

**ФОРМУВАННЯ ОПТИМАЛЬНИХ ПАРАМЕТРІВ
СИСТЕМИ ТЕХНІЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ ВАНТАЖНИХ СУДЕН
ЗА РАХУНОК ЦИФРОВИХ СТРАТЕГІЙ**

Сучасні торгові судна відіграють ключову роль у транспортній системі, забезпечуючи перевезення великих обсягів вантажів по всьому світу. Це покладає великі вимоги до ефективності та надійності суднового обладнання. Системи технічного обслуговування вантажних суден відіграють важливу роль у забезпеченні нормального функціонування суден та забезпеченні їхньої безпеки. Однак, існують певні проблеми, пов'язані із сучасним станом систем технічного обслуговування суден. Зокрема, питання надійності та ефективності технічного обслуговування є критичними для оптимізації витрат та підвищення ефективності морського транспорту. Оптимальні параметри системи технічного обслуговування можуть вирішити ці проблеми та покращити функціонування вантажних суден. Метою статті є розгляд та обґрунтування оптимальних параметрів системи технічного обслуговування суден, що базуються на застосуванні цифрових стратегій. Постановка проблеми включає в себе необхідність підвищення надійності суднового обладнання, зменшення витрат та покращення експлуатаційної продуктивності. Аналіз попередніх досліджень та публікацій використано для визначення потенційних проблем і демонстрації, як використання цифрових стратегій може вирішити ці проблеми. Стаття включає докладний огляд літератури, а також розглядає сучасні методи оптимізації параметрів технічного обслуговування, враховуючи стохастичні аспекти та методи надійності. Висновки статті вказують на важливість реорганізації та оптимізації систем технічного обслуговування суден і підкреслюють роль цифрових стратегій у досягненні цієї мети. Проведене дослідження допомагає вирішити ключові проблеми в сфері технічного обслуговування вантажних суден та покращити ефективність та надійність суднового обладнання. Результати дослідження мають практичне застосування для судноплавних компаній та організацій, що працюють у галузі морського транспорту.

Ключові слова: технічне обслуговування, вантажні судна, цифрові стратегії, оптимізація параметрів, надійність та ефективність, суднові системи, морський транспорт.

A.I. Golovan. Formation of optimal parameters of the cargo ship maintenance system through digital strategies. Contemporary merchant ships play a key role in the international transportation system, ensuring the transportation of large volumes of cargo around the world. This places great demands on the efficiency and reliability of shipboard equipment. Cargo ship maintenance systems play an important role in ensuring the proper functioning of ships and their safety. However, there are certain problems associated with the current state of ship maintenance systems. In particular, the issues of reliability and efficiency of maintenance are critical for optimizing costs and increasing the efficiency of maritime transport. Optimal parameters of the maintenance system can solve these problems and improve the operation of cargo ships. The purpose of the article is to consider and justify the optimal parameters of the ship maintenance system based on the application of digital strategies. The problem statement includes the need to increase the reliability of ship equipment, reduce costs and improve operational performance. An analysis of previous research and publications is used to identify potential challenges and demonstrate how the use of digital strategies can address these issues. The article includes a detailed

* канд. техн. наук, доцент, Одеський національний морський університет, м. Одеса, ORCID: 0000-0001-6589-4381, g.onmu@ukr.net

literature review and discusses state-of-the-art methods for optimizing maintenance parameters, including stochastic aspects and reliability methods. The conclusions of the article point to the importance of reorganizing and optimizing ship maintenance systems and emphasize the role of digital strategies in achieving this goal. The study helps to solve key problems in the field of cargo ship maintenance and improve the efficiency and reliability of ship equipment. The results of the study have practical application for shipping companies and organizations operating in the field of maritime transport.

Key words: maintenance, cargo ships, digital strategies, parameter optimization, reliability and efficiency, ship systems, maritime transport.

Постановка проблеми. У сучасному світі судна відіграють ключову роль у транспортній системі, забезпечуючи перевезення великих обсягів вантажів по всьому світу. Це покладає великі вимоги до ефективності та надійності судового обладнання. Системи технічного обслуговування вантажних суден відіграють важливу роль у забезпеченні нормального функціонування суден та забезпеченні їхньої безпеки.

Однак, існують певні проблеми та виклики, пов'язані із сучасним станом систем технічного обслуговування суден. Зокрема, питання надійності та ефективності технічного обслуговування є критичними для оптимізації витрат та підвищення ефективності морського транспорту. Оптимальні параметри системи технічного обслуговування можуть вирішити ці проблеми та покращити функціонування вантажних суден.

За таких умов, актуальним постає вирішення проблеми підвищення ефективності системи технічного обслуговування вантажних суден і питань її оптимізації з використанням цифрових стратегій. Проблема полягає у тому, що технічне обслуговування вантажних суден вимагає значних витрат і управління різними параметрами, включаючи надійність, безпеку, регулярність та витрати.

По-перше, стан вантажного судна має відповідати вимогам щодо надійності та безпеки, а також забезпечувати регулярність рейсів.

По-друге, витрати на технічне обслуговування повинні бути оптимізовані, щоб знизити загальні витрати на утримання судна.

Отже, це дослідження передбачає розгляд параметрів системи технічного обслуговування та визначення оптимальних значень цих параметрів, які забезпечують максимальну ефективність і мінімізацію витрат в управлінні вантажним судном. Вирішення цієї проблеми передбачає розробку цифрових стратегій та методів для підвищення продуктивності та зниження витрат у процесі технічного обслуговування суден.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Розглянуті роботи дають уявлення про оптимізацію параметрів системи технічного обслуговування вантажних суден. Автори статті [1] підкреслюють необхідність реорганізації служб технічного обслуговування і логістики для поліпшення економічних показників системи технічного обслуговування. Дослідження [2] фокусується на оптимізації інтервалів технічного обслуговування та порогів працездатності судових механічних систем за допомогою стохастичної моделі. Стаття [3] досліджує підходи до оптимізації параметрів технічного обслуговування з постійною періодичністю контролю, враховуючи такі критерії, як мінімізація питомої вартості операцій і максимізація коефіцієнта технічного використання. Автор статті [4] застосовує методи надійності для підвищення експлуатаційної продуктивності та зниження витрат в системі головного двигуна морського судна.

Також у проаналізованих роботах припускається, що сучасні цифрові інструменти та технології можуть оптимізувати параметри систем технічного обслуговування вантажних суден. Короткі періоди технічного обслуговування для обраної групи обладнання можуть підвищити середню надійність експлуатації судна в морі з мінімальними витратами [5]. Система технічного обслуговування інтегрує потік інформації за допомогою різних стратегій технічного обслуговування [6]. Гібридний багатокритеріальний метод прийняття рішень підходить для вибору технічного обслуговування для кожної одиниці обладнання судових технічних засобів, систем і комплексів [7].

Проаналізовані статті разом підкреслюють важливість реорганізації служб технічного обслуговування, оптимізації інтервалів і порогових значень технічного обслуговування, а також

використання методів підвищення надійності для вдосконалення системи технічного обслуговування вантажних суден.

Проведений аналіз існуючих досліджень показав, що існують деякі потенційні проблеми, які можуть бути вирішені шляхом впровадження цифрових стратегій у систему технічного обслуговування вантажних суден. Серед цих проблем важливо виділити:

1. Недостатній рівень надійності. Вища надійність обладнання і механізмів суден може сприяти зменшенню аварійності та забезпеченню безпеки на морських шляхах.

2. Зростання витрат. Вдосконалення системи технічного обслуговування може допомогти вирішити проблему зростання витрат на обслуговування суден, що може виникнути через непланові ремонти та високі витрати на запасні частини.

3. Покращення продуктивності. Впровадження оптимізованих параметрів системи технічного обслуговування (ТО) сприятиме зменшенню часу зупинок для ремонту та підвищенню тривалості експлуатаційного періоду судна, що в свою чергу позитивно вплине на продуктивність.

4. Зменшення негативного впливу на навколишнє середовище. Ефективне технічне обслуговування може сприяти зменшенню викидів токсичних речовин і покращенню екологічної стійкості суден.

5. Підвищення конкурентоспроможності. Враховуючи, що судноплавні компанії працюють в конкурентному середовищі, оптимізація системи технічного обслуговування може надати перевагу у конкурентній боротьбі.

Таким чином, стаття пропонує підходи до оптимізації параметрів системи технічного обслуговування вантажних суден з використанням цифрових стратегій, які можуть вирішити вищезазначені проблеми та сприяти покращенню ефективності та надійності суден у морському транспорті.

Мета статті полягає в розробці і дослідженні підходів та стратегій для оптимізації параметрів системи технічного обслуговування вантажних суден з використанням цифрових технологій з метою підвищення ефективності та зниження витрат у цьому процесі.

Виклад основного матеріалу.

Питання підвищення ефективності систем технічного обслуговування вантажних суден має високу актуальність, як на етапі їх проектування, так і під час їхнього експлуатаційного періоду. Ця актуальність відображена у ряді наукових досліджень [5, 8-14]. На рис. 1 наведена концептуальна схема системної взаємодії, яка стоїть в основі підвищення ефективності систем технічного обслуговування вантажних суден шляхом впровадження цифрових стратегій. Останні визначають підхід до комплексного вирішення завдань управління процесом підвищення ефективності систем технічного обслуговування вантажних суден.

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

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

З аналізу представленої системи (зображеної на рис. 1) стає очевидним, що в рамках управління забезпеченням оптимальних параметрів системи технічного обслуговування вантажних суден, використовуючи цифрові стратегії, можна виділити дві важливі взаємодіючі складові цього процесу – інформаційну та управлінську (виконавчу). Інформаційна складова охоплює в собі дистанційне забезпечення процесів ідентифікації, моніторингу, діагностування та прогнозування як показників ефективності системи ТО, так і параметрів технічного стану судових технічних засобів, конструкцій і вантажних суден в умовах інтелектуальної транспортної системи

(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.

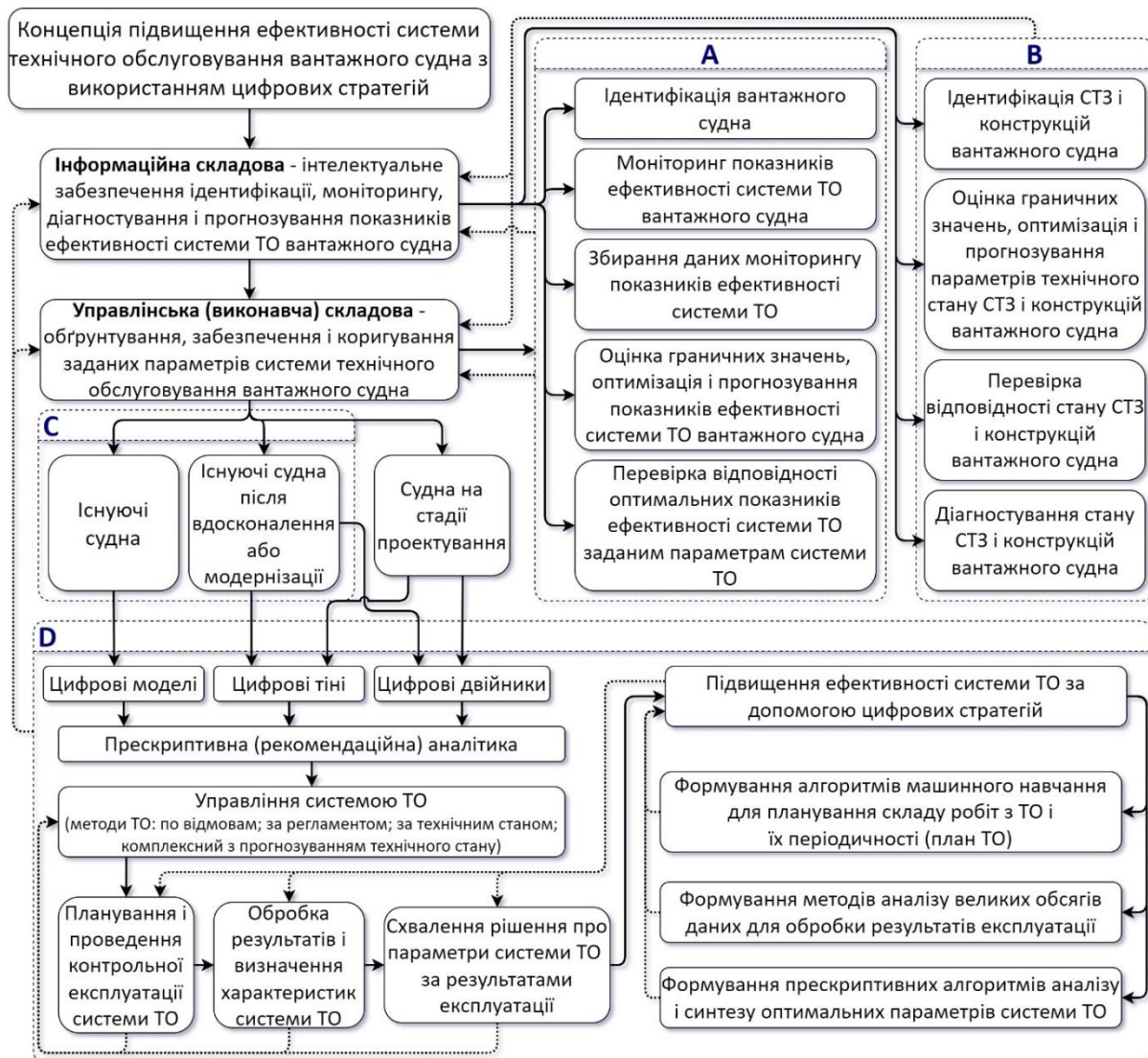


Рис. 1 – Схема системної взаємодії при підвищенні ефективності систем технічного обслуговування вантажних суден на основі цифрових стратегій

Характеристики інформаційної взаємодії, що виявляються в рамках процесів забезпечення заданих показників ефективності системи ТО вантажного судна подано на рис. 1 (сегменти А та В). Процеси управлінського (виконавчого) забезпечення заданих параметрів системи ТО вантажного судна (сегменти С 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 А та В). Процеси ідентифікації параметрів технічного стану суднових технічних засобів, конструкцій і показників ефективності системи ТО вантажного судна передбачають використання автоматизованої системи контролю і прогнозування технічного стану суднових технічних засобів і конструкцій (ACMS) у поєднанні з системою «ShipDiMRO», яка функціонує в рамках ITS. Зазначені процеси відзначаються збором даних під час моніторингу, здійсненням оцінки граничних значень, а також оптимізацією параметрів технічного стану суднових технічних засобів, конструкцій і показників ефективності системи ТО вантажного судна впродовж тривалого часу. В кінцевій стадії сегмента А відбувається перевірка відповідності

забезпечення заданих показників ефективності системи ТО вантажного судна заданим параметрами системи ТО цього судна.

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

Відповідно до накопиченої інформації у сегменті **А** починає здійснюватися управління параметрами системи технічного обслуговування як існуючих вантажних суден (сегмент **С**), так і тих, які перебувають на стадії проектування. У сегменті **Д** 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 [9, 10, 14].

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

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

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

внесення коригувань до параметрів системи ТО з подальшим аналізом оптимальності цих параметрів.

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

Перша задача полягає в забезпеченні необхідного значення імовірності знаходження в стані технічної придатності до використання при максимізації прибутків в експлуатації.

Друга задача передбачає досягнення визначених прибутків за максимальної імовірності знаходження в стані технічної придатності до використання.

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

Підвищення ефективності системи технічного обслуговування означає збільшення результативності та оптимізацію процесів, пов'язаних з технічним обслуговуванням 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. Усі ці зміни допомагають забезпечити більш якісне та ефективне функціонування судна та знизити витрати на його утримання.

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

З метою оцінки ефективності системи ТО вантажного судна, що відбувається на різних етапах її вдосконалення в судноплавній компанії, здійснюється використання розглянутих у Розділі 1 показників ефективності системи ТО. В якості доповнення до розглянутого матеріалу першого розділу може бути наведений комплексний показник ефективності системи ТО вантажного судна – узагальнений індекс надійності (УІН) [14]. Для розрахунку даного УІН використовуються вже наявні аналітичні моделі, побудовані на основі методів теорії матриць, логіко-імовірнісних підходів, а також використання байєсівських і мінімаксних оцінок [15].

Для досягнення підвищення ефективності системи ТО важливим є постійний процес удосконалення компонентів, що входять до сукупності параметрів системи ТО. В одному з напрямів підвищення ефективності системи ТО через застосування цифрових стратегій (сегмент **D**) є вдосконалення коригувальних ланок кожного з трьох етапів процесу управління системою ТО. Це вдосконалення (сегмент **D**) виражається через розробку і впровадження в практику судноплавних компаній алгоритмів машинного навчання для планування складу робіт з ТО і їх періодичності (план ТО) на першому етапі, методів аналізу великих обсягів даних для обробки результатів експлуатації на другому етапі, прескриптивних алгоритмів аналізу і синтезу оптимальних параметрів системи ТО на третьому етапі (рис. 1). Результати вдосконалення через зворотні зв'язки передаються у інформаційну та управлінську (виконавчу) складові процесу забезпечення заданих параметрів і показників ефективності системи технічного обслуговування вантажного судна.

Висновки

Використання цифрових стратегій в системі технічного обслуговування вантажних суден є ключовим чинником для досягнення оптимальної ефективності та економічної вигоди на морському транспорті та призведе до ряду позитивних змін та покращень:

1. В результаті дослідження визначено, що оптимальні параметри системи технічного обслуговування вантажних суден можуть бути досягнуті за допомогою цифрових стратегій. Встановлено, що використання цифрових інструментів дозволяє зменшити час зупинок для ремонту, витрати на запасні частини та підвищити тривалість експлуатаційного періоду обладнання.

2. Дослідження показало, що цифрові стратегії дозволяють ефективно оцінювати надійність та безпеку судової експлуатації, зменшуючи ризики технічних відмов та аварій.

3. Застосування цифрових підходів в технічному обслуговуванні вантажних суден дозволяє знизити витрати на обслуговування та забезпечити ефективне функціонування суден.

4. Однією із ключових складових статті є розробка схеми системної взаємодії при підвищенні ефективності систем технічного обслуговування вантажних суден на основі цифрових стратегій. Ця схема включає в себе використання алгоритмів машинного навчання для планування робіт з технічного обслуговування, аналіз великих обсягів даних для обробки результатів експлуатації та розробку прескриптивних алгоритмів аналізу та синтезу оптимальних параметрів системи ТО. Ця схема дозволяє забезпечити максимальні результати при мінімальних затратах.

Подальше використання результатів цього дослідження може включати їхнє практичне застосування в судноплавних компаніях та портових установах. Впровадження цифрових стратегій у практику технічного обслуговування вантажних суден може призвести до зменшення технічних відмов, підвищення продуктивності та зниження витрат. Крім того, ці дослідження можуть служити як основа для подальших наукових розробок у галузі оптимізації систем технічного обслуговування суден, включаючи розробку нових цифрових інструментів та методик.

Загалом, ця стаття відкриває перспективи для поліпшення надійності та ефективності технічного обслуговування вантажних суден, що має важливе значення для морського транспорту та логістики.

Перелік використаних джерел:

1. Recent advancements in data-driven methodologies for the fault diagnosis and prognosis of marine systems: A systematic review / C. Velasco-Gallego, B.N. De Maya, C.M. Molina, I. Lazakis, N.C. Mateo. *Ocean Engineering*. 2023. Vol. 284. 115277. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.115277>.
2. Kimera D., Nangolo, F. Maintenance optimization for marine mechanical systems. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment*. 2019. Vol. 234(2). Pp. 446-462. DOI: <https://doi.org/10.1177/1475090219882601>.
3. Zhyrov G. Analysis of problem optimization of parameters maintenance process according to state with constant periodicity of control. *International Journal of Emerging Trends in Engineering Research*. 2020. Vol. 8(6). Pp. 2606-2611. DOI: <https://doi.org/10.30534/ijeter/2020/63862020>.
4. Improving the operational output of marine vessel mainengine system through cost reduction using reliability technique / Ugoji K.U., Isaac O.E., Nkoi B., Wofuru-Nyenke O.K. *International journal of engineering and modern technology*. 2022. Vol. 8(2). Pp. 36-52. DOI: <https://doi.org/10.56201/ijemt.v8.no2.2022.pg36.52>.
5. Optimization of maintenance scheduling of ship borne machinery for improved reliability and reduced cost / Verma A.K., Srividya A., Rana A., Khattri S.K. *International Journal of Reliability, Quality and Safety Engineering*. 2012. Vol. 19. № 3. Pp. 1-15. DOI: <https://doi.org/10.1142/s0218539312500143>.
6. Development of optimized maintenance system for vehicle fleet / R. Haider, A.M. Kakar, S.B. Khattak, S.U. Rehman, S. Maqsood, M. Ullah, R. Akhtar, A. Sikandar. *Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2015. Vol. 34(2). Pp. 21-28. DOI: <https://doi.org/10.25211/jeas.v34i2.2114>.
7. Emovon I., Norman R., Murphy A.J. Hybrid MCDM based methodology for selecting the optimum maintenance strategy for ship machinery systems. *Journal of Intelligent Manufacturing*. 2015. Vol. 29(3). Pp. 519-531. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10845-015-1133-6>.
8. Lazakis I., Turan O., Aksu S. Increasing ship operational reliability through the implementation of a holistic maintenance management strategy. *Ships and Offshore Structures*. 2010. Vol. 5(4).

- Pp. 337-357. DOI: <https://doi.org/10.1080/17445302.2010.480899>.
9. System of water vehicle power plant remote condition monitoring / A. Golovan, I. Honcharuk, O. Deli, O. Kostenko, Y. Nykyforov. *IOP Conference Series*. 2021. Vol. 1199(1). Pp. 1-11. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899x/1199/1/012049>.
 10. Aspects of forming the information V2I model of the transport vessel / A. Golovan, I. Gritsuk, S. Rudenko, V. Saravas, A. Shakhov, O. Shumylo. *IEEE International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES)*, Kremenchuk, Ukraine, 23-25 September 2019. Pp. 390-393. DOI: <https://doi.org/10.1109/mees.2019.8896595>.
 11. Bayer D., Aydın O., Celik M. An ICOR approach towards ship maintenance software development. *International Journal of Maritime Engineering*. 2021. Vol. 160. Part A1. Pp. A11-A20. DOI: <https://doi.org/10.5750/ijme.v160ia1.1044>.
 12. Ford D.N., Housel T.J., Mun J. Ship maintenance processes with collaborative product lifecycle management and 3D terrestrial laser scanning tools: reducing costs and increasing productivity. *Proceedings of the ninth Annual Acquisition Research Symposium*. 2011. Pp. 266-291. DOI: <https://doi.org/10.21236/ada543988>.
 13. Research on simulation method of ship equipment maintenance support process / L. Li, P. Yi, Z. Wang, K. Liu, F. Li. *Proceedings of the 2nd International Conference on Algorithms, High Performance Computing and Artificial Intelligence (AHPCAI)*, Guangzhou, China, 21-23 October 2022. Pp. 778-782. DOI: <https://doi.org/10.1109/ahpcai57455.2022.10087716>.
 14. Golovan A., Gritsuk I. The main principles of assessing the efficiency of ship maintenance. *Transport development*. 2023. Vol. 1(16). Pp. 47-60. DOI: <https://doi.org/10.33082/td.2023.1-16.04>.
 15. Kim T., Song J. Generalized Reliability Importance Measure (GRIM) using Gaussian mixture. *Reliability Engineering & System Safety*. 2018. Vol. 173. Pp. 105-115. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ress.2018.01.005>.

References:

1. C. Velasco-Gallego, B.N. De Maya, C.M. Molina, I. Lazakis, and N.C. Mateo, «Recent advancements in data-driven methodologies for the fault diagnosis and prognosis of marine systems: A systematic review», *Ocean Engineering*, vol. 284, 115277, 2023. doi: **10.1016/j.oceaneng.2023.115277**.
2. D. Kimera, and F. Nangolo, «Maintenance optimization for marine mechanical systems», *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment*, vol. 234(2), pp. 446-462, 2019. doi: **10.1177/1475090219882601**.
3. G. Zhyrov, «Analysis of problem optimization of parameters maintenance process according to state with constant periodicity of control», *International Journal of Emerging Trends in Engineering Research*, vol. 8(6), pp. 2606-2611, 2020. doi: **10.30534/ijeter/2020/63862020**.
4. K.U. Ugoji, O.E. Isaac, B. Nkoi, and O.K. Wofuru-Nyenke, «Improving the Operational Output of Marine Vessel MainEngine System through Cost Reduction using Reliability Technique», *International journal of engineering and modern technology*, vol. 8(2), pp. 36-52, 2022. doi: **10.56201/ijemt.v8.no2.2022.pg36.52**.
5. A.K. Verma, A. Srividya, A. Rana, and S.K. Khattri, «Optimization of maintenance scheduling of ship borne machinery for improved reliability and reduced cost», *International Journal of Reliability, Quality and Safety Engineering*, vol. 19, № 3, pp. 1-15, 2012. doi: **10.1142/s0218539312500143**.
6. R. Haider, A.M. Kakar, S.B. Khattak, S.U. Rehman, S. Maqsood, M. Ullah, R. Akhtar, and A. Sikandar, «Development of optimized maintenance system for vehicle fleet», *Journal of Engineering and Applied Sciences*, vol. 34(2), pp. 21-28, 2015. doi: **10.25211/jeas.v34i2.2114**.
7. I. Emovon, R. Norman, and A.J. Murphy, «Hybrid MCDM based methodology for selecting the optimum maintenance strategy for ship machinery systems», *Journal of Intelligent Manufacturing*, vol. 29(3), pp. 519-531, 2015. doi: **10.1007/s10845-015-1133-6**.
8. I. Lazakis, O. Turan, and S. Aksu, «Increasing ship operational reliability through the implementation of a holistic maintenance management strategy», *Ships and Offshore Structures*, vol. 5(4), pp. 337-357, 2010. doi: **10.1080/17445302.2010.480899**.
9. A. Golovan, I. Honcharuk, O. Deli, O. Kostenko, and Y. Nykyforov, «System of Water Vehicle

- Power Plant Remote Condition Monitoring», *IOP Conference Series*, vol. 1199(1), pp. 1-11, 2021. doi: 10.1088/1757-899x/1199/1/012049.
10. A. Golovan, I. Gritsuk, S. Rudenko, V. Saravas, A. Shakhov, and O. Shumylo, «Aspects of Forming the Information V2I Model of the Transport Vessel», in 2019 IEEE International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES), 2019, pp. 390-393. doi: 10.1109/mees.2019.8896595.
 11. D. Bayer, O. Aydin, and M. Celik, «An ICOR approach towards ship maintenance software development», *International Journal of Maritime Engineering*, vol. 160, part A1, pp. A11-A20, 2021. doi: 10.5750/ijme.v160ia1.1044.
 12. D.N. Ford, T.J. Housel, and J. Mun, «Ship Maintenance Processes with Collaborative Product Lifecycle Management and 3D Terrestrial Laser Scanning Tools: Reducing Costs and Increasing Productivity», in Proceedings of the ninth Annual Acquisition Research Symposium, 2011, pp. 266-291. doi: 10.21236/ada543988.
 13. L. Li, P. Yi, Z. Wang, K. Liu, and F. Li, «Research on Simulation Method of Ship Equipment maintenance Support process», in Proceedings of the 2nd International Conference on Algorithms, High Performance Computing and Artificial Intelligence (AHPCAI), 2022, pp. 778-782. doi: 10.1109/ahpcai57455.2022.10087716.
 14. A. Golovan, and I. Gritsuk, «The main principles of assessing the efficiency of ship maintenance», *Transport development*, vol. 1(16), pp. 47-60, 2023. doi: 10.33082/td.2023.1-16.04.
 15. T. Kim, and J. Song, «Generalized Reliability Importance Measure (GRIM) using Gaussian mixture», *Reliability Engineering & System Safety*, vol. 173, pp. 105-115, 2018. doi: 10.1016/j.ress.2018.01.005.

Рецензент: І.В. Грицук
д-р техн. наук, проф., ХДМА

Стаття надійшла 18.07.2023
Стаття прийнята 12.08.2023

УДК 629.5:656.6

doi: 10.31498/2225-6733.47.2023.300117

© Дудченко С.*

УДОСКОНАЛЕННЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ РАЙОНУ ПЛАВАННЯ ДЛЯ ОПТИМАЛЬНОГО МАРШРУТУ ПЕРЕХОДУ СУДНА

Планування оптимального маршруту переходу судна є ключовою проблемою при проектуванні систем планування руху та навігації. Дана проблема полягає в необхідності визначення траєкторії від початкової до кінцевої точки, що забезпечує відсутність зіткнень з переешкодами. При вирішенні даної проблеми, також потрібно враховувати динаміку судна, невизначеність і нестационарність водного середовища, час на обчислення шляху та фізичну здійсненність траєкторії. Задача планування традиційно сформульована як задача оптимізації стану поточного положення судна відносно цільового положення. Найчастіше цю задачу розв'язують у конфігураційному просторі, який складається з набору переешкод, кінематичних і динамічних обмежень і набору точок в районах плавання. Методи планування поділяються на глобальні та локальні. Глобальні методи будують маршрут на основі відомої карти, тоді як локальні методи коригують шлях при виявленні переешкод. Проте на даний момент математичні моделі району плавання лише частково враховують невизначеності зон, в яких функціонує судно. Це зумовлює планування

* капітан далекого плавання, ст. викладач, Херсонська державна морська академія; директор, ТОВ «Херсонський морський спеціалізований тренажерний центр при Херсонській державній морській академії», м. Херсон, ORCID: 0000-0002-1613-7226, dudchenko.serhiy@gmail.com