий комплекс ACMS, цифрові панелі управління процесом технічного обслуговування (ПК, планшет, смартфон), розміщені на робочих місцях учасників процесу обслуговування вантажного судна, та автоматизоване робоче місце планування операцій технічного обслуговування з належним програмним забезпеченням. Комплекс ACMS, який паралельно підключений до системи стандарту OBD-M судна (Рисунок 3.9) та до суднового центру обробки даних, через суднову локальну мережу Intranet-Inmarsat/Starlink-Internet, співпрацює з Web-сервісом, базою даних та необхідним програмним забезпеченням інформаційної системи моніторингу, діагностики та прогнозування ефективності системи технічного обслуговування, технічного стану СТЗ і К в умовах інтелектуальних транспортних систем [82, 120, 122, 351]. Це дозволяє оперативно отримувати інформацію від судна з використанням наявних каналів передачі даних на автоматизоване робоче місце планування операцій технічного обслуговування. Існування сучасних високопродуктивних мобільних обчислювальних систем надає учасникам процесу технічного обслуговування судна та розробникам систем управління можливість створювати зручні інтерфейси нового покоління, що значно спрощують роботу учасників процесу технічного обслуговування судна і зменшують витрати на їхню професійну підготовку [30].

В рамках систем ACMS і ShipDiMRO, а також в межах віртуальної судноплавної компанії «shipmonitoring.org» – підприємства, яке спеціалізується на експлуатації засобів водного транспорту [413, 427, 440, 441] інформаційне

програмне забезпечення для моніторингу, діагностики та прогнозування ефективності системи технічного обслуговування та технічного стану вантажного судна в умовах інтелектуальних транспортних систем може мати таку структуру [413], як зображено на Рисунку 3.11. Ця структура складається з двох основних компонентів та має адресну орієнтацію: системне програмне забезпечення і прикладне програмне забезпечення, яке включає в себе розроблені програми для збору, зберігання та обробки інформації про характеристики та показники ефективності системи технічного обслуговування і технічного стану СТЗ і К вантажного судна [120, 122, 431, 441]. Прикладна спрямованість цього програмного забезпечення прямо пов'язана з системами ACMS і ShipDiMRO та з автоматизованим робочим місцем планування операцій технічного обслуговування в межах внутрішньої мережі або сервера. Згідно вимог до програмного забезпечення і інформаційної системи [119, 123, 415, 441], це програмне забезпечення реалізує такі завдання для комплексного прескриптивного технічного обслуговування: збирання даних щодо характеристик системи технічного обслуговування, технічного стану судна; аналіз великих обсягів даних для опрацювання експлуатаційних результатів; використання машинного навчання для планування обсягів робіт з технічного обслуговування та їх частоти; прескриптивний аналіз і синтез оптимальних параметрів системи технічного обслуговування; збереження даних у базі даних; встановлення функціональних зв'язків у часі; можливість прогнозування показників ефективності системи технічного обслуговування, технічного стану судна за визначеними параметрами.

В якості системного програмного забезпечення в автоматизованому робочому місці планування операцій ТО внутрішньої мережі або сервера і системах ACMS та ShipDiMRO можуть розглядатися наступні варіанти: для роботи на настільних платформах можна використовувати операційні системи: iOS, Android, Linux, Windows [120, 122, 123]. У випадку роботи на мобільних платформах можна користуватися iOS, Android. Щодо використання у вбудованому обладнанні можливі варіанти, такі як FreeRTOS, Nucleus RTOS [120, 122, 123].

Для ведення моніторингу показників ефективності системи ТО, параметрів технічного стану СТЗ і К вантажного судна в умовах інтелектуальних транспортних систем у складі віртуального підприємства «shipmonitoring.org» в процесі експлуатації СТЗ і К вантажного судна використовуються різноманітні програмні засоби. Перед початком моніторингу потрібно приєднати до лінії ODB-M через блок моніторингу електронні блоки керування СТЗ, а також підключити мобільні пристрої та комп'ютери до центру обробки даних, в якому встановлене спеціалізоване прикладне програмне забезпечення. Це дозволить зробити навіть мобільні пристрої повноцінними бортовими комп'ютерами, готовими до роботи з відповідними даними та функціоналом.

Для обробки отриманих даних щодо моніторингу показників ефективності системи технічного обслуговування та технічного стану СТЗ і К вантажного судна використовується розроблена система інформаційного обміну (Рисунок

3.9), де ключову роль відіграє аналітичний центр інформаційної мережі (може також застосовуватися Web-сервіс віртуального підприємства «shipmonitoring.org»). Опрацювання результатів вимірювань показників ефективності системи технічного обслуговування та технічного стану СТЗ і К прямо залежить від математичного забезпечення, що використовується, і визначається рівнем математичної бази. Надалі отримані результати контролю піддаються аналізу, після чого складається звіт у формі відповідного протоколу.

Створення програмного забезпечення для гарантування підвищення ефективності системи ТО вантажного судна є вкрай специфічним завданням і прив'язане до конкретного апаратного забезпечення. Це передбачає необхідність розподілення його на окремі модулі, кількість яких може варіюватися відповідно до їхнього призначення, використаного обладнання для вимірювань та завдань, які вони вирішують [102]. Проте всі модулі одного типу мають спільний інтерфейс для взаємодії з іншими модулями. В рамках описаного програмного забезпечення систем ShipDiMRO, ACMS і віртуального підприємства з технічного обслуговування вантажних суден «shipmonitoring.org» [123], були розроблені структури моделей інформаційного забезпечення для систем моніторингу показників ефективності системи ТО (Рисунок 3.12) та параметрів технічного стану СТЗ і К (Рисунок 3.13) в умовах інтелектуальних транспортних систем.

Основні кроки обробки інформації у програмних комплексах (див. Рисунок 3.12 і Рисунок 3.13), для яких розроблені алгоритми та відповідне програмне забезпечення, включають збір повідомлень та діагностичних даних щодо систем технічного обслуговування та СТЗ і К вантажного судна [119, 120, 122]; накопичення даних про систему ТО, СТЗ і К в умовах експлуатації; визначення граничних значень (мінімальне і максимальне відхилення параметрів від середнього) у файлах звітів про параметри стану СТЗ і системи ТО на основі інформації, отриманої від статистичних характеристик моделі з найменшою сумою квадратів відхилень; отримання оптимальної моделі для часового тренду у вигляді структури "модель - статистичні характеристики" за допомогою лінійної, експоненціальної, логарифмічної та поліноміальної (з різним ступенем) апроксимації відповідних залежностей параметрів у файлах звітів; отримання прогнозу параметрів системи ТО та стану СТЗ і К на відповідний прогнозний період; визначення параметра стану СТЗ і К з мінімальним прогнозним часом, при якому відбудеться вихід за допустимі межі; перевірка відповідності параметрів системи ТО і стану СТЗ і К на основі проведеного моніторингу та прогнозування відповідних параметрів.Кожен параметр моніторингу СТЗ і К має числове вираження фізичних процесів, що відбуваються в ньому. А кожен параметр моніторингу системи технічного обслуговування вантажного судна також відображає числові характеристики технологічних процесів, які стосуються обслуговування його СТЗ і К. Ці параметри можуть включати час між відмовами (MTBF), час відновлення після відмови (MTTR), ефективність роботи, ресурсоємність процесів обслуговування та інші показники, які вказують на стан системи ТО та її можливість працювати на оптимальному рівні.

У більшості випадків встановлення функціональної залежності між параметром та фізичними процесами, що відбуваються в СТЗ і К , виявляється практично неможливим через складність і взаємозв'язок багатьох компонентів та процесів. Отже, при розробці системи ми виходимо з припущення, що якщо процеси в часі приймають і носять сталий характер, то будь-які зміни параметрів відображатимуться відповідно, тобто будь-який параметр зазнає змін у часі. Таким чином, для двох підсистем моніторингу однієї системи ми можемо розглядати їх як функціонал відповідний процесу [120, 123, 419, 441].

Інформаційна програма системи забезпечення моніторингу в умовах інтелектуальних транспортних систем повинна включати дві основні підсистеми: підсистему, яка відтворює графічний інтерфейс користувача, та підсистему обробки даних.

Під час розробки системи моніторингу в умовах інтелектуальних транспортних систем виконуються певні етапи планованої роботи. Ці етапи включають визначення цілей прогнозування контрольованих параметрів системи ТО та параметрів СТЗ і К; визначення часових рамок для прогнозування; вибір однієї або кількох залежностей, форма яких відповідає динаміці часових рядів; оцінювання параметрів обраних залежностей; перевірка адекватності обраних залежностей для прогнозування процесу та остаточний вибір залежності; розрахунок прогнозу на відповідний період часу; оцінювання точності прогнозування та виявлення наявності автокореляції випадкових складових [413, 440].

Діагностичні можливості пристроїв прямо впливають на використане програмне забезпечення та особливості системи ТО і технічного стану. У більшості випадків, для діагностики двигунів, насосів, сепараторів і рушіїв, існують спеціалізовані комерційні програми. Ці програми підтримують різні протоколи виробників СТЗ і надають можливість працювати з різними блоками цих систем [119, 120, 123].

Вибір способу проведення цієї взаємодії передбачає урахування всіх параметрів і характеристик системи ТО, СТЗ і К, а також отримання саме даних моніторингу. Це може бути отримано шляхом безпосереднього вимірювання, імпорту даних, що вже були отримані під час випробувань, або взаємодії обох. Використання стандартних форматів для зберігання даних при розробці описаного програмного забезпечення дозволяє використовувати його в складі будь-якого програмного комплексу без значних структурних змін.

М13. Опис підсистем інформаційної моделі загальної предметної області системи ТО

Перша підсистема відповідає за отримання інформації від основних блоків, контролю та управління системою технічного обслуговування, а саме блоки для збору та передачі інформації від системи ТО і стану умов експлуатації вантажного судна. Друга підсистема відповідає за отримання інформації від суднових технічних засобів і конструкцій, про умови експлуатації СТЗ і вантажного судна (використовуючи мережу CANopen) та пристроїв моніторингу

(бортовий реєстратор). Ця система відрізняється тим, що обидві підсистеми створюють спільне інформаційне середовище для контролю показників ефективності системи технічного обслуговування та технічного стану СТЗ і К вантажного судна. Однак вони працюють незалежно одна від одної, вирішуючи завдання відповідно до їхніх функцій та особливостей.

На основі ключових методів оцінки обсягу інформації [49, 138, 140, 297] створено концепцію та модель для аналізу об'єкта дослідження в даній предметній області.

Таблиця «Судно» містить основні ідентифікаційні дані судна, включаючи назву та характеристики. Тут кожному судну присвоєно унікальний ID. Інші таблиці, такі як «Параметри технічного стану СТЗіК», «Хронологічний моніторинг показників ТО ВС», «Оцінка граничних значень, оптимізація і прогнозування показників ТО ВС», «Перевірка відповідності оптимальних показників ТО» та інші, містять деталізовану інформацію про параметри ТО, їхні вимірювання, оцінки, відповідності та прогнози. Кожна таблиця має зв'язок з таблицею «Судно» через зовнішній ключ, який допомагає забезпечити унікальність та відстеження даних для кожного конкретного судна. Це дозволяє організувати та зберігати великий обсяг інформації про ТО та умови експлуатації судна в систематизованому та структурованому форматі.

Модель «підсистеми 1» зображена на Рисунку 3.16 відображає процеси, пов'язані з моніторингом ефективності технічного обслуговування вантажних суден та умов його експлуатації. Основні процеси, що моделюються цією системою, включають:

1. Моніторинг параметрів ТО. Збір та реєстрація даних про різні показники ефективності системи ТО і технічного стану судна (наприклад, температура двигуна, тиск у системах, рівень вібрації, зношеності деталей тощо).

2. Аналіз даних та встановлення граничних значень. Отримані дані піддаються обробці та аналізу для визначення граничних значень показників ТО. Цей процес допомагає визначити критичні параметри та їхні оптимальні значення.

3. Оцінка відповідності показників. Порівняння фактичних показників із встановленими оптимальними значеннями для визначення відхилень та потреб у виправленні або підтримці параметрів.

4. Планування робіт з технічного обслуговування. Розклад проведення робіт ТО на основі даних про стан судна, пріоритетності та необхідних ресурсів.

5. Виконання робіт ТО та контроль статусу. Відстеження та фіксація процесу виконання різних видів технічного обслуговування (періодичних перевірок, ремонтів, обслуговування тощо) та їх статусу (виконано, в черзі, заплановано).

6. Управління ресурсами. Відстеження необхідних ресурсів для виконання робіт ТО (матеріали, інструменти, обладнання) та їх кількості.

Таблиця «Судна» другої підсистеми містить дані про вантажне судно, включаючи його ідентифікатор, назву, а також основні характеристики, такі як розмір, тип та потужність. «СТЗіК» описує технічні засоби та конструкції судна,

зв’язуючи їх ідентифікатор з відповідним судном. Ця таблиця містить такі дані, як тип СТЗіК та їхні описи. Додаткові таблиці, такі як «Граничні значення», «Оптимізація та прогнозування», «Перевірка відповідності», «Діагностування», «Інспекції», «Технічні характеристики», «Історія обслуговування», «Пристрої моніторингу», «Умови експлуатації судна» та «Параметри технічного стану СТЗіК», містять деталізовані дані про відповідність параметрів, діагностику, інспекції, обслуговування, пристрої моніторингу, умови експлуатації та технічні характеристики конкретних елементів СТЗіК.

Кожна з цих таблиць має зв’язки з таблицею «СТЗіК», що дозволяє зв’язати дані із відповідними технічними засобами та конструкціями судна для зберігання та організації інформації про їхній стан, параметри, обслуговування та моніторинг.

Модель «підсистеми 2» моніторингу технічного стану суднових технічних засобів і конструкцій (СТЗіК) включає в себе ряд процесів:

1. Збір та акумуляція даних про суднові технічні засоби та конструкції. Цей процес передбачає накопичення інформації щодо технічного стану СТЗіК, включаючи параметри, результати діагностики, результати інспекцій та іншу технічну інформацію.

2. Аналіз параметрів технічного стану. Після збору даних про технічний стан, вони аналізуються для встановлення граничних значень, оптимізації та прогнозування параметрів.

3. Визначення відповідності параметрів. Здійснюється порівняння фактичних значень параметрів із встановленими нормативами чи стандартами, щоб визначити їхню відповідність.

4. Планування обслуговування та діагностики. На основі аналізу даних розробляється графік проведення діагностики, обслуговування та інспекцій для забезпечення належного технічного стану.

5. Виконання обслуговування та діагностики. Фіксація та проведення запланованих робіт з технічного обслуговування, а також проведення діагностування з метою підтримки функціонування СТЗіК на необхідному рівні.

6. Управління обслуговуванням. Моніторинг і контроль за виконанням робіт з обслуговування, реєстрація дат проведених інспекцій, результатів діагностики та історії обслуговування для кожного елементу СТЗіК.

М14. Особливості загальної методології формування та оцінювання способів підвищення ефективності систем ТО

Принципи теорії складних ергатичних систем вивчають питання ефективності, враховуючи алгоритми роботи, можливість виникнення дефектних ситуацій, наявність функціональної надмірності в їхній структурі та інші аспекти [185]. Під час дослідження цих питань необхідно виходити з визначених передумов. Це вимагає формулювання ключових положень і принципів дослідження ефективності систем технічного обслуговування вантажних суден. Розглянемо основні з них, враховуючи максимальне число

факторів, що впливають на ефективність аналізованих систем технічного обслуговування вантажних суден.

Сучасні системи технічного обслуговування вантажних суден представляють собою складні ергатичні системи, що мають сукупність важливих властивостей: розгалужені функціональні зв'язки, перемінну структуру, різноманітність надмірності, які дозволяють реалізувати поставлену функціональну задачу у різноманітних дефектних ситуаціях в окремих їхніх компонентах [183].

Цей принцип визначає зміст ряду інших важливих вхідних передумов. Система технічного обслуговування вантажних суден складається з великої кількості підсистем, більшість з яких також є складними ергатичними системами. Ці підсистеми варіюються за принципом організації, технічного та інформаційного забезпечення. Експлуатація таких підсистем здійснюється різними спеціалістами із різним рівнем кваліфікації. Тому теорія ефективності повинна надавати дослідникам «єдину мову» у формі відповідних термінів та визначень для обміну наявною інформацією.

Вивчення системи технічного обслуговування конкретного екземпляру вантажного судна повинно проводитися протягом усього життєвого циклу засобів водного транспорту [84]. Цей принцип базується на об'єктивно існуючому взаємозв'язку між послідовними процесами проектування, випробувань, виробництва та експлуатації вантажних суден. Взаємозв'язок стадій життєвого циклу вантажних суден, а відповідно, й їхніх систем технічного обслуговування, здійснюється як у прямому, так і в зворотному напрямку. При цьому важливу роль відіграють розробки та модернізація вантажних суден на основі результатів випробувань та досвіду експлуатації.

Проблема ефективності систем технічного обслуговування вантажних суден розв'язується в контексті загальної задачі забезпечення необхідної ефективності експлуатації засобів водного транспорту [431]. Вона включає в себе питання роботи окремих суднових технічних засобів без дефектних ситуацій, що безпосередньо пов'язано з точністю формування їхніх параметрів. Методи теорії ефективності систем технічного обслуговування вантажних суден повинні забезпечувати практичне рішення цих важливих завдань [416].

Аналіз системи технічного обслуговування вантажних суден та її складових вимагає більш детального підходу враховуючи складність та невизначеність факторів [44]. Перед дослідниками постає завдання розробки математичних моделей, які б забезпечували більш точне й об'єктивне оцінювання ефективності цієї системи. Невизначеність в системі технічного обслуговування вантажних суден пояснюється кількома факторами. По-перше, збійні ситуації мають ймовірнісно-статистичний характер, тобто їх походження підпорядковане певним статистичним законам [205]. По-друге, система може переходити з одного стану в інший через відмови суднових технічних засобів або збійні ситуації у їх складових частинах [397]. Ці переходи також є випадковими і додатково ускладнюють моделювання системи. По-третє, моменти часу

застосування засобів водного транспорту є випадковими і залежать від зовнішніх факторів [327].

Враховуючи цю невизначеність, дослідження ефективності системи технічного обслуговування вантажних суден потребує багатомірного підходу [358]. Задачі повинні розв'язуватись у просторі невизначеності, де кожна змінна може приймати різні значення з певною ймовірністю. Такий підхід дозволяє більш точно оцінити ефективність системи в умовах реального експлуатаційного середовища.

При здійсненні досліджень ефективності системи технічного обслуговування вантажних суден на різних етапах життєвого циклу важливо забезпечувати об'єктивність аналізу [389]. Це вимагає об'єктивного врахування невизначеності та надання вагомості різним сценаріям розвитку подій. Лише таким чином можна забезпечити надійну та зрозумілу оцінку ефективності системи технічного обслуговування вантажних суден та розробити вдосконалені стратегії для оптимізації цього процесу, а саме підвищення ефективності технічного обслуговування.

Реальні показники ефективності системи технічного обслуговування вантажних суден часто відрізняються від розрахункових та заданих, зазвичай в гірший бік [266]. Це приводить до спроб стейкхолдерів знайти виправдання або навіть заперечити факт недостатньо високої ефективності системи технічного обслуговування конкретного типу чи екземпляру вантажного судна. Такі обставини підкреслюють важливість дослідження систем технічного обслуговування вантажних суден як об'єктів експлуатації та необхідність визначення показників їхньої ефективності.

Оцінювання та забезпечення необхідної ефективності системи технічного обслуговування вантажних суден неможливі без використання математичних методів [58, 116]. Виконання відповідних обчислень вимагає знання ймовірнісних характеристик надійності суднових технічних засобів, якості та точності функціонування складових частин системи технічного обслуговування вантажних суден. Ці параметри не можуть бути повністю встановлені лише на основі статистичного аналізу. Формальний статистичний опис часто не дозволяє виявляти причини непередбачуваних ситуацій, а це, у свою чергу, унеможливлює раціональне проектування та впровадження ініціатив з поліпшення конкретної системи технічного обслуговування вантажного судна.

Тому, при дослідженні ефективності системи технічного обслуговування вантажних суден, окрім використання статистичних методів, необхідно застосовувати причинно-наслідковий підхід [64]. Цей підхід дозволяє проводити розрахунки, використовуючи виявлені теоретичні закономірності процесів функціонування системи технічного обслуговування вантажних суден, які досить адекватно відображають реальні процеси, що відбуваються в ній. Такий підхід дозволяє краще зрозуміти механізми збійних ситуацій та розробити збалансовані стратегії для покращення ефективності системи технічного обслуговування вантажних суден на різних етапах їхнього життєвого циклу.

Ефективність системи технічного обслуговування вантажного судна може розглядатись як властивість процесу функціонування системи його технічного обслуговування в контексті використання даної програми експлуатації вантажного судна. Від цієї властивості залежить кінцевий результат виконання завдання, що ставиться перед вантажним судном як транспортним засобом. Ефективність системи технічного обслуговування вимірюється корисним ефектом від застосування даної системи технічного обслуговування в умовах виникнення збійних ситуацій у фіксовані моменти часу.

Для об'єктивної оцінки ефективності системи технічного обслуговування та порівняння її з іншими, необхідно мати конкретний числовий показник, що відображає її функціонування. Вибір таких показників залежить від специфіки та призначення засобу водного транспорту, для якого застосовується система технічного обслуговування, а також від поставленої дослідженню задачі. Ці показники можуть бути ймовірнісними, інформаційними, вартісними тощо. Вибір та обґрунтування певних показників є евристичним завданням, що визначається призначенням системи технічного обслуговування і метою дослідження.

Вимоги, що є найбільш загальними та суттєвими для показників ефективності, можуть бути сформульовані наступним чином:

1. Фізичний зміст: Показники ефективності повинні мати чіткий та зрозумілий фізичний смисл, щоб відображати конкретні аспекти функціонування системи технічного обслуговування [298]. Це допомагає зрозуміти їх значення та імплікації і забезпечує їх застосування для оцінки реальних показників процесу.
2. Відповідність задачам системи технічного обслуговування: Кожен показник повинен прямо відповідати поставленим перед системою технічного обслуговування задачам [27]. Це означає, що показники повинні бути підібрані з урахуванням конкретних потреб технічного обслуговування вантажного судна.
3. Простота визначення: Показники ефективності повинні мати можливість досить простого та зручного визначення [373]. Це допомагає забезпечити легку оцінку ефективності технічного обслуговування та спростити аналіз результатів.
4. Узгодженість при різних варіантах використання судна: Показники ефективності мають залишатися однаковими та вимірюватися у одних і тих самих фізичних одиницях незалежно від варіантів використання судна за призначенням [8]. Це дозволяє здійснювати зрівняльну оцінку різних варіантів технічного обслуговування та зробити зрозумілими результати порівнянь.

Прийняття ймовірності виконання поставленої функціональної задачі як основного показника ефективності системи технічного обслуговування вантажного судна повністю задовольняє зазначеним вимогам. Ймовірність виконання поставленої задачі може бути розглянута як показник, що характеризує ефективність даної системи технічного обслуговування вантажного судна в різних аспектах, таких як ймовірність готовності судна до використання за призначенням, ймовірність виникнення особливих ситуацій під

час рейсу, ймовірність збереження обумовленого рівня витрат на технічне обслуговування та інші.

Використання ймовірнісного показника дозволяє виразити властивості системи технічного обслуговування вантажного судна у вигляді числових значень, що засновані на аналізі ймовірнісних випадків та ризиків. Такий підхід забезпечує більш точну та об'єктивну оцінку ефективності, оскільки враховує можливість різних сценаріїв та непередбачуваних подій, які можуть впливати на функціонування системи.

Окрім того, ймовірнісний підхід дозволяє здійснювати аналіз ризиків та визначати оптимальні стратегії технічного обслуговування, забезпечуючи оптимальний баланс між ефективністю та вартістю обслуговування. Цей підхід є практично значущим для вирішення проблем забезпечення надійності та безпеки експлуатації вантажного судна.

Використання ймовірнісного показника (позначений як 4.2) для оцінки ефективності дозволяє задовольнити також наступні важливі вимоги:

1. Максимальний облік факторів, що впливають на виникнення збійних ситуацій під час технічного обслуговування вантажного судна: Ймовірнісний показник дозволяє враховувати та аналізувати широкий спектр можливих факторів, що впливають на ефективність системи технічного обслуговування. Це забезпечує комплексний підхід до оцінки та контролю факторів, що визначають успішність обслуговування судна.
2. Зручність використання при розрахунках ефективності систем технічного обслуговування вантажного судна: Ймовірнісний показник є зручним інструментом для здійснення розрахунків, оскільки його визначення базується на ймовірнісних методах, що дозволяють враховувати необхідну статистичну інформацію та велику кількість варіантів сценаріїв.
3. Пристосованість до нормування при завданні вимог на проектування нових засобів водного транспорту і суден, які знаходяться в експлуатації: Ймовірнісний показник може бути використаний для формулювання нормативних вимог та стандартів на проектування нових суден, а також для перевірки відповідності заданим вимогам суден які вже знаходяться в експлуатації.
4. Принципова можливість практичної перевірки заданих вимог в процесі експлуатації і спеціальних випробувань: Ймовірнісний показник дозволяє проводити практичні перевірки ефективності системи технічного обслуговування на підставі аналізу реальних даних та випробувань. Це дозволяє оцінювати та вдосконалювати функціонування системи з урахуванням фактичних умов експлуатації.

Таким чином, ймовірнісний показник (4.2) є потужним інструментом для комплексної оцінки ефективності системи технічного обслуговування вантажного судна, враховуючи різноманітні аспекти та особливості його функціонування.

Процес виникнення збійних ситуацій в системі технічного обслуговування вантажного судна, з огляду на його фізичну природу, має випадковий характер,

тому показники ефективності є статистичними величинами, що базуються на правилах математичної статистики та теорії ймовірностей. Обрання ймовірного показника (позначений як 4.2) як основного показника ефективності системи технічного обслуговування вантажного судна дозволяє уникнути багатьох критеріїв, що ускладнюють проведення досліджень. Цей показник (4.2) є функцією часу застосування (t) та загалом може виявлятися випадковою величиною.

Це може бути обумовлено, наприклад, різною інтенсивністю використання засобів водного транспорту, варіаціями рівня підготовки суднових механіків, фінансовими можливостями судноплавної компанії та іншими факторами. З урахуванням стохастичної природи системи, ймовірний показник ефективності забезпечує більш точну та комплексну оцінку реальної динаміки технічного обслуговування та підтримання судна в оптимальному стані функціонування.

М15. Особливості логічної організації процесу оцінювання та вибору способу підвищення ефективності системи технічного обслуговування вантажного судна

У прикладних дослідженнях ефективності систем технічного обслуговування зазвичай доводиться вирішувати проблеми:

1. оцінки ефективності операції в системі технічного обслуговування (проблема оцінки) [159];
2. вибору раціонального способу (стратегії) виконання операцій технічного обслуговування (проблема вибору) [20].

Оцінка ефективності операції полягає у виробленні так званого оціночного судження щодо придатності заданого способу дій або пристосованості системи технічного обслуговування до вирішення певних завдань на основі вимірювання (оцінювання) рівня ефективності операції.

Ефективність операції в процесі обслуговування засобів транспорту оцінюється з метою вирішення таких завдань:

- ухвалення рішення щодо допустимості практичного використання оцінюваного способу дій у тій чи іншій ситуації [126];
- виявлення вкладів (ефектів) різних чинників у загальну ефективність операції, впливу взаємодій чинників на ефективність [232];
- встановлення шляхів підвищення ефективності операції (виявлення резервів ефективності) [263];
- виявлення функціональних можливостей системи технічного обслуговування, що використовуються в операції [5];
- зіставлення (порівняння) кількох альтернативних варіантів дій або систем технічного обслуговування, їх ранжування за рівнями ефективності (встановлення відношення переваги на множині можливих варіантів) [51].

Останнє завдання часто виступає як підпроблема оцінки ефективності. Її називають завданням порівняльної оцінки варіантів (способів дій, систем).

У загальній проблемі вибору раціонального способу використання активних засобів в операції або шляхів розвитку систем технічного обслуговування виділяють завдання:

- вибору доцільного способу керування системою технічного обслуговування із заданими функціональними характеристиками [73];
- визначення раціонального режиму експлуатації засобів транспорту, що обслуговуються [241];
- розроблення оптимального плану операції [235];
- оптимального розподілу ресурсів між підсистемами в операції [379];
- вибору раціонального варіанта проектованої системи технічного обслуговування [9];
- формування програми розвитку систем технічного обслуговування [196];
- формування техніко-економічних вимог до створюваних засобів транспорту (систем) [56];
- висунення гіпотез раціональної поведінки підсистем, що перебувають у взаємодії з досліджуваною системою технічного обслуговування [322].

Практична спрямованість досліджень ефективності систем технічного обслуговування полягає у виробленні рішень на раціональне використання засобів транспорту при досягненні мети в різних умовах експлуатації або на доцільний варіант проектованої системи технічного обслуговування.

У технічному обслуговуванні засобів водного транспорту проблема ефективності тісно пов’язана з проблемою надійності суднових технічних засобів [395]. Зростання складності суднових технічних засобів призводить до зниження їхньої надійності, а отже, до зменшення їхньої ефективності [336]. При цьому ненадійна система технічного обслуговування не може бути ефективним засобом досягнення поставленої мети [269]. Аналіз ефективності операції дає змогу підійти до визначення вимог до параметрів надійності суднових технічних засобів, що використовуються як активні засоби в операції [38]. Це один із важливих аспектів зв’язку проблем надійності та ефективності в технічному обслуговуванні водного транспорту. Іншим аспектом зв’язку цих проблем є визначення раціональних способів технічного обслуговування водного транспорту для підвищення надійності створюваних засобів водного транспорту. Недостатня надійність проектованого або наявного засобу водного транспорту може виявитися проблемою, для розв’язання якої висувають альтернативні цілі (наприклад, відмова від виробництва засобу транспорту або заміна його новим, вдосконаленим; підвищення надійності наявної системи технічного обслуговування до потрібного рівня; поліпшення умов експлуатації наявного засобу транспорту тощо), здійснюють вибір однієї з цих цілей та організовують операцію для досягнення обраної мети. Ефективність цієї операції може бути оцінена, наприклад, ймовірністю безвідмовної роботи засобу водного транспорту протягом заданого часу, якщо за мету операції обрано підвищення надійності системи. У такому разі показник надійності засобу водного транспорту виступає як показник ефективності операції з підвищення надійності наявних або проектованих суднових технічних засобів.

Мета A_0 є вихідним пунктом досліджень ефективності операцій технічного обслуговування засобів транспорту. Для вибору раціонального шляху її досягнення необхідно мати спосіб вимірювання ефективності операції. Показник ефективності вимірює ступінь відповідності реального результату операції бажаному [21]. На основі показника ефективності формується певне правило вибору раціонального способу використання активних засобів в операції (стратегій) технічного обслуговування. Як таке правило використовують критерій ефективності. Критерій вибирають на основі певних принципів раціональної цілеспрямованої поведінки. Залежно від складності S_0-системи, що реалізує операцію, і цілей досліджень вводяться різні принципи раціональної поведінки. Доводиться встановлювати різні методологічні рівні дослідження ефективності операцій технічного обслуговування для суднових технічних засобів різного ступеня складності [366].

Під час дослідження ефективності операцій технічного обслуговування використовують методологічні підходи, засновані на експерименті та моделюванні [267]. Експериментальний підхід передбачає проведення серії натурних експериментів із реальною системою технічного обслуговування [17]. Результати експериментів обробляються з використанням методів математичної статистики.

Експеримент зазвичай раціонально планується з метою отримання найбільшої кількості інформації про досліджуване явище. Математична теорія експерименту [79, 252] дає змогу сформувати оптимальні плани експериментів.

Експериментальний підхід до дослідження ефективності великомасштабних операцій у технічному обслуговуванні засобів транспорту обмежений. Складність і масштаби сучасних систем технічного обслуговування засобів водного транспорту зазвичай не дають змоги проводити експерименти з ними, а експеримент з елементами системи технічного обслуговування або із судновими технічними засобами не дає змоги отримати уявлення про емерджентні властивості системи [55]. Враховуючи факт того, що емерджентні властивості системи є результатом взаємодії інших властивостей, але не зводяться до їхньої суми, розглянемо приклади для системи технічного обслуговування:

1. Самоорганізація. Ця властивість проявляється, коли система технічного обслуговування здатна самостійно реорганізовувати свої робочі процеси у відповідь на зовнішні та внутрішні зміни [216]. Це не просто сума накопичених умінь і досвіду, а результат їхньої взаємодії та координації.

2. Гнучкість у прийнятті рішень. У системі технічного обслуговування може виникнути здатність швидко адаптуватися до нестандартних ситуацій і приймати ефективні рішення [151]. Ця властивість виходить за рамки індивідуальної компетентності і є результатом спільної роботи та обміну інформацією між різними компонентами системи технічного обслуговування.

3. Колективний інтелект. Це стосується здатності системи в цілому генерувати рішення та ідеї, які недоступні окремим її частинам [340]. Ця

властивість виникає зі складних взаємодій між компонентами системи та їхніми знаннями.

4. Стійкість системи до невизначеності. У системі технічного обслуговування може розвинутися здатність ефективно функціонувати в умовах невизначеності та непередбачуваності [369], що є результатом сукупності досвіду, гнучкості та адаптивності, але не зводиться просто до суми цих якостей.

Наведені приклади демонструють, як емерджентні властивості системи технічного обслуговування можуть виникати зі складних взаємодій і зв'язків між її компонентами, перевершуючи просту суму окремих характеристик.

Основною дослідницькою концепцією аналізу ефективності операцій технічного обслуговування є моделювання. Експеримент із самою системою технічного обслуговування замінюється експериментом з її моделлю [392]. Операція, що реалізується S_0-системою, імітується в рамках моделі S_0-системи.

Під час моделювання систем технічного обслуговування рівень складності яких не надто високий, часто вдається ввести математичну залежність показника ефективності від керованих змінних (побудувати модель) у формі доволі простої функції із системою обмежень у вигляді рівностей або нерівностей і задачу вибору раціональної стратегії технічного обслуговування звести до одного з класів задач математичного програмування. Вибір найкращої стратегії технічного обслуговування в цьому разі зазвичай зводиться до розв'язання оптимізаційної задачі одним із методів математичного програмування [141, 194, 299, 431, 441]. У цій дисертації головну увагу приділено дослідженню ефективності систем технічного обслуговування, які використовуються у великомасштабних операціях. Основною формою вивчення цих систем за загальною ознакою є імітаційне дослідження [203], в основі якого лежить імітаційне моделювання. Бурхливий розвиток у 21 столітті електронно-обчислювальної техніки відкриває широкі можливості імітаційного дослідження великомасштабних операцій у системах технічного обслуговування.

Процес формування рішень у складних ситуаціях вивчає сучасна теорія рішень. У рамках цієї теорії формуються принципи ухвалення рішень, на основі яких відпрацьовуються підходи до відбору сукупності допустимих цифрових стратегій, до формального опису уподобань особи, яка ухвалює рішення, до вибору принципів компромісу за наявності суперечливих інтересів суб'єктів системи в умовах різного ступеня невизначеності ситуації і, нарешті, до вибору раціональних способів використання активних засобів в операціях технічного обслуговування на основі висунутих критеріїв ефективності системи технічного обслуговування.

Отже, як предмет теорії ефективності операцій технічного обслуговування виступають закономірності, що пов'язують ефективність операції технічного обслуговування з якістю активних суднових технічних засобів, способами їхнього використання в операції та умовами оточення. Об'єктом цієї теорії є операція технічного обслуговування.

М16. Опис факторів, що визначають ефективність операцій системи ТО

Первинною якістю будь-якої системи є її «стійкість» (*R*-якість) [103]. Системи, що не володіють цією якістю, не можуть існувати. Для простих систем стійкість об'єднує такі їхні властивості, як міцність, стійкість до впливу зовнішніх чинників, збалансованість, стабільність, гомеостазис (здатність системи повертатися до рівноважного стану в разі виведення з нього зовнішніми впливами). Для складних систем характерні різні форми структурної стійкості, такі, як надійність, живучість тощо.

Іншою якістю систем, складнішою за стійкість, є «стійкість до перешкод» (*I*-якість), яку розуміють як здатність системи без спотворень сприймати і передавати каналами повідомлень інформаційні потоки. Стійкість до перешкод, іншими словами, є здатність системи протидіяти перешкодам. Стійкість до перешкод об'єднує низку властивостей, властивих здебільшого системам управління. До таких властивостей належать надійність систем зв'язку і систем оброблення інформації, їхня пропускна спроможність, можливість ефективного кодування і декодування інформації, електромагнітна сумісність радіоелектронних засобів тощо.

Наступною якістю системи є «керованість» (*C*-якість). Під керованістю розуміють здатність системи переходити за кінцевий (заданий) час з одного стану в інший (потрібний) під впливом керуючих впливів. У загальному розумінні керованість є здатність системи виконувати команди управління, оперативно реагувати на них. Очевидно, керувати можна лише стійкою до перешкод системою. Якщо сигнали керування спотворюються в неприпустимих межах під час їх передання до об'єктів управління, то управління втрачає сенс.

Керованість забезпечується насамперед наявністю прямого і зворотного зв'язків, які слугують для передавання керованій системі команд (сигналів) управління, отримання від неї повідомлень про неузгодженість реального (фактичного) і необхідного станів керованого об'єкта і виконання команд управління. Керованість об'єднує такі властивості системи, як гнучкість управління, його оперативність, точність, швидкодія, інерційність тощо. Для складних систем керованість охоплює і здатність вироблення рішень, на основі яких формуються керівні впливи.

У ряду ускладнення якостей наступне місце після керованості посідає «спроможність системи» (*A*-якість). Ідеться про якість системи, яка визначає її можливості розв'язувати ті чи інші завдання, досягати тих чи інших результатів у своїй діяльності (виробляти у відповідні строки певні операції, здійснювати певний обсяг транспортних перевезень тощо). Ця якість об'єднує сукупність властивостей системи, що визначають її функціональне призначення (операційне, транспортне, інформаційне тощо). До таких властивостей можуть бути віднесені продуктивність, потужність, забезпеченість різного роду ресурсами тощо. *A*-якість є визначальною при введенні поняття ефективності системи (операції) технічного обслуговування. Безглуздо залучати як активний засіб в операції систему, нездатну досягти мети операції. Операція, очевидно, буде неефективною. «Спроможність системи» є необхідною (але не достатньою) умовою ефективності операції, її найважливішим чинником. Однак висока

ефективність операції зумовлена не тільки здатністю системи, а й раціональним її використанням.

«Спроможність системи» відображає потенційну можливість вирішити поставлене завдання, тобто її потенційну ефективність. Остання, як уже зазначалося, визначається ефективністю операції за ідеальних способів використання розглянутої системи.

Найскладнішою якістю системи є «самоорганізація» (*L*-якість). Цією якістю володіють системи великої складності, здатні змінювати свою структуру, параметри, орієнтацію поведінки з метою підвищення ефективності виконання своїх функцій. Система, що самоорганізується [242] виявляє властивості, принципово важливими з яких є: свобода вибору рішень, здатність до адаптації, самонавчання, розпізнавання ситуацій тощо.

Принцип свободи вибору рішень передбачає вибір не єдиного найкращого рішення, а кількох прийнятних рішень [302]. Залежно від ситуації, що складається, під час вибору рішення на певному кроці залишається можливість повернутися до попереднього кроку і змінити раніше ухвалене рішення так, щоб залишалася свобода вибору рішення на наступних кроках процесу [130]. Цим забезпечується значна гнучкість управління та істотно підвищується його ефективність.

З метою підвищення ефективності операції системи технічного обслуговування, що самоорганізується, можуть змінювати підпорядковування своїх підсистем, перерозподіляти завдання між ними і ресурси для вирішення цих завдань.

Введення рівнів якості систем технічного обслуговування дає змогу обмежувати дослідження якості одним із перелічених рівнів. Так, якості простих систем часто зводяться до стійкості цих систем. Наприклад, якість обслуговування конструкцій, таких, як настил у машинному відділенні, визначається його стійкістю. Тут немає сенсу підніматися на вищі рівні під час оцінювання якості обслуговування. Очевидно, під час аналізу якості обслуговування ультра-коротко хвильового прийом-передавача рівень стійкості, який визначається в цьому разі надійністю його роботи, недостатній. Доцільно під час оцінювання якості ультра-коротко хвильового приймача перейти на рівень *I*-якості (стійкість до перешкод), оскільки на цьому рівні можна визначити якість голосу. Однак під час оцінювання якості, наприклад операцій обслуговування пропульсивного комплексу, необхідно перейти на рівень *A*-якості й оцінити потенційну ефективність системи технічного обслуговування вантажного судна як її здатність забезпечити технічну придатність вантажного судна із заданими параметрами. У цьому випадку доводиться досліджувати операцію, метою якої є забезпечення надійності та безпеки. Потенційну ефективність цієї операції технічного обслуговування можна прийняти як характеристику якості пропульсивного комплексу [123].

Рівень якості обирають на стадії аналізу сукупності суднових технічних засобів вантажного судна [175] і залежно від складності об’єкта визначають мету

дослідження, наявність інформації про властивості об’єкта, його цільове призначення та умови застосування.

Наступна важлива група факторів, що суттєво впливають на ефективність операції технічного обслуговування, характеризує способи застосування обладнання в операції. Ці фактори визначають (задають) порядок і прийоми використання обладнання для вирішення поставлених завдань в операції. Кожному екземпляру обладнання притаманні свої, специфічні способи застосування, які характеризуються сукупністю відповідних факторів. До них належать: розподіл часткових завдань і виділених ресурсів між елементами системи, просторово-часова послідовність виконання окремих видів робіт (дій), способи управління і планування, способи зв’язку і взаємодії між елементами системи, режими і регулярність використання тощо.

До факторів, що формують умови функціонування систем технічного обслуговування, належать природні фактори (природно-кліматичні умови, географічне місцеположення тощо), фактори, які є наслідком активних дій конкурентів або партнерів (наприклад, можливість, характер, способи цілеспрямованої протидії), а також фактори, що характеризують наявність і види різного роду обмежень (економічних, соціальних, екологічних та ін.).

Серед факторів, які враховуються під час дослідження ефективності, велика частка факторів, які не контролюються алгоритмом формування рішень, наприклад, об’єктивні закони природи та суспільного розвитку, які необхідно враховувати в будь-якому разі, а за умови їх пізнання – використовувати для досягнення поставлених цілей та враховувати їхній можливий негативний вплив. Неконтрольованими є й інші фактори; наприклад, погодні умови, дії конкурентів відносять до умов функціонування (використання) системи технічного обслуговування. Усі ці фактори прийнято називати некерованими.

До керованих факторів відносять такі, на які алгоритм формування рішень може впливати на свій розсуд, тобто якими він може оперувати в процесі планування і проведення операції. До них відносять, наприклад, чинники, що характеризують способи застосування системи технічного обслуговування.

Стратегії U формуються з безлічі керованих факторів. Однак у моделях операцій залежно від характеру завдання дослідження ефективності безліч стратегій U може бути сформовано з факторів, що характеризують не тільки способи застосування, а й умови застосування та якості систем технічного обслуговування. Так, наприклад, якщо необхідно вибрати найкращий проект системи для певних умов і способів її застосування, то тоді як стратегія $u \in U$ виступають сукупності характеристик того чи іншого проекту. Або інший приклад. У дослідницьких завданнях часто ставиться завдання вибору (створення) такого комплексу умов проведення операції (функціонування системи ТО) u^*, за якого ефективність операції ТО найбільша. Очевидно, що в цьому випадку безліч стратегій U формується з безлічі факторів, що характеризують умови проведення операції (функціонування системи ТО).

Стосовно досліджуваної системи технічного обслуговування фактори можуть бути зовнішніми і внутрішніми [261]. Зовнішні фактори відображають

вплив зовнішнього середовища, сприяючи успішному проведенню операції (корисні чинники), або протидіючі успіху операції (шкідливі чинники). Внутрішні чинники відображають взаємовплив рушійних сил усередині системи на перебіг і результат операції.

Невизначеність нестохастичного характеру виникає зазвичай через такі обставини:

1) наявності цілеспрямованої протидії з боку конкуруючої системи, способи дій якої невідомі досліднику [371]; цю невизначеність поведінки конкурента називають поведінковою невизначеністю Λ_J^B;

2) недостатньої вивченості деяких явищ, що супроводжують процес функціонування системи [290]; невизначеність цього типу називають природною Λ_J^N;

3) нечіткого уявлення мети операції, що призводить до неоднозначного трактування відповідності реального результату операції бажаному [294]; таку невизначеність називають цільовою $\Lambda_J^{A_0}$.

Дослідження ефективності систем технічного обслуговування з урахуванням невизначених чинників нестохастичної природи значною мірою ускладнюється відсутністю достатньо загальної теорії (подібно до теорії ймовірностей для дослідження випадкових явищ), яка б формувала методологічні засади вивчення явищ із невизначеними чинниками. Проте використання теорії нечітких множин, теорії ігор і теорії рішень дає змогу знайти деякі шляхи розв'язання завдань дослідження ефективності систем за наявності суттєвої невизначеності нестохастичного характеру [280].

М17. Опис загальної схеми досліджень ефективності операцій технічного обслуговування

І. Проблемний аналіз

1. Визначення існування проблеми (встановлення, чи є проблема насправді, чи вона є уявною), встановлення причин її виникнення та взаємозв'язку з іншими проблемами; з'ясування та формулювання проблеми, визначення її актуальності, розв'язності та терміновості розв'язання [72].

2. Виявлення, аналіз і опис ситуації, тобто комплексу умов, у яких виникла або може виникнути проблема [13].

3. Формування й аналіз проблемної ситуації з використанням евристичних і формальних методів [91]; визначення ступеня повноти й достовірності інформації про проблемну ситуацію та її достатності для оцінювання дійсної необхідності й можливості розв'язання проблеми з урахуванням умов, що склалися, а також для формування цілей діяльності, що розв'язують проблему; вироблення, якщо є потреба, комплексу заходів для одержання інформації, якої бракує, і додаткового визначення проблемної ситуації.

4. Формування та аналіз альтернативних цілей $\alpha_o = \{A_o^1, A_o^2, \dots, A_o^m\}$, досягнення яких вирішує проблему, і вибір однієї з них як мети операції.

5. Аналіз шляхів досягнення мети та визначення суттєвих обмежень (економічних, технічних тощо), що впливають на вибір засобів і способів

досягнення мети [11]; декомпозиція складної мети, розчленовування її на складові та завдання.

6. Вибір засобів досягнення мети, обґрунтування рівня їхньої якості в низці рівнів якості, що ускладнюється $\pi = \{R, I, C, A, L\}$; оцінка наявних або потрібних ресурсів.

7. Загальна постановка задачі дослідження ефективності операції [14].

II. Концептуальні дослідження

1. Опис метасистеми, аналіз її діяльності [134].

2. Виокремлення S_o-системи, в рамках якої проводиться (реалізується) операція.

3. Оцінювання інформаційної достатності [147].

4. Обґрунтування методологічного рівня дослідження ефективності операції $\nu = \{I, II, III, IV\}$.

5. Встановлення типу операції (S_o-системи), виходячи з рівнів поведінки, що ускладнюється $\mu = \{e, h, c, p, a\}$.

6. Обґрунтування концепції раціональної поведінки $\gamma = \{П, O, A\}$.

7. Висування гіпотез поведінки суб'єктів системи [46].

8. Обґрунтування складу і змісту зовнішнього доповнення, формування необхідного результату операції (цілепокладання), вибір простору стратегій суб'єктів системи технічного обслуговування, встановлення основних обмежень (дисциплінуючих умов), що випливають із діяльності метасистеми [198].

9. Вибір узагальнених показників ефективності, опис результату операції (корисних ефектів і витрат), обґрунтування функції відповідності реального результату необхідному, вибір шкал показників [173].

10. Обґрунтування принципу вироблення концептуального рішення і введення на цій основі критерію ефективності [71].

11. Концептуальне моделювання, кібернетичний опис операції (S_o-системи) [342], факторизація завдання (виявлення ефектів чинників та їхніх взаємодій) [66], встановлення напрямів операційних досліджень, уточнення і конкретизація завдань дослідження ефективності операції [272].

III. Операціональні дослідження

1. Постановка завдання операціонального дослідження [90].

2. Оцінювання інформаційної достатності [39].

3. Формування (уточнення) множини стратегій за результатами концептуальних досліджень [131].

4. Уточнення характеристик активних засобів, опис їхніх властивостей, оцінка наявних або потрібних ресурсів [378].

5. Вибір способу і засобів операціонального моделювання [3].

6. Формування операціональної моделі, встановлення переліку вихідних даних, введення операторів переходу і виходу, уточнення обмежувальних умов, перевірка операціональної моделі [188].

7. Уточнення показників ефективності операції [253].

8. Обґрунтування принципу вироблення операціональних рішень і формування критерію ефективності [345].

9. Операціональне моделювання, вироблення рекомендацій для ухвалення рішення в різних варіантах завдання дослідження ефективності операції [12].

IV. Детальні дослідження

1. Постановка задачі детального дослідження [135].

2. Уточнення зовнішнього доповнення за результатами операційного дослідження (вимоги до якості елементів, вимоги до управління якістю тощо) [198].

3. Узгодження та вибір показника і критерію оцінки якості операцій системи технічного обслуговування [345].

4. Визначення характеристик якості за результатами експерименту [345].

5. Розв'язання задачі задоволення якості або управління якістю операцій системи технічного обслуговування [19].

V. Прийняття рішення

1. Аналіз результатів проведених досліджень.

2. Планування контрольних заходів щодо впровадження прийнятого рішення [295].

3. Затвердження прийнятого рішення [7].

М18. Основні принципи вибору критеріїв ефективності

1. Принцип селекції. На кожному кроці багатоетапного процесу прийняття рішень цей принцип передбачає добір (селекцію) кількох рішень, близьких до найкращих. Потім із цих рішень слід сформувати низку комбінацій і на наступному етапі ухвалення рішень відібрати кілька комбінацій, близьких до найкращих, користуючись критерієм вищого порядку, ніж на попередньому кроці. У такий спосіб формується низка комбінацій рішень, що ускладнюються, з якої відбирають не тільки найкращі рішення, а й близькі до них.

2. Принцип свободи вибору рішень. Цей принцип може бути реалізовано під час організації поведінки систем, здатних до самоорганізації (яким властива *L*-якість). Він рекомендує не ухвалювати на основі апріорної інформації рішення в усіх деталях на всю доступну для огляду перспективу (іноді його називають принципом неостаточних рішень). Свобода вибору тут полягає в можливості перегляду, уточнення раніше ухваленого рішення залежно від поточної інформації.

3. Принцип самонавчання. Згідно з цим принципом, адаптивна поведінка системи забезпечується в процесі багаторазових зовнішніх впливів на систему, запам'ятовуванням реакцій на ці впливи і результатів реагування, а також коригуванням реакцій, спрямованим на підвищення ефективності поведінки системи технічного обслуговування. Накопичувану інформацію в процесі самонавчання використовують для вдосконалення критерію ефективності.

4. Принцип прогнозування та аналізу ризиків. Цей принцип вимагає інтеграції аналітичних інструментів для оцінки майбутніх станів системи та потенційних ризиків. Використання моделей прогнозування та аналізу ризиків дає змогу передбачити можливі неполадки та вживати профілактичних заходів до їх виникнення, зменшуючи тим самим ймовірність непередбачених збоїв.

5. Принцип модульності та гнучкості. Цей принцип передбачає створення системи з можливістю легкої адаптації та модифікації її компонентів. Модульність дає змогу швидко й ефективно реагувати на зміни в експлуатаційних вимогах і технологічних процесах, спрощуючи процес обслуговування та модернізації системи.

6. Принцип інтеграції даних і технологій. Цей принцип має містить використання сучасних технологій збирання, оброблення та аналізу даних для поліпшення процесу ухвалення рішень. Інтеграція даних з різних джерел і їх аналіз за допомогою передових предиктивної і прескриптивної аналітики, алгоритмів машинного навчання і штучного інтелекту допоможе підвищити точність і ефективність системи технічного обслуговування.

7. Принцип стійкості та екологічної відповідальності. З огляду на важливість стійкості в сучасному світі, цей принцип підкреслює необхідність мінімізації екологічного впливу системи обслуговування. Включення екологічних критеріїв у процес ухвалення рішень сприяє розробленню більш екологічно чистих та енергоефективних процесів обслуговування.

М19. Особливості системного підходу до підвищення ефективності системи ТО вантажного судна в умовах експлуатації

Дослідження ефективності систем технічного обслуговування вантажних суден та їх суднових технічних засобів передбачає вирішення двох основних взаємозалежних задач: аналізу та забезпечення (синтезу) їх необхідної ефективності. Аналіз ефективності спрямований на визначення показників ефективності систем технічного обслуговування вантажних суден та виявлення на основі цього фактора основних причин, що впливають на надійність і ефективність роботи їх суднових технічних засобів. Рішення цієї задачі здійснюється за допомогою відповідних розрахункових методів, що базуються на теоретичних концепціях та емпіричних даних.

В результаті аналізу ефективності систем технічного обслуговування вантажних суден, дослідники здатні виявити ключові показники ефективності, які відображають рівень продуктивності та безпеки діяльності технічного обслуговування вантажного судна [330]. Ці показники можуть включати, наприклад, час, необхідний для виконання ремонтних робіт, час експлуатації судна без збоїв, кількість аварій та їх вплив на функціонування, а також ефективність використання ресурсів.

Після здійснення аналізу, проводять синтез систем технічного обслуговування, спрямований на підвищення ефективності та покращення роботи компонентів судна (суднових технічних засобів) [59]. Для досягнення цілей синтезу використовуються різноманітні інженерні рішення та методи оптимізації, враховуючи вимоги безпеки, ефективність витрат та збереження ресурсів [145]. Ці дві взаємопов’язані задачі спільно визначають підходи до управління системами технічного обслуговування вантажних суден. Системний підхід до дослідження та оптимізації ефективності систем технічного обслуговування вантажних суден забезпечує підвищення їх надійності, безпеки

та ефективності функціонування, що є важливим внеском у розвиток судноплавної промисловості та морського транспорту загалом.

Забезпечення (синтез) ефективності систем технічного обслуговування вантажних суден передбачає розробку методів, організаційно-технічних заходів і конструктивно-схемних рішень, спрямованих на досягнення необхідної ефективності виробничих процесів під час технічного обслуговування вантажних суден [262]. Однак, наповнення аналізу ефективності систем технічного обслуговування вантажних суден кількісними значеннями показників є складним і важливим етапом. На етапі проектування вантажного судна, така оцінка здійснюється з метою прогнозування очікуваної ефективності системи технічного обслуговування конкретного типу судна [239]. Це необхідно для обґрунтування проекту вантажного судна та вирішення ряду організаційно-технічних питань, пов'язаних з вибором оптимального чи раціонального варіанта структури технічних систем і комплексів вантажного судна, способів резервування, глибини і методів контролю, кількості і номенклатури запасних комплектуючих, базової періодичності профілактичних робіт, обґрунтування вимог до надійності комплектуючих та іншого.

Оцінка ефективності систем технічного обслуговування вантажних суден на етапах випробувань і експлуатації є важливою для визначення її реальних показників [247]. Така оцінка має характер не тільки констатації, а й спрямована на аналіз і зрозуміння дійсних результатів технічного обслуговування. Проведення оцінки ефективності систем технічного обслуговування вантажних суден дозволяє вирішити ряд важливих наукових і практичних завдань, а саме:

- Розробка організаційно-технічних заходів з метою підвищення ефективності систем технічного обслуговування вантажних суден [246]. Отримані результати оцінки дозволяють ідентифікувати та аналізувати проблемні аспекти системи обслуговування, що забезпечують підґрунтя для розробки оптимальних заходів щодо покращення функціонування системи;
- Уточнення тактико-технічних вимог до нових засобів водного транспорту на основі досвіду експлуатації їх аналогічних засобів [265]. Результати оцінки ефективності вже існуючих систем технічного обслуговування дозволяють виявити слабкі місця та вдосконалити технічні характеристики нових суден для досягнення більшої надійності та забезпечення ефективності їх обслуговування;
- Оцінка перспективних напрямків модернізації існуючих систем технічного обслуговування вантажних суден [393]. З урахуванням зібраних даних і результатів оцінки, можна виявити та розробити оптимальні технічні рішення для покращення функціональних можливостей існуючих систем обслуговування з метою підвищення ефективності;
- Розробка експлуатаційних заходів для більш ефективного використання можливостей вантажних суден як комерційних транспортних засобів [323]. На основі зібраних даних, можливо розробити оптимальні підходи та плани для оптимізації експлуатації вантажних суден з метою зниження витрат та забезпечення оптимального використання ресурсів.

Ці завдання мають велике наукове і практичне значення, оскільки підвищення ефективності систем технічного обслуговування вантажних суден сприяє підвищенню безпеки та стабільності функціонування вантажних суден, що має важливе значення для розвитку морського транспорту та судноплавства загалом.

При виконанні оцінки ефективності систем технічного обслуговування вантажних суден необхідно детально і чітко сформулювати завдання дослідження, в якому повинні бути зазначені наступні ключові аспекти:

- Призначення вантажних суден і їх систем технічного обслуговування, а також зазначення їхніх специфічних особливостей [382]. Виокремлення основних функціональних завдань, які виконуються вантажними суднами, та опис їхнього технічного обслуговування.
- Найменування показників ефективності, які потрібно визначити для систем технічного обслуговування вантажних суден [348]. Це можуть бути, наприклад, ймовірність виконання поставлених задач, показники надійності, ресурси технічних систем, витрати та інші параметри.
- Варіанти використання вантажних суден, що охоплюють різні умови та типи перевезень [264]. Зазначення різних сценаріїв використання суден, таких як перевезення різних видів вантажів, рейси на різних маршрутах, діяльність в різних кліматичних умовах та ін.
- Особливості застосування систем технічного обслуговування для кожного можливого варіанту використання вантажних суден [293]. Це включає розгляд вимог до обслуговування в залежності від типу перевезень, розрахункових навантажень, діапазону температур та ін.
- Ознаки збійних ситуацій, які можуть виникнути в системах технічного обслуговування вантажних суден [68]. Це опис можливих проблем, відмов, аварій та інших негативних сценаріїв, що впливають на ефективність обслуговування.

Ці ключові аспекти дослідження дозволять здійснити комплексний аналіз ефективності систем технічного обслуговування вантажних суден та виявити основні фактори, що впливають на їхню надійність та ефективність.

На основі отриманих вхідних даних проводиться аналіз та оцінка ефективності систем технічного обслуговування вантажних суден та їх технічних засобів. Отримані результати дозволяють зробити висновок про характер їх ефективності. Задача забезпечення необхідної ефективності систем технічного обслуговування вантажних суден передбачає розробку методів, організаційно-технічних заходів та конструктивно-схемних рішень, які націлені на досягнення встановлених показників ефективності функціонування цих систем та їх окремих компонентів.

У випадках, коли технічні, організаційні або економічні обмеження не дозволяють повністю задовольнити вимоги до ефективності, може ставитися менш складна задача підвищення рівня ефективності в порівнянні з вже досягнутими рівнями [419]. Дана альтернатива дозволяє впроваджувати певні

покращення та інновації для підвищення продуктивності систем технічного обслуговування вантажних суден при обмежених ресурсах та можливостях [119].

Дослідження систем технічного обслуговування вантажних суден починається з проведення аналізу та вивчення поставлених перед нею задач, з'ясування принципів її побудови, перевірки ступеня виконання основних обмежень та обґрунтування можливості введення додаткових обмежень за необхідності [419]. Це дозволяє здійснити декомпозицію системи технічного обслуговування на складові частини, виділити основну (пріоритетну) задачу та розподілити її на часткові задачі, а також визначити умовні показники ефективності.

Ці операції і комплексний аналіз взаємозв'язків в системі технічного обслуговування вантажного судна об'єднуються поняттям "структурний аналіз системи технічного обслуговування вантажного судна". Важливо підкреслити, що цей етап дослідження має принципове значення та здійснюється з урахуванням комплексності системи технічного обслуговування та її взаємодії з іншими складовими частинами вантажного судна.

Результати структурного аналізу визначають подальший напрямок дослідження, розробки та вдосконалення системи технічного обслуговування вантажних суден. Велике значення має правильний вибір параметрів та показників ефективності, які дозволяють об'єктивно оцінити продуктивність системи технічного обслуговування, а також виявити основні напрямки для оптимізації її роботи.

Слід підкреслити, що дана стадія дослідження, включаючи структурний аналіз системи технічного обслуговування вантажних суден, має складну та відповідальну природу, і вона служить основою для подальших робіт з аналізу та впровадження необхідних заходів для забезпечення ефективності цієї системи в різних умовах експлуатації.

Сучасні вантажні судна демонструють ряд характерних рис, які мають важливе значення для їх ефективної експлуатації та функціонування. Серед основних характеристик можна виокремити наступні:

- Різноманітність фізичних принципів: В суднових технічних системах та комплексах спостерігається наявність елементів, що працюють на різних фізичних принципах [367]. Це може бути пов'язано з різними типами двигунів (дизельні, електричні, газотурбінні), системами автоматичного керування, гідравлічними системами, електронікою та іншими складовими частинами;
- Функціональна і структурна надмірність: Вантажні судна характеризуються значною рівнем функціональної та структурної надмірності їхніх технічних систем і комплексів, що дозволяє вирішувати основні задачі експлуатації з великим запасом потужності та можливості пристосування до різних умов роботи [80];
- Використання обчислювальних пристроїв: У сучасних суднових системах широко застосовуються цифрові та аналогові обчислювальні пристрої для забезпечення автоматизованого керування та контролю [1]. Це дозволяє

підвищити точність процесів, забезпечити оптимальні режими роботи та зменшити людський фактор в управлінні;

- Висока надійність елементів: Значна кількість елементів, використовуваних у вантажних суднах, відзначається високим рівнем надійності [236]. Це особливо важливо для безпеки експлуатації та успішного функціонування судна на протязі тривалого періоду;

Зазначені особливості сучасних вантажних суден визначають наявність нових характеристик, що були нехарактерними для вантажних суден попередніх поколінь. Особливо важливим аспектом є можливість вантажних суден здійснювати свої функції при відмові окремих компонентів, завдяки значній функціональній і структурній надмірності суднових технічних систем і комплексів.

Процес оцінки ефективності систем технічного обслуговування вантажних суден може бути розглянутий в наступній послідовності [418]:

1. На першому етапі, проводячи аналіз алгоритмів функціонування вантажних суден з урахуванням специфічних умов їх застосування, визначається послідовність етапів, які повинні бути вирішені в межах системи технічного обслуговування вантажного судна для досягнення успішної реалізації його завдань в цілому.
2. Для кожного з етапів обираються відповідні умовні показники ефективності системи технічного обслуговування.
3. Засновуючись на досвіді попередньої експлуатації та застосуванні даного типу вантажних суден, необхідно проаналізувати здійснення загальних обмежень і ввести додаткові обмеження, що допоможуть досягти завдань з оцінки ефективності за відповідний проміжок часу.
4. Після введення обмежень, варто обрати та обґрунтувати моделі, які будуть описувати поведінку елементів суднових технічних систем і комплексів вантажного судна та самого судна в цілому під час здійснення етапів.
5. Використовуючи відповідний математичний апарат, що відповідає обмеженням та обраним моделям, проводиться оцінка ефективності системи технічного обслуговування вантажного судна при вирішенні конкретних задач з використанням судна згідно його призначення.
6. На останньому етапі оцінюється ефективність системи технічного обслуговування вантажного судна в цілому.

При реалізації зазначеного алгоритму оцінки ефективності системи технічного обслуговування вантажних суден, необхідно враховувати фактори, такі як модернізація вантажного судна та обсяги виконуваних робіт, специфічні для кожного конкретного вантажного судна [415]. У зв’язку з цим, важливо створити модель системи технічного обслуговування вантажного судна, яка б відповідала наступним вимогам [430]:

- Враховувати структуру системи технічного обслуговування вантажного судна та її зміну у часі, оскільки система може піддаватися модернізації і оновленню з метою покращення ефективності.

- Відбивати фізичну сутність явищ, які відбуваються з судном, щоб модель була адекватною до реальних умов експлуатації та поводження вантажного судна.
- Точність моделі повинна бути погоджена з точністю наявних вхідних даних, щоб отримані результати були достовірними та надійними.
- Мати чутливість до основних (найбільш суттєвих) параметрів і досить точно відображати їхній вплив на значення показників ефективності системи технічного обслуговування вантажного судна.

Зазначені вимоги найбільшою мірою відповідають математичним моделям у виді дискретного Марківського ланцюга та дискретного Марківського процесу [413]. При моделюванні системи технічного обслуговування вантажного судна характерним є перехід зі стану в стан тільки у фіксовані моменти часу $(t_1, t_2, t_3, \dots, t_M)$. Ці моменти часу визначають етапи технічного обслуговування вантажного судна. Така апроксимація дозволяє досить точно оцінити якість рішення окремих задач під час технічного обслуговування вантажних суден.

Використання дискретного Марківського ланцюга та дискретного Марківського процесу в моделюванні системи технічного обслуговування вантажних суден має деякі переваги. Зокрема, такі моделі дозволяють адекватно відобразити перехід між різними станами системи обслуговування, які можуть залежати від фіксованих моментів часу. Крім того, ці моделі дозволяють аналізувати ймовірнісні характеристики системи, що є важливим для оцінки ефективності технічного обслуговування вантажних суден.

При використанні дискретного Марківського ланцюга та дискретного Марківського процесу у моделюванні систем технічного обслуговування вантажних суден, необхідно враховувати особливості самої системи, а також точність і наявність вхідних даних, що забезпечує адекватність отриманих результатів. Зазначені моделі відкривають широкі можливості для аналізу і планування ефективних рішень у системі технічного обслуговування вантажних суден, зокрема, для оптимізації етапів технічного обслуговування та підвищення якості функціонування цих суден.

Властивості дискретного Марківського процесу полягають у тому, що моменти зміни станів відбуваються в будь-які випадкові моменти часу. Цей підхід апроксимації процесу технічного обслуговування вантажних суден є найбільш адекватним для відтворення реальних процесів та має найбільшу точність. Оскільки загальне число станів, у яких може перебувати система технічного обслуговування вантажного судна при деталізації процесу, може зростати безмежно, важливо обмежитись лише найбільш важливими станами, що найсуттєвіше впливають на ефективність технічного обслуговування, забезпечуючи при цьому достатню точність вхідних даних.

Для побудови моделей систем технічного обслуговування вантажних суден, які враховують дискретний Марківський процес, необхідно ввести систему обмежень, що дозволяють зменшити розмірність задачі до прийнятних розмірів. Однак, формулювання таких обмежень представляє собою складне

завдання, оскільки вимагає компромісу між зниженням розмірності і виникаючою при цьому методичною похибкою.

Наголошуємо, що оцінка та аналіз ефективності систем технічного обслуговування вантажних суден, заснованих на моделі (4.2), практично неможливі. Такі задачі є вкрай складними через складні статистичні залежності, що виникають при наявності випадкових моментів часу (t_m), які характеризують появу збійних ситуацій в складових частинах (m) системи технічного обслуговування вантажних суден. Функція ймовірності $P(t_1, t_2, t_3, \dots, t_M, \tau)$, яка є складною, ускладнює проведення оцінок ефективності методами аналітичного або статистичного характеру, зокрема шляхом застосування формули (4.2). Для таких задач важливо врахувати, що статистичні дані можуть бути недостатніми для визначення (M)-вимірну щільності ймовірності, а також функції (4.1).

Більшість вхідних параметрів моделі системи технічного обслуговування вантажних суден визначаються за допомогою методів теорії надійності. Однак, рішення задачі оцінки ефективності сучасних систем технічного обслуговування вантажних суден, як було показано вище, стикається з обчислювальними труднощами, пов'язаними з необхідністю перебору великого масиву інформації та визначення на її базі ймовірнісних характеристик суднових технічних засобів, систем і комплексів, а також процесу їхнього технічного обслуговування. Ця проблема виникає через те, що розмірність моделі системи технічного обслуговування вантажного судна зростає по експоненті, а саме пропорційно (2^M), де (M) – кількість компонентів системи.

З цієї причини, для вирішення таких задач необхідні методи оцінки ефективності та прикладні програми, які б максимально економічно здійснювали необхідні обчислення. При цьому вони повинні бути спроектовані таким чином, щоб від користувача вимагалося лише формалізувати певним чином свої запитання до програми, а решта обчислювальних процесів виконувалася автоматично. Такий підхід спростить і прискорить процес оцінки ефективності систем технічного обслуговування вантажних суден, забезпечуючи при цьому достатню точність результатів.

М20. Принципи формування системи КПТОВС

Принцип 1 – відносна автономність. Цей принцип заснований на інтеграції системи технічного обслуговування вантажного судна в загальну структуру системи експлуатації [61]. Перед ініціацією підконтрольної експлуатації з метою створення системи технічного обслуговування необхідно здійснити ряд підготовчих дій: скласти перелік технічних засобів і конструкцій судна; забезпечити наявність повного комплекту експлуатаційної та програмно-методичної документації для конкретного типу вантажного судна; визначити склад та кількість обслуговуючого персоналу, необхідних для виконання всіх операцій технічного обслуговування; встановити кваліфікаційні вимоги до персоналу, який буде задіяний у процесах технічного обслуговування.

Принцип 2 – структуроване планування. Цей принцип включає розробку єдиного плану для реалізації системи технічного обслуговування вантажного

судна, з акцентом на послідовне виконання задач на кожному етапі [276]. Це передбачає детальний технічний аналіз експлуатаційної документації для ідентифікації ключових аспектів, які підлягають оцінці, та здійснення контрольованої експлуатації з метою аналізу характеристик системи технічного обслуговування.

Принцип 3 – інтегроване управління. Цей принцип полягає у централізації процесу управління створенням системи технічного обслуговування вантажного судна під час експлуатації [76]. Він включає єдине керівництво від керівництва судноплавної компанії, яке веде процес, з оцінкою і аналізом експлуатаційних характеристик, виконуваним старшими механіками, та активне застосування автоматизованих систем.

Принцип 4 – адаптивність. Цей принцип базується на ідентифікації та впровадженні інноваційних та передових методів під час експлуатації для удосконалення системи технічного обслуговування вантажного судна [347].

Принцип 5 – стандартизація вимог і оцінювання. Цей принцип вимагає застосування уніформованих критеріїв і оцінок до системи технічного обслуговування вантажного судна, охоплюючи як індивідуальні технічні засоби судна, так і вантажне судно в цілому [352].

Принцип 6 – ієрархічна організація. Цей принцип передбачає створення ієрархічної структури у формуванні системи прескриптивного технічного обслуговування вантажного судна, де ключові вирішення базуються на ефективності, вартісних показниках, часових рамках реалізації, а також на ресурсах і потенціалі судноплавних компаній [125].

Принцип 7 – методологічна консистентність. Цей принцип підкреслює важливість застосування уніфікованих та послідовних методологічних підходів у процесі розробки та впровадження системи технічного обслуговування вантажного судна [222]. Основа цього підходу полягає у створенні та використанні програмно-методичного забезпечення для планування, організації та оцінки результативності розробленої системи.

Принцип 8 – фінансова ефективність. Цей принцип акцентує на важливості врахування вартісних витрат при створенні системи технічного обслуговування вантажного судна, які є ключовими для визначення потенціалу її подальшого удосконалення [225]. Високі матеріальні інвестиції у систему обслуговування вимагають ретельного аналізу їх економічної ефективності та доцільності.

Принцип 9 – практична придатність. Цей принцип наголошує на необхідності оцінки системи технічного обслуговування вантажного судна в умовах і режимах, які максимально наближені до реальних умов її майбутньої експлуатації в рамках судноплавної компанії [107]. Такий підхід дозволяє глибоко та всебічно виявити потенційні слабкі місця, перевірити адекватність і належність суднових технічних засобів, конструкцій і систем до фактичних умов експлуатації.

Викладені принципи є фундаментальними для розробки методичного підходу управління системами технічного обслуговування вантажних суден під

час експлуатації. Для ефективного впровадження цих принципів, методичне забезпечення повинно:

- Забезпечувати своєчасне і повне проведення підконтрольної експлуатації, а також адекватну обробку результатів для перевірки відповідності системи технічного обслуговування вантажного судна встановленим вимогам;
- Враховувати та узагальнювати успішний досвід експлуатації вантажних суден різних типів у різноманітних судноплавних компаніях;
- Бути базованим на сучасних наукових та технічних досягненнях;
- Враховувати існуюче узгоджене методичне забезпечення та вимоги до системи технічного обслуговування в умовах експлуатації;
- Виключати двозначність у тлумаченні вимог до системи технічного обслуговування, її формування та отриманих результатів оцінки;
- Гарантувати консистентність у підходах до вимог та оцінок системи технічного обслуговування, як на рівні окремих компонентів судна, так і вантажного судна загалом;
- Бути гнучким до корекції на основі результатів практичного застосування;
- Не знижувати ефективності та економічності системи технічного обслуговування та її оцінки;
- Забезпечувати використання систем ACMS та ShipDiMRO судноплавними компаніями для збору, обробки та поширення інформації про стан та результати формування системи технічного обслуговування;
- Регламентувати обсяг і порядок документування і використання інформації при оцінці параметрів системи технічного обслуговування;
- Передбачати заходи та процедури для забезпечення безпеки під час формування системи технічного обслуговування.

Під час розробки та обґрунтування методичного забезпечення для аналізу та синтезу систем технічного обслуговування вантажного судна, заснованого на даних, отриманих в процесі експлуатації, які були детально розглянуті в попередніх розділах, були враховані зазначені принципи та вимоги. Нижче представлено узагальнену методику управління системами технічного обслуговування вантажних суден, яка базується на результатах їх експлуатації.

Розгляд аналізу та синтезу систем технічного обслуговування вантажних суден як об’єктів відпрацювання в умовах експлуатації охоплює два важливих аспекти: науковий та організаційно-технічний. Науковий аспект полягає у виявленні та формулюванні типових завдань, що виникають у процесі створення систем технічного обслуговування вантажного судна, і в розробці методології для їх вирішення. До цього відносяться методи аналізу і синтезу цих систем на основі даних експлуатації, розглянуті раніше.

Організаційно-технічний аспект визначається практичним застосуванням цих методів, що робить створення наукових основ і методів рішення типових задач не єдиною вимогою. Важливим є також впровадження отриманих наукових результатів у широку інженерну практику управління системами технічного обслуговування вантажних суден в судноплавних компаніях. Це потребує

адаптації запропонованих методів до рівня інженерних методик, включаючи розробку конкретного програмного забезпечення.

Методичне забезпечення аналізу та синтезу систем технічного обслуговування вантажних суден, яке використовується під час експлуатації, відображає принцип ієрархічності у технічному обслуговуванні вантажних суден. Структура такого методичного забезпечення може бути представлена як набір методик, які застосовуються на різних рівнях:

Рівень I. Вантажне судно – цей рівень включає аналіз і синтез систем технічного обслуговування судна як цілісного об’єкта, враховуючи вектор його параметрів.

Рівень II. Суднові технічні засоби та конструкції – на цьому рівні відбувається аналіз та синтез окремих компонентів судна, таких як двигуни, системи керування тощо, з урахуванням їх специфічних параметрів поєднаних у вектор.

Рівень III. Суднові технічні системи та комплекси – цей рівень зосереджений на аналізі і синтезі систем технічного обслуговування більш складних систем і комплексів на судні, таких як системи забезпечення навігації, комунікації та безпеки, з різними підходами і стратегіями технічного обслуговування, а також векторами параметрів.

Кожен рівень в цій ієрархії має свою специфіку і вимагає індивідуального підходу в аналізі та розробці стратегій технічного обслуговування.

Процедура ухвалення рішень щодо виконання вимог до системи технічного обслуговування вантажного судна на основі результатів експлуатації, описана в попередніх розділах, підкреслює, що ключовим елементом методичного забезпечення є методики оцінки системи технічного обслуговування для окремих суднових технічних засобів. Типові моделі таких засобів були розроблені та представлені у Розділі 5 даної роботи.

Ці методики і моделі забезпечують систематичний підхід до оцінювання та удосконалення систем технічного обслуговування, враховуючи специфіку кожного засобу та його вплив на загальну роботу вантажного судна. Це дозволяє ефективно керувати процесом технічного обслуговування, виявляти потенційні проблеми та оптимізувати роботу системи в цілому.

М21. Опис процедури формування системи прескриптивного технічного обслуговування вантажного судна

1. На основі структурної схеми вантажного судна, складається детальний перелік усіх суднових технічних засобів, конструкцій, систем і комплексів, які потребують аналізу з метою оптимізації технічної експлуатації і відповідного технічного обслуговування.

2. Виконується аналіз потенційних станів суднових технічних засобів, конструкцій, систем і комплексів виходячи з їхніх систем технічного обслуговування, , із зображенням цих станів у вигляді таблиці та їхньою візуалізацією у формі графа станів.

3. Аналізуються можливі напрямки переходів між станами, і на цій основі будуються орієнтовані графи станів для кожного суднового технічного засобу, конструкції, системи або комплексу.

4. Розглядається фізична сутність кожного можливого переходу між станами, після чого складаються матриці інтенсивностей переходів.

5. Якщо існують немарковські параметри, їх необхідно перетворити до марковських для полегшення аналізу та синтезу систем.

6. Використовуючи статистичні дані, зібрані під час експлуатації, розраховуються значення інтенсивностей переходів між станами суднових технічних засобів та систем.

7. Визначаються всі необхідні параметри для включення в рівняння інтенсивностей переходів. В результаті цього кроку буде сформовано вектор параметрів систем технічного обслуговування для кожного окремого елемента (засобу, конструкції, системи чи комплексу).

8. На основі отриманих даних складаються системи алгебраїчних і диференціальних рівнянь, що описують поведінку та характеристики кожного з суднових технічних елементів.

9. Вирішуються побудовані системи рівнянь для отримання кількісних характеристик поведінки та станів суднових технічних засобів та систем.

10. Проводиться аналіз показників якості систем технічного обслуговування вантажного судна, з метою визначення їх оптимальних параметрів та можливих варіантів удосконалення.

11. Проводиться аналіз виконання вимог до параметрів систем технічного обслуговування на основі обробки статистичних даних, наприклад, стосовно тривалості різних видів технічного обслуговування.

12. Перевіряється, наскільки реальні показники якості технічного обслуговування відповідають вимогам, розрахованим за допомогою відомих моделей систем технічного обслуговування.

13. Формування вектору параметрів систем технічного обслуговування для суднових технічних засобів, які відповідають вимогам судноплавної компанії та розробника.

14. Складання переліку всіх суднових технічних засобів, конструкцій, систем і комплексів, що входять до складу вантажного судна.

15. Інтеграція систем моніторингу стану всіх перерахованих у переліку компонентів судна.

16. Впровадження прескриптивних методів аналізу і синтезу параметрів системи технічного обслуговування, аналізу великих обсягів даних та машинного навчання для планування періодичності і складу робіт технічного обслуговування.

17. Формулювання системи технічного обслуговування складових частин вантажного судна з параметрів, які задовольняють вимогам з технічного обслуговування на суднові технічні засоби, конструкції, системи і комплекси, що входять до них. При цьому, якщо періодичність технічного обслуговування для складових частин вантажного судна визначається на основі періодичності таких

видів обслуговування для їхніх індивідуальних елементів, то загальна тривалість кожного виду обслуговування для кожної складової частини вантажного судна визначається як сукупність тривалості всіх необхідних операцій технічного обслуговування, які формують критичний шлях у технологічному графіку обслуговування цієї складової частини.

18. Виконати аналіз виконання вимог до показників надійності складових частин вантажного судна, враховуючи, що ці показники визначаються як продукт відповідних показників надійності суднових технічних засобів, конструкцій, систем і комплексів, залучених до структурної схеми надійності цих складових частин.

19. Розробити і оцінити систему технічного обслуговування вантажного судна, дотримуючись методології, аналогічної до тієї, що використана у кроках 17 і 18.

20. Здійснити верифікацію виконання вимог до параметрів системи технічного обслуговування вантажного судна.

21. Провести оцінку дотримання вимог до показників якості технічного обслуговування вантажного судна з урахуванням встановлених параметрів його системи.

22. У випадку відповідності показників якості технічного обслуговування при різних параметрах системи, провести визначення оптимальних параметрів через рішення задачі синтезу.

23. У разі невиконання вимог до системи технічного обслуговування, розробити відповідні заходи для усунення причин цього невиконання або, у разі неможливості такого усунення, здійснити оптимальне коригування параметрів системи через рішення задачі синтезу.

М22. Опис процедури синтезу системи комплексного прескриптивного технічного обслуговування вантажних суден

1. Застосовуючи структурований орієнтований граф станів, що представляє судновий технічний засіб, конструкцію, систему чи комплекс, який був розроблений для аналізу системи технічного обслуговування (згідно з кроками 1, 2, 3 Алгоритму 1), прийняти кількість можливих станів цього агрегату як початкові дані для подальшого аналізу.

2. Проаналізувати і встановити кількість можливих варіантів параметрів системи технічного обслуговування для кожного суднового технічного засобу, конструкції, системи чи комплексу, які відповідають встановленим вимогам до технічного обслуговування в рамках специфічних умов експлуатації вантажного судна.

3. Скласти матриці, що відображають інтенсивності переходів, для кожного з ідентифікованих варіантів параметрів.

4. Виконати обчислення відповідних значень елементів вказаних матриць.

5. Здійснити аналітичний розгляд станів та переходів суднових технічних засобів, конструкцій, систем і комплексів, базуючись на структурі орієнтованого

графа, та визначити відповідні економічні вигоди, асоційовані з кожним з цих станів та переходів.

6. Скласти матриці фінансових результатів для кожного варіанту параметрів системи, які відповідають зазначеним критеріям і вимогам.

7. Виконати обчислення значень елементів для матриць фінансових результатів.

8. На основі підготовлених вхідних даних провести рішення задачі оптимізації параметрів системи технічного обслуговування вантажного судна.

9. Застосувати алгоритми машинного навчання для адаптивного оновлення параметрів системи технічного обслуговування.

10. Сформувати вектор, що відображає оптимальні параметри системи технічного обслуговування для суднових технічних засобів, конструкцій, систем і комплексів, що входять до складу вантажного судна.

11. Сформувати вектор, що відображає оптимальні параметри для системи технічного обслуговування вантажного судна, відповідно до процедур, визначених у кроках 14 до 21 Алгоритму 1.

М23. Особливості побудови моделі технічного обслуговування суднових технічних засобів вантажних суден

Під час побудови моделі технічного обслуговування суднових технічних засобів вантажних суден, необхідно враховувати зв’язки тільки у випадку відсутності даних про напрацювання до відповідних станів, при яких можна було б визначити швидкість зміни технічного стану. У цьому випадку доступні лише середнє напрацювання до відмови та коефіцієнт варіації. Однак, якщо ці дані збережені, можна безпосередньо визначити швидкості зміни технічного стану, їх середнє значення та коефіцієнт варіації, і в такому випадку не потрібно вводити жодних поправок.

Моменти втрати працездатності, які відбуваються між технічним обслуговуванням та контрольними операціями, визначаються за допомогою лінійного інтерполювання. Використання описаної моделі для імітації експлуатації об’єкта, який перебуває в системі технічного обслуговування, дозволяє встановити закону вплив розподілу на періодичність регламентного технічного обслуговування та контролю.

Наведені нижче результати можуть бути застосовані до будь-яких фактичних даних шляхом переходу від безрозмірних характеристик до абсолютних значень. З точки зору основної відмінної ознаки реального процесу зміни технічного стану, важливими є коефіцієнт варіації для швидкості зміни технічного стану (V_v), та закон розподілу.

Для розгляду методів, які найчастіше використовуються, включаючи комплексний метод регламентного технічного обслуговування з проміжним контролем, необхідно враховувати основу процесу зміни технічного стану. У цьому контексті, значення коефіцієнта варіації для швидкості зміни технічного стану (V_v) або коефіцієнта варіації для напрацювань до відмови чи будь-якого іншого стану (V_t), наприклад, незадовільного, повинні бути визначені. Також

повинен бути відомий закон розподілу для швидкості зміни технічного стану або моделювання виконується для декількох законів, а потім приймається песимістичний результат..

Для переходу від відносних результатів моделювання до конкретних результатів досліджуваного об’єкта необхідно встановити наступні параметри: 1) середнє напрацювання до відмови; 2) або медіанне напрацювання до відмови, яке визначається як момент часу, коли досягається непрацездатний стан згідно середньої швидкості зміни технічного стану; 3) або швидкість зміни технічного стану. З урахуванням зв’язків значень, що розраховуються за допомогою поліномів [150] достатньо знати будь-який із трьох параметрів.

Залежно від методу технічного обслуговування вантажних суден, вимагається різний обсяг інформації про категорії технічного стану. При використанні будь-якого методу необхідно мати знання можливого діапазону зміни технічного стану, включаючи аварійне значення параметра (Y_{fail}) та початкове значення (Y_0), яке може відповідати стану "хорошої" категорії, що приймається системою. Замість "хорошого" стану може бути обрано будь-який інший стан, визначений на початку експлуатаційного циклу відповідно до поставлених завдань дослідження. Знання параметрів, що відповідають "незадовільному" стану (Y_u) , є необхідним для будь-якого методу технічного обслуговування, за винятком методу за відмовами. Під час проведення контролю технічного стану, залежно від технології застосованого методу, може бути необхідним опис проміжних категорій технічного стану (принаймні однієї), при досягненні якої необхідно змінити періодичність контролю. В такому випадку слід задати відповідне правило зміни періодичності контролю.

У разі застосування технічного обслуговування за станом необхідне завдання алгоритму прогнозу зміни технічного стану, який також має стати частиною моделі.

Під час моделювання процесів технічного обслуговування, особлива увага приділяється відомому недоліку інформації, що міститься в інструкціях заводів виробників, коли в них наведені настановні значення структурних параметрів, що розуміються як такі, що описують «добрий» технічний стан. Крім того, у будь-якій інструкції наводяться гранично-допустимі значення для структурних параметрів, які слід розуміти як такі, що описують «незадовільний» стан. Як правило, інформація про категорії на цьому вичерпується. Опис «аварійного» стану зазвичай відсутній, тобто заводи виробники вважають за краще не розкривати запаси надійності, які вони заклали під час призначення гранично-допустимих значень структурних параметрів.

Наприклад, при використанні відомих показників довговічності у вигляді гамма-відсоткових ресурсів, значення гамми залишається невідомим для експлуатаційника. Це пояснюється тим, що фактично, продовження роботи в царині незадовільних станів є ризиком експлуатаційника і не може бути частиною відповідальності заводу-виготовлювача, тим більше, що в цій царині технічних станів можливе спотворення закономірності зміни технічного стану.

Вважається, що процес, який призводить до граничного стану, у своєму продовженні призводить або до відмови, або створює сприятливі умови її появи. Рівень граничного стану, що відповідає його математичному очікуванню, називають критичним, за якого надзвичайно висока ймовірність відмови (понад 50 %). І питання не полягає в тому, наскільки близький цей рівень до непрацездатного стану через протікання цього процесу зміни технічного стану, а питання полягає в тому, наскільки далеко слід встановлювати призначений рівень граничного стану. Заводи виробники суднової техніки встановлюють призначений рівень граничного стану, який суттєво нижчий за критичний рівень. Практично це означає встановлення саме гранично-допустимих значень структурних параметрів, параметрів робочих і супутніх процесів. При цьому критичний рівень граничного стану можна ідентифікувати як деякий стан, що належить до категорії незадовільних станів і знаходиться між гранично-можливим і гранично-допустимим значенням параметра, що характеризує технічний стан за системою прийнятих категорій.

М24. Особливості марковських моделей для опису процесів технічного обслуговування вантажних суден

Марківські моделі можуть використовуватися для моделювання широкого спектра сценаріїв, включаючи динаміку зносу суднових технічних засобів, ймовірності виникнення дефектів або несправностей, ймовірність необхідності проведення певного виду технічного обслуговування та багато іншого. Це може служити основою для ефективного планування та оптимізації технічного обслуговування, підвищуючи тим самим надійність суден і знижуючи загальні витрати на експлуатацію.

Основа використання цього методу полягає в уявленні процесу зміни технічного стану вантажного судна як випадкового [10]. Можливі стани об’єкта представляються у вигляді графа, вершинами якого є стани з ймовірностями перебування у них P_i, а стрілки вказують напрямки можливих переходів з відповідними інтенсивностями λ_{ij}.

Найбільшого поширення набули однорідні Марківські моделі, коли інтенсивність переходу λ_{ij} не залежить від інтервалу часу Δt і від того, в який момент часу t на осі часу починається цей елементарний відрізок. Вказана задача зводиться до вирішення системи рівнянь Чепмена-Колмогорова при постійних інтенсивностях переходу $\lambda_{ij} = const$ (однорідний процес) або зі змінними інтенсивностями $\lambda_{ij} = f(t)$ (неоднорідний процес). Описаний підхід може бути використаний для аналізу та прогнозування різних сценаріїв технічного обслуговування судна, включаючи динаміку зносу технічних засобів, частоту та тривалість ремонтних робіт, а також можливості для планування технічного обслуговування та мінімізації простоїв судна.

Для обчислення комплексних показників надійності складного об’єкта, який складається з багатьох компонентів, у яких відбуваються різні процеси зміни технічного стану, потрібно виділити принаймні три основних стани:

1. Робочий,

2. Неробочий - виконання позапланового ТО,

3. Виконання запланованого ТО.

Причому в цих станах може перебувати кожна конструктивна компонента складного об’єкта і системи.

Складний об’єкт, наприклад, головний двигун вантажного судна, може розглядатися як об’єкт, який забезпечує виконання основної функції - надання судну руху з заданими показниками. Ця функція підтримується робочим станом компонентів конструкції самого двигуна, а також робочим станом систем, що його обслуговують. Кожна з компонент конструкції підлягає запланованому ТО і може підлягати позаплановому ТО у випадку відмови. Точно так само, кожна з систем і їх компонентів може підлягати запланованим і позаплановим видам ТО.

Якщо відомі інтенсивності відмов компонентів і систем, інтенсивності їх відновлення, інтенсивності запланованих ТО і виконання запланованих ТО, можуть бути визначені комплексні показники надійності з рівнянь Чепмена-Колмогорова.

Інтенсивності відмов і запланованих ТО, а також відновлення і виконання запланованих ТО залежать від конфігурації системи ТО, а також від властивостей самого об’єкта і характеру процесів, що в ньому відбуваються. Це може стати основою для детального планування та оптимізації технічного обслуговування вантажного судна.

Наприклад, головний двигун вантажного судна може розглядатися як об’єкт, що складається з наступних конструктивних компонентів:

B. Остов, фундаментна рама, кріплення до суднового фундаменту.
C. Кришка циліндра з компонентами.
D. Колінчастий вал, упорний підшипник та підшипники рами.
E. Шатун із підшипниками.
F. Поршень із штоком, сальник штока.
G. Втулки циліндрів.
H. Крейцкопф, підшипники крейцкопфа, паралелі.
I. Привід розподільчого валу (для двигунів з традиційними механічними системами управління).
J. Розподільчий вал із підшипниками (для двигунів з традиційними механічними системами управління).
K. Привід газорозподільчих органів (для двигунів з традиційними механічними системами управління).
L. Електронні контролери подачі палива і управління клапанами (для двигунів з електронною подачею палива та електронним газорозподілом).
M. Вихлопні клапани.
N. Демпфер.

Щодо систем, що обслуговують двигун, можна виділити наступні:

A. Система управління, запуску та реверсу.
B. Система подачі повітря.
C. Паливна система.
D. Система циркуляційного змащування.

E. Система змащування циліндрів.
F. Система охолодження.
G. Система контролю.
H. Дренажна система.
I. Система вентиляції картера.
J. Вихлопна система.

В свою чергу, кожна система розглядається як сукупність різноманітних компонентів. Інтенсивності відмов у результаті виконання незалежних процесів можуть вважатися сумами інтенсивностей відмов за відповідними видами та причинами. Інтенсивності відмов складних компонентів можуть розглядатися через відповідні коефіцієнти відмов.

М25. Особливості моделювання процесів оцінювання ефективності переходу на КПТОВС

У сучасний період, після 2020 року, спираючись на нову елементну базу, розроблено різноманітне обладнання для моніторингу суднових технічних засобів. Ці засоби володіють значно більшими можливостями, ніж ті, що були використані у проміжку між 2000 і 2010 роками. Зокрема, вони використовують методи аналізу даних у реальному часі, штучний інтелект та цифрові двійники [119, 420, 424, 429].

Застосування сучасних методів аналізу даних у реальному часі дозволяє збирати, обробляти та аналізувати інформацію з суднових технічних засобів миттєво, забезпечуючи оперативне реагування на зміни в їхньому технічному стані. Це дозволяє покращити ефективність технічного обслуговування та запобігати виникненню неполадок.

Штучний інтелект використовується для автоматизації процесу моніторингу та аналізу даних, що надходять від суднових технічних засобів. Він дозволяє виявляти аномалії, прогнозувати можливі відхилення та рекомендувати оптимальні стратегії технічного обслуговування.

Методологія цифрових двійників використовується для створення віртуальних моделей суднових технічних засобів, які точно відображають їхні фізичні характеристики та поведінку. Це дозволяє проводити детальний аналіз, тестування та оптимізацію різних сценаріїв технічного обслуговування без необхідності втручання в реальні об’єкти.

Отже, застосування сучасного обладнання для контролю суднових технічних засобів, заснованого на новітніх технологіях, дозволяє підвищити ефективність технічного обслуговування та забезпечити безпеку та надійність вантажних суден [119, 420, 424, 429].

Розглянемо можливість проведення порівняльного аналізу застосування різних методів технічного обслуговування суднових технічних засобів вантажних суден з урахуванням визначених припущень. Основою цієї методики є лінійна модель зміни технічного стану. Існують чотири причини, які обґрунтовують її використання:

1. Інформація про зміну технічного стану між періодами технічного обслуговування може бути відсутня або має непрямий та частковий характер [164].
2. Реалізація залежності зміни технічного стану завершується у момент виконання технічного обслуговування, і наступний цикл реалізації процесу розпочинається заново [184].
3. Лінійна модель дозволяє вирішувати задачу у загальному безрозмірному вигляді, мінімізуючи вимоги до початкової інформації про результати виконаного технічного обслуговування [154]. Крім того, ця модель може застосовуватись до будь-яких суднових технічних засобів.
4. Використання нелінійної моделі не суттєво впливає на результати, якщо базою порівняння є однакова ймовірність запобігання відмов системою технічного обслуговування [106].

Отже, застосування нелінійної моделі технічного обслуговування порівняно з лінійною впливає лише на інтервали контрольних операцій та їх кількість, а якщо не враховувати витрати на контроль, це не має суттєвого значення [119].

З метою отримання порівняльних результатів, як було вказано раніше, необхідно мати залежності між отриманими величинами та ймовірністю попередження відмов системою технічного обслуговування (P_{pre}). Після вибору відповідної точки з задовільним результатом можна визначити періодичність проведення регламентного технічного обслуговування або контролю технічного стану, що є необхідним для практичного використання отриманих результатів.

Формули для визначення витрат, пов’язаних з циклом експлуатації, демонструють, що наслідки відмов, їхній рівень та ймовірність попередження відмов прямо впливають на витрати, пов’язані з циклом експлуатації об’єкта. Чим більші наслідки відмов і чим менша ймовірність попередження відмов, тим більші витрати можна очікувати протягом циклу експлуатації об’єкта [18].

Однак функція витрат (w) може бути використана для аналізу питомих витрат за умови, що в структурі витрат на планові та непланові технічні обслуговування відсутні компоненти, які залежать від тривалості експлуатаційного циклу. Проте, слід зауважити, що така ситуація не є універсальною і може відрізнятися в залежності від конкретного випадку технічного обслуговування суднових технічних засобів вантажних суден.

Важливо зазначити, що ймовірності безвідмовної роботи відповідних деталей ($P_{i\,pre}$) і ймовірності попередження відмови системою технічного обслуговування (P_{pre}) неоднакові і не рівні один одному. Хоча ці ймовірності взаємозв’язані і залежать не лише від безвідмовності деталей, а й від інших властивостей. Таким чином, втрати, пов’язані з неповним використанням ресурсу, розподіляються між послідовними технічними обслуговуваннями, навіть якщо ці втрати насправді виникають лише в момент виконання останнього технічного обслуговування [74].

У контексті вартості запасних частин, важливо відмітити, що не існує оптимальних точок для питомих витрат. Зі збільшенням ймовірності

попередження відмов системою технічного обслуговування, залишається більший невикористаний ресурс при заміні деталей, особливо у випадку короткого експлуатаційного циклу. Фактичні значення питомих витрат залежать від параметрів, що характеризують систему технічного обслуговування через ймовірність запобігання відмовам, а також властивостей об'єкта експлуатації, таких як коефіцієнт варіації для швидкості зміни технічного стану (V) та закон розподілу.

Це свідчить про необхідність уважного аналізу та встановленні параметрів системи технічного обслуговування при розрахунку питомих витрат на запасні частини. Оптимальний підхід полягає в досягненні балансу між ймовірністю запобігання відмовам, невикористаним ресурсом та ефективністю використання запасних частин.

Виконання розрахунків залежностей для питомих витрат на змінно-запасні частини в процесі технічного обслуговування суднових технічних засобів вантажних суден вимагає введення відповідного нормувального множника, який ураховує співвідношення витрат на запасні частини та інші складові витрат, такі як оплата праці та інші фактори. При цьому, ураховуються також витрати на виконання самого технічного обслуговування.

Проведення таких розрахунків дозволяє отримати залежність сумарних питомих витрат, яка включає як витрати на змінно-запасні частини, так і витрати на інші елементи технічного обслуговування. Цей підхід дозволяє більш детально оцінити сукупні витрати, пов'язані з технічним обслуговуванням, і прийняти обґрунтовані рішення щодо ефективного використання ресурсів.

Вивчення результатів розрахунків показує, що в процесі технічного обслуговування суднових технічних засобів вантажних суден можуть або не можуть виявлятися точки мінімальних питомих витрат. У прикладі на Рисунку 5.14 представлено залежності для логнормального розподілу з коефіцієнтом варіації швидкості зміни технічного стану ($V = 0.5$). Коефіцієнт (K) враховує збільшення витрат на виконання примусового технічного обслуговування, тоді як (K_{ti}) представляє витрати на змінні деталі відносно витрат на виконання технічного обслуговування.

Дослідження цих результатів розрахунків показує, що формування точок мінімальних питомих витрат є комплексним процесом, який залежить від параметрів системи технічного обслуговування та властивостей об'єкта експлуатації. При розгляді логнормального розподілу швидкості зміни технічного стану з коефіцієнтом варіації ($V = 0.5$), зміщення точки мінімальних питомих витрат стає очевидним.

Ці результати вказують на необхідність ретельного аналізу параметрів системи технічного обслуговування та їх впливу на питомі витрати.

Незаперечно, можна стверджувати, що чим вища вартість запасних частин, які підлягають попередній заміні під час регулярного технічного обслуговування, тим меншу ймовірність запобігання відмовам слід забезпечувати системою технічного обслуговування. Проте, з точки зору безпеки, це не може бути виправдано. У такому випадку, виконання технічного

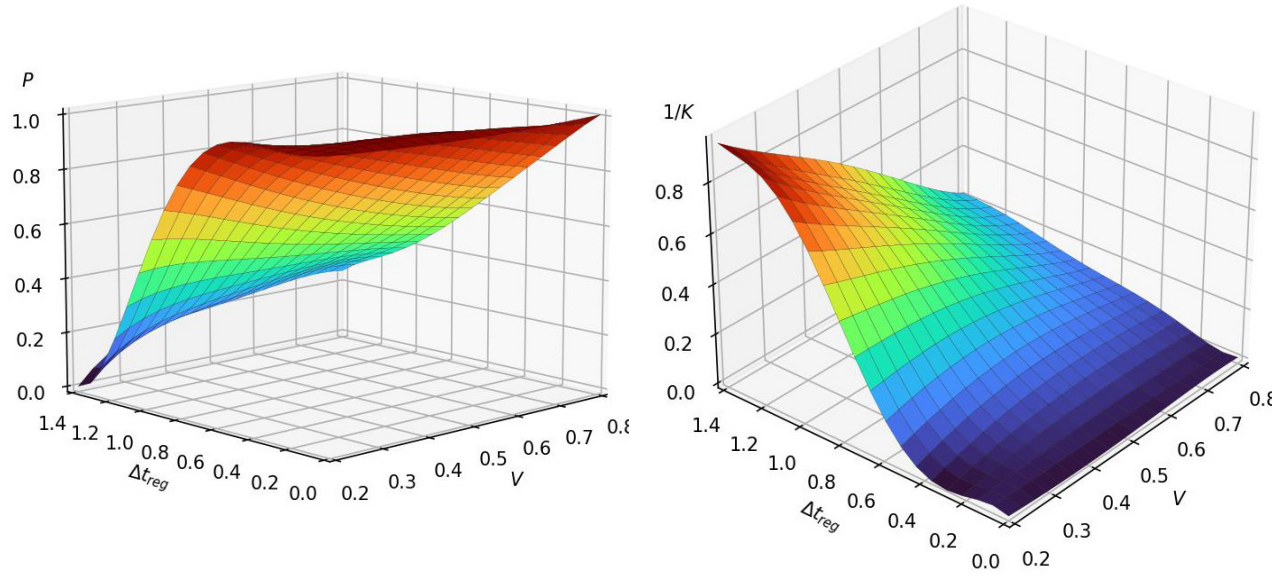
обслуговування з прогнозуванням технічного стану стає єдиним розумним рішенням для вирішення цієї суперечливої ситуації.

М26. Особливості адаптивного формування параметрів системи технічного обслуговування за максимальним коефіцієнтом технічного використання

У системі прескриптивного технічного обслуговування ShipDiMRO, що працює в межах інформаційної системи shipmonitoring.org, для визначення періодичності технічного обслуговування, за якої буде забезпечено максимум коефіцієнта технічного використання контрольованих суднових технічних засобів і конструкцій використовується рівняння (7.2). Розв'язання цього рівняння щодо періодичності регламентного технічного обслуговування (Δt_{reg}) показує, що зі збільшенням наслідків відмов $K = T_{rec}/T_{sch}$ періодичність регламентного технічного обслуговування має зменшитися для всіх значень коефіцієнта варіації (V) для напрацювань до відмов, причому, що меншим є значення (V), то зменшення періодичності має бути більшим. Оскільки від періодичності технічного обслуговування залежить ймовірність попередження відмов системою технічного обслуговування, аналогічно і для розв'язання оптимізаційної задачі щодо потреби в технічному обслуговуванні, слід очікувати зв'язку між заданою необхідною безвідмовністю в експлуатації (P_{pre}), наслідками відмов (K) та одержуваним коефіцієнтом технічного використання (K_{tu}). На Рисунку М26 представлено математичні моделі за результатами розв'язання рівняння (7.2), що встановлює зв'язок між перерахованими коефіцієнтами. На першому кроці задається необхідна безвідмовність, наприклад $(P_{pre}) = 0{,}932$ при варіації $V = 0{,}2$. Далі визначається $(\Delta t_{reg} = Z)$ з використанням виразу (7.4) і коефіцієнтів із таблиці М26 для Рис. М26 (А), при цьому $(P_{pre} = X)$, а коефіцієнт варіації $(V = Y)$.

Таблиця М26 – Коефіцієнти апроксимуючих функцій

Коеф.	Рис. М26 (А)	Рис. М26 (Б)	Коеф.	Рис. М26 (А)	Рис. М26 (Б)
C[0]	1,09820888	0,032145746	**C[14]**	-1,755307601	-9,062784865
C[1]	-3,671282971	-0,211369303	**C[15]**	255,5670881	-0,11324416
C[2]	2,3628921	0,338911091	**C[16]**	-488,8521813	0,375254055
C[3]	10,38196787	0,188426044	**C[17]**	233,8032419	-5,058901632
C[4]	8,801181461	0,747483459	**C[18]**	-64,10247116	15,67757623
C[5]	-3,736626059	-6,847657941	**C[19]**	5,488086356	27,72875991
C[6]	39,14235732	0,193240769	**C[20]**	0,42669811	-0,326174883
C[7]	-127,7103876	-1,936933724	**C[21]**	-110,1916529	-0,208091716
C[8]	39,12010771	17,04499878	**C[22]**	204,7246901	1,782733905
C[9]	-3,944784851	15,95483965	**C[23]**	-93,02531696	0,473494619
C[10]	-191,3300853	0,036902959	**C[24]**	-2,964247317	1,203625147
C[11]	393,1492104	-1,311216178	**C[25]**	31,53853363	-7,549182548
C[12]	-150,8759275	-2,507391649	**C[26]**	-13,33010068	-5,265210467
C[13]	28,29739365	-42,10579378	**C[27]**	1,876399361	0,939252236



А) Б)

Рисунок М26 – Математичні моделі для визначення прийнятних наслідків відмов $(1/K)$, за яких буде забезпечено заданий рівень безвідмовності (P_{pre}) та оптимальний коефіцієнт технічного використання (K_{tu})

Далі визначається $(1/K = Z)$ з використанням виразу (7.4) і коефіцієнтів із таблиці М26 для Рис. М26 (Б), при цьому коефіцієнт варіації $(V = X)$, а періодичність технічного обслуговування $(\Delta t_{reg} = Y)$, наслідки відмов 0,315.

Як видно, якщо потрібно забезпечити необхідну безвідмовність за відомого закону і коефіцієнта варіації напрацювань до відмови, періодичність технічного обслуговування, що призначається, забезпечить адаптивний коефіцієнт технічного використання лише за цілком певного співвідношення витрат часу на планове технічне обслуговування і на відновлення.

У тому разі, якщо фактичні витрати часу на усунення наслідків відмов (T_{rec}^{fact}) будуть більшими, ніж передбачалося $(K_{fact} > K_{est})$, оптимальний коефіцієнт технічного використання не буде отримано. Тобто фактичний коефіцієнт технічного використання буде меншим, ніж якби він міг бути при призначенні за більш ранніх термінів технічного використання. І, навпаки, якщо фактичні наслідки відмов нижчі від розрахункових $(K_{fact} < K_{est})$, оптимальний коефіцієнт технічного використання може бути отриманий при збільшенні періодичності технічного обслуговування. Система ShipDiMRO безперервно вирішує завдання адаптації коефіцієнтів технічного використання на підставі результатів експлуатації.

У системі прескриптивного технічного обслуговування ShipDiMRO, що працює в рамках інформаційної системи shipmonitoring.org, використовується рівняння (7.3) для визначення оптимальної періодичності контрольних операцій під час технічного обслуговування за станом, за якого забезпечується максимум коефіцієнта готовності. Результати розв'язання рівняння (7.3), за аналогією з розв'язанням (7.2), також подаються у вигляді математичних моделей для визначення оптимальної періодичності контролю, наприклад для випадку експоненціального закону розподілу напрацювань до відмови.

Як видно з розгляду Рисунка 7.2, так само, як і для регламентного ТО, визначена за допомогою нього періодичність може не задовольнити вимогам безвідмовності, хоча зазвичай значення ймовірності безвідмовної роботи між контрольними операціями досить високі. Наприклад, для наведеного прикладу вона дорівнює 0,932. Однак слід звернути увагу на одержувані періодичності контрольних операцій, - вони в більшості випадків реально здійсненні лише із застосуванням автоматичного контролю, тобто системи ACMS. Оскільки напрацювання на відмову більшості елементів СЕУ менше ніж 10000 годин, контроль технічного стану за допомогою переносних засобів зазвичай реально здійснити за час не більше ніж 1 година, періодичність контролю слід очікувати не рідше ніж 100 годин. Крім того, вихідний вираз для коефіцієнта готовності не охоплює величини випереджувального допуску, тому що припускає, що виявляється незадовільний стан, що передує відмові, а не сама відмова. В іншому разі всі процедури технічного обслуговування не були б планово-попереджувальними. Але під час постановки задачі визначення коефіцієнта готовності як досліджувана величина має бути присутня величина часу, що витрачається на відновлення після відмови. У наведеному виразі (7.3) розглядаються витрати часу на контроль справної і несправної системи, що більш актуально для електронних систем, а не до механічних. Для механічних систем, як правило, встановлюється факт справності або несправності з однаковими витратами часу. А пошук несправності з необхідною глибиною здійснюється вже в процесі технічного обслуговування.

М27. Особливості адаптивного формування параметрів системи технічного обслуговування за ефективністю використання ресурсів

Розглянемо, яким чином у системі ShipDiMRO реалізоване рішення завдання адаптивізації системи технічного обслуговування з урахуванням критерію мінімізації витрат (ефективності використання ресурсів). У цьому контексті, нашим підходом буде не знаходити рішення щодо періодичності технічного обслуговування або контролю, а звертати увагу на ймовірність передбачення відмов системою технічного обслуговування. Така постановка завдання обумовлена наступними аспектами:

- забезпечення мінімальних витрат на технічне обслуговування визначає оптимальну ймовірність передбачення відмов;
- розглядаються наслідки відмов;
- враховуються витрати на запасні частини з урахуванням невикористаного ресурсу;
- оптимальна ймовірність передбачення відмов дозволяє визначити періодичність технічного обслуговування або контролю;
- можливе порівняння різних методів при однаковій ефективності профілактики.

Оптимізованими показниками системи технічного обслуговування і ремонту можуть бути абсолютні значення обсягів виконуваних робіт і витрат на їх виконання. Однак прийнятнішими будуть їхні питомі значення, тобто

абсолютні значення, віднесені до одиниці часу. Наведені у Таблиці Л.1 різні параметри можуть застосовуватися для з'ясування причин незадовільного функціонування системи технічного обслуговування та аналізу її ефективності. Нижче буде розглянуто більш обмежене коло параметрів, з якими всі інші пов'язані лінійними залежностями. Аналіз буде виконано в загальному вигляді, при збереженні методики підходу можуть бути проаналізовані різні конкретні ситуації (за відомих фактичних витрат, трудомісткості тощо).

Основні показники, що адаптивізуються:

- ймовірність попередження відмов системою технічного обслуговування
- витрати і трудомісткість технічного обслуговування (планові та непланові)
- питомі витрати на технічне обслуговування (планові та непланові)
- використаний ресурс
- імовірність своєчасного технічного обслуговування.

У разі застосування технічного обслуговування за станом діапазон зміни тривалості циклу експлуатації та залишкового ресурсу істотно менший, ніж за регламентного технічного обслуговування, водночас положення мінімуму питомих витрат, що не залежать від часу (першої складової), припадає на область максимально можливих ймовірностей запобігання відмовам. З іншого боку, в цій області зростають величини витрат на змінно-запасні частини, тому можна очікувати наявності екстремумів для величин сумарних питомих витрат. Однак, з огляду на те, що величини тривалості циклу експлуатації та залишкового ресурсу як функції ймовірності запобігання відмовам близькі до лінійних у царині високих значень імовірності, оптимуми не спостерігаються або залежності питомих витрат мають значний радіус кривизни. Як результат різниця між оптимальним значенням витрат і на межах досліджуваних ділянок різняться досить незначно. Це видно з Рисунка 7.3 і Рисунка 7.4, які ілюструють результати розрахунків за різних наслідків відмов (K) витрат на змінно-запасні частини (K_t) під час технічного обслуговування за станом, швидкість зміни технічного стану розподілена за законом Вейбулла $(V = 0{,}4)$, параметр незадовільного стану $(a = 0{,}8)$.

Розгляд зміни величин тривалості циклу експлуатації та залишкового ресурсу показує, що значною мірою вони залежать від призначених величин параметра незадовільного стану (a). Тому оптимізація має здійснюватися за цим параметром. Однак, це стає можливим за умови завдання як величин параметрів незадовільного стану і відмови, тобто завдання параметра незадовільного стану нормованого параметром непрацездатного стану, а це не завжди доступно для експлуатаційника.

З іншого боку, наближення параметра незадовільного стану до параметра непрацездатного стану $(a \to 1)$ тривалість циклу експлуатації пропорційно зростає, а питомі витрати на змінно-запасні частини падають через більший ступінь використання ресурсу. Однак для ухвалення такого рішення про збільшення параметра а необхідна його підтримка почастішанням контролю для збереження величини ймовірності попередження відмов системою технічного обслуговування за станом. Таким чином, розв'язання задач оптимізації

технічного обслуговування за станом має ще враховувати витрати на контроль. У наведених у попередніх розділах основних виразах витрати на контроль технічного стану не враховувалися, як незначні порівняно з витратами на змінно-запасні частини і виконання технічного обслуговування. Для розв'язання задач оптимізації технічного обслуговування за станом з огляду на незначний прояв спостережуваних ефектів необхідно врахувати і витрати на контроль. Розроблені моделі, впроваджені в систему ShipDiMRO, дають змогу розв'язувати завдання з урахуванням витрат на виконання контролю.

Під час прийняття рішення про ефективність збільшення значення параметра незадовільного стану, мають бути враховані зміни всіх параметрів - тривалість циклу експлуатації та залишковий ресурс.

Іноді трапляються випадки відсутності даних про аварійне значення параметра технічного стану, а експлуатаційник має лише значення, що описує її незадовільний стан. У таких випадках розв'язання задачі оптимізації можливе лише щодо першої складової витрат на технічне обслуговування. Або залишковий ресурс визначається до незадовільного стану.

Оптимізація витрат на комплексне технічне обслуговування являє собою найскладніший випадок оптимізації, оскільки в цьому випадку фактично можливі як регламентні процедури технічного обслуговування, так і технічне обслуговування за станом. Апріорі можна сказати, що чим більша частина операцій технічного обслуговування виконується за станом, тим матимуть місце менші витрати на технічне обслуговування.

Принципово вибір комплексного методу технічного обслуговування пов'язаний із необхідністю врахувати одночасно фізичні особливості декількох процесів зміни технічного стану, що протікають, і, відповідно, можливості контролю технічного стану, особливості технології виконання робіт із технічного обслуговування у зв'язку з протіканнями процесів, і зовнішні обмеження, які накладаються вимогами національних і міжнародних правил, правил судноплавної компанії та класифікаційних товариств.

М28. Особливості адаптивізації періодичності перевірок і операцій технічного обслуговування суднового аварійного джерела енергії

Наукове обґрунтування оптимізації системи технічного обслуговування за максимальним коефіцієнтом готовності, технічного використання вантажного судна повинно бути спрямоване на максимізацію ефективності використання ресурсів. Проведемо дослідження адаптивної частоти операцій технічного обслуговування аварійного джерела енергії вантажного судна. Метою цього дослідження є оптимізація профілактичного обслуговування вантажних суден шляхом визначення мінімальної раціональної частоти вимірювання залишкової ємності свинцево-кислотних акумуляторних батарей, необхідної для досягнення економічної ефективності та бажаної прогностичної продуктивності в системі індикації залишкової ємності батареї. Дослідження має на меті збалансувати експлуатаційну стабільність і економічну ефективність, надаючи цінну інформацію про практичні міркування і потенційні переваги прескриптивного

обслуговування. Методологія, використана в цьому дослідженні, включає теоретичну розробку повністю автоматизованої системи моніторингу стану та опис кроків з очищення даних для врахування впливу навколишнього середовища на продуктивність системи. Для оцінки чутливості прогнозу залишкового корисного ресурсу до зміни частоти вимірювань, моделей прогнозування та налаштувань параметрів використовується моделювання за методом Монте-Карло, що дозволяє оцінити оптимальну частоту вимірювань для системи. Результати показують, що певна мінімальна частота вимірювань необхідна для досягнення цільової точності прогнозування при дотриманні балансу між економічною ефективністю та експлуатаційною стабільністю.

На морських суднах аварійним джерелом електроенергії може бути як генератор, так і свинцево-кислотні акумулятори, на яких і зосереджується увага в цьому дослідженні. Якщо аварійним джерелом електроенергії є акумуляторна батарея, вона повинна бути здатна нести аварійне електричне навантаження без підзарядки, підтримувати напругу батареї протягом усього періоду розряду в межах 12% вище або нижче її номінальної напруги, а в разі відмови основного джерела електроенергії автоматично підключатися до аварійного розподільного щита і негайно надавати всі зазначені послуги [156]. Контрольний список технічного обслуговування судна, встановлений класифікаційними товариствами, передбачає щоденну перевірку установки акумуляторної батареї, корисної залишкової ємності (RBC), напруги, струму розряду і зарядного пристрою на всіх суднах. [69, 158] Ці правила Міжнародної морської організації та класифікаційних товариств не беруть до уваги суднові рейсові цикли (SVC). Під судновим рейсовим циклом розуміється повна послідовність подій, що відбуваються на судні під час рейсу з одного порту в інший і назад [127]. SVC є важливою концепцією в морських операціях, оскільки вона допомагає визначити і зрозуміти різні аспекти рейсу судна, такі як споживання палива, експлуатаційні витрати і вимоги до технічного обслуговування. Але для багатьох суден, не тільки внутрішніх водних шляхів, а й морських і річкових, щоденна перевірка акумуляторних установок без урахування SVC може потенційно знизити надійність і експлуатаційну готовність судна.

Розвиток предиктивного технічного обслуговування став одним з найважливіших рушіїв інновацій не лише в морській галузі. Поширення бортових і дистанційних систем контролю і діагностики створює багато нових можливостей для зниження витрат на технічне обслуговування і підвищення експлуатаційної стабільності. Прогнозуючи майбутні несправності та відмови систем, можна розпочати прескриптивне технічне обслуговування, щоб запобігти втраті мореплавства або працездатності [357]. Це підвищує експлуатаційну готовність і надійність судна та дозволяє уникнути дорогих компенсаційних виплат через затримку або скасування рейсів [354] і подальших ремонтів [329].

Згідно з оглядом літератури, більшість досліджень зосереджені на зниженні ризику операційних збоїв через технічні причини та підвищенні безпеки і надійності системи [121], серед яких дослідницькі зусилля наразі

зосереджені на діагностуванні [277] і прогнозуванні [25] заходів з технічного обслуговування суден. Метою цих зусиль є уникнення незапланованих заходів з технічного обслуговування суден і перехід від планового технічного обслуговування до технічного обслуговування за станом [120]. Ці підходи неявно припускають необмежену доступність необхідних даних [339], з отриманою в результаті точністю оцінки залишкового ресурсу [275]. Оскільки отримання цих даних є основним чинником інвестиційних витрат на впровадження такої системи прогнозування та управління станом [353], загальна вигода значною мірою залежить від мінімізації інвестиційних зусиль при максимальному підвищенні продуктивності [350]. Automated Condition Monitoring System (ACMS) - з її потенціалом економії коштів у порівнянні зі звичайною системою - вже було показано в [122], на прикладі системи індикації енергоспоживання для суховантажного судна. Система індикації залишкового заряду акумулятора (RBCIS), яка є предметом цього дослідження, є невід'ємною частиною системи індикації енергоспоживання вантажного судна. У цьому дослідженні звичайна система визначається як така, що складається з бортової сенсорної мережі з датчиками RBC на кожній батареї і дисплея на навігаційному містку. Традиційний процес технічного обслуговування судна вимагає регулярних, рутинних перевірок, запланованих через певні проміжки часу. Усуваючи ручні, повторювані рутинні перевірки традиційного процесу технічного обслуговування, автоматизована система моніторингу стану дозволяє користувачам ініціювати завдання з технічного обслуговування тільки в той час, коли потрібні коригувальні дії, і планувати завдання на бажаний час.

Крім того, точність прогнозування (PA) має важливе значення для уникнення дорогого подальшого технічного обслуговування і підтримки загальної безпеки системи, оскільки повною мірою можливості автоматизованої системи моніторингу стану можуть бути використані тільки при знижених порогах технічного обслуговування, тобто при зменшенні проектного запасу міцності системи проти деградації. Для того, щоб досягти високого показника PA, вимірювання RBC повинні бути максимально точними і надійними. Виробники акумуляторів, такі як Panasonic, рекомендують враховувати температуру акумулятора для отримання найбільш надійних вимірювань RBC [288]. Тому триваліші перерви між рейсами, наприклад, ротація екіпажу, природно, обмежують частоту вимірювань RBC без температурної компенсації. Однак переваги використання методу оцінки необхідної частоти для прогнозування виходу з ладу недостатньо вивчені, особливо при оптимізації заходів з технічного обслуговування судна. Незважаючи на те, що технічно можливо виміряти RBC гарячої батареї [346] та врахувати температурні зміни RBC, спричинені температурою [328], необхідну температурну компенсацію [288] зазвичай передбачає інвестиційні витрати, наприклад, на встановлення додаткових або кращих систем вимірювання температури. Тому необхідно дослідити, як змінюється PA для різних частот вимірювання, щоб розрахувати найкраще співвідношення між додатковими інвестиційними витратами та можливостями прогнозування, отриманими завдяки вищим частотам

вимірювання. Іншими словами досягти максимізації ефективності використання ресурсів [118].

Описані вище прогалини в дослідженнях спонукають нас зосередитися на оптимізації предиктивного обслуговування акумуляторних батарей вантажних суден шляхом визначення мінімальної частоти вимірювань RBC, необхідної для досягнення економічної ефективності та бажаної прогностичної продуктивності. У цьому дослідженні представлено метод оцінки необхідної частоти для прогнозування відмов з апріорно визначеною точністю. Для перевірки моделі використовується автоматизована система RBCIS. Через відсутність реальних даних використовується моделювання за методом Монте-Карло. Виміряне значення RBC моделюється і вважається квазілінійним на всіх етапах роботи, з випадковими, нормально розподіленими падіннями RBC після кожного SVC. Отримані результати можуть бути використані для оцінки прогностичних характеристик системи та її чутливості до змін середніх втрат, волатильності вимірювань та частоти вимірювань. Новизна цього дослідження може бути підсумована в трьох аспектах: (1) оцінка мінімально необхідної частоти вимірювань на основі розглянутих середніх втрат RBC для оптимізації відповідного плану технічного обслуговування шляхом варіювання еталонної похибки; (2) визначення оптимальної частоти вимірювань шляхом порівняння двох різних методів прогнозування RBC і відмов; (3) використання метрик продуктивності, представлених в [321] котрі дозволяють оцінити, який метод прогнозування забезпечує найкращі показники з точки зору точності та надійності.

Рівень датчиків, або рівень збору даних, є найнижчим рівнем автоматизованої системи технічного обслуговування на основі стану (Рисунок 7.4). На цьому рівні відбувається лише перетворення аналогових виходів датчиків у цифрові дані [279]. Розробка автоматизованої системи моніторингу стану ACMS повинна максимально покладатися на існуючі бортові датчики, щоб зменшити витрати на впровадження та експлуатацію [165]. На цьому рівні автоматизації слід враховувати три основні аспекти:

1. Що потрібно вимірювати? Іншими словами, які (зовнішні) умови впливають на поведінку системи?
2. Коли найкращий час для вимірювання? Наприклад, чи не дасть вимірювання в певний час доби недостовірні результати?
3. Безперервний час проти дискретного - як часто потрібно проводити вимірювання?

Підкреслюється, що всі ці аспекти взаємозалежні, і відповідь на одне питання вплине на інші. Оскільки ці аспекти значною мірою залежать від конкретного випадку використання, питання обговорюються на прикладі автоматизованої системи RBCIS.

Модель OSA-CBM від MIMOSA [258] передбачає, що система повинна мати можливість збирати та обробляти достовірну вимірювальну інформацію, щоб надавати точну інформацію про стан системи та впроваджувати ACMS (Automated Condition Monitoring System) [214]. Витрати на додавання датчиків

необхідно порівнювати з вартістю отриманих знань [275], а співвідношення профілактичного та реактивного обслуговування має бути зведено до мінімуму [350]. Спочатку буде представлено теоретично описано можливу структуру системи, що дозволяє користувачам оцінити вимоги до такої системи. Основна увага приділяється загальним аспектам надійного збору та автоматизованої попередньої обробки даних на прикладі RBCIS, що дозволяє користувачам отримати уявлення про стан системи. Для цілей цієї статті передбачається, що на судні встановлена найсучасніша система RBCIS. Ця система складається з RBC-датчика на кожній батареї, який передає RBC-інформацію через суднову локальну мережу на бортовий блок обробки та відображення інформації. [120]. Наразі ця інформація відображається лише на моніторі Integrated Bridge System розташованому на навігаційному містку і не обробляється жодним іншим чином.

Компанія Panasonic визначила зовнішнє навантаження і тепловиділення як зовнішні фактори, що впливають на RBC [288]. Тому, щоб полегшити безперервне вимірювання RBC, система повинна реєструвати стан електричного навантаження, RBC (Cap_{rem}) і температуру батареї (T). У сучасних системах аварійного живлення з декількома батареями температура батареї, як правило, не реєструється. Однак, щоб мінімізувати кількість необхідних додаткових датчиків, технічно можливо оцінити температуру батареї на основі існуючих умов навколишнього середовища, наприклад, температури навколишнього повітря.

Після введення основних параметрів для вимірювання системи необхідно оцінити найкращий час для вимірювання системи. Це особливо важливо для дискретних вимірювань, які є знімками поточного стану системи за певні періоди часу. Однак для постійних вимірювань можуть існувати сценарії роботи, які перешкоджають достовірному вимірюванню параметрів системи. Для RBCIS та зменшення впливу зовнішнього тепловиділення Panasonic рекомендує враховувати температуру акумулятора, щоб отримати найбільш надійні вимірювання RBC [288].

Незважаючи на можливість розрахунку виміряного RBC з урахуванням температурної компенсації, момент безпосередньо перед відходом судна від причалу може бути визначений як найбільш підходящий час для надійного вимірювання, особливо для вимірювань після кожного SVC, коли експлуатаційні обмеження не дозволяють системі охолонути протягом рекомендованого часу. На той час система розсіює якомога більше теплової енергії, і на вимірювання буде якомога менше впливати зовнішнє тепло, що надходить до батареї. Однак слід зазначити, що цей час для вимірювання RBC вимагає надійного прогнозу технічної придатності судна. В іншому випадку, виявлена, але не передбачена несправність призведе до дорогих подальших експлуатаційних відмов. Для менш частих вимірювань RBC - як можливого результату параметричного дослідження - визначення відповідного часу вимірювання стає менш складним завданням, оскільки восьмигодинна зупинка зазвичай забезпечує достатній час для охолодження системи до умов навколишнього середовища.

Наступним рівнем над рівнем збору даних (DA) є рівень попередньої обробки даних (DP). У цьому розділі наша увага зосереджена на найважливіших компонентах попередньої обробки даних, а саме: очищенні даних, виявленні відхилень та обробці. Крім того, надається всебічний огляд агрегації даних, яка передбачає об'єднання даних з різних датчиків для отримання додаткової інформації про поведінку системи. Хоча детальний розгляд агрегації даних не включено до подальшого дослідження параметрів, він представлений тут, щоб забезпечити ретельність розділу.

Згідно з результатами дослідження [325], підготовка даних є критично важливим аспектом, який відіграє ключову роль у процесі виявлення знань. Вона забезпечує отримання достовірної інформації про стан системи та гарантує відтворюваність результатів. Як вже обговорювалося раніше, необхідно враховувати вплив навколишніх умов, а також вимірювання навантаженої або розрядженої батареї на оцінку RBC [288].

Неточності в системі оцінки RBC виникають насамперед через складність точного визначення функції f_T^d, яка характеризує зв'язок між вимірюваними параметрами батареї та Cap_{rem}. Точне визначення характеристик за всіх можливих умов, включаючи варіації струму розряду, температури і часу зберігання, є складним завданням, оскільки поведінка акумулятора сильно залежить від цих умов. Більша варіативність практичних умов використання може призвести до зниження точності, оскільки отримання f_T^d для всіх можливих умов є складним завданням. Крім того, поведінка батареї змінюється з використанням і старінням, що ускладнює отримання точних значень f_T^d для різних батарей. Адаптивні системи можуть бути краще пристосовані для боротьби з зношенням і старінням батареї. [36]

Імпеданс батареї (Z) це залежна від частоти комплексна величина, яка описує зв'язок між напругою та струмом батареї. Він може бути виміряний у частотній області та отриманий на основі вимірювань у часовій області [149]. У першому випадку вимірюється імпеданс змінного струму, дійсний у певній точці зсуву. Це називається спектроскопією імпедансу [228, 28]. При використанні часового підходу імпеданс акумулятора (Z) можна отримати шляхом ділення різниці напруги до і після застосування кроку струму на величину кроку струму. Тим не менш, слід зазначити, що вибір часу, в який проводиться вимірювання напруги, може мати суттєвий вплив на значення, отримане в результаті вимірювань.

На додаток до звичайної техніки вимірювання напруги у двох точках, більш комплексний підхід передбачає вимірювання всієї кривої часу відновлення напруги акумулятора (τ) і використання її як індикатора Cap_{rem}. Цей метод, відомий як хронопотенціометрія, є аналогом імпедансної спектроскопії в часовій області. Проте, через нездатність імпедансної спектроскопії надати точну інформацію про Cap_{rem} хронопотенціометрія має ті ж обмеження, що й імпедансна спектроскопія, що робить її непридатною для практичного використання.

У цьому дослідженні припускається наявність даних з температурною компенсацією, де оцінюється лише RBC Cap_{rem} – нормалізований до змодельованих умов навколишнього середовища 15 °C. Узгодженість умов експлуатації забезпечується шляхом порівняння вимірювань RBC, отриманих за аналогічних умов навантаження в один і той же час до відходу судна від причалу. Таким чином, на етапі попередньої обробки вже враховані різні сценарії експлуатації, і їх вплив на розробку моделей прогнозування є несуттєвим. Варто зазначити, що множинні варіації є вірогідними, але заради мети дослідження аналіз обмежується цими конкретними умовами.

Цей розділ відповідає рівню виявлення станів у функціональних блоках OSA-CBM (зображений на Рисунку 7.4), який тісно пов'язаний з попереднім етапом попередньої обробки даних як частини налаштування системи. Для того, щоб можна було розрахувати прогнозований час відмови, виявлення станів і визначення порогових значень технічного обслуговування представлено наступними рівняннями. Різні методи прогнозування відмов системи вводяться і оцінюються на основі метрик, представлених в роботі [321]. Методи прогнозування повинні відповідати певним критеріям продуктивності, які включають в себе прогнозування часу відмови з максимально можливою точністю, прогнозування, що не перевищує термін експлуатації системи (EOL) і стійкість до змін у вимірах, наприклад, стійкість до викидів даних вимірювання.

У контексті прогнозування стану акумулятора метод фільтра Калмана можна використовувати для оцінки стану акумулятора та прогнозування його майбутньої поведінки. Він працює шляхом створення моделі поведінки акумулятора, а потім використання вимірювань струму та напруги акумулятора для оновлення моделі та уточнення прогнозів з часом. Метод особливо корисний у випадках, коли існує невизначеність у вимірах або моделі, оскільки він може допомогти зменшити вплив цієї невизначеності на точність прогнозів.

Однак у цьому дослідженні метод фільтра Калмана не використовувався для прогнозування заряду батареї. Це пов'язано з тим, що основна увага в дослідженні була зосереджена на порівнянні та оцінці різних методів прогнозування заряду батареї, які частіше використовуються в промисловості, таких як метод середніх значень та регресійний метод. Крім того, метод фільтра Калмана може вимагати інтенсивних обчислювань і вимагає більше ресурсів і досвіду для реалізації порівняно з деякими іншими методами, оціненими в дослідженні.

Враховуючи вимоги до надійного методу прогнозування, викладені в цьому дослідженні, для порівняння було обрано два різні методи: метод середнього значення та регресійний метод. Основна концепція методу середнього значення полягає у визначенні середнього значення деградації ($\bar{d}_n$) шляхом взяття суми всіх інкрементних деградацій батареї (d_i) до SVC_n та обчислення їхнього середнього значення. З іншого боку, метод регресії використовує лінійну регресію для прогнозування деградації батареї на основі кумулятивної кількості циклів, при цьому нахил лінії регресії представляє швидкість деградації. Ці методи будуть оцінюватися на основі їх здатності точно

прогнозувати час виходу з ладу, стійкості до викидів і здатності надавати своєчасні прогнози, які не перевищують EOL системи.

Для оцінки прогностичної точності обох методів буде проведено порівняння їхньої продуктивності в прогнозуванні EOP з використанням повністю відомих вихідних даних, які включають EOL і повний розвиток кумулятивних втрат RBC. Крім того, буде виміряно частоту пропущених відмов, щоб оцінити вплив різних частот вимірювань на здатність прогнозування. Коефіцієнт пропущених відмов – це відсоток подій, для яких EOL був коротшим, ніж EOP всіх подій. Дослідження проводитиметься на повному наборі даних, з вимірюваннями після кожного SVC_n від номінального стану на початку до останнього вимірювання RBC перед EOL, в залежності від циклу зчитування.

Далі представлено імітаційну модель, яка має на меті оцінити прогностичну ефективність різних частот збору даних з метою науково обґрунтованої валідації методів, запропонованих у попередньому розділі. З цією метою для буксира компанії Fremont Tugboat Company було обрано щоденне використання 5 SVC як репрезентативного експлуатаційного профілю для буксира [311]. Далі припускається, що звичайні перевірки RBC будуть проводитися з інтервалом в один календарний день або 15 годин буксирування, відповідно до Плану технічного обслуговування судна (SMP) [85]. Слід зазначити, що не враховується вплив старіння на батарею, тобто повторні підзарядки не призводять до збільшення середньодобової втрати RBC з плином часу. Більше того, припускається, що втрата ємності відбувається за квазілінійною моделлю деградації, без прискорення або сповільнення деградації до нижнього порогового значення ємності.

Порівнюючи продуктивність різних методів з фактичними даними, можна визначити їх ефективність для точної оцінки RBC [124]. Номінальний стан батареї був встановлений на рівні початкового RBC 100 %, а поріг технічного обслуговування був визначений як 60 %. Цей поріг позначає точку, за якою подальша втрата RBC призведе до необхідності подальшого дорогого технічного обслуговування [339].

Втрати RBC моделюються за різних умов експлуатації в діапазоні від 0,05 %/добу до 2,0 %/добу для середніх втрат RBC і від 0 %/добу до 2,0 %/добу для стандартних відхилень. Ці значення відповідають екстремальним умовам експлуатації акумулятора, починаючи від мінімальних втрат RBC з низькою мінливістю даних вимірювань до максимально допустимих добових втрат RBC з високою невизначеністю даних [288]. Крім того, досліджено вплив різних частот збору даних на точність прогнозування двома представленими методами. Зокрема, оцінюються наступні стратегії вимірювань: вимірювання після кожного SVC, вимірювання через кожний 5-й SVC (тобто через один день роботи), вимірювання через кожний 10-й SVC (тобто через кожний другий день роботи) та вимірювання через кожний 15-й SVC, що є поточним традиційним циклом зчитування SMP [85].

Порівнюючи рівняння (7.16) і (7.18), можна помітити, що основна відмінність між запропонованими методами полягає в тому, як вони зважують

вимірювання протягом усього терміну служби системи, особливо в останньому SVC перед прогнозованою відмовою системи, коли RBC падає нижче заздалегідь визначеного порогового значення. Метод усереднення порівнює середнє значення втрат RBC між останнім вимірюванням перед відмовою і новим, номінальним станом, неявно включаючи всі стани деградації в проміжку між ними. В результаті крива деградації проходить через ці два вимірювання RBC. З іншого боку, метод регресії мінімізує SSE і підганяє дані вимірювань під лінійну функцію, яка може не включати останнє вимірювання RBC, особливо якщо воно вважається викидом порівняно з середнім значенням. Таким чином, криві деградації можуть мати різний нахил, що відповідає різним рівням деградації системи з часом.

На Рисунку 7.5 показано середню точність прогнозування (PA) для різних частот вимірювань при різному середньоквадратичному відхиленні. Для прогнозу відмов при прогнозуванні кінця періоду прогнозування використовувався метод усереднення, а середні показники були отримані на основі 1 000 симуляцій. Крім того, середня втрата RBC була зафіксована на рівні 0,05 % на день. На рисунку показано, що існує тенденція до зниження точності прогнозування зі збільшенням варіацій у вимірах деградації і зменшенням частоти вимірювань. Крім того, можна продемонструвати, що чутливість частоти вимірювань до змін точності прогнозування є незначною для невеликої середньої деградації системи, оскільки максимальне зміщення не перевищує 2 SVC. Хоча збільшення волатильності даних, здається, покращує точність прогнозу для вимірювань кожні 10 або 15 SVC, слід підкреслити, що для цих параметрів значно зростає коефіцієнт пропущених спостережень. Тому розраховане середнє зміщення враховує лише конкретні симуляції без передчасних збоїв. Помилки округлення, особливо у випадках, коли останнє падіння RBC, що призводить до необхідної підзарядки батареї, є надмірно великим або малим, відповідальні за зміщення в прогнозі відмов для вимірювань після кожного рейсу.

У свою чергу, Рисунок 7.6 ілюструє точність прогнозування для регресійного методу для прогнозування відмов, але для того ж самого стану системи. Порівняння цих двох графіків показує, що розрахунок середньої деградації системи забезпечує більш точне наближення до реального значення EOL (Рисунок 7.7) для прогнозування відмов. Тим не менш, різниця в точності між цими двома методами становить менше одного SVC для майже всіх варіацій параметрів і, таким чином, має незначне практичне значення. Враховуючи припущення про майже лінійну втрату RBC (визначену середньодобовою втратою RBC) з випадково доданим шумом вимірювання (описаним стандартним відхиленням), очікується, що ці методи будуть демонструвати подібні прогностичні характеристики. Це порівняння також демонструє, що метод усереднення є достатньо стійким до деградаційних викидів вимірювань для обраних параметрів. Через те, що цей метод менш вимогливий до обчислень, у цій дисертації основна увага приділяється прогнозуванню відмов за допомогою методу середнього арифметичного для подальших оціночних метрик.

Хоча здається, що поточна стратегія технічного обслуговування повинна залишатися незмінною з точки зору середньої похибки прогнозування, MR (рівняння 7.22), як показник надійності прогнозування, демонструє значні зміни для різних налаштувань параметрів.

При використанні поточної частоти вимірювань у 3 дні експлуатації та середніх втрат RBC, а також стандартного відхилення 0,6 %/добу, приблизно 1% автоматизованих систем моніторингу стану RBC вийдуть з ладу ще до першого вимірювання RBC, що робить їх нездатними прогнозувати майбутню відмову системи (Таблиця 7.2). Ця тенденція постійно погіршується зі збільшенням щоденної деградації системи, що призводить до найгіршого сценарію, коли жодна система не може передбачити майбутню відмову за сучасним підходом до частоти вимірювань, незважаючи на те, що щоденна деградація RBC знаходиться в межах допустимої межі, встановленої виробником (рівняння 7.20) [288].

Імітаційне моделювання в цій роботі базується на фіксованому пороговому значенні для запуску подальших дій з технічного обслуговування. Як згадувалося раніше і показано в Таблиці 7.2, методи прогнозування майже завжди передбачають середню похибку прогнозу або EOL. Для того, щоб автоматизована система моніторингу стану була найбільш ефективною, необхідно мінімізувати запас надійності для дій з технічного обслуговування, що дозволить повністю використати наявний корисний ресурс [339]. Однак неточне прогнозування, що призводить до перевищення максимально допустимої деградації, зазначеної виробником, може призвести до підвищення вартості технічного обслуговування.

Таблиця 7.2 також демонструє розрахунок 60-го процентиля (P_{60}) як показника необхідного залишкового запасу надійності, щоб мінімізувати ймовірність того, що це призведе до підвищення вартості технічного обслуговування. Це значення представляє максимальне зміщення EOL, яке дорівнює значенню 60 % результату моделювання за методом Монте-Карло.

Таким чином, визначення порогу прескриптивного технічного обслуговування передбачає компроміс між підвищенням економічної ефективності за рахунок використання можливостей системи та прийняттям вищого ризику подальшого підвищення вартості технічного обслуговування через порушення порогів технічного обслуговування, встановлених виробником.

На прогностичну спроможність автоматизованої RBCIS впливають наступні фактори, як показано в нашому моделюванні:

- Загальна точність прогнозування залежить від частоти вимірювань, але зміни в точності при зміні частоти вимірювань від кожного SVC до кожного 15-го SVC або кожного дня роботи, відповідно, є незначними, оскільки вони знаходяться в межах одного операційного дня.
- З іншого боку, спостерігається значне збільшення коефіцієнта пропущених відмов для нижчих частот вимірювань і вищого середньодобового зносу, що в кінцевому підсумку призводить до найгіршого сценарію, коли 100% передчасних відмов відбуваються до першої точки вимірювання, тим самим зводячи нанівець будь-які прогностичні можливості.

- Надійного прогнозу відмов з незначними змінами в PA можна досягти, проводячи оцінку RBC двічі на день або кожні 5 SVC, відповідно, з урахуванням базового використання. Такий підхід мінімізує додаткові інвестиційні витрати за рахунок уникнення необхідності температурної компенсації зчитування RBC. Більше того, 60-й процентиль залишається майже незмінним для невеликих середньодобових втрат RBC.

Висновки

У цьому розділі представлено новий підхід до оцінки прогнозних характеристик суднової системи аварійного живлення на основі частоти вимірювань параметрів акумуляторів. Основною метою цього дослідження було визначення оптимальної частоти вимірювань, яка забезпечить найкращу точність прогнозування, враховуючи при цьому необхідні інвестиційні витрати.

Основні висновки дослідження полягають у наступному:

1. У дослідженні були промодельовані квазілінійні втрати RBC та проаналізовано ефективність прогнозування за допомогою двох різних підходів: методу усереднення та регресійного методу.
2. Результати показали, що найкращі результати прогнозування з незначними відхиленнями від EOL можуть бути досягнуті за допомогою методу усереднення, а збільшення частоти вимірювань призводить до зростання загальної точності прогнозування.
3. На основі результатів моделювання, стаття рекомендує зчитування RBC двічі на день як достатнє для надійного прогнозування відмов, з незначним впливом на точність EOP при зміні частоти вимірювань від кожного SVC до кожного 5-го SVC, відповідно.

Однак, дослідження має певні обмеження та простір для подальших досліджень:

1. Моделювання неявно припускає, що очікувана поведінка в майбутньому може бути отримана з умов експлуатації, які спостерігалися в минулому. Майбутні дослідження необхідні для вивчення того, як зміни в щоденному використанні або умовах експлуатації можуть бути безпосередньо перенесені на зміну очікуваного терміну служби систем, що контролюються станом.
2. Чинні правила Міжнародної морської організації та Класифікаційних товариств не враховують SVC, що означає необхідність подальших досліджень і, можливо, нових правил, які враховують SVC не тільки для обслуговування акумуляторних батарей, але й для інших відповідальних механізмів і систем.

M29. Основні засади моніторингу і прогнозування технічних параметрів стану суднових технічних засобів в умовах експлуатації

Системи управління водними транспортними засобами зазнають змін і включають проактивне технічне обслуговування на основі стану, використовуючи якісні дані моніторингу стану техніки. Таким чином, стратегії технічного обслуговування переходять від реактивного технічного обслуговування до проактивних підходів, які повинні передбачати будь-яке погіршення стану до планового технічного втручання. Сучасна стратегія

технічного обслуговування базується на належному аналізі ризиків і правильному впровадженні практик технічного обслуговування на основі стану, відповідних робочих процесів, інструментів і належних навичок персоналу [120]. Надання актуальної та глибокої інформації про стан силової установки водного транспортного засобу дозволяє експлуатаційникам набагато точніше оцінювати ризики. Інформація про технічний стан зазвичай отримується в результаті ретельних перевірок і функціональних випробувань, але стратегія технічного обслуговування на основі стану передбачає отримання порад в режимі реального часу від консультативної системи і щомісячних звітів, які надаються експертами компанії [124]. Адже якщо будь-який значний знос або пошкодження виявлено на ранній стадії, ризик подальших пошкоджень зменшується, а постійний доступ до експертної підтримки консультаційної системи дозволяє експерту підтримувати управлінські рішення надійними даними і ретельно планувати технічне обслуговування засобу водного транспорту з мінімальними витратами на простої і ремонт. Це важливо для всіх, хто бере участь у процесі управління технічним обслуговуванням, а загальна операційна ефективність і доходи від цього тільки зростуть. Бортовий і дистанційний моніторинг зараз відіграє важливу роль у підтримці клієнтів у майбутньому, а також є логічним доповненням до сервісних угод.

Термін "засіб водного транспорту" у цій дисертації означає: контейнеровози, суховантажні судна та багатоцільові суховантажні судна.

Теоретичним і практичним питанням бортового контролю технічного стану агрегатів водних транспортних засобів присвячено багато публікацій [54, 92, 115, 209, 226, 250]. У наступних публікаціях висвітлено вплив різних стратегій обслуговування на ефективність експлуатації компонентів машин [62, 113, 207, 212, 372]. Обладнання для контролю стану, вимоги до експлуатації, методи спостереження та дослідження технічного стану компонентів машин засобів водного транспорту описані в наступних публікаціях [114, 129, 170, 201, 307, 310].

Для забезпечення гарантованої та безперебійної роботи засобів водного транспорту необхідно проводити не тільки бортовий, але й дистанційний систематичний моніторинг [122] для виявлення реального технічного стану вузлів машин та прогнозування моменту виникнення відмови для призначення відповідного режиму їх експлуатації. А поєднання хронологічного дистанційного моніторингу із методами прогнозування стану і прескриптивної аналітики системи ShipDiMRO дозволяє формувати адаптивний план технічного обслуговування судна, перелік операцій у якому характеризуватиметься науковою обґрунтованістю [418, 431].

У різних галузях промисловості використовується багато визначень, коли йдеться про різні стратегії технічного обслуговування. Технічне обслуговування водного транспорту можна охарактеризувати двома типами стратегій вищого рівня: коригувальне технічне обслуговування (CM) і профілактичне технічне обслуговування (PM). CM також називають реактивним технічним обслуговуванням, а PM - проактивним технічним обслуговуванням. Відмінним

аспектом CM є те, що воно виконується після виникнення відмови або як відкладене CM, або як аварійне технічне обслуговування. CM може бути результатом цілеспрямованої стратегії доведення до відмови. PM може бути спрямоване на запобігання відмові, оцінку ризику виникнення відмови або мінімізацію наслідків відмови. По суті, PM - це тип технічного обслуговування, який виконується через певний проміжок часу, поки обладнання все ще працює, з метою зменшення ймовірності відмови або запобігання відмові. Відмінним аспектом PM є те, що він виконується до того, як відбудеться відмова, і складається з таких стратегій технічного обслуговування, як:

- Технічне обслуговування за часом (TBM),
- Технічне обслуговування на основі оцінки ризиків (RBM),
- Технічне обслуговування з пошуку відмов (FFM),
- Технічне обслуговування на основі стану (CBM),
- Прогнозне технічне обслуговування (PDM),
- Прескриптивне технічне обслуговування (PxM).

Під TBM розуміється заміна або ремонт пристрою для відновлення його надійності через регулярні проміжки часу, або використання в будь-якому випадку його стану. TBM припускає, що несправність пов’язана з віком і можна визначити очевидний термін служби.

RBM - це коли ви використовуєте методологію оцінки ризиків для розподілу обмежених ресурсів технічного обслуговування на ті активи, які несуть найбільший ризик у разі виходу з ладу (ризик = ймовірність х наслідок). За допомогою RBM компоненти обладнання, які мають вищий ризик і дуже високі наслідки виходу з ладу, підлягатимуть частішим перевіркам і технічному обслуговуванню. Компоненти обладнання з низьким рівнем ризику можуть перевірятися і обслуговуватися з меншою частотою і, можливо, з меншим обсягом робіт. Коли судновласник ефективно впроваджує процес RBM, він повинен знизити загальний ризик виходу з ладу всіх компонентів обладнання в найбільш економічно вигідний спосіб.

FFM не запобігає відмовам, а лише виявляє їх. Після виявлення несправності оператор повинен її усунути. FFM проводиться через певні проміжки часу, які зазвичай визначаються законодавством або підходами, заснованими на оцінці ризиків. Завдання FFM спрямовані на виявлення прихованих відмов, які зазвичай пов’язані із захисними функціями.

Як стратегія, CBM шукає фізичні докази того, що збій відбувається або ось-ось станеться. Якщо можна знайти докази того, що щось знаходиться на ранніх стадіях відмови, можна вжити заходів, щоб запобігти повній відмові і уникнути наслідків відмови. Більшість режимів відмови дають певне попередження про те, що вони знаходяться в процесі виникнення. Важливо розуміти, що CBM не лагодить техніку і не зупиняє несправності. CBM лише дозволяє виявити деякі проблеми до того, як вони стануть відмовами. Для того, щоб CBM була ефективною стратегією, дуже важливим є раннє втручання в технічне обслуговування. Це передбачає ефективний збір даних, аналіз даних, прийняття рішень і, нарешті, втручання з технічного обслуговування.

Нещодавно, коли експерти говорили про PDM, це був синонім CBM, але з сучасним впровадженням прикладного штучного інтелекту (AAI) і машинного навчання в датчиках обладнання з меншою вартістю з'являється різниця між PDM і CBM. І автор дисертації стверджує, що PDM може бути розширенням, більш просунутим підходом у порівнянні з CBM, де потенційно багато технологічних параметрів, отриманих від інтелектуальних датчиків, дозволяють визначити, чи компоненти машин засобів водного транспорту віддаляються від стабільних умов експлуатації [40] і рухаються до відмови. Основне завдання PDM - передбачити, коли відбудеться відмова, а потім визначити відповідний час для технічного втручання.

Основне завдання яке стоїть перед PxM, полягає у адаптивному формуванні плану технічного обслуговування засобу водного транспорту на основі результатів PDM.

Обов'язкові інтервали між капітальними ремонтами визначаються класом судна - контейнеровози, суховантажі та багатоцільові суховантажні судна під час CM можуть потребувати капітального ремонту, який передбачає постановку у док кожні п'ять років з проміжним оглядом між ними, незалежно від технічного стану його машинних компонентів. Але дослідження автора цієї дисертації показали, що не всі елементи обладнання, виходячи з їх технічного стану, потребують капітального ремонту після п'ятирічного періоду експлуатації [120, 121, 122, 124, 129]. Існує достатній запас міцності вузлів машин, який дозволяє збільшити міжремонтні періоди на 50 % з 5 до 7,5 років [120, 121, 122, 124]. Перед допуском засобу водного транспорту до подовжених міжремонтних інтервалів беруться до уваги різноманітні фактори.

Проведений аналіз дозволяє обґрунтувати наступне положення – для вирішення проблеми подовження міжремонтних періодів необхідне точне хронологічне визначення працездатності компонентів машин засобів водного транспорту за допомогою системи ACMS, прогнозування ймовірного часу виходу з ладу на основі стратегії PDM та адаптивізації плану технічного обслуговування засобу водного транспорту у системі ShipDiMRO.

М30. Загальні положення з моніторингу стану суднових технічних засобів вантажних суден

Поверхнева деградація компонентів машин у переважній більшості випадків призводить до втрати машиною своєї придатності і включає в себе переважно механічний знос і корозію. Кожна несподівана зупинка в роботі, спричинена відмовами компонентів машин, має значний вплив на ефективність засобів водного транспорту, витрати на ремонт та інші витрати, дохід, прибуток і, зрештою, конкурентоспроможність. Підраховано, що кожен простій водного транспортного засобу коштує операторам суден близько 25 тис. доларів США на годину або 600 тис. доларів США на день [121]. Це є причиною того, що судновласники постійно шукають способи усунення відмов, зберігаючи при цьому витрати на технічне обслуговування на мінімально можливому рівні. Саме тут CBM виступає основою для стратегії PDM [385].

Належний моніторинг на основі стану допомагає судновласникам або операторам:

- зменшити витрати на ремонт,
- зменшити витрати на технічне обслуговування,
- збільшити термін служби водних транспортних засобів,
- підвищити безпеку персоналу,
- збільшити дохід,
- підвищити ефективність.

Моніторинг стану засобів водного транспорту - це процес перевірки стану компонентів техніки під час її нормальної експлуатації. Він складається зі збору даних, їх обробки та порівняння з тенденціями, базовими та репрезентативними даними аналогічних компонентів. Розвиток електроніки та програмного забезпечення суттєво змінює моніторинг стану техніки, роблячи його простішим у використанні та надійнішим.

Моніторинг стану застосовується в багатьох сферах: редуктори, кондиціонери, електродвигуни, вентилятори, насоси, повітродувки, крани, сепаратори, газові турбіни, парові турбіни, водяні насоси, котли, двигуни внутрішнього згоряння та їхні допоміжні системи.

Незалежно від сфери застосування, для успішної реалізації належної стратегії моніторингу стану машин важливо дотримуватися структурованого підходу, який складається з наступних семи етапів [365]:

1. формування реєстру обладнання,
2. оцінка стану компонентів обладнання та їх критичності для експлуатації засобу водного транспорту,
3. визначення відповідного методу моніторингу стану компонентів обладнання,
4. вибір доступних технологій моніторингу стану,
5. встановлення системи моніторингу стану,
6. збір діагностичних даних та інтерпретація даних,
7. прогнозування технічного стану та визначення завдань технічного обслуговування.

Перший етап спрямований на створення реєстру всіх компонентів техніки для засобів водного транспорту і зазвичай включає: технологічні креслення, електричні схеми, правильні дані про кожен компонент (тип, швидкість, потужність тощо), позицію компонента для легкого пошуку, унікальний ідентифікаційний номер кожного компонента.

На другому етапі необхідно проаналізувати минулі відмови компонентів обладнання, середній час між відмовами та середній час на ремонт, середні витрати на заміну або ремонт, вартість простою, ризик подальшого пошкодження. Ця інформація допоможе у визначенні та виборі правильних методів і технологій моніторингу стану компонентів обладнання.

Третій етап характеризується вибором правильних методів, які використовуються для оцінки стану компонентів машин, які найчастіше використовуються: моніторинг температури, моніторинг тиску, моніторинг швидкості обертання, моніторинг вібрації, акустичного випромінювання,

ультразвукове тестування, аналіз масла, аналіз палива, аналіз вихлопних газів, моніторинг стану двигуна та аналіз сигнатури струму двигуна.

Четвертий етап характеризується необхідністю вибору доступних технологій моніторингу стану. Як зазначалося у Постановці задачі, існує широкий спектр доступних стратегій моніторингу стану машин. Найкращою стратегією технічного обслуговування було б використання комбінації всіх описаних стратегій для отримання найкращих результатів. Але, зважаючи на часові та бюджетні обмеження, вимірювання температури в поєднанні з вібраційною діагностикою виявилися найефективнішими технологіями моніторингу стану.

На п’ятому етапі важливо правильно вибрати спосіб монтажу датчиків, обраних на четвертому етапі. Правильна установка датчиків моніторингу стану має важливе значення для його працездатності. Неправильний монтаж дасть діагностичні дані, які пов’язані не тільки зі зміною технічного стану, але і з кріпленням датчика. А отже, зробить дані датчика недостовірними. Датчики вібрації слід встановлювати в місцях, які забезпечують вимірювання вертикальних, горизонтальних і осьових переміщень.

Шостий етап є найдовшим і найважливішим, оскільки він відбувається під час комунікації компонентів працюючого механізму з навколишнім середовищем. Компоненти механізмів спілкуються за допомогою вібраційних сигналів, що генеруються під час роботи. І важливо розуміти вібрацію, щоб мати можливість оцінити технічний стан компонентів машини. Для перекладу сигналів вібрації в технічний стан використовуються засоби вібраційної діагностики, які складаються з трьох основних частин: датчики, обладнання для збору даних, програмне забезпечення для моніторингу стану. Програмне забезпечення для моніторингу стану може бути створено для моніторингу технічного стану конкретного компонента машини або може бути зміна налаштувань і, отже, призначене для комплексної діагностики машин. Найкращі програмні рішення пропонують пряме підключення та передачу даних до розподілених систем управління. Існують відмінності між програмним забезпеченням для моніторингу стану з точки зору доступу до даних, воно може бути локальним з доступом до комп’ютера або веб-програмним забезпеченням для віддаленого моніторингу стану.

Нарешті, на сьомому етапі необхідно інтерпретувати дані діагностики, зібрані за допомогою програмних засобів, описаних на попередньому етапі, і зробити прогноз змін технічного стану. Найоптимальніше це робити з автоматизованими даними, використовуючи стратегію PDM на основі AAI, оскільки вона дозволяє дуже надійно прогнозувати вихід з ладу різних компонентів техніки і ставити відповідні завдання з технічного обслуговування. Базуючись на отриманих даних виконати адаптивізацію плану технічного обслуговування.

Організація систем моніторингу базується на загальних теоретико-методологічних принципах і показана на Рисунку 7.10 [301]:

1. Структурно-організаційний принцип - система моніторингу будь-якого рівня, будучи багаторівневою ієрархічною структурою, повинна будуватися з урахуванням взаємодії з вищими системами та нижчими підсистемами.

2. Функціональний принцип - моніторинг функціонує в часі як взаємопов’язана і взаємозалежна система безперервного спостереження, оцінки, прогнозування та управління.

3. Принцип навчання - з плином часу в системі моніторингу якість прогнозів та ефективність управління повинні природним чином підвищуватися, система моніторингу повинна постійно вдосконалюватися з плином часу і функціонувати як система, що "самонавчається".

4. Просторовий принцип - просторова структура системи точок отримання інформації формується залежно від методики та технологій моніторингу.

5. Принцип часу - періодичність спостережень і збору інформації в системі моніторингу повністю визначається динамікою спостережуваних процесів.

6. Цільовий принцип - кожна система моніторингу повинна будуватися з урахуванням досягнення її мети - оптимізації управління, досягнення якої ґрунтується на прогнозних оцінках його розвитку шляхом прийняття оптимальних управлінських рішень і рекомендацій.

Метою моніторингу стану і викидів є забезпечення системи управління обладнанням своєчасною і достовірною інформацією, що дозволяє:

- оцінити маркери стану та функціональної цілісності обладнання,
- виявляти причини зміни цих маркерів та оцінювати наслідки таких змін, а також визначати коригувальні дії,
- створювати передумови для визначення дій з виправлення виникаючих негативних ситуацій до того, як буде завдано збитків.

У зв’язку з цим основними завданнями моніторингу технічного стану та викидів є:

- визначення технічного стану, в якому обладнання перебувало в минулому (генезис), перебуває в теперішньому (діагноз) і буде перебувати в майбутньому (прогноз),
- пошук місця та ідентифікація джерел несправностей,
- визначення типу технічного стану.

М31. Загальні аспекти формування автоматизована інформаційна система

Дистанційний моніторинг стану засобів водного транспорту відіграє важливу роль у запобіганні потенційно дуже дорогих морських інцидентів і забезпеченні максимальної ефективності експлуатації та надійності судна з мінімальними витратами на технічне обслуговування і ремонт. Концепція підходу до прескриптивного технічного обслуговування на основі прогнозування стану є найкращою практикою сьогодення, і стає все більш важливим перехід від планового технічного обслуговування до обслуговування на основі прогнозування стану, з метою зниження все більш високих витрат на утримання сучасного флоту. Бортовий і дистанційний моніторинг є невід’ємною частиною процесу прескриптивного технічного обслуговування для отримання якісних даних, правильного аналізу та ефективних заходів реагування, необхідних для такого підходу, в цьому розділі представлена розроблена автором модель моніторингу суднових технічних засобів вантажних суден. Розглянутий підхід у поєднанні з прескриптивним обслуговуванням економить

час і гроші судновласників за рахунок ранньої діагностики відмов або надмірного зносу компонентів. Технічні засоби і конструкції вантажних суден включає в себе не тільки корпус, двигун з допоміжним обладнанням, але й усі системи, комплекси та основні рушійні блоки, зокрема, гребні гвинти. Результатом роботи стала розробка системи моніторингу стану засобів водного транспорту (WVCM), яка дозволяє ретельно дослідити роботу обладнання водного транспортного засобу. Система WVCM є підсистемою ACMS. Система WVCM складається з наступних встановлених на борту: акселерометрів, датчиків тиску і температури, блоків моніторингу масла, палива і вихлопних газів, а також системи вимірювання крутного моменту.

Завдання моніторингу AIS [362] складаються з:

- пошук та накопичення інформації про стан технічних засобів і конструкцій вантажних суден,
- постійне оброблення та оцінювання інформації,
- здійснення прогнозування розвитку технічного стану,
- розв’язання оптимізаційних задач управління технічним станом і адаптивізації плану технічного обслуговування.

Звідси випливає структура моніторингу AIS, яка складається з чотирьох взаємопов’язаних основних блоків (Рисунок 7.12), кожен з яких спрямований на вирішення одного з вищезазначених завдань.

Перший блок AIS - це автоматизована інформаційно-пошукова система (AIRS). Ця система являє собою комп’ютерну базу даних. Всі основні дані про об’єкт моніторингу (в тому числі дані спостережень) надходять в систему AIRS з мережі спостережень, накопичуються в базі даних, попередньо обробляються, сортуються і потім використовуються у всіх наступних операціях з оцінки і прогнозування технічного стану та адаптивізації плану технічного обслуговування.

Другим блоком AIS є автоматизована система обробки даних (ADPS). Ця система обробляє та оцінює вхідну інформацію про моніторинг технічного стану.

Третій блок AIS - це автоматизована система прогнозування та діагностики (APDS). Цей блок вирішує питання побудови регулярних прогнозів відповідно до схеми функціонального моніторингу.

Четвертий блок - автоматизована система управління (ACS), спрямована на розробку рекомендацій та підтримки прийняття управлінських рішень.

Всі чотири блоки AIS пов’язані між собою і утворюють єдину функціонуючу систему WVCM. Основним питанням в організації AIS є її інформаційне, технічне та математичне забезпечення. Інформаційне забезпечення формує основу, що зберігається в базі даних для її подальшого аналізу, обробки, оцінки, багатоцільового пошуку, поповнення та видачі. Технічне забезпечення AIS - це комплекс технічних засобів зберігання та обробки інформації, реалізований на базі персональних комп’ютерів, а також обладнання для інформаційних мереж і периферійних пристроїв (мережеві адаптери, модеми тощо). Математичне забезпечення AIS базується на таких програмних блоках: пошуковому зі статистичною обробкою даних, прогностичному, діагностичному та оптимізаційному.

ДОДАТОК Н
ПЕРЕЛІК НАУКОВО-ДОСЛІДНИХ РОБІТ І АКТИ ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

Прикладні науково-дослідні роботи керівником яких був автор:

1. «Розроблення програмного забезпечення інформаційно-аналітичної системи контроля і прогнозування рівня надійності суднових технічних систем і комплексів вантажного судна на основі цифрових двійників» (0123U102142) кафедри судноводіння і морської безпеки, Одеського національного морського університету, 01.2020-12.2020 рр.

2. «Розроблення автоматизованої системи розпізнавання несправностей та інформаційного забезпечення процесу технічної експлуатації суднових технічних комплексів вантажного судна» (0123U102178) кафедри судноводіння і морської безпеки, Одеського національного морського університету, 01.2021-06.2021 рр.

3. «Розроблення автоматизованої інформаційної системи обґрунтування раціональної програми і управління технічним обслуговуванням вантажних суден» (0123U102204) кафедри судноводіння і морської безпеки, Одеського національного морського університету, 07.2021-12.2021 рр.

4. «Розроблення комплексної автоматизованої системи контроля і прогнозування показників надійності засобів морського транспорту» (0123U102241) кафедри судноводіння і морської безпеки, Одеського національного морського університету, 01.2022-06.2022 рр.

5. «Розроблення комплексної системи інформаційного забезпечення процесу технічної експлуатації суднових технічних систем: автоматизований пошук несправностей і підтримка прийняття рішень» (0123U102286) кафедри судноводіння і морської безпеки, Одеського національного морського університету, 07.2022-12.2022 рр.

6. «Розроблення систем інформаційного забезпечення підтримки технічної придатності суден торгового флоту України на основі цифрових двійників і аналізу даних в реальному часі» (0123U102159) кафедри судноводіння і морської безпеки, Одеського національного морського університету 01.2023-12.2023 рр.

PRESTIGE SHIPMANAGEMENT LTD.

13/16 VINCENTI BLDGS, STRAIT STREET, VALETTA VLT 08 – MALTA.

TEL: (356) 236410, 241675, 234128, 244675, FAX: (365) 240021, Tlx: 1012 CDLAW MW

«21» 04 2023р.

АКТ

про використання в виробничій діяльності результатів

дисертаційного дослідження

ГОЛОВАНЯ АНДРІЯ ІГОРОВИЧА

У виробничій діяльності ТОВ «PRESTIGE SHIPMANAGEMENT LTD» використовуються результати дисертаційного дослідження здобувача наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю «Експлуатація та ремонт засобів транспорту» Голованя Андрія Ігоровича. В результаті впровадження розроблених автором методів та методології підвищення ефективності експлуатації засобів водного транспорту на основі інтелектуальних телематичних технологій стало можливим науково обґрунтувати вибір оптимальних експлуатаційних режимів роботи теплоходів компанії з урахуванням прогнозованих умов експлуатації. Прогнозувати характер зміни технічного стану суднових технічних засобів та обґрунтовувати можливість подовження періоду між капітальними ремонтами теплоходів.

Використання розробленої методології дозволяє спланувати оптимальні режими роботи теплоходів з урахуванням зовнішніх умов експлуатації, що надає можливість економити за рейс від 3 до 7 % енергоносіїв. Практична реалізація одержаних в роботі результатів прогнозування характеру зміни технічного стану суднових технічних засобів доцільна в математичному та програмному забезпеченні, як складової методології в системі контролю параметрів технічного стану засобів водного транспорту. Застосування запропонованих методів і методології дозволяє підвищити ефективність використання теплоходів до 10 % шляхом мінімізації сукупних експлуатаційних затрат. При цьому, результати математичного моделювання свідчать про те, що досі не використано наявний 7 % потенціал підвищення ймовірності виконання безвідмовної експлуатації засобів водного транспорту.

Суперінтендант
відділу технічної
експлуатації флоту

PRESTIGE SHIPMANAGEMENT MALTA LIMITED

Олександр БУЯДЖИ

«10» 01 2024р.

АКТ
про використання в виробничій діяльності результатів дисертаційного дослідження

У виробничій діяльності ТОВ «АКСОН ПОРТ СЕРВІС» використовуються результати дисертаційного дослідження здобувача наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.22.20 «Експлуатація та ремонт засобів транспорту» Головань Андрія Ігоровича, в результаті впровадження методу оцінювання ефективності переходу на комплексне прескриптивне технічне обслуговування і ремонту із прогнозуванням стану, запропоновано оцінювати ефективність застосовуваного методу за величиною питомих витрат за цикл експлуатації.

Запропоновані методики адаптивізації системи технічного обслуговування спрямовані на максимізацію коефіцієнта технічного використання, ефективності використання ресурсів та встановлення оптимальної періодичності технічного обслуговування в рамках формування цифрової стратегії. Проведення досліджень за різними критеріями дозволяють обирати оптимальні параметри синтезу цифрової стратегії з урахуванням особливостей операцій і технології використання в умовах експлуатації, а також визначати вплив окремих факторів на ефективність системи технічного обслуговування вантажних суден в реальних умовах експлуатації. Метод адаптивного формування параметрів системи технічного обслуговування за ефективністю використання ресурсів дозволяє з'ясовувати причини незадовільного функціонування системи технічного обслуговування та аналізу її ефективності. Це в кінцевому підсумку сприяє надійному функціонуванню суднових технічних засобів та суттєвій оптимізації витрат на експлуатацію та технічне обслуговування суден.

Ефективність технічного обслуговування вантажних суден визначена шляхом порівняння стратегій системи «Комплексного прескриптивного технічного обслуговування вантажних суден» із стратегією регламентного технічного обслуговування. Найкращим варіантом є рішення, що призводить до підвищення ефективності та скорочення витрат. При співставленні стратегій відмічається зниження питомих витрат на 20,9 % у сукупності із підвищенням ефективності використання ресурсів на 29,7 %. Впровадження нових об'єктів у систему технічного обслуговування сфокусоване на критерії ефективності використання ресурсів. Отримані результати розрахунків вартості обладнання надають можливість аналізувати загальний ефект та приймати обґрунтовані рішення. Результатом процесу адаптивізації та динамічного корегування, сервісом shipmonitoring.org, параметрів системи технічного обслуговування вантажних суден є динамічно оновлюваний план технічного обслуговування.

Генеральний директор
ТОВ «АКСОН ПОРТ СЕРВІС» _____ Віталій МАЛКІН

ТОВАРИСТВО З ОБМЕЖЕНОЮ ВІДПОВІДАЛЬНІСТЮ «АКСОН ПОРТ СЕРВІС» 44584120 УКРАЇНА

МАЛЕ НАУКОВО–ВИРОБНИЧЕ ПІДПРИЄМСТВО "ЛЕПТОН" У формі ТОВ, ЄДРПОУ 20929413

«12» березня 2024р.

АКТ
про використання в виробничій діяльності МНВП "ЛЕПТОН"
результатів дисертаційного дослідження

В рамках виконання докторської дисертації Голованя Андрія Ігоровича (далі – здобувач) були розроблені наступні пристрої та програмне забезпечення:

- Модуль LN-8AI для вимірювання напруги та струму;
- Модуль LN-2FC для вимірювання частоти.

Вказані пристрої використовуються у виробничій діяльності МНВП «ЛЕПТОН», а саме для створення діагностичних стендів.

МНВП «ЛЕПТОН» успішно інтегрувало модулі LN-8AI та LN-2FC в свої виробничі процеси. Зокрема, дані модулі використовуються в діагностичних стендах для забезпечення високоточного вимірювання електричних параметрів, що дозволило значно підвищити ефективність та надійність виробничих процесів. Модулі LN-8AI забезпечили точне вимірювання напруги та струму в різних частинах обладнання, що дало змогу вчасно виявляти відхилення від нормативних значень і попереджати можливі несправності. Модулі LN-2FC дозволили проводити точні вимірювання частоти, що особливо важливо для контролю роботи генераторів та інших пристроїв, чутливих до частотних характеристик.

Використання результатів дисертаційного дослідження здобувача дало змогу МНВП "ЛЕПТОН" досягти наступних переваг:

- Підвищення точності вимірювань електричних параметрів завдяки використанню модулів LN-8AI та LN-2FC, що дозволяє отримувати більш надійні та достовірні дані;
- Зменшення витрат на обслуговування та ремонт обладнання завдяки своєчасному виявленню та усуненню можливих несправностей, що знижує ризик серйозних поломок і простоїв;
- Поліпшення діагностики та прогнозування стану обладнання, що забезпечує більш ефективне планування робіт з обслуговування і ремонту та підвищує загальну продуктивність виробництва;
- Оптимізація виробничих процесів за рахунок точного контролю електричних параметрів, що дозволяє зменшити енергоспоживання та підвищити ефективність роботи обладнання;
- Підвищення конкурентоспроможності продукції підприємства завдяки впровадженню сучасних технологій вимірювання та контролю.

МНВП "ЛЕПТОН" підтверджує, що результати дисертаційного дослідження здобувача ефективно використовуються у виробничій діяльності та сприяють підвищенню якості продукції та послуг підприємства.

ДИРЕКТОР МНВП «ЛЕПТОН»
к.т.н. (05.22.20) Юрій КУЧЕРЕНКО

ЗАТВЕРДЖУЮ
В.о. директора
ТОВ «Одеський авіаційний завод»
Валентин ГОСТІЩЕВ
19 01 2024 року

АКТ № 234/ТВ
про використання в виробничій діяльності результатів
дисертаційного дослідження
ГОЛОВАНЬ АНДРІЯ ІГОРОВИЧА

У виробничій діяльності ТОВ «Одеський авіаційний завод» використовуються результати дисертаційного дослідження здобувача наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.22.20 «Експлуатація та ремонт засобів транспорту» ГОЛОВАНЬ Андрія Ігоровича. У результаті впровадження на експериментальній установці було проведено наукове дослідження над синхронною машиною (генератором) засноване на вимірюванні та подальшому аналізі комплексного (векторного) сигналу напруги, струму та частоти. Для вимірювання напруги та струму використовувалися вимірювальні модулі. Модуль LN-8AI для вимірювання напруги та струму, а модуль LN-2FC - для вимірювання частоти. Ці модулі використовувались для збору даних про режимні параметри роботи синхронної машини турбогенератора. Основним призначенням модуля LN-2FC є обчислення частоти гармонійного сигналу на вході в "Обчислювач" і виведення результату обчислення в комп'ютер, у вигляді цифрового або аналогового сигналу.

Проведений аналіз результатів експерименту показує, що контроль комплексного сигналу напруги, струму та частоти дозволяє більш точно виявляти анормальні режими роботи генератора, уникнувши значних наслідків для його конструктивних елементів. Дані щодо роботи протиаварійної автоматики генераторів свідчать, що використання алгоритмів із пуском за фактом потрапляння в зону частотних характеристик генератора і введенням витримки часу від 0,5 до 2,0 секунди призводить до збільшення часу виявлення анормального режиму роботи до 10 секунд.

Отримані результати процесів автоматичного оцінювання стану синхронної машини генератора використовуються у роботі діагностичного стенду ТОВ «ОАЗ».

Головний технолог Ольга НИКИФОРЕНКО

Начальник інженерного бюро технічного відділу Олег МАРЕВСЬКИЙ

Начальник цеха № 3 Олександр КУДІН

«ЗАТВЕРДЖУЮ»
Проректор з НПР
Одеського національного морського університету
_____ Олександр ШУМИЛО
«10» 05 2024р.

АКТ

про впровадження результатів дисертаційного дослідження
Головань Андрія Ігоровича
в навчальному процесі
Одеського національного морського університету

Цим актом підтверджується, що результати дисертаційного дослідження А.І. Головань, к.т.н. доцента кафедри судноводіння і морської безпеки, яке представлене до захисту на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.22.20 – Експлуатація та ремонт засобів транспорту, впроваджувалися в освітній процес Навчально-наукового інституту морського флоту Одеського національного морського університету протягом 2020 – 2024 навчальних років при проведенні лекційних та практичних занять з дисциплін: Експлуатація палубних механізмів і суднових пристроїв, Автоматизація суднових енергетичних установок, Моделювання інформаційних процесів, технологій та систем на водному транспорті.

Розроблені дисертантом монографії Сучасні технології і методи моделювання інформаційних процесів в галузі водного транспорту з оглядом на морську безпеку, Стратегії і техніки управління ризиками в морській безпеці, успішно використовуються при формуванні освітньо-наукових програм.

Впровадження результатів дисертаційного дослідження засвідчило високий рівень розробки й практичну значущість навчально-методичних матеріалів Головань А.І. Вважаємо, що результати цього дослідження можна рекомендувати до використання в освітньому процесі закладів вищої освіти, які здійснюють підготовку майбутніх фахівців морського транспорту.

Узгоджено:
В.о. директора ННІМФ
к.т.н. доцент Олексій ШАМОВ

Зав. кафедрою СМБ
к.т.н. професор Андрій ВОЛОШИН