

Автомобільний, річковий, морський та авіаційний транспорт

УДК 629.5.078:656.075

doi: 10.26906/SUNZ.2024.1.005

А. І. Головань

Одеський національний морський університет, Одеса, Україна

ОСОБЛИВОСТІ ОЦІНЮВАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ СИСТЕМ ТЕХНІЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ ВАНТАЖНИХ СУДЕН

Анотація. У статті розглянуто важливу проблему оцінювання ефективності систем технічного обслуговування вантажних суден. Аналіз останніх досліджень і публікацій в цій області, вказує на необхідність оцінювання ефективності технічного обслуговування вантажних суден. Метою статті є розроблення і формування алгоритмів інформаційної системи моніторингу показників ефективності технічного обслуговування вантажних суден для застосування їх в інформаційній системі оцінювання способів підвищення ефективності технічного обслуговування. Результати статті включають блок-схеми алгоритмів: збору даних про параметри системи технічного обслуговування та технічного стану суднових технічних засобів і конструкцій, моніторингу і визначення статусу несправностей та оцінювання способів підвищення ефективності системи технічного обслуговування з можливістю прогнозування показників ефективності системи технічного обслуговування. Висновки підкреслюють важливість аналізу експлуатаційних даних, використання інформаційно-комунікаційних технологій та системного підходу до оцінювання способів підвищення ефективності з метою забезпечення надійності і ефективності технічного обслуговування вантажних суден.

Ключові слова: технічне обслуговування, вантажні судна, ефективність, прогнозування, аналіз.

Вступ

Постановка проблеми. Системи моніторингу технічного стану суднових технічних засобів, конструкцій (СТЗІК) та експлуатаційних характеристик системи технічного обслуговування (ТО) в умовах Інтелектуальних транспортних систем розроблені для забезпечення постійного автоматизованого контролю за технічними параметрами суднових технічних засобів, конструкцій, систем і комплексів вантажних суден. Вони призначені для виявлення відмовних станів і запобігання їх подальшому розвитку. Крім того, ці системи дозволяють налагоджувати системи комплексного прескриптивного технічного обслуговування з можливістю прогнозування технічного стану та обґрунтованого забезпечення оптимальних параметрів системи ТО.

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

Головною проблемою, яка висвітлюється в статті, є необхідність розроблення алгоритмів і впровадження їх у єдину систему моніторингу вантажних суден з метою забезпечення постійного контролю за різними показниками ефективності системи технічного обслуговування, підвищення надійності та безпеки судноплавства.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В цілому, аналіз останніх досліджень і публікацій вказує на важливість впровадження інформаційних систем моніторингу ефективності технічного обслуговування суден. Важливими постають питання: системного технічного обслуговування, що орієнтоване на надійність (SRCM), яке ефективно підвищує надійність і безпеку повністю електричних суден шляхом визначення оптимальних завдань технічного обслуговування і використання методів управління ризиками, таких як аналіз рівнів захисту (LOPA) [1]; оцінювання ефективності технічного обслуговування суден за допомогою підходу до аналізу процесів, заснованого на вхідних, контрольних, вихідних даних і ресурсах (ICOR) [2]; оцінювання ефективності технічного обслуговування суден шляхом застосування моделі на основі Марківського аналізу для оцінки надійності кожної підсистеми, а потім розгляд шляхів підвищення надійності та вимірювання економічних переваг [3]; автоматизації оцінки стану танків і конструкцій вантажних суден за допомогою бездротової технології, яка значно скорочує час і зусилля, максимізуючи ефективність, економічність і надійність суден [4]. Метод оцінки життєвого циклу збільшує значення операційного показника енергоефективності (EEOI) в реальному часі, особливо при менших обертках двигуна і меншій осадці судна, оцінюючи ефективність технічного обслуговування судна [5]. Періодичне вимірювання швидкості/потужності може дозволити екіпажу судна спрогнозувати відповідний час для технічного обслуговування корпусу, мінімізуючи споживання палива та зменшуючи забруднення навколишнього середовища [6]. Запропонована стратегія мінімізує витрати на паливо, викиди та технічне обслуговування повністю електричних суден шляхом оптимального планування рейсів, періодів генерації

та оцінки ризиків з урахуванням інформації про моніторинг технічного стану [7]. Автоматизована служба моніторингу ефективності технічних операцій покращує і підтримує ефективність виробництва електроенергії на судні шляхом моніторингу роботи судових головних і допоміжних дизельних двигунів [8]. Аналіз даних може допомогти оцінити надійність судових двигунів і спланувати заходи з технічного обслуговування, що потенційно зменшить кількість відмов двигунів і аварій в судноплавній галузі [9]. Модель коригування технічного обслуговування складається з аналізу експлуатаційних даних та аналізу ризиків, визначення важливих компонентів та прийняття ефективної політики технічного обслуговування [10].

Всі ці дослідження разом підкреслюють важливість аналізу експлуатаційних даних, використання інформаційно-комунікаційних технологій і розгляду різних підходів до вимірювання ефективності технічного обслуговування вантажних суден.

Мета статті полягає в розробці і формуванні алгоритмів інформаційної системи моніторингу показників ефективності технічного обслуговування вантажних суден.

Основний матеріал

Науковою та технічною оптимальністю для здійснення інтелектуального моніторингу технічного стану СТЗіК, а також експлуатаційних характеристик системи ТО є інтегрована система. Ця система включає в себе поєднання стандартного та додаткового обладнання для інформаційно-діагностичного моніторингу, яке програмно вбудовано в навігаційно-зв'язковий комплекс судна та виконує функції, пов'язані з супутниковою навігацією.

З метою виконання моніторингу експлуатаційних характеристик системи ТО, визначення технічного стану та ідентифікації несправностей в СТЗіК та системах вантажних суден необхідно об'єднати навігаційно-зв'язкові та діагностичні компоненти. Це об'єднання передбачає технологічний і програмний зв'язок між ними та створення розгалуженої системи контролю експлуатаційних характеристик системи ТО, а також робочих параметрів окремих СТЗіК, систем і комплексів вантажних суден. При цьому інтеграція бортового навігаційного обладнання з основними технологічними компонентами системи моніторингу технічного стану СТЗіК повинна відбуватися в рамках єдиної концепції мобільної інформаційно-діагностичної системи.

Необхідність створення комплексної автоматизованої системи в контексті інформаційних умов Інтелектуальної транспортної системи впливає з необхідності вирішення низки складних завдань, які взаємодіють між собою та обмежені апаратно-програмними можливостями конкретної мікропроцесорної техніки СТЗіК, систем і комплексів.

Процеси керування сучасних судових технічних засобів, систем і комплексів базуються на використанні мікроконтролерів, які володіють розширеним набором засобів зв'язку. Це дозволяє здійснювати збір інформації від стандартних датчиків

судових технічних засобів, систем і комплексів, проводити часткову обробку вимірюваних даних, формувати діагностичні повідомлення та передавати інформацію через діагностичні інтерфейси On-Board Diagnostics - Marine (OBD-M). Аналіз технологічних рішень, що використовуються на ринку обслуговування вантажних суден, виявив відсутність можливості забезпечення повноцінного аналізу не лише отриманих характеристик системи ТО і параметрів технічного стану СТЗіК, систем і комплексів, а також прогнозування їхнього стану.

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

1. Формування процесів збору даних про показники ефективності системи ТО та параметри технічного стану СТЗіК. Алгоритм збору даних (рис. 1) про параметри системи технічного обслуговування та технічного стану судових технічних засобів і конструкцій в межах комплексної системи прескриптивного технічного обслуговування починається з ініціалізації збору даних. Цей крок включає запуск системи збору даних та встановлення необхідних параметрів, таких як часові інтервали, типи датчиків та області моніторингу. Далі відбувається автоматичний збір даних з різних датчиків на судні, таких як температура, тиск, вібрації, рівні зносу тощо. Агрегація даних виконується у вигляді розрахунку середнього значення:

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}, \quad (1)$$

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

Після збору даних відбувається їх первинна обробка та валідація, яка включає перевірку на наявність помилок або відхилень та виключення аномальних даних. Аналіз даних проводиться за допомогою статистичного аналізу для визначення тенденцій та закономірностей.

Важливими інструментами в цьому процесі є формули для визначення стандартного відхилення або варіабельності:

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

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

На наступному етапі виконується класифікація інформації про стан системи технічного обслуговування і технічний стан судових технічних засобів.



Рис. 1. Блок-схема алгоритму збору даних про параметри системи технічного обслуговування та технічного стану суднових технічних засобів і конструкцій в межах комплексної системи прескриптивного технічного обслуговування

Формуються звіти на основі зібраних даних, які подаються у зрозумілому та структурованому форматі для подальшого аналізу. Дані зберігаються на судновому сервері і передаються для інтеграції з аналітичним центром системи технічного обслуговування ShipDiMRO, де вони використовуються для планування технічного обслуговування та ремонтних робіт. На завершальному етапі прогнозуються параметри системи технічного обслуговування. Представлений алгоритм забезпечує систематичний підхід до збору та аналізу даних, що є важливим для підтримання ефективності системи технічного обслуговування та забезпечення технічної безпеки судна.

Алгоритм збору даних, представлений на Рис. 1, є ключовим компонентом інформаційної моделі системи комплексного прескриптивного технічного обслуговування «ShipDiMRO» і спрямований на збір даних про параметри системи технічного обслуговування і параметри суднових технічних засобів і конструкцій. Цей процес відіграє вирішальну роль у забезпеченні точності прогнозування параметрів системи технічного обслуговування і параметрів технічного стану суднових технічних засобів і конструкцій. Одним із найважливіших аспектів процесу є вибір часового інтервалу для отримання інформації. Зменшення цього інтервалу забезпечує вищу точність прогнозу, але одночасно збільшує час необхідний для обчислення прогнозних значень.

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

технічного обслуговування і технічного стану суднових технічних засобів і конструкцій проводиться моніторинг та визначення їх потенційних несправностей.

Розроблені спеціалізовані алгоритми збору даних та розпізнавання стану несправностей, які є невід'ємною частиною процесу прогнозування параметрів системи технічного обслуговування. Ці алгоритми адаптовано до специфічних умов використання в межах віртуального підприємства «shipmonitoring.org». Визначним для алгоритму є інтервал часу Δt для зчитування інформації з датчиків та загальний період T , протягом якого відбувається збір інформації. В результаті, вихідними даними алгоритму є масив даних, який містить часові ряди значень параметрів. Ключові етапи та особливості процесу збору даних детально представлені на згаданому рис. 1.

2. Особливості процесу діагностування ефективності системи ТО і визначення статусу несправностей СТЗ і К у складі системи моніторингу комплексної системи прескриптивного технічного обслуговування. Процес моніторингу (рис. 2) та визначення статусу несправностей системи технічного обслуговування вантажного судна, згідно з розробленим алгоритмом, розпочинається з актуалізації інформації з аналітичним центром ShipDiMRO. Це забезпечує актуальність даних у системі. Далі відбувається ініціалізація системи технічного обслуговування, що включає активацію необхідних модулів для моніторингу та управління обладнанням. Після цього система проходить через етап самодіагностики, який визначає її готовність і функціональний стан.

У разі виявлення зниження рівня технічної придатності судна, стандартне відхилення якого розраховується за формулою (3), система аналізує показники ефективності системи технічного обслуговування:

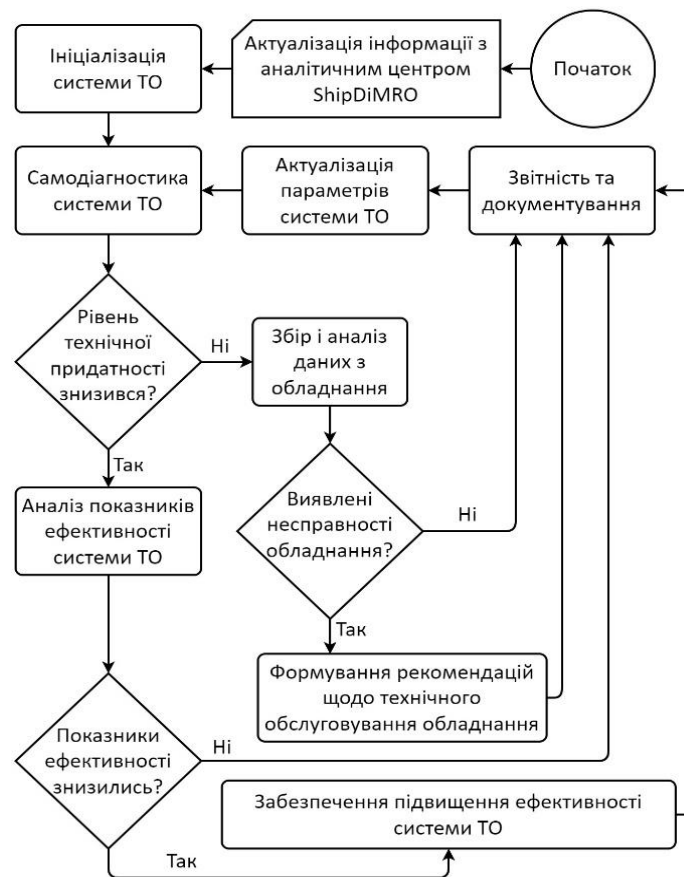


Рис. 2. Блок-схема алгоритму моніторингу і визначення статусу несправностей системи технічного обслуговування вантажного судна в межах комплексної системи прескриптивного технічного обслуговування

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \mu)^2}, \quad (3)$$

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

Якщо ж технічна придатність не знизилася, здійснюється збір та аналіз даних безпосередньо з обладнання судна. Для цього використовується статистичний аналіз даних, наприклад, обчислення середніх значень, аналіз трендів або лінійна регресія (4):

$$y = a \cdot x + b, \quad (4)$$

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

У разі виявлення зниження ефективності системи технічного обслуговування, здійснюються заходи для її підвищення. Це може включати зміни в робочих процедурах або оновлення режимів роботи обладнання. Паралельно проводиться аналіз (формула 5) даних обладнання для виявлення аномалій і несправностей:

$$Z = \frac{(X - \mu)}{\sigma}, \quad (5)$$

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

У разі їх виявлення формуються рекомендації для їх усунення:

Важливою частиною процесу є звітність та документування усіх виявлених даних та вжитих заходів. Завершується процес актуалізацією параметрів прескриптивної системи технічного обслуговування на основі отриманих результатів (6) за методом машинного навчання для оновлення параметрів на основі набору даних.

$$\theta_{new} = \theta_{old} - \alpha \cdot \nabla J(\theta), \quad (6)$$

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

Алгоритм (рис. 2) забезпечує комплексний підхід до моніторингу та управління станом технічного обслуговування вантажного судна, що включає виявлення та реагування на потенційні несправності, а також оптимізацію ефективності системи. Блок-схема (рис. 2) містить в собі методики, які дозволяють об'єктивно оцінювати, аналізувати та оптимізувати процеси в системі технічного обслуговування, що сприяє підвищенню надійності, безпеки та ефективності обслуговування вантажного судна.

3. Розробка алгоритмів оцінювання способів підвищення ефективності системи ТО з можливістю прогнозування показників ефективності системи ТО та параметрів технічного стану СТЗ і К в умовах експлуатації. Алгоритм інформаційної системи (рис. 3), важливою задачею якого є оцінювання способів підвищення ефективності системи технічного обслуговування та включає прогнозування

показників ефективності системи та параметрів технічного стану суднових технічних засобів, розпочинається з актуалізації інформації з аналітичним центром ShipDiMRO. Далі відбувається збір і обробка даних, після чого вибирається метод апроксимації для аналізу даних (формула 7):

$$y = a_0 + a_1x + a_1x^2 + \dots + a_nx^n, \quad (7)$$

Застосування обраного методу апроксимації дозволяє оцінити якість отриманих апроксимацій (формула 8) та визначити, чи знайдена оптимальна модель. Якщо модель вважається оптимальною, обирається результуючий ряд для подальшого аналізу:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_i (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_i (y_i - \bar{y}_i)^2} = 1 - \frac{SSE}{SST}, \quad (8)$$

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:

$$SSE = \sum_i (y_i - \hat{y}_i)^2, \quad (9)$$

Для прогнозування стану системи спочатку встановлюється глибина прогнозування і прогнозний часовий проміжок. Після цього застосовується модель для прогнозування, оцінюється достовірність прогнозу (формули 10 – 13) та формується звіт прогнозу. У разі виявлення недостовірності прогнозу проводиться корекція моделі та повторний аналіз.

За m кроків прогнозування розраховуються такі показники точності прогнозів: середня квадратична похибка (формула 10), корінь із середньоквадратичної похибки (формула 11), середня абсолютна похибка (формула 12), середня абсолютна похибка у відсотках (формула 13):

$$MSE = \frac{\sum_{i=n-m+1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{m}, \quad (10)$$

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

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

$$MAPE = \sum_{i=n-m+1}^n \frac{100 \cdot |y_i - \hat{y}_i|}{m|y_i|}, \quad (13)$$

Якість прогнозу тим вища, чим менше значення величин обчислених за формулами (10 – 13). 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.

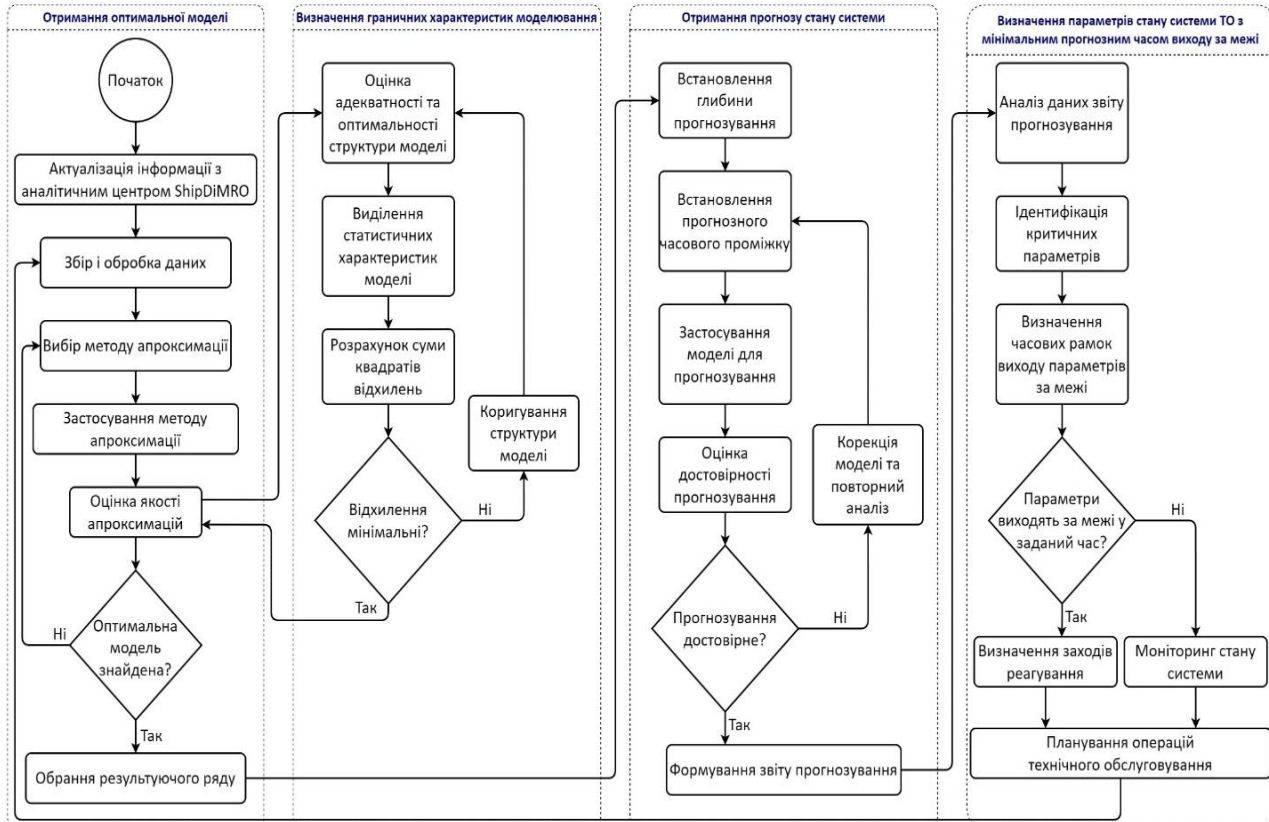


Рис. 3. Блок-схема алгоритму інформаційної системи оцінювання способів підвищення ефективності системи технічного обслуговування з можливістю прогнозування показників ефективності системи технічного обслуговування та параметрів технічного стану суднових технічних засобів і конструкцій в умовах експлуатації

Алгоритм (рис. 3) забезпечує комплексний підхід до оцінювання ефективності системи технічного обслуговування та прогнозування стану технічних засобів, враховуючи поточні тенденції та можливі майбутні зміни.

Висновки

З урахуванням вище зазначених розроблених блок-схем алгоритмів, можна сформулювати такі висновки:

1. Розроблено алгоритм збору даних про параметри системи технічного обслуговування та технічного стану суднових технічних засобів і конструкцій в межах комплексної системи прескриптивного технічного обслуговування.

2. Створено алгоритм моніторингу і визначення статусу несправностей системи технічного обслуговування вантажного судна в межах комплексної системи прескриптивного технічного обслуговування.

3. Представлена блок-схема алгоритму інформаційної системи оцінювання способів підвищення ефективності системи технічного обслуговування з можливістю прогнозування показників ефективності системи технічного обслуговування та параметрів технічного стану суднових технічних засобів і конструкцій в умовах експлуатації.

В цілому, стаття акцентує увагу на необхідності розробки та впровадження комплексних, автоматизованих систем моніторингу для оцінки ефективності технічного обслуговування вантажних суден.

Використання інформаційно-комунікаційних технологій є ключовим для підтримки надійності та ефективності у сфері обслуговування суден.

Стаття підкреслює важливість систематичного підходу, що включає використання оперативних даних та передових аналітичних методів, для покращення процесів обслуговування, забезпечуючи сталу продуктивність та безпеку в морських операціях.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Igder, M., Rafiei, M., Boudjadar, J., & Khooban, M. (2021). Reliability and Safety Improvement of Emission-Free Ships: Systemic Reliability-Centered Maintenance. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 7, 256-266. <https://doi.org/10.1109/TTE.2020.3030082>.
2. Bayer, D., Aydin, O., & Çelik, M. (2018). AN ICOR APPROACH TOWARDS SHIP MAINTENANCE SOFTWARE DEVELOPMENT. *International Journal of Maritime Engineering*. <https://doi.org/10.3940/RINA.IJME.2018.A1.444>.
3. Anantharaman, M., Khan, F., Garaniya, V., & Lewarn, B. (2014). A Step by Step Approach for Evaluating the Reliability of the Main Engine Lube Oil System for a Ship's Propulsion System. *TransNav: International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, 8, 367-371. <https://doi.org/10.12716/1001.08.03.06>.
4. Prioretti, M., & Tobin, E. (2008). Automating the Surface Force Tank and Void Assessment Process. *Naval Engineers Journal*, 120, 53-60. <https://doi.org/10.1111/J.1559-3584.2008.00123.X>.
5. Sun, C., Wang, H., Liu, C., & Zhao, Y. (2020). Real Time Energy Efficiency Operational Indicator (EEOI): Simulation Research from the Perspective of Life Cycle Assessment. *Journal of Physics: Conference Series*, 1626. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1626/1/012060>.
6. Radonjić, A. (2011). Strategy to reduce pollution from Serbian pushboats. *International Journal for Traffic and Transport Engineering*, 1.
7. Hein, K., Xu, Y., Wilson, G., & Gupta, A. (2020). Condition-based Optimal Maintenance and Energy Management of All-electric Ships. *IECON 2020 The 46th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, 3767-3772. <https://doi.org/10.1109/IECON43393.2020.9254842>.
8. Mo, B., Dehli, P., Steinebach, C., Lim, T., & Perera, L. (2017). Automated System for Fleet Benchmarking and Assessment of Technical Condition. <https://doi.org/10.1115/OMAE2017-61219>.
9. Anantharaman, M., Islam, R., Khan, F., G., & Lewarn, B. (2019). Data Analysis to Evaluate Reliability of a Main Engine. *TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*. <https://doi.org/10.12716/1001.13.02.18>.
10. Bukša, A., Šegulja, I., & Tomas, V. (2010). Adjustment of Maintenance Approach for Improved Operability and Safety of Ship Navigation. *Promet-traffic & Transportation*, 22, 95-103. <https://doi.org/10.7307/PTT.V22I2.168>.

Received (Надійшла) 23.11.2023

Accepted for publication (Прийнята до друку) 31.01.2024

Features of evaluating the efficiency of cargo vessel maintenance systems

Andrii Golovan

Abstract. The article deals with the important issue of assessing the efficiency of cargo ship maintenance systems. Analysis of recent research and publications in this area indicates the need to assess the efficiency of cargo ship maintenance. The purpose of the article is to develop and form algorithms for an information system for monitoring the efficiency of cargo ship maintenance indicators for use in an information system for assessing ways to improve the efficiency of maintenance. The results of the article include flowcharts of the algorithms for: collecting data on the parameters of the maintenance system and the technical condition of ship's equipment and structures, monitoring and determining the status of faults and evaluating ways to improve the efficiency of the maintenance system with the possibility of forecasting the efficiency of the maintenance system. The conclusions emphasize the importance of analyzing operational data, using information and communication technologies and a systematic approach to evaluating ways to improve efficiency in order to ensure the reliability and efficiency of cargo ship maintenance.

Keywords: maintenance, cargo ships, efficiency, forecasting, analysis.