СУДНОВОДІННЯ ТА ЕНЕРГЕТИКА СУДЕН

УДК 629.5.078:656.075 doi.org/10.33298/2226-8553.2023.1.37.12

Головань А.І.

КОНЦЕПТУАЛЬНА МОДЕЛЬ ПЛАНУВАННЯ ТА ОПТИМІЗАЦІЇ ГРАФІКІВ ТЕХНІЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ ВАНТАЖНИХ СУДЕН

Сучасний світ вимагає постійного розвитку та вдосконалення технічних засобів, особливо в сфері морського транспорту. Вантажні судна є важливою складовою глобальної торговельної системи, а тому актуальність дослідження технічного стану суднових технічних засобів не викликає сумнівів. Результати таких досліджень можуть мати значне практичне значення, оскільки вони сприяють підвищенню ефективності та безпеки морського транспорту.

Хоча існує багато досліджень, присвячених технічному обслуговуванню суден, багато аспектів цієї теми залишаються недостатньо дослідженими. Наприклад, вплив різних методів технічного обслуговування на ефективність судноплавства є темою, яка потребує подальшого дослідження. Аналіз наукової літератури з цієї теми вказує на існування проблеми відсутності достатньо ефективних методів моделювання процесів зміни технічного стану суднових технічних засобів, тому ця проблема є актуальною і потребує подальшого наукового дослідження.

У статті визначено, що задачі прогнозування та планування технічного обслуговування вантажних суден можуть бути ефективно вирішені за допомогою аналітичних та статистичних моделей, зокрема Марківських моделей, які дозволяють моделювати процеси зносу та пошкоджень.

У статті проведено порівняльний аналіз аналітичних та статистичних моделей, що використовуються для моделювання процесів зміни технічного стану суднових технічних засобів вантажних суден. Особлива увага приділена Марківським моделям, які виявилися особливо корисними для моделювання процесів зносу та пошкоджень.

Досліджено важливість розгляду вантажного судна як складного об'єкта, що включає різні конструктивні компоненти та системи, що його обслуговують. Визначено, що врахування цих факторів може допомогти в плануванні та оптимізації технічного обслуговування, підвищуючи тим самим надійність суден і знижуючи загальні витрати на експлуатацію.

Ключові слова*: моделювання, технічний стан, вантажні судна, аналітичні моделі, статистичні моделі, Марківські моделі, технічне обслуговування.*

Постановка проблеми. Стаття висвітлює проблему моделювання процесів зміни технічного стану суднових технічних засобів вантажних суден. Це важливе питання, оскільки ефективність та безпека морського транспорту в значній мірі залежать від технічного стану суден. Неадекватне або неправильне моделювання цих процесів може призвести до неправильного обслуговування або ремонту суден, що, у свою чергу, може призвести до аварій та інших небезпечних ситуацій.

У контексті наукових завдань, стаття спрямована на розробку нових або вдосконалення існуючих математичних моделей для опису процесів зміни технічного стану суднових технічних засобів. Це може включати вивчення різних факторів, які впливають на ці процеси, та розробку методів для їх кількісної оцінки.

З практичної точки зору, результати цієї роботи можуть бути використані для покращення процедур обслуговування та ремонту суден, а також для планування та оптимізації їх експлуатації.

Крім того, вони можуть допомогти в управлінні ризиками, пов'язаними з технічним станом суден, та в підвищенні загальної безпеки морського транспорту.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В цілому, аналіз останніх досліджень і публікацій вказує на важливість використання аналітичних та статистичних моделей для моделювання процесів зміни технічного стану вантажних суден [1]. Це може допомогти в плануванні та оптимізації технічного обслуговування [2], підвищуючи тим самим надійність суден і знижуючи загальні витрати на експлуатацію [3]. Використання Марківських моделей, зокрема, може допомогти в плануванні та оптимізації графіка обслуговування, передбачення потреби в ремонті та заміні компонентів [4]. Вони дозволяють моделювати процеси зносу та пошкоджень, які є відмінними властивостями експлуатації вантажних суден [5]. Також аналіз вказує на важливість розгляду вантажного судна як складного об'єкта, що включає різні конструктивні компоненти та системи, що його обслуговують [6]. Кожний з цих компонентів і систем може перебувати в різних станах (робочий, неробочий - виконання позапланового ТО, виконання запланованого ТО), що впливає на загальний технічний стан судна [7].

Врахування цих факторів може допомогти в плануванні та оптимізації технічного обслуговування, підвищуючи тим самим надійність суден і знижуючи загальні витрати на експлуатацію.

Мета дослідження полягає в розробці ефективних методів та моделей для планування та оптимізації технічного обслуговування вантажних суден, що допоможуть збільшити надійність суден і знизити загальні витрати на експлуатацію.

Основні результати дослідження. Основою моделей, що описують закономірності зміни технічного стану, є моделі закономірностей розвитку та накопичення пошкоджень. У цьому контексті використовуються аналітичні та статистичні моделі.

З традиційної практики, аналітичні моделі використовуються на етапі розробки нових технологій обробки, створення та дослідження матеріалів, що беруть участь в процесі зносу, виявлення причин незадовільних експлуатаційних якостей тощо.

Аналітичні моделі представляють собою найбільш строго обґрунтований опис процесів зносу і відрізняються повнотою врахування факторів. При цьому широко використовуються експериментальні дані, а також експлуатаційні дані про знос. Однак, з їх допомогою досить складно моделювати випадкові експлуатаційні фактори, що діють в інтервалі між технічним обслуговуванням суднових технічних засобів.

У контексті технічного обслуговування вантажних суден, ці моделі можуть бути застосовані для прогнозування технічного стану судна, включаючи різні складові, такі як двигуни, корпус, рушій, навігаційне обладнання, енергетичне обладнання, тощо. Особливість цього сектора полягає у тому, що випадкові експлуатаційні фактори можуть включати різноманітні умови моря, навантаження, погодні умови та інші фактори, які впливають на стан судна та його технічних засобів між плановими технічними обслуговуваннями.

Іншим напрямком у моделюванні процесів зміни технічного стану є використання статистичних моделей. Базуючись на них, було побудовано теорію масового обслуговування [8], що дозволяє розв’язувати задачі прогнозування потреби у технічному обслуговуванні на основі статистичних даних, не заглиблюючись в сутність фізичних процесів. Найбільшого поширення набули Марківські моделі, які можуть допомогти в плануванні та оптимізації графіка обслуговування, передбачення потреби в ремонті та заміні компонентів. Статистичні моделі, особливо Марківські, виявляються корисними, оскільки вони можуть моделювати процеси зносу та пошкоджень, які є відмінними властивостями експлуатації вантажних суден.

Марківські моделі займають особливе місце в сучасному теоретичному підході до моделювання процесів технічного обслуговування та експлуатації вантажних суден. Завдяки своїм властивостям з урахуванням випадковості та непередбачуваності, вони стають незамінними в інструментах прогнозування та планування.

Основне припущення Марківського процесу полягає у тому, що майбутній стан системи залежить виключно від поточного стану, а не від шляху, яким було досягнуто цього стану. У контексті технічного обслуговування вантажних суден, це може бути інтерпретовано так, що поточний стан судна (наприклад, рівень зносу чи пошкоджень компонентів) впливає на його майбутній стан.

Марківські моделі можуть використовуватися для моделювання широкого спектра сценаріїв, включаючи динаміку зносу суднових технічних засобів, імовірності виникнення дефектів або несправностей, імовірність необхідності проведення певного виду технічного обслуговування та багато іншого. Це може служити основою для ефективного планування та оптимізації технічного обслуговування, підвищуючи тим самим надійність суден і знижуючи загальні витрати на експлуатацію.

Основа використання цього методу полягає в уявленні процесу зміни технічного стану вантажного судна як випадкового [9]. Можливі стани об'єкта представляються у вигляді графа, вершинами якого є стани з імовірностями перебування у них P_i, а стрілки вказують напрямки можливих переходів з відповідними інтенсивностями λ_{ij}.

Найбільшого поширення набули однорідні Марківські моделі, коли інтенсивність переходу λ_{ij} не залежить від інтервалу часу Δt і від того, в який момент часу t на осі часу починається цей елементарний відрізок. Вказана задача зводиться до вирішення системи рівнянь Чепмена-Колмогорова при постійних інтенсивностях переходу $\lambda_{ij} = const$ (однорідний процес) або зі змінними інтенсивностями $\lambda_{ij} = f(t)$ (неоднорідний процес). Описаний підхід може бути використаний для аналізу та прогнозування різних сценаріїв технічного обслуговування судна, включаючи динаміку зносу технічних засобів, частоту та тривалість ремонтних робіт, а також можливості для планування технічного обслуговування та мінімізації простоїв судна.

Для обчислення комплексних показників надійності складного об'єкта, який складається з багатьох компонентів, у яких відбуваються різні процеси зміни технічного стану, потрібно виділити принаймні три основних стани:

1. Робочий, 2. Неробочий - виконання позапланового ТО, 3. Виконання запланованого ТО.

Причому в цих станах може перебувати кожна конструктивна компонента складного об'єкта і системи.

Складний об'єкт, наприклад, головний двигун вантажного судна, може розглядатися як об'єкт, який забезпечує виконання основної функції - надання судну руху з заданими показниками. Ця функція підтримується робочим станом компонентів конструкції самого двигуна, а також робочим станом систем, що його обслуговують. Кожна з компонент конструкції підлягає запланованому ТО і може підлягати позаплановому ТО у випадку відмови. Точно так само, кожна з систем і їх компонентів може підлягати запланованим і позаплановим видам ТО.

Якщо відомі інтенсивності відмов компонентів і систем, інтенсивності їх відновлення, інтенсивності запланованих ТО і виконання запланованих ТО, можуть бути визначені комплексні показники надійності з рівнянь Чепмена-Колмогорова.

Інтенсивності відмов і запланованих ТО, а також відновлення і виконання запланованих ТО залежать від конфігурації системи ТО, а також від властивостей самого об'єкта і характеру процесів, що в ньому відбуваються. Це може стати основою для детального планування та оптимізації технічного обслуговування вантажного судна.

Наприклад, головний двигун вантажного судна може розглядатися як об'єкт, що складається з наступних конструктивних компонентів:

A. Остов, фундаментна рама, кріплення до суднового фундаменту.

B. Кришка циліндра з компонентами. C. Колінчастий вал, упорний підшипник та підшипники рами. D. Шатун із підшипниками.

E. Поршень із штоком, сальник штока. F. Втулки циліндрів.

G. Крейцкопф, підшипники крейцкопфа, паралелі.

H. Привід розподільчого валу (для двигунів з традиційними механічними системами управління).

I. Розподільчий вал із підшипниками (для двигунів з традиційними механічними системами управління).

J. Привід газорозподільчих органів (для двигунів з традиційними механічними системами управління).

K. Електронні контролери подачі палива і управління клапанами (для двигунів з електронною подачею палива та електронним газорозподілом).

L. Вихлопні клапани. M. Демпфер.

Щодо систем, що обслуговують двигун, можна виділити наступні:

A. Система управління, запуску та реверсу. B. Система подачі повітря.

C. Паливна система. D. Система циркуляційного змащування.

E. Система змащування циліндрів. F. Система охолодження.

G. Система контролю. H. Дренажна система.

I. Система вентиляції картера. J. Вихлопна система.

В свою чергу, кожна система розглядається як сукупність різноманітних компонентів. Інтенсивності відмов у результаті виконання незалежних процесів можуть вважатися сумами інтенсивностей відмов за відповідними видами та причинами. Інтенсивності відмов складних компонентів можуть розглядатися через відповідні коефіцієнти відмов.

Позначимо індексом i - поточний стан, яких може бути загалом $2(M+N)$, де M - кількість вузлів, що підлягають ТО та беруть участь у розрахунку, N - кількість систем двигуна, що підлягають ТО. Множник “2” означає, що різновид ТО може бути як плановим, так і позаплановим. Лише один стан відповідає робочому стану головного дизеля і його систем, тому загальна кількість станів складає $2(M+N)+1$.

Цей підхід дозволяє враховувати різні стани технічного стану і складності системи технічного обслуговування вантажного судна, що включає численні компоненти і системи. Залежно від конкретних умов, різні компоненти і системи можуть мати різні відмови і рівні надійності, що слід враховувати при плануванні та проведенні технічного обслуговування. На Рис. 1 представлено граф можливих станів головного двигуна, що використовується для розрахунку комплексних показників надійності. Стан S є працездатним.

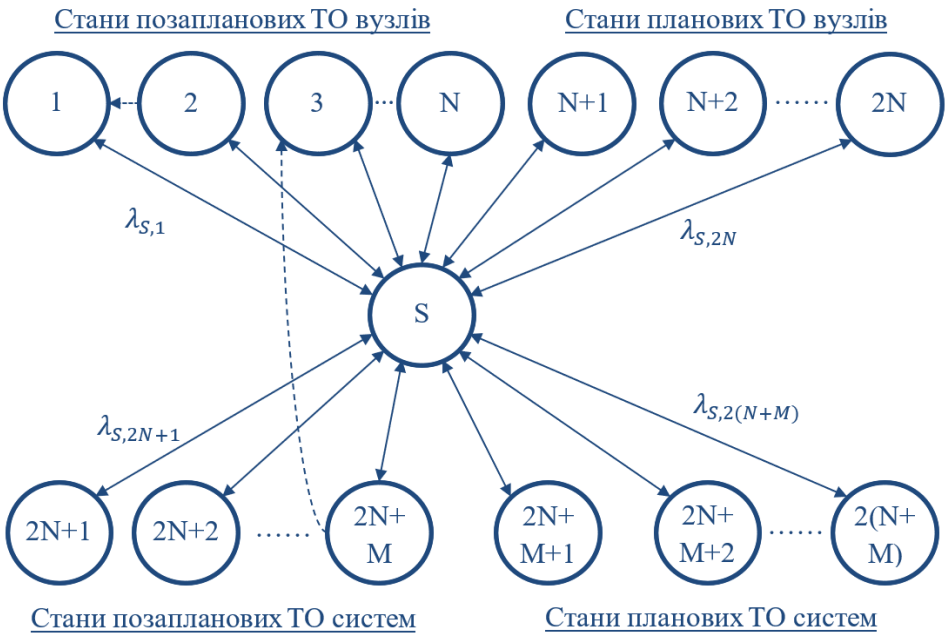

Рисунок 1 - Граф станів суднового технічного засобу (на прикладі головного двигуна)

При $i = 1, 2, \dots N$ маємо місце непланові ТО внаслідок відмови вузла, $i = (N+1), (N+2), \dots (2N)$ - планові ТО вузла. При $i = (2N+1), (2N+2), \dots (2N+M)$ - позапланові ТО системи внаслідок відмови, а при $i = (2N+M+1), (2N+M+2), \dots 2(N+M)$ - планові ТО системи. Система рівнянь для розрахунку значень ймовірностей відповідних станів визначається розв'язанням системи рівнянь Чепмена-Колмогорова (рівняння 1).

Така модель дозволяє детально враховувати окремі можливі стани головного двигуна в рамках технічного обслуговування вантажного судна. Це забезпечує більш точний і деталізований аналіз надійності, враховуючи різні види ТО - як планові, так і непланові, для різних вузлів та систем. Система рівнянь Чепмена-Колмогорова, використана в цьому контексті, дозволяє обчислити ймовірності перебування в різних станах на основі інтенсивностей переходів між ними.

$$\begin{cases} \dfrac{dP_1(t)}{dt} = -\mu_{1,S} \cdot P_1(t) + \lambda_{S,1} \cdot P_S(t) \\ \dfrac{dP_2(t)}{dt} = -\mu_{2,S} \cdot P_2(t) + \lambda_{S,2} \cdot P_S(t) \\ \dots\ \dots\ \dots\ \dots\ \dots \\ \dfrac{dP_i(t)}{dt} = -\mu_{i,S} \cdot P_i(t) + \lambda_{S,i} \cdot P_S(t) \\ \dfrac{dP_S(t)}{dt} = \sum\limits_{i=1}^{M+N} \mu_{i,S} \cdot P_i(t) - P_S(t) \sum\limits_{i=1}^{M+N} \lambda_{S,i} \end{cases} \quad (1)$$

У випадку, коли встановлено зв'язок відмови вузла або системи з відмовами інших вузлів та систем, система рівнянь ускладняється через появу додаткових членів, що враховують інтенсивність зв'язаних відмов.

$$\begin{cases} \dfrac{dP_1(t)}{dt} = -\mu_{1,S} \cdot P_1(t) + \lambda_{S,1} \cdot P_S(t) + \lambda_{2,1} \cdot P_2(t) \\ \dfrac{dP_2(t)}{dt} = -\mu_{2,S} \cdot P_2(t) + \lambda_{S,2} \cdot P_S(t) - \lambda_{2,1} \cdot P_2(t) \\ \dfrac{dP_3(t)}{dt} = -\mu_{3,S} \cdot P_3(t) + \lambda_{S,3} \cdot P_S(t) + \lambda_{(2N+3),3} \cdot P_{2N+3}(t) \\ \dots\ \dots\ \dots\ \dots\ \dots \\ \dfrac{dP_{2N+3}(t)}{dt} = -\mu_{(2N+3),S} \cdot P_{2N+3}(t) + \lambda_{S,3} \cdot P_S(t) - \lambda_{(2N+3),3} \cdot P_{2N+3}(t) \\ \dots\ \dots\ \dots\ \dots\ \dots \\ \dfrac{dP_i(t)}{dt} = -\mu_{i,S} \cdot P_i(t) + \lambda_{S,i} \cdot P_S(t) \\ \dfrac{dP_S(t)}{dt} = \sum\limits_{i=1}^{M+N} \mu_{i,S} \cdot P_i(t) - P_S(t) \sum\limits_{i=1}^{M+N} \lambda_{S,i} \end{cases} \quad (2)$$

Наприклад, якщо відмова вузла 2 призводить до відмови вузла 1, і відмова системи M призводить до відмови вузла 3, то система рівнянь (1) набуває форми (2).

Прикладами таких зв'язків відмов можуть бути відмови підшипників шатунів через пошкодження теплообмінника і відмови системи змащування. Іншим прикладом може бути відмова системи охолодження, що веде до перегріву двигуна і можливої відмови циліндрів або підшипників. Або, наприклад, відмова системи живлення, яка може призвести до збою в системі управління, що, в свою чергу, може призвести до відмови двигуна.

Числове розв'язання цієї істотно розрідженої системи диференціальних рівнянь навіть при змінних у часі інтенсивностях відмов не представляє суттєвих ускладнень. Основною проблемою є збір надійних експлуатаційних даних та визначення інтенсивностей відмов та відновлень.

Як правило, на практиці, відсутня вибірка необхідних параметрів. Навіть при наявності значної кількості відмов, вимагається, щоб ці відмови, будучи розбиті за видами, вузлами, системами тощо, представляли репрезентативну вибірку. Зазвичай це нереально. Отже, було б значущим кроком вперед вирішити цю задачу визначення інтенсивностей відмов та відновлень за допомогою експлуатаційних звітних даних, які включають закономірності зміни технічного стану. Одним з шляхів вирішення цієї задачі є методологія, заснована на цифрових двійниках і аналізу даних в реальному часі [10].

Для опису процесів зміни технічного стану також може бути застосований цей самий метод Марківських процесів. При цьому заздалегідь повинна бути сформована система можливих станів на шляху від робочого стану після технічного обслуговування або виробництва до планового ТО або відмови. Основною особливістю цих станів є те, що самостійно, без проведення технічного обслуговування, об'єкт не може покращити технічний стан.

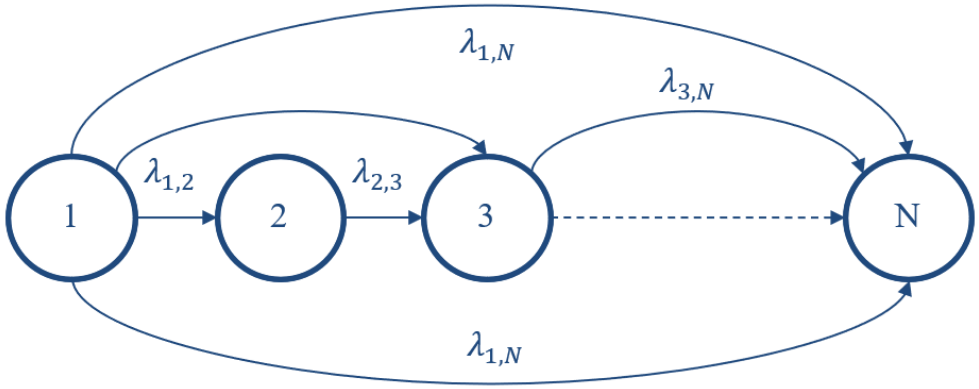

Рисунок 2 - Граф зміни технічного стану

При деградації технічного стану він може переходити з категорії в категорію з різною швидкістю, що може, зокрема, виражатися в переході в іншу категорію, минаючи проміжну категорію. На Рисунку 2 представлено умовний граф зміни технічного стану.

Система рівнянь, що описує динаміку зміни технічних станів, може бути представлена у вигляді (3). Так само, як і в попередньому випадку, основна проблема полягає в отриманні необхідної інформації про фактичні значення інтенсивностей переходу з одного стану в інший (λ).

$$\begin{cases} \dfrac{dP_1(t)}{dt} = -\left(\lambda_{1,2} + \lambda_{1,3} + \cdots + \lambda_{1,N}\right) \cdot P_1(t) \\ \dfrac{dP_2(t)}{dt} = \lambda_{1,2} \cdot P_1(t) - \left(\lambda_{2,3} + \cdots + \lambda_{2,N}\right) \cdot P_2(t) \\ \dfrac{dP_3(t)}{dt} = \lambda_{1,3} \cdot P_1(t) + \lambda_{2,3} \cdot P_2(t) - \left(\lambda_{3,4} + \cdots + \lambda_{3,N}\right) \cdot P_3(t) \\ \cdots \cdots \cdots \cdots \cdots \\ \dfrac{dP_N(t)}{dt} = \lambda_{1,N} \cdot P_1(t) + \lambda_{2,N} \cdot P_2(t) + \cdots + \lambda_{1N-1,N} \cdot P_{N-1}(t) \end{cases} \quad (3)$$

Кількість проміжних станів між початковим (1) і кінцевим (N) є тим більшою, чим більше кількість ділянок з особливостями зміни технічного стану потрібно виділити. А проблема наявності достатньої статистичної інформації загострюється зі збільшенням числа можливих станів що потрібно виділити. Тому найчастіше задачу вирішують виділенням двох станів (робочого і неробочого).

Іншим суттєвим недоліком цього методу є складність обліку властивостей планово-попереджувальної системи технічного обслуговування. Якщо для регламентованого методу

технічного обслуговування принципової складності не виникає, то для методів технічного обслуговування за станом (з виконанням прогнозу і адаптацією періодичності виявленому стану), а тим більше комбінованих методів технічного обслуговування, побудова алгоритму функціонування об'єднаної моделі об'єкт-система технічного обслуговування стає складною задачею.

Разом з тим Марківські моделі можуть бути використані для дослідження об’єкта в цілому, що має кінцеву кількість елементів, видів відмов елементів і систему технічного обслуговування. Система технічного обслуговування налаштована на попередження відмов певного виду (за результатами аналізу критичності), роботи за технічним обслуговуванням об’єднуються в комплекси. Відповідно кожен комплекс, налаштований на попередження найбільш критичних відмов автоматично забезпечує попередження інших з кінцевою ефективністю.

В змішаній моделі інтенсивності переходу з різних станів можуть бути отримані через величини інтенсивностей зношування, таким чином дозволяючи об'єднати фізичну модель з Марківською чи напівмарківською.

Висновки. Основні висновки дослідження включають:

1. В результаті проведеного дослідження була розроблена нова модель для моделювання процесів зміни технічного стану суднових технічних засобів вантажних суден. Ця модель дозволяє більш точно прогнозувати зміни в технічному стані суднових технічних засобів, що сприяє підвищенню ефективності та безпеки морського транспорту.

2. Отримані результати можуть бути пояснені застосуванням сучасних методів моделювання та аналізу даних. Використання цих методів дозволило виявити нові закономірності в процесах зміни технічного стану суднових технічних засобів.

3. Результати цього дослідження можуть бути корисними як в теоретичному, так і в практичному аспектах. З теоретичної точки зору, вони сприяють розвитку наукових знань в області моделювання технічних процесів. З практичної точки зору, вони можуть бути використані для підвищення ефективності та безпеки вантажних суден.

В цілому, дослідження вказує на важливість використання аналітичних та статистичних моделей для моделювання процесів зміни технічного стану вантажних суден. Це може допомогти в плануванні та оптимізації технічного обслуговування, підвищуючи тим самим надійність суден і знижуючи загальні витрати на експлуатацію.

ЛІТЕРАТУРА

1. Lazakis, I., Raptodimos, Y., & Varelas, T. (2017). Predicting ship machinery system condition through analytical reliability tools and artificial neural networks. *Ocean Engineering*, *152*, 404–415. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2017.11.017

2. Oikonomou, S., Lazakis, I., & Papadakis, G. (2019). An Innovative Machine Learning System for Real Time Condition Monitoring of Ship Machinery. In *Lecture notes in civil engineering*. Springer Nature. https://doi.org/10.1007/978-981-15-4672-3_47

3. Dynamic reliability analysis tool for ship machinery maintenance. (2015). In *CRC Press eBooks* (pp. 639–646). https://doi.org/10.1201/b18855-83

4. Verma, A. K., Srividya, A., Ramesh, P. G., Deshpande, A., & Sadiq, R. (2016). Expert Knowledge Base in Integrated Maintenance Models for Engineering Plants. In *Studies in fuzziness and soft computing*. Springer Nature. https://doi.org/10.1007/978-3-319-32229-2_36

5. Tan, A., Kim, Y., & Kosse, V. (2008). Condition monitoring of low-speed bearings — a review. *Australian Journal of Mechanical Engineering*, *6*(1), 61–68. https://doi.org/10.1080/14484846.2008.11464558

6. Michala, A. L., & Lazakis, I. (2016). Ship machinery and equipment wireless condition monitoring system. In *University of Strathclyde Publishing eBooks* (pp. 63–69). http://eprints.gla.ac.uk/138003/

7. Dimopoulos, G., Georgopoulou, C., & Stefanatos, J. (2019). Advanced Ship Machinery Modeling and Simulation. In *Springer eBooks* (pp. 433–464). https://doi.org/10.1007/978-3-030-02810-7_14

8. Zhang, Y., Ren, S., Liu, Y., & Si, S. (2017). A big data analytics architecture for cleaner manufacturing and maintenance processes of complex products. *Journal of Cleaner Production*, *142*, 626–641. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.07.123

9. Alhouli, Y. (2011). Development of Ship Maintenance Performance Measurement Framework to Assess the Decision Making Process to Optimise in Ship Maintenance Planning. In *[Thesis]. Manchester, UK: The University of Manchester; 2011*. https://ethos.bl. uk/ OrderDetails.do?uin=uk.bl.ethos.532215

10. Головань, А. (2023). Розроблення систем інформаційного забезпечення підтримки технічної придатності суден торгового флоту України на основі цифрових двійників і аналізу даних в реальному часі (0123U102159). https://nddkr.ukrintei.ua/view/rk /d1025734d23 e9a0005f89ffa7dc9a215

REFERENCES

1. Lazakis, I., Raptodimos, Y., & Varelas, T. (2017). Predicting ship machinery system condition through analytical reliability tools and artificial neural networks. *Ocean Engineering*, *152*, 404–415. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2017.11.017

2. Oikonomou, S., Lazakis, I., & Papadakis, G. (2019). An Innovative Machine Learning System for Real Time Condition Monitoring of Ship Machinery. In *Lecture notes in civil engineering*. Springer Nature. https://doi.org/10.1007/978-981-15-4672-3_47

3. Dynamic reliability analysis tool for ship machinery maintenance. (2015). In *CRC Press eBooks* (pp. 639–646). https://doi.org/10.1201/b18855-83

4. Verma, A. K., Srividya, A., Ramesh, P. G., Deshpande, A., & Sadiq, R. (2016). Expert Knowledge Base in Integrated Maintenance Models for Engineering Plants. In *Studies in fuzziness and soft computing*. Springer Nature. https://doi.org/10.1007/978-3-319-32229-2_36

5. Tan, A., Kim, Y., & Kosse, V. (2008). Condition monitoring of low-speed bearings — a review. *Australian Journal of Mechanical Engineering*, *6*(1), 61–68. https://doi.org/10.1080/14484846.2008.11464558

6. Michala, A. L., & Lazakis, I. (2016). Ship machinery and equipment wireless condition monitoring system. In *University of Strathclyde Publishing eBooks* (pp. 63–69). http://eprints.gla.ac.uk/138003/

7. Dimopoulos, G., Georgopoulou, C., & Stefanatos, J. (2019). Advanced Ship Machinery Modeling and Simulation. In *Springer eBooks* (pp. 433–464). https://doi.org/10.1007/978-3-030-02810-7_14

8. Zhang, Y., Ren, S., Liu, Y., & Si, S. (2017). A big data analytics architecture for cleaner manufacturing and maintenance processes of complex products. *Journal of Cleaner Production*, *142*, 626–641. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.07.123

9. Alhouli, Y. (2011). Development of Ship Maintenance Performance Measurement Framework to Assess the Decision Making Process to Optimise in Ship Maintenance Planning. In *[Thesis]. Manchester, UK: The University of Manchester; 2011*. https://ethos.bl.uk /OrderDetails.do?uin=uk.bl.ethos.532215

10. Golovan, A. (2023). Development of information support systems for maintaining the technical serviceability of Ukrainian merchant ships based on digital twins and real-time data analysis [Rozroblennia system informatsiinoho zabezpechennia pidtrymky tekhnichnoi prydatnosti suden torhovoho flotu Ukrainy na osnovi tsyfrovykh dviinykiv i analizu danykh v realnomu chasi] (0123U102159). https://nddkr.ukrintei.ua/view/rk/d1025734d23e9a0005f89ffa7dc9a215 [in Ukrainian]

Golovan A.I.

CONCEPTUAL MODEL OF PLANNING AND OPTIMIZATION OF CARGO VESSEL MAINTENANCE SCHEDULES

The modern world requires continuous development and improvement of technical means, especially in the field of maritime transport. Cargo ships are an important part of the world trade system, and therefore the importance of research into the technical condition of shipboard equipment is undeniable. The results of such studies can be of considerable practical importance in improving the efficiency and safety of maritime transport.

Although there is a large body of research on ship maintenance, many aspects of this topic remain under-researched. For example, the impact of different maintenance methods on shipping efficiency is a topic that requires further research. An analysis of the scientific literature on this topic indicates that there is a problem of lack of sufficiently effective methods for modeling the processes of changing the technical condition of the ship's technical means, so this problem is relevant and requires further scientific research.

The article states that the tasks of forecasting and planning the maintenance of cargo ships can be effectively solved by analytical and statistical models, in particular, by Markov models, which allow modeling the processes of wear and damage.

The article provides a comparative analysis of analytical and statistical models used to model the processes of changes in the technical condition of on-board technical means of cargo ships. Special attention is paid to Markov models, which have proven to be particularly useful for modeling wear and damage processes.

The importance of considering a cargo ship as a complex object that includes various structural components and systems serving it is investigated. It is found that taking these factors into account can help to plan and optimize maintenance, thereby increasing ship reliability and reducing overall operating costs.

***Keywords**: modeling, technical condition, cargo ships, analytical models, statistical models, Markov models, maintenance.*