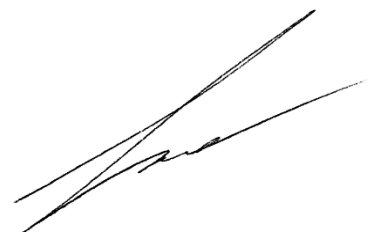


МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ОДЕСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ МОРСЬКИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АВТОМОБІЛЬНО-ДОРОЖНІЙ
УНІВЕРСИТЕТ

ГОЛОВАНЬ АНДРІЙ ІГОРОВИЧ



УДК 629.5.078:656.075

**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

Реферат

дисертації на здобуття наукового ступеня

доктора технічних наук

Одеса – 2024

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Одеському національному морському університеті Міністерства освіти і науки України.

Опоненти:

доктор технічних наук, професор
ПЕТРОВ Ігор Михайлович
професор кафедри морських перевезень
Національного університету «Одеська Морська
Академія», м. Одеса

доктор технічних наук, професор
ГОРОБЧЕНКО Олександр Миколайович
декан факультету інфраструктури та рухомого
складу залізниць Київського інституту
залізничного транспорту Державного
університету інфраструктури та технологій, м.
Київ

доктор технічних наук, професор
КАЛІНІН Євген Іванович
завідувач кафедри тракторів і автомобілів
Національного університету біоресурсів і
природокористування України, м. Київ.

Захист дисертації відбудеться 11 грудня 2024 року о 12:00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.059.02 при Харківському національному автомобільно-дорожньому університеті (зала засідань, вул. Ярослава Мудрого, 25, м. Харків)

Із дисертацією можна ознайомитись на офіційному сайті <https://www.khadi.kharkov.ua/science/specializovani-vcheni-radi/d-6405902/opriljudnennja-disertacii-ta-vidgukiv/> та в науковій бібліотеці Харківського національного автомобільно-дорожнього університету за адресою: 61002, Україна, м. Харків, вул. Ярослава Мудрого, 25

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради
кандидат технічних наук, доцент



М.П. Холодов

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

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» та КНД 31.2.002.01–96 «Правил технічної експлуатації морських і річкових суден», 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'явилися 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.

Рациональне 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 сформуванню 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 судових 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 контролю 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 контролю 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 судових 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 АСМС, 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 впроваджено 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; II 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 напрямку, 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.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі дисертаційної роботи обґрунтовано актуальність обраної теми, визначено мету та поставлені завдання дослідження. Виділено наукову новизну та практичне значення отриманих результатів. Зазначено напрями впровадження отриманих результатів. Крім того, надано інформацію про апробацію та публікації, пов'язані з предметом дослідження і структуру дисертації.

У першому розділі наведено результати аналізу шляхів управління технічним обслуговуванням вантажних суден торгівельного флоту в умовах експлуатації, які виявляють загальні проблеми. Підтверджено, 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. 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. Сформульовані загальні положення щодо ефективності систем технічного обслуговування вантажних суден в умовах експлуатації. Виконаний аналіз впливу умов експлуатації на інтенсивність відмов, пошкоджень та станів технічних засобів вантажного судна. Визначені основні характеристики і вимоги до оцінювання і підвищення ефективності системи ТО вантажного судна в умовах експлуатації.

Для проведення дослідження характеру зміни інтенсивності відмов і пошкоджень комплектуючих судових технічних засобів 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 напруження, 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.

Для кількісної оцінки ефективності систем технічного обслуговування вантажних суден потрібне 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.

Аналіз досліджень шляхів 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 судової інформаційної системи технічного обслуговування, наприклад, через поєднання систем ACMS та ShipDiMRO. Вони мають забезпечувати технічному відділу судноплавної компанії або судовому 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.

В другому розділі розроблена концепція підвищення ефективності систем технічного обслуговування вантажних суден в умовах експлуатації, а також механізм її реалізації. Ця концепція базується на процесах інформаційного моніторингу фактичного технічного стану судна та визначенні оптимальних параметрів системи ТО. Запропоновано використання цифрових стратегій які формують управлінські процеси на різних етапах функціонування судна.

Концепція передбачає 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. Крім цього концепція

передбачає максимізацію ефективності використання ресурсів (E) та абсолютного потенційного ефекту (A) операцій технічного обслуговування.

$$E = \frac{(p - r)^2}{p \cdot r \cdot (n_p - n_r)^2}, \quad (1)$$

$$A = \int_{t_l}^{t_d} \left[\int_{v_l}^v \left(\int_0^\varepsilon |r(\tau)| d\tau \right) d\varepsilon - \int_{v_l}^v \left(\int_0^\varepsilon |p(\tau)| d\tau \right) d\varepsilon \right] dv, \quad (2)$$

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

де $r(\tau)$ – інформація про ресурси що споживаються, $p(\tau)$ – інформація про ресурси що віддаються, t_d – момент завершення визначення абсолютного потенційного ефекту, n_p, n_r – моменти реєстрації вихідних і вхідних продуктів технічного обслуговування.

Концепція базується на реалізації системної взаємодії (Рис. 1) двох важливих складових цього процесу – інформаційна та управлінська (виконавча). 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. Характеристики інформаційної взаємодії, що виявляються в рамках процесів забезпечення заданих показників ефективності системи ТО вантажного судна подано на Рисунку 1 (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**). В кінцевій стадії сегмента **A** відбувається перевірка відповідності забезпечення заданих показників ефективності системи ТО вантажного судна заданим параметрам системи ТО цього судна.

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.

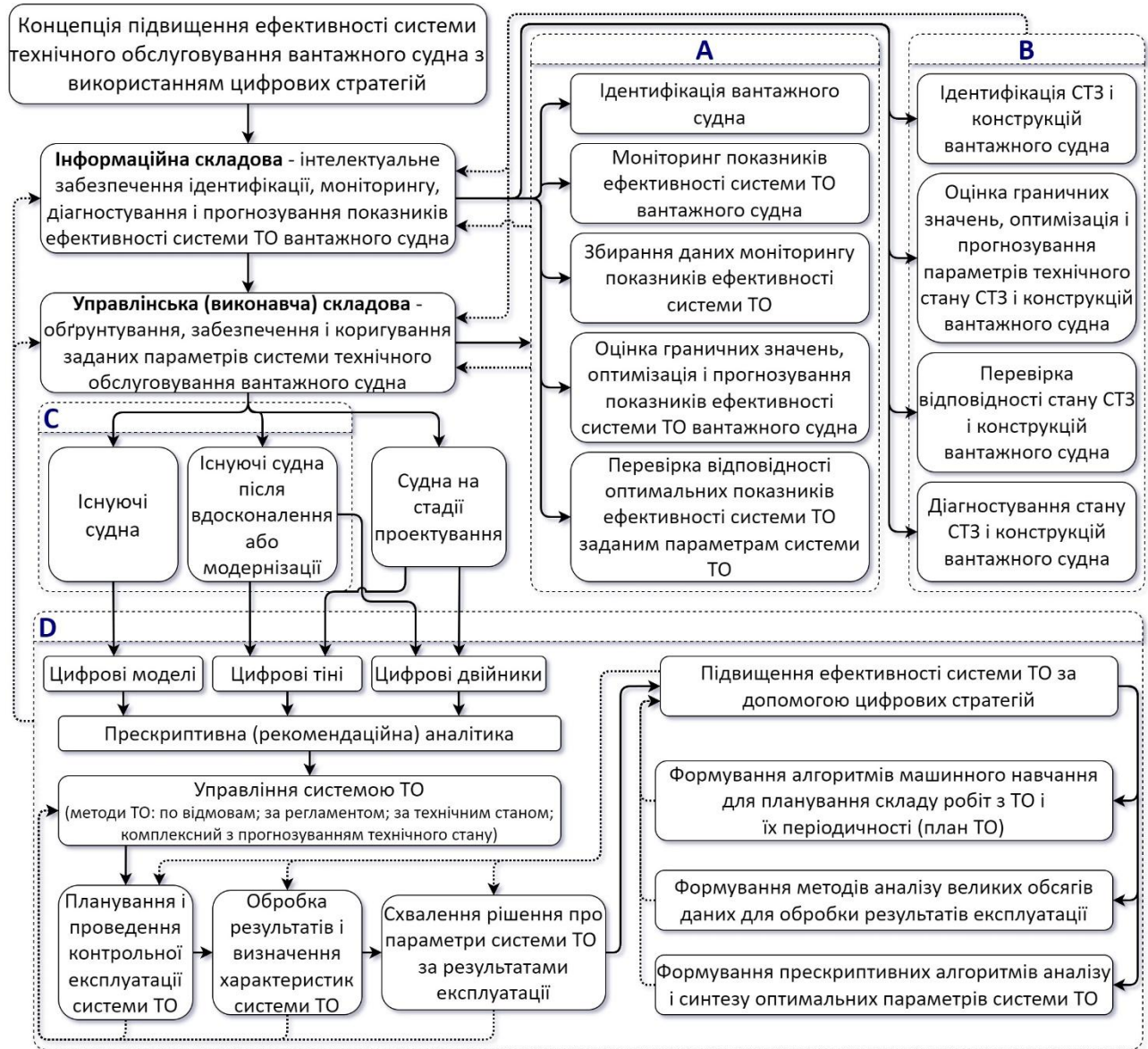


Рисунок 1 – Схема системної взаємодії при підвищенні ефективності систем технічного обслуговування вантажних суден на основі цифрових стратегій

Задачу підвищення ефективності системи ТО на основі інформації про фактичні параметри технічного стану судна можливо виразити як задачу оптимізації (3), яка передбачає досягнення визначених прибутків (g) за максимальної ймовірності знаходження в стані технічної придатності (P_{ready}) до використання.

$$\max: P_{ready}(X); g(X) \geq C^{lim}; \forall x \in G; \forall C^{lim} \in [0 \div \infty], \quad (3)$$

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.

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 (3) має вигляд:

$$\max: g(X); P_i(\bar{X}) \geq P_i^{req}; i \in S^{pros}; P_i(\bar{X}) \geq P_i^{req}; i \in S^{cons}; \forall x \in G; \quad (4)$$

$$g_{res}(\bar{X}) \leq g_{res}^{req},$$

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

Підвищення ефективності системи ТО означає збільшення результативності та оптимізацію процесів, пов'язаних з ТО та підтримкою технічної придатності вантажного судна. Це може включати зменшення часу зупинок для ремонту, зменшення витрат на запасні частини, підвищення тривалості експлуатаційного періоду обладнання тощо.

Сформульовані основні стратегічні напрямки реалізації концепції 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.

Розроблено формалізовану схему системи КПТОВС з взаємодією основних управлінських рішень. Проведена формалізація співвідношень основних загальних та локальних задач під час формування схеми системи КПТОВС, що дозволяє забезпечити системний взаємозв'язок складових в єдиному інформаційному просторі та автоматизувати процедури прийняття рішень щодо підвищення ефективності системи технічного обслуговування вантажних суден.

В **третьому розділі** розглядаються можливості аналізу інформації про параметри технічного стану судна, оцінювання способів підвищення ефективності систем ТО вантажних суден та можливості прогнозування параметрів стану систем ТО в умовах експлуатації. Також розглядаються питання дослідження і формування загальної інформаційної моделі системи прескриптивного ТО з використанням системної декомпозиції на складові елементи і інформаційні зв'язки між ними. Для формування предметної області системи ТО та СТЗіК вантажного судна, використовувались принципи, що орієнтовані на конкретні завдання отримання, обробки і аналізу даних дистанційного моніторингу та функціональні потреби експлуатаційного персоналу вантажного судна.

Розроблена загальна структура систем моніторингу показників ефективності системи ТО у складі системи КПТОВС на основі аналітичного центру ShipDiMRO. На основі автоматизованого бортового комплексу ACMS розроблена загальна структура систем моніторингу СТЗіК вантажного судна. Запропонована структура інформаційної взаємодії між елементами ITS системи КПТОВС в процесах моніторингу вантажного судна (Рис. 2). 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.

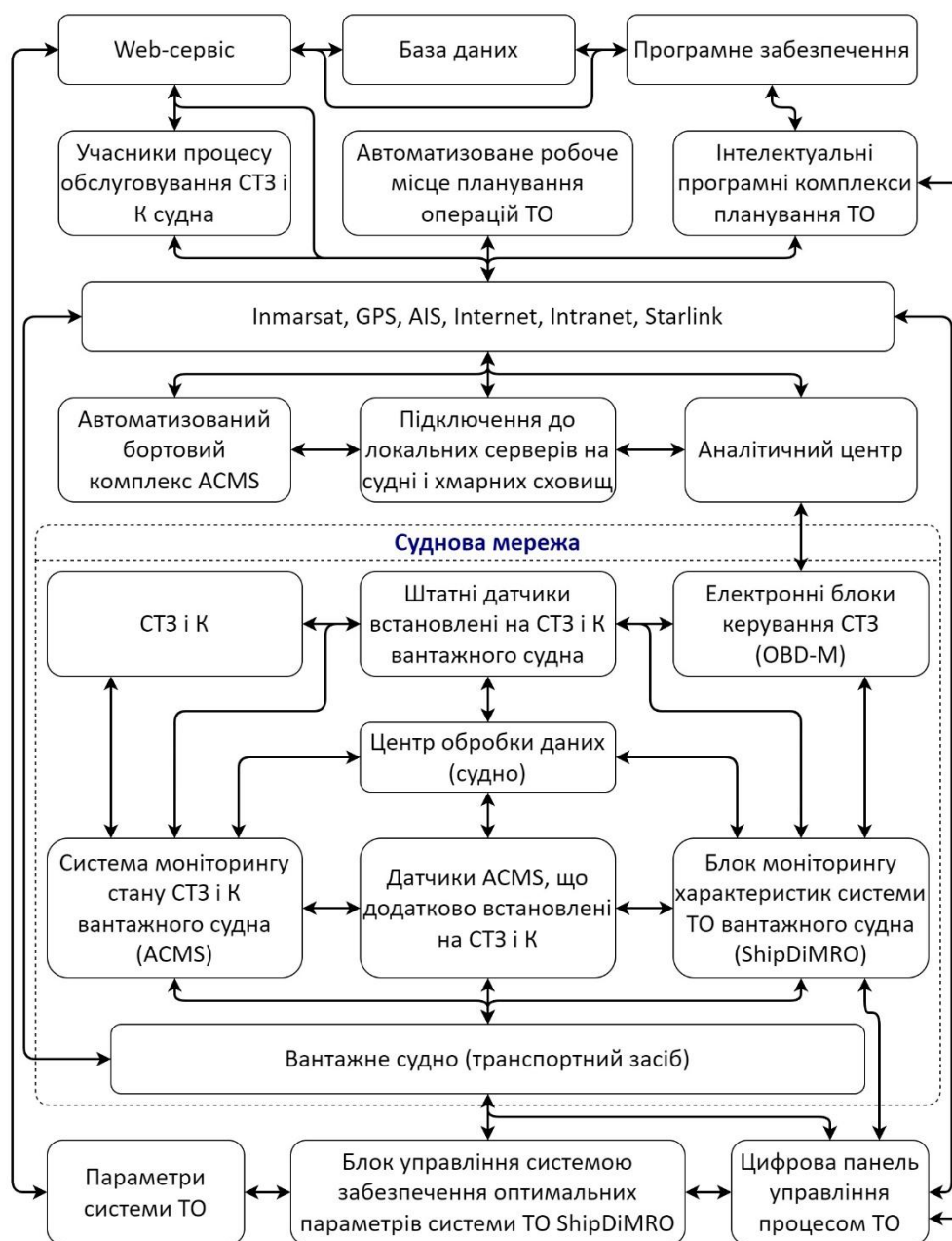


Рисунок 2 – Схема інформаційного обміну між елементами вимірювального комплексу для здійснення дистанційного дослідження ефективності системи ТО у складі системи КПТОВС

З використанням діаграм потоків даних (DFD) розроблено і сформовано інформаційну модель предметної області підвищення ефективності систем технічного обслуговування вантажних суден в умовах експлуатації. З урахуванням структури інформаційної системи на DFD-діаграмі, важливими джерелами первинних даних про показники ефективності системи ТО і технічний стан СТЗіК є пристрої для збирання та передачі інформації про базу даних, учасників процесу обслуговування, умови експлуатації тощо, які розглядаються як «зовнішні сутності». Серед функціональних завдань «Інформаційної системи моніторингу» визначаються ідентифікація, моніторинг та прогнозування ефективності системи

ТО, технічних параметрів СТЗіК, а також діагностування та прогнозування параметрів технічного стану СТЗіК, а також судна в цілому.

Для виконання визначених завдань були розроблені системи під назвами «ACMS» і «ShipDiMRO». 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 СТЗіК вантажного судна в умовах експлуатації за допомогою електронних блоків керування із функцією діагностики 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 діагностики технічних засобів судна та до судового центру обробки даних, через судову 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 СТЗіК в умовах інтелектуальних транспортних систем. Це дозволяє оперативно отримувати інформацію від судна з використанням наявних каналів передачі даних на автоматизоване робоче місце планування операцій технічного обслуговування.

На основі ключових методів оцінки обсягу інформації створено концепцію та модель для аналізу об'єкта дослідження в обраній предметній області. 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 умов експлуатації; 2. СТЗ, К, пристроїв моніторингу та умов експлуатації. 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.

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 судових технічних засобів і конструкцій, пристроїв моніторингу і умов експлуатації.

Відповідно до встановленої задачі формування предметної області дослідження і залежно від наявних технічних можливостей та математичного забезпечення складових, модель включає всі необхідні інформаційні компоненти, які стосуються кожного об'єкту автоматизації.

В процесі формування предметної області отримана повна множина інформаційних елементів:

$$\text{- для підсистеми 1: } Q_1 = \{q_{a_1}/a_1 = 1, 62\}, \quad P(Q_1) = 62, \quad (5)$$

$$\text{- для підсистеми 2: } Q_2 = \{q_{a_2}/a_2 = 1, 23\}, \quad P(Q_2) = 23, \quad (6)$$

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

$$Q = Q_1 + Q_2 = \{q_a/a = 1, 85\}, \quad P(Q) = 85, \quad (7)$$

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

Після розробки опису предметної області системи моніторингу параметрів системи ТО та СТЗіК, а також створення інформаційної моделі, встановлено, 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. Встановлено, 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. Визначено, що кожен інформаційний елемент системи моніторингу параметрів системи ТО та СТЗіК належить тільки одному об'єкту автоматизації. Це вказує на відповідність між інформаційними компонентами та об'єктами автоматизації і гарантує їхню чітку взаємодію в системі.

Базуючись на розробленій предметній області сформовані процеси збору даних про показники ефективності системи ТО та параметри технічного стану СТЗіК. Враховані, у вигляді алгоритму, особливості процесу діагностування ефективності системи ТО і визначення статусу несправностей СТЗіК у складі системи КПТОВС. Розроблені алгоритми 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 (Рис. 3), важливою задачею якого є оцінювання способів підвищення ефективності системи технічного обслуговування, який включає прогнозування показників ефективності системи та параметрів технічного стану суднових технічних засобів, розпочинається з актуалізації інформації з аналітичним центром ShipDiMRO. Далі відбувається збирання і оброблення даних, після чого вибирається метод апроксимації для аналізу даних (8). Застосування обраного методу апроксимації дозволяє оцінити якість отриманих апроксимацій (9) та визначити, чи знайдена оптимальна модель. Якщо модель вважається оптимальною, обирається результуючий ряд для подальшого аналізу:

$$y = a_0 + a_1x + a_1x^2 + \dots + a_nx^n, \quad (8)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_i (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_i (y_i - \bar{y}_i)^2} = 1 - \frac{SSE}{SST}, \quad (9)$$

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 (10).

$$SSE = \sum_i^{15} (y_i - \hat{y}_i)^2, \quad (10)$$

Для прогнозування стану системи спочатку встановлюється глибина прогнозування і прогнозний часовий проміжок. Після цього застосовується модель для прогнозування, оцінюється достовірність прогнозу (11 – 14) та формується звіт прогнозу. У разі виявлення недостовірності прогнозу проводиться корекція моделі та повторний аналіз.

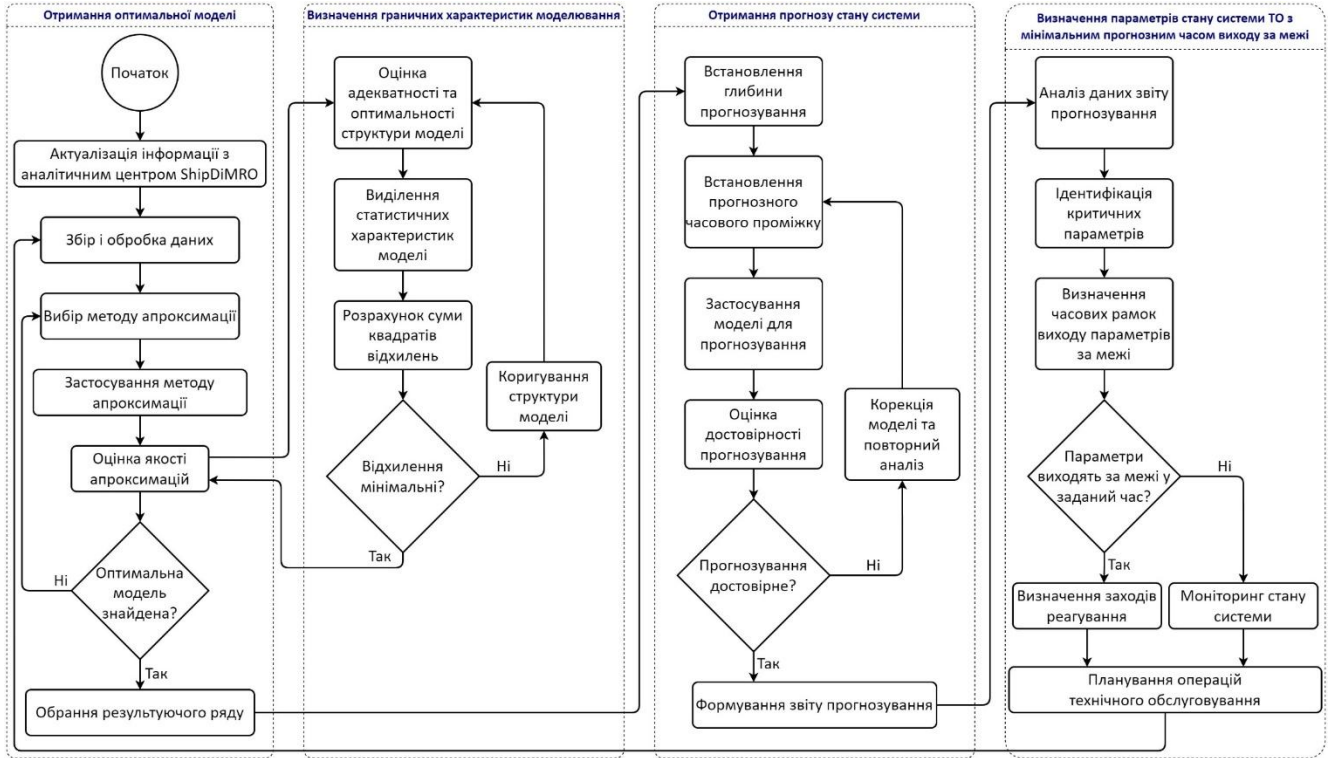


Рисунок 3 – Блок-схема алгоритму інформаційної системи оцінювання способів підвищення ефективності системи ТО з можливістю прогнозування показників ефективності системи ТО та параметрів технічного стану СТЗіК в умовах експлуатації

За m кроків прогнозування розраховуються такі показники точності прогнозів:

- середня квадратична похибка:

$$MSE = \frac{\sum_{i=n-m+1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{m}, \quad (11)$$

- корінь із середньоквадратичної похибки:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=n-m+1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{m}}, \quad (12)$$

- середня абсолютна похибка:

$$MAE = \frac{\sum_{i=n-m+1}^n |y_i - \hat{y}_i|}{m}, \quad (13)$$

- середня абсолютна похибка у відсотках:

$$MAPE = \sum_{i=n-m+1}^n \frac{100 \cdot |y_i - \hat{y}_i|}{m|y_i|}. \quad (14)$$

Якість прогнозу тим вища, чим менше значення величин обчислених за формулами (11 – 14). 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 (Рис. 3) забезпечує комплексний підхід до оцінювання ефективності системи технічного обслуговування та прогнозування стану технічних засобів, враховуючи поточні тенденції та можливі майбутні зміни.

Четвертий розділ присвячений розробці та обґрунтуванню загальної методології формування та оцінювання стратегій підвищення ефективності системи технічного обслуговування вантажного судна. Особливістю цієї методології є підхід до моделювання досліджуваних систем у формі системних об'єктів. Він базується на виділенні основних процесів системи з урахуванням її цільових функцій, а також на визначенні ключових функціональних елементів, зворотних зв'язків як параметрів управління процесами, і взаємозв'язків з середовищем.

В попередніх дослідженнях не використовувався підхід до представлення досліджуваних системи ТО та СТЗіК в основних системних об'єктах на основі інформації про фактичний технічний стан складових процесів підвищення ефективності прескриптивної системи ТО. За результатами формування системи КПТОВС 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 представлена схема взаємодії програмних модулів системи КПТОВС, що забезпечує управління якістю системи технічного обслуговування для конкретного вантажного судна.

Застосовуючи методологію морфологічного аналізу, 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.

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. 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.



Рисунок 4 – Схема взаємозв'язків основних програмних модулів системи КПТОВС при керуванні якістю системи технічного обслуговування вантажного судна

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 СТЗ, вказані 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 їх 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.

У морфологічній матриці схем цифрових стратегій для функціонального елемента «топология 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 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. 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 $N = 10450944$.

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).

Цифрова стратегія ТО (правила технічного обслуговування) базується на: об'єктивних даних про вантажне судно (характеристик безвідмовності та ремонтпридатності, тощо); специфічних особливостях суднових технічних засобів (структури системи, характеристик індикації відмов, наявності вбудованого контролю працездатності, тощо); даних про умови експлуатації.

Цифрова стратегія ТО 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.

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. За сполученням визначених ознак сформовано такі цифрові стратегії, для яких отримано вирази основних показників якості роботи системи:

- цифрова стратегія прогнозування термінів попереджувальної профілактики;
- цифрова мінімаксна стратегія прогнозування термінів попереджувальної профілактики;
- цифрова стратегія адаптивного призначення попереджувальних профілактичних робіт;
- цифрова стратегія профілактики за відомого середнього напруження технічних засобів вантажних суден;
- цифрова стратегія вибору оптимальних термінів проведення робіт технічного обслуговування за повної інформації (цифровий двійник);
- цифрова стратегія вибору оптимальних термінів проведення робіт технічного обслуговування за неповної інформації (цифрова модель, цифрова тінь).

Розроблено і обґрунтовано структуру методики, яка дозволяє формувати цикл підвищення ефективності системи технічного обслуговування вантажного судна в умовах експлуатації з використанням цифрових стратегій. Обґрунтовано методику прийняття рішень за векторним показником відпрацювання прескриптивної системи технічного обслуговування за результатами експлуатації з використанням цифрових стратегій. Встановлено, що 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. 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. 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 недовідомованих (таких, що не поліпшуються одночасно за всіма показниками) може виявитися найкращим для конкретного алгоритму прийняття рішень у конкретних умовах.

У разі, 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

$$u^*: \max_{u \in U} W_e(X(u)), \quad (15)$$

Відмінна риса цієї задачі у тому, що припускається 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:

$$U = \{u | W_i(u) \geq W_i^{req}, i = \overline{1, m}\}, \quad (16)$$

тобто множину U сформовано на основі критерію технічної придатності вантажного судна. Якщо вдається переваги алгоритму прийняття рішень змодельовати прагненням до збільшення значень функції ефективності, то $U^* \subset U$ може бути знайдено за допомогою критерію оптимальності (15).

Розроблено і обґрунтовано методику визначення ефективних цифрових стратегій. 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_1 і 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 взаємозалежними 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 взаємозалежність часткових компонент векторного показника дає змогу значно звужити початкову множину стратегій U , не розкриваючи повністю систему переваг алгоритму прийняття рішень. Вирішальне правило в цьому разі будується на основі аксіоми В. Парето.

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:

$$x_i \geq y_i, i = \overline{1, m}, \quad (17)$$

векторна оцінка x не менш пріоритетна за оцінку y :

$$x \overset{\omega_0}{\succeq} y, \quad (18)$$

Якщо хоча б одна з нерівностей (17) виконується як суворая, то виконується умова $x \succ_{\omega_0} y$. Якщо всі нерівності виконуються як рівності, то $x \sim_{\omega_0} y$.

Побудовані відношення (18) на множині X векторних оцінок породжують аналогічні відношення переваги на множині стратегій:

$$u \succeq v \Leftrightarrow x(u) \succeq x(v), \quad (19)$$

Відношення (18) і (19) не є зв'язними, тому що для довільних векторних оцінок $x, z \in X$ частина нерівностей у (17) може виконуватися в один бік ($x_i \geq z_i, i = \overline{1, k}$), а частина - в інший ($x_j \leq z_j, j = \overline{k+1, m}$). Такі векторні оцінки називаються непорівнянними за Парето. На підставі відношення суворого пріоритету $\succ_{\omega_0}$ на множині досяжних оцінок X_d вводиться ядро відношення $M_{\omega_0}^{\succ}$ Парето:

$$M_{\omega_0}^{\succ} = \left\{ x \mid \exists y \in X_d : y \succ_{\omega_0} x, x \in X_d \right\}, \quad (20)$$

Стратегії U_{ω_0} , векторні оцінки яких належать ядру відношення $M_{\omega_0}^{\succ}$, називаються ефективними або недомінованими за Парето. Усі інші стратегії $U \setminus U_{\omega_0}$ 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 (17)). Отже, рішення слід шукати лише на множині U_{ω_0} ефективних стратегій.

Якщо множина X_d дискретна, то ефективні стратегії відшуковують на основі визначення (20) шляхом попарного порівняння векторних оцінок.

Якщо число компонент векторного показника ефективності більше за три, то відшукати ефективні стратегії за визначенням (20) 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:

$$W_i(u^*) = \max_{u \in U} W_i(u), \quad (21)$$

де $W_j(u) \geq b_j, j = \overline{1, m}, j \neq i, b_j = W_j(u^*), j = \overline{1, m}$.

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:

$$\Gamma(\gamma^*, W(u^*)) = \max_{u \in U} \Gamma(\gamma^*, W(u)), \quad (22)$$

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 :

$$F(\gamma, u^*) = \max_{u \in U} F(\gamma, u), \quad (23)$$

де $F(\gamma, u) = \sum_{i=1}^m \gamma_i W_i(u)$.

За допомогою (21) – (23), 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 (21) – (23), потребують великих витрат часу та ресурсів, то ефективні цифрові 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 (19). Домінуючу стратегію відкидають. Процедуру повторюють необхідну кількість разів; при цьому кожен знову згенеровану стратегію порівнюють з усіма недомінованими на попередніх кроках. Генерацію стратегій слід здійснювати таким чином, щоб забезпечити рівномірність вибірки на множині U .

П'ятий розділ присвячений математичному моделюванню процесів досліджуваної системи ТО. Запропоновано основні припущення і положення моделювання процесів системи КПТОВС. 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.

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.

На Рисунках 5 і 6 представлено поверхні, описані формулами (24) і (25), за допомогою яких забезпечується умови 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 (24) та за нелінійного $V_v = 0.173$ (при $n = 0.5$) за формулою (25).

Дослідження були проведені за показником ступеня n в діапазоні зміни його значень від 0.25 до 2. Цей діапазон прийнято з урахуванням досліджень, де зазначається, що в період припрацювання n дорівнює від 0.45 до 0.75 і досягає значень 1.2 у період інтенсивного зносу.

Рисунок 7 ілюструє отримані залежності тривалості циклу експлуатації, Рисунок 8 ілюструє залежність залишкового ресурсу, а Рисунок 9 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 9).

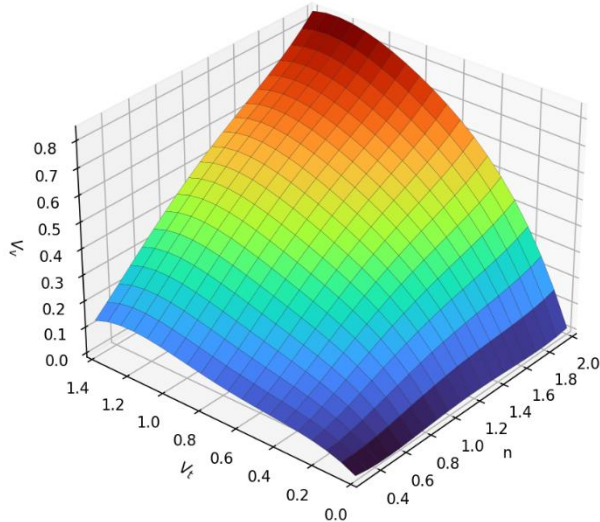


Рисунок 5 - Коефіцієнти зв'язку між коефіцієнтами варіації для напрацювань до відмови, визначених безпосередньо V_t за функцією зміни технічного стану V_v , що змінюється за законом $Y = \varepsilon t^n$ з розподілом

Вейбулла для ε

$$V_v = 0,060900119 - 0,368050929 \cdot n + 0,121798700 \cdot V_t + 0,626749910 \cdot n^2 + 1,193311999 \cdot n \cdot V_t - 0,739394205 \cdot V_t^2 - 0,404056859 \cdot n^3 - 0,248792728 \cdot n^2 \cdot V_t - 0,727603518 \cdot n \cdot V_t^2 + 0,993675764 \cdot V_t^3 + 0,088019942 \cdot n^4 + 0,043984999 \cdot n^3 \cdot V_t + 0,050282336 \cdot n^2 \cdot V_t^2 + 0,160721461 \cdot n \cdot V_t^3 - 0,385922421 \cdot V_t^4 \quad (24)$$

$$V_v = -140,283883939 + 16,044869023 \cdot n + 659,317198286 \cdot K_t + 1,005549672 \cdot n^2 - 57,631937756 \cdot n \cdot K_t - 1156,605832190 \cdot K_t^2 - 0,317968737 \cdot n^3 - 1,505070356 \cdot n^2 \cdot K_t + 70,368569766 \cdot n \cdot K_t^2 + 898,353196296 \cdot K_t^3 + 0,095198128 \cdot n^4 - 0,124996589 \cdot n^3 \cdot K_t + 1,175464456 \cdot n^2 \cdot K_t^2 - 29,120003111 \cdot n \cdot K_t^3 - 260,729639781 \cdot K_t^4 \quad (25)$$

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

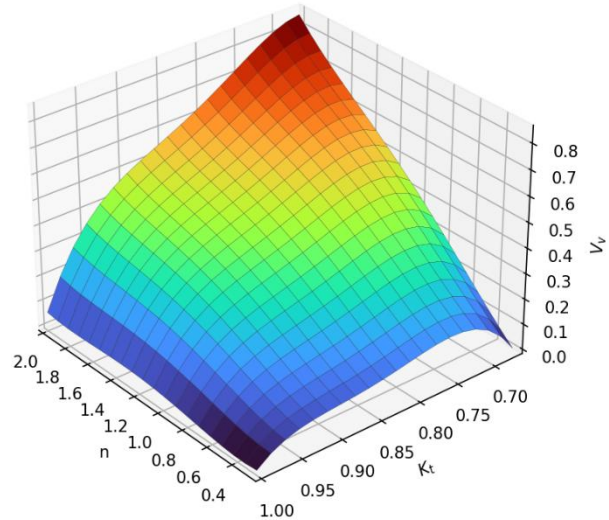


Рисунок 6 - Коефіцієнти зв'язку між середніми та медіанними напрацюваннями до відмови K_t та за функцією зміни технічного стану V_v , що змінюється за законом $Y = \varepsilon t^n$ із розподілом Вейбулла для ε

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.

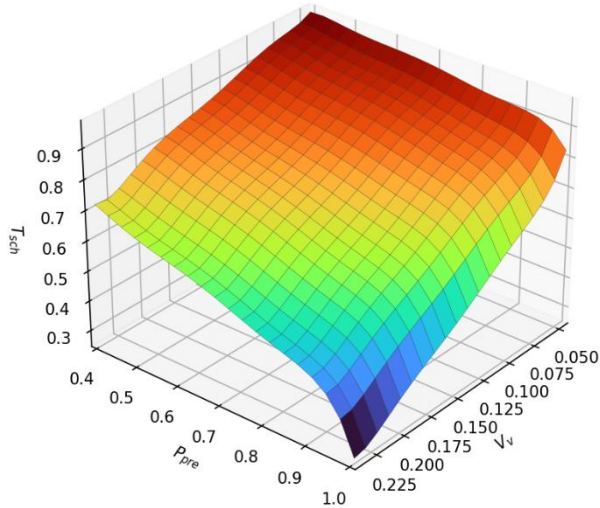


Рисунок 7 - Залежності тривалості циклу експлуатації від ймовірності попередження відмов P_{pre} регламентним технічним обслуговуванням для нелінійного закону зміни технічного стану $Y = \epsilon t^n$, де $n = 0.5$ і закону Вейбулла для розподілу значень коефіцієнта ϵ

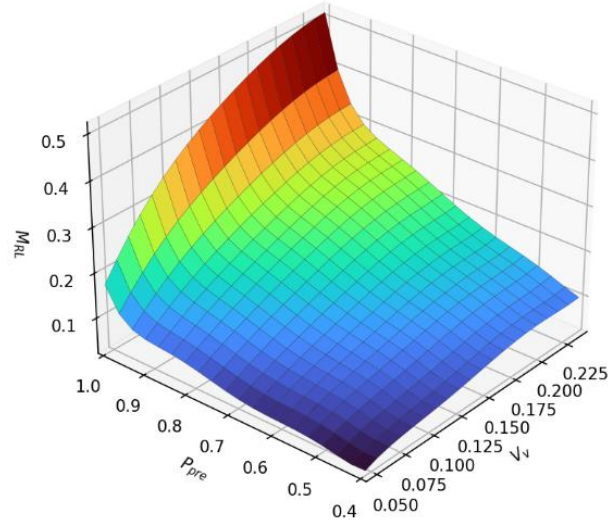


Рисунок 8 - Залежності залишкового ресурсу від ймовірності попередження відмов P_{pre} регламентним технічним обслуговуванням для нелінійного закону зміни технічного стану $Y = \epsilon t^n$, де $n = 0.5$ і закону Вейбулла для розподілу значень коефіцієнта ϵ

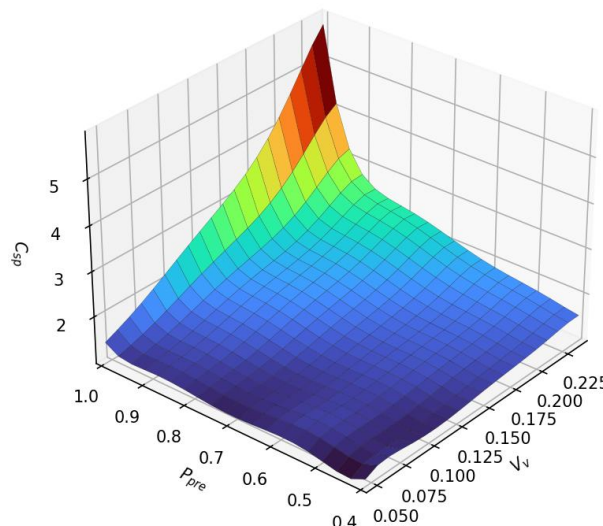


Рисунок 9 - Залежності питомих витрат на змінно-запасні частини C_{sp} від ймовірності попередження відмов P_{pre} регламентним технічним обслуговуванням для нелінійного закону зміни технічного стану $Y = \epsilon t^n$, де $n = 0.5$ і закону Вейбулла для розподілу значень коефіцієнта ϵ

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.

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.

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.

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.

Перевірка адекватності математичних моделей і системи КПТОВС шляхом порівняння з результатами експериментальних досліджень показала, що використані математичні моделі цілком задовільно описують (на рівні вище 95 %) основні процеси системи технічного обслуговування і можуть бути застосовані для оцінювання різних способів підвищення ефективності системи технічного обслуговування і не лише за рахунок використання цифрових стратегій.

В шостому розділі викладено мету, програму, методику та результати 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 застосування 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 вантажних суднах засобів дистанційного моніторингу, які інтегруються у склад системи КПТОВС, спеціально розробленої для умов інтелектуальних транспортних систем.

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 судову 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».

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.

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 аномального 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.

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.

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.

Результати проведених досліджень свідчать про 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.

У сьомому розділі наведені результати досліджень на математичних моделях ефективності застосування цифрових стратегій для підвищення ефективності систем ТО вантажних суден в умовах експлуатації.

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.

Під час адаптивізації плану регламентного технічного обслуговування за максимумом коефіцієнта оперативної готовності на певний період часу (x) можна використовувати відповідне рівняння:

$$\frac{T_{sch}}{T_{rec} + x} = 1 - \frac{1}{1 - Q(\Delta t_{reg}) + \lambda(\Delta t_{reg}) \times \int_0^{\Delta t_{reg}} [1 - Q(\Delta t_{reg})] dt} \quad (26)$$

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:

$$\frac{T_{sch}}{T_{rec} - T_{sch}} = \lambda(\Delta t_{reg}) \times \int_0^{\Delta t_{reg}} [1 - Q(\Delta t_{reg})] dt - Q(\Delta t_{reg}), \quad (27)$$

Подібно до цього, для технічного обслуговування за станом оптимальна періодичність контрольних операцій визначається з максимуму коефіцієнта готовності, виходячи з наступного виразу:

$$\frac{1 - Q(x + \Delta t_c)}{\int_0^{\Delta t_c} [1 - Q(x + \omega)] d\omega} = \frac{(T_{cf} - T_{cg})f(\Delta t_c) + 1}{\Delta t_c + (T_{cf} - T_{cg})Q(\Delta t_c) + T_{cg}}, \quad (28)$$

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, $\omega = t - \xi$.

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.

У системі ShipDiMRO системи КПТОВС, 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 (26). 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 11 представлено математичні моделі за результатами розв'язання рівняння (26), 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 (29) і коефіцієнтів із таблиці 1 для Рис. 11 (А), при цьому $(P_{pre} = X)$, а коефіцієнт варіації $(V = Y)$.

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 12 і Рисунка 13, 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 ($a = 0,8$).

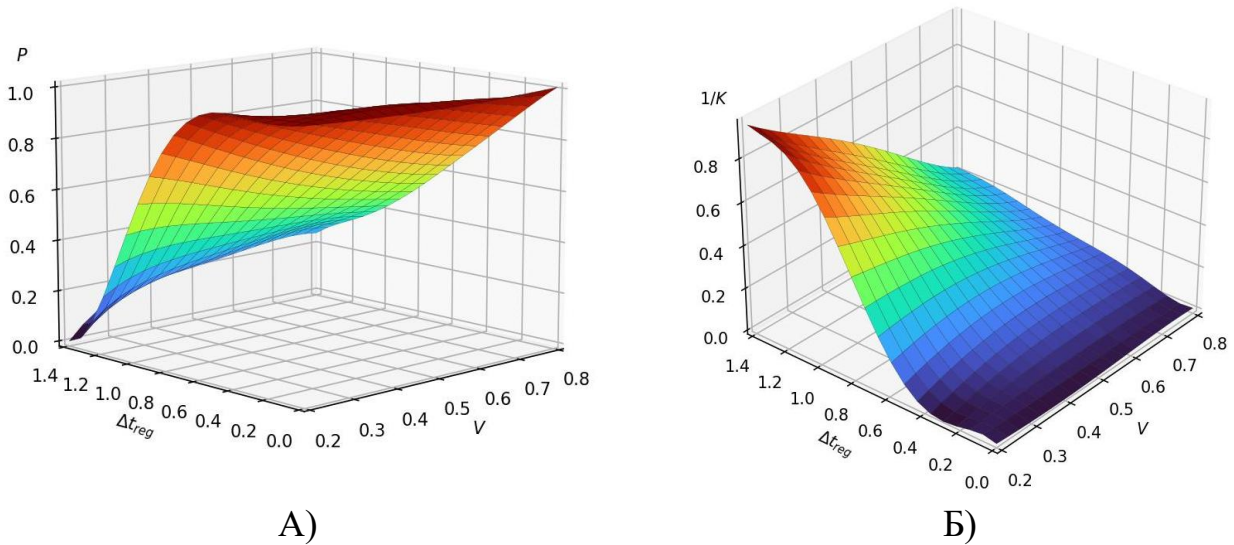


Рисунок 11 – Математичні моделі для визначення прийнятних наслідків відмов ($1/K$), за яких буде забезпечено заданий рівень безвідмовності (P_{pre}) та оптимальний коефіцієнт технічного використання (K_{tu})

Таблиця 1 – Коефіцієнти апроксимуючих функцій

Коеф.	Рис. 11 (А)	Рис. 11 (Б)	Коеф.	Рис. 11 (А)	Рис. 11 (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

$$\begin{aligned}
 Z = & C[0] + C[1] * X + C[2] * Y + C[3] * X^2 + C[4] * X * Y + \\
 & + C[5] * Y^2 + C[6] * X^3 + C[7] * X^2 * Y + C[8] * X * Y^2 + C[9] * Y^3 + \\
 & + C[10] * X^4 + C[11] * X^3 * Y + C[12] * X^2 * Y^2 + C[13] * X * Y^3 + \\
 & + C[14] * Y^4 + C[15] * X^5 + C[16] * X^4 * Y + C[17] * X^3 * Y^2 + \\
 & + C[18] * X^2 * Y^3 + C[19] * X * Y^4 + C[20] * Y^5 + C[21] * X^6 + \\
 & + C[22] * X^5 * Y + C[23] * X^4 * Y^2 + C[24] * X^3 * Y^3 + \\
 & + C[25] * X^2 * Y^4 + C[26] * X * Y^5 + C[27] * Y^6
 \end{aligned} \tag{29}$$

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.

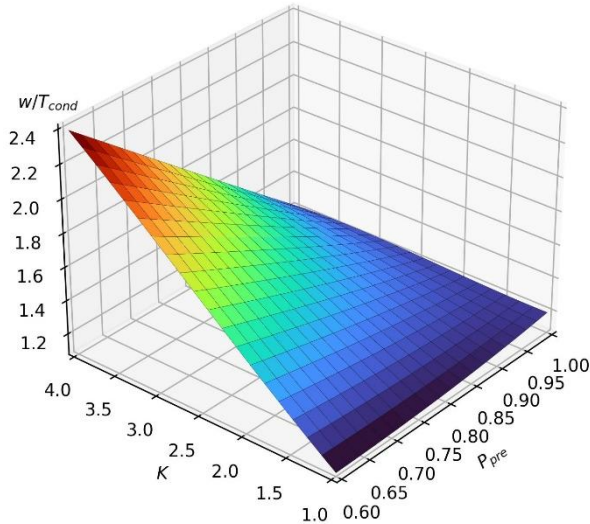


Рисунок 12 – Приклад залежності питомих витрат на виконання технічного обслуговування без урахування вартості змінно-запасних частин

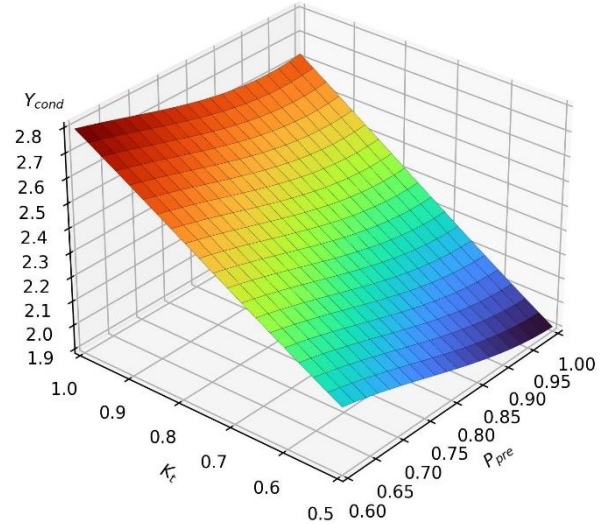


Рисунок 13 – Приклад залежності питомих витрат на виконання технічного обслуговування з урахуванням вартості змінно-запасних частин

З іншого боку, наближення параметра незадовільного стану до параметра непрацездатного стану ($a \rightarrow 1$) 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 (a) необхідна його підтримка почастищенням 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. В 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.

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.

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 прескриптивного технічного обслуговування системи КПТОВС (Рис. 10).

Component / Object	Job ID	Job Interval	Dept.	Last	Work Date Due	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_GASDET ECT	Month	DECK	27-02-23	27-03-23				D								
CALIBRATION OF FLAMMABLE GAS DETECTOR	381_GASDET ECT-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_RUD DER	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 - RECORDED 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_GREA SE-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 10 – Фрагмент плану прескриптивного технічного обслуговування системи КПТОВС

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 АСМС 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 створенні 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 ACSMS 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 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. 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 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 судових 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 напрямку, 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 Cherniavskiy, 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., & Vrublevskiy, 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 «ДНПРОВСЬКІ 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 ваhti 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 судноремонтної 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, II Міжнародна науково-практична морська конференція кафедри СЕУ і ТЕ Одеського Національного Морського Університету 24-28 квітня 2020 року.

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 судових 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.

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.