

УДК 629.5.078:656.075

DOI 10.47049/2226-1893-2023-3-71-83

ОСОБЛИВОСТІ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ЗМІНИ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ З СКЛАДОВОЮ ВИПАДКОВОСТІ

А.І. Головань

к.т.н., доцент кафедри судноводіння і морської безпеки

ORCID: 0000-0001-6589-4381

Одеський національний морський університет, м. Одеса, Україна

Анотація. В межах сучасних умов експлуатації вантажних суден, особливу актуальність набуває проблема підтримки та оптимізації технічного стану суднових технічних засобів. При цьому, одним з важливих аспектів є врахування випадкових факторів, які можуть впливати на ефективність та надійність суден. Це стає особливо актуальним, коли мова йде про великі вантажні судна, що роблять довгі рейси, де вірогідність випадкових пошкоджень чи відмов є високою. Представлена стаття присвячена дослідженню методів моделювання процесів зміни технічного стану суднових технічних засобів вантажних суден. Важливість теми обумовлена необхідністю прогнозування та планування технічного обслуговування суден, що включає різні складові, зокрема двигуни, корпус, рушій, навігаційне обладнання, енергетичне обладнання, та інші. Розглянуто аналітичні та статистичні методології моделювання, а також враховано випадкові експлуатаційні фактори, що діють в інтервалі між технічним обслуговуванням суднових технічних засобів. У статті визначено, що задачі моделювання процесів зміни технічного стану включають аналіз швидкості зміни технічного стану, яка відображає динаміку змін технічного стану засобів вантажного судна і є важливим індикатором для планування та проведення технічного обслуговування. У статті проведено порівняльний аналіз аналітичних та статистичних методологій моделювання, що використовуються для деталізації закономірностей варіативності технічного стану, формування моделей регулярностей еволюції та акумуляції пошкоджень. Досліджено вплив випадкових експлуатаційних факторів на процеси зміни технічного стану між технічним обслуговуванням суднових технічних засобів. Виявлено, що випадкові експлуатаційні фактори можуть охоплювати різні морські умови, навантаження, погодні умови та інші фактори, що впливають на стан судна та його технічних засобів між плановими технічними обслуговуваннями. Результати дослідження можуть бути використані для оптимізації графіка технічного обслуговування, заснованого на реальному стані суднових технічних засобів.

Ключові слова: моделювання, технічний стан, вантажні судна, технічне обслуговування, аналітичні моделі, статистичні методології, випадкові експлуатаційні фактори.

UDC 629.5.078:656.075

DOI 10.47049/2226-1893-2023-3-71-83

PECULIARITIES OF MODELING PROCESSES OF TECHNICAL CONDITION CHANGE WITH A COMPONENT OF RANDOMNESS

A.I. Golovan

Ph.D (Engineering), Associate Professor
Navigation and Maritime Safety department
ORCID: 0000-0001-6589-4381

Odesa National Maritime University, Odesa, Ukraine

Abstract. *Under the current conditions of cargo ships' operation, the problem of maintaining and optimizing the technical condition of ship's technical facilities is of relevance. At the same time, one of the important aspects is to consider random factors that may affect the efficiency and reliability of ships. This becomes especially relevant when it comes to large cargo ships making long voyages, where the probability of accidental damage or failure is high. The present article is devoted to the study of methods for modeling the processes of changes in the technical condition of shipboard technical equipment of cargo ships. The importance of the topic is due to the need to forecast and plan ship maintenance, which includes various components, including engines, hull, propulsion, navigation equipment, power equipment, etc. Analytical and statistical modeling methodologies are considered, and random operational factors acting in the interval between maintenance of ship's technical means are considered. The article determines that the tasks of modeling the processes of technical condition change include the analysis of the rate of change of technical condition, which reflects the dynamics of changes in the technical condition of cargo ship equipment and is an important indicator for planning and conducting maintenance. The article provides a comparative analysis of analytical and statistical modeling methodologies used to detail the patterns of technical condition variability, form models of regularities of evolution and accumulation of damage. The influence of random operational factors on the processes of technical condition change between maintenance of ship's technical means is investigated. It was found that random operational factors can cover various sea conditions, loads, weather conditions and other factors that affect the condition of the ship and its equipment between scheduled maintenance. The results of the study can be used to optimize the maintenance schedule based on the actual condition of the ship's equipment.*

Keywords: *modeling, technical condition, cargo ships, maintenance, analytical models, statistical methodologies, random operational factors.*

Вступ. Системний аналіз та моделювання процесів зміни технічного стану є важливими засобами для управління ризиками та підвищення ефективності експлуатації судна. Але, у більшості випадків, сучасні моделі не враховують комплекс випадкових факторів, що впливають на ці процеси. У зв'язку з цим, необхідно розробити нові методики та моделі, які б могли враховувати цю

випадковість і допомогти в підвищенні ефективності та надійності вантажних суден. Представлена стаття зосереджується на важливій проблемі моделювання процесів зміни технічного стану суднових технічних засобів вантажних суден з урахуванням випадковості.

Постановка проблеми в статті виходить з того, що традиційні аналітичні моделі, які використовуються для моделювання процесів зносу та пошкодження, не завжди ефективні для моделювання випадкових експлуатаційних факторів, що діють в інтервалі між технічним обслуговуванням суднових технічних засобів. Це питання має велике наукове та практичне значення, оскільки випадкові експлуатаційні фактори, такі як непередбачувані морські умови, навантаження, погодні умови та інші фактори, можуть суттєво впливати на стан судна та його технічних засобів між плановими технічними обслуговуваннями.

Автор пропонує новий підхід до моделювання цих процесів, який включає в себе випадкову складову в моделі зміни технічного стану. Це дозволяє більш точно описати реальні процеси зміни технічного стану та планувати технічне обслуговування на основі реального стану суднових технічних засобів, а не лише на основі стандартного регламенту. Ця робота має велике значення для практики управління технічним обслуговуванням вантажних суден, оскільки вона може допомогти в підвищенні ефективності технічного обслуговування та зниженні ризику відмови обладнання. Використання цієї моделі може дозволити операторам суден більш точно прогнозувати потреби в обслуговуванні та ремонті, що, в свою чергу, може знизити витрати на обслуговування та збільшити надійність суднового обладнання. Також це дослідження може стати основою для подальших наукових досліджень в області моделювання процесів зміни технічного стану суднових технічних засобів, включаючи розробку більш точних та ефективних моделей та методів для прогнозування та управління цими процесами.

Мета дослідження полягає у розробці та впровадженні нового підходу до моделювання процесів зміни технічного стану суднових технічних засобів вантажних суден. Вказана мета включає в себе аналіз та оцінку впливу різних випадкових експлуатаційних факторів на стан судна та його технічних засобів між плановими технічними обслуговуваннями, а також розробку методів та інструментів для прогнозування та управління цими процесами.

Аналіз останніх досліджень і публікацій вказує на важливість моделювання процесів зміни технічного стану суднових технічних засобів вантажних суден з урахуванням випадковості [1].

Аналітичні та статистичні методології моделювання використовуються для деталізації закономірностей варіативності технічного стану, що формуються на основі моделей регулярностей еволюції [2] та акумуляції пошкоджень [3]. Марківські моделі використовуються для моделювання процесів технічного обслуговування та експлуатації вантажних суден [4], завдяки своїм властивостям з урахуванням випадковості та непередбачуваності [5]. Швидкість зміни технічного стану може бути представлена як сума детермінованої складової та випадкової складової, що розподілена відносно математичного очікування за яким-небудь законом розподілу [6]. Застосування моделі, що враховує випадкову складову, дозволяє

більш точно прогнозувати технічний стан суднових технічних засобів та планувати технічне обслуговування на основі реального стану [7].

Проведений аналіз вказує на важливість подальших досліджень в цій області, зокрема, щодо вдосконалення моделей та методів для прогнозування та управління технічним станом суднових технічних засобів.

Виклад основного матеріалу. Основу механізмів, які деталізують закономірності варіативності технічного стану, формують моделі регулярностей еволюції та акумуляції пошкоджень. У цьому дискурсі застосовуються аналітичні та статистичні методології моделювання.

Відповідно до зазначеної традиції практики, аналітичні моделі використовуються в період концептуалізації нових технологій обробки, генерування та дослідницького аналізу матеріалів, які беруть участь в процесах зносу, виявлення елементів, що викликають незадовільні експлуатаційні характеристики, та інше.

Аналітичні моделі є найбільш суворо обґрунтованим представленням процесів зносу і характеризуються всебічним врахуванням факторів. При цьому вони залежать від експериментальних даних, а також експлуатаційних даних про зношення. Втім, вони не надто ефективні для моделювання випадкових експлуатаційних факторів, що діють в інтервалі між технічним обслуговуванням суднових технічних засобів.

У контексті технічного обслуговування вантажних суден, ці моделі можуть бути релевантні для прогнозування технічного стану судна, включаючи різні складові, зокрема двигуни, корпус, рушій, навігаційне обладнання, енергетичне обладнання, та інше. Специфічність цієї галузі полягає у тому, що випадкові експлуатаційні фактори можуть охоплювати різні морські умови, навантаження, погодні умови та інші фактори, що впливають на стан судна та його технічних засобів між плановими технічними обслуговуваннями.

У дослідженні [8] розглянуто Марківські моделі які 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.

Проте, інший варіант опису процесу зміни технічного стану, який, будучи спрямований на опис фізичного процесу, дозволяє використовувати практично всю інформацію про зміну технічного стану, що збирається в процесі виконання діагностики, технічного обслуговування та ремонту.

Процес зміни технічного стану може бути представлений у вигляді певної функції $F(t)$ і випадкової компоненти $\Delta(t)$

$$Y(t) = F(t) + \Delta(t) \quad (1)$$

Питання про походження випадкової компоненти при застосуванні традиційних методів теорії надійності, коли здійснюється відома обробка статистичного матеріалу, має значення лише на етапі класифікації відмов. При здійсненні управління ТО за регламентом, такий опис процесу зміни технічного стану повністю

виправданий. При застосуванні управління ТО за конкретною реалізацією процесу зміни технічного стану такий розгляд випадкової компоненти не виправданий, оскільки суттєво погіршує результат застосування ТО за станом. Справа в тому, що кожне проміжне визначення технічного стану в які-небудь моменти часу звужує область можливих станів, в які може перейти об'єкт у майбутньому. Це пояснюється тим, що закономірність зміни технічного стану є результатом певної швидкості зміни технічного стану, яка має певну нестабільність через ряд експлуатаційних та технологічних факторів. В кінцевому рахунку, отриманий розкид в технічному стані обумовлюється розкидом швидкості зміни технічного стану. Такий розгляд випадкової складової в процесі зміни технічного стану дозволяє описувати процес управління ТО не тільки за регламентом, але і для методів за станом і в більшій мірі, відповідає фізичному сенсу процесів, що відбувається.

При деталізованому аналізі процесу трансформації технічного стану протягом часу, функція швидкості зміни технічного стану $\gamma(t)$ відіграє ключову роль. Цей параметр відображає динаміку змін технічного стану засобів вантажного судна і є важливим індикатором для планування та проведення технічного обслуговування

$$\gamma(t) = \frac{dY(t)}{dt} \quad (2)$$

де $Y(t)$ – величина, що характеризує розмір пошкодження (збільшення зазору, величина відкладень, зменшення розміру деталі внаслідок зносу, розмір тріщини тощо) від часу t . Аналіз $\gamma(t)$ дозволяє виявити потенційні проблеми та відмови обладнання, а також оптимізувати графік технічного обслуговування, заснований на реальному стані суднових технічних засобів, а не лише на стандартному регламенті.

Знаючи функцію швидкості зміни технічного стану $\gamma(t)$ величину пошкодження в часі, визначають за формулою

$$Y(t) = \int_0^t \gamma(t) dt \quad (3)$$

Об'єктами технічного обслуговування та експлуатації є старіючі об'єкти, в яких відбуваються незворотні процеси, тому функція $Y(t)$ є монотонно зростаючою. Варто відзначити, що процеси накопичення розмірів пошкоджень є випадковими, а розгляд їх закономірності є не що інше, як математичне очікування даної випадкової функції. В загальному випадку з урахуванням випадкової компоненти швидкість зміни технічного стану може бути представлена як

$$\gamma(t) = \alpha(t) + \delta(\alpha) \quad (4)$$

де $\alpha(t)$ – детермінована складова швидкості зміни, а $\delta(\alpha)$ – випадкова складова, яка розподілена відносно математичного очікування $\alpha(t)$ за яким-небудь законом розподілу, наприклад, логнормальному або Вейбулла, причому в загальному випадку з непостійним коефіцієнтом варіації. Типові закономірності процесів зміни технічного стану без урахування випадкової компоненти представлені в роботі [9]. Найбільш поширені стаціонарні процеси, коли $\alpha(t) = \text{const}$ або коливається відносно середнього, це має місце при стабілізації факторів, що впливають на швидкість зміни технічного стану. Цей тип залежності характерний для процесів механічного зношування прироблених пар тертя, корозійного зношування, а знос як результат цього типу процесів змінюється лінійно. Якщо при накопиченні пошкоджень виникають фактори, що інтенсифікують процес або навпаки - сповільнюють, швидкість зміни починає монотонно змінюватися, і накопичення пошкоджень відбувається не лінійно в часі. Прикладом такого процесу може бути зношування пари тертя на останній стадії, коли в результаті збільшення зазорів змінюється характер навантаження пари тертя, що призводить до інтенсифікації зносу. У деяких випадках швидкість протікання зміни технічного стану має екстремум (деякі процеси корозійного руйнування та короблення), після досягнення якого швидкість накопичення пошкоджень падає, а процес накопичення пошкоджень припиняє наростати. Це іноді спостерігається в відливках, коли після певного періоду часу та перерозподілу напружень та деформацій короблення її припиняється. Аналогічна картина спостерігається в складних конструкціях, що мають прокладки та зібрані на різьбових з'єднаннях, коли важко забезпечити рівномірність навантаження всіх елементів кріплення. У перший період експлуатації, по мірі отримання додаткових пластичних деформацій прокладками, відбувається перерозподіл навантажень між елементами кріплення. Як результат відбувається стабілізація навантаження елементів кріплення або навпаки – лавиноподібний ріст навантажень по мірі відмови найбільш навантажених елементів.

Процес зношування рамових підшипників дизеля [10] є ще більш складним, оскільки по мірі зношування величина навантаження на підшипник зменшується, а на сусідні – збільшується, що викликає їх більш інтенсивне зношування, що в подальшому знову збільшує навантаження на перший підшипник. Тобто, в цьому випадку можливі не один, а кілька екстремумів у швидкості зміни технічного стану.

Для втомних процесів характерне виникнення тріщини після певної кількості циклів навантаження, і лише після цього вона починає рости.

У умовах експлуатації частіше всього спостерігаються процеси, які представляють собою одночасне та взаємопов'язане протікання кількох закономірностей, да ще й із випадковою складовою. На рис. 1 представлені можливі випадкові реалізації процесу зміни технічного стану. Там же нанесені дві прямі: аварійного стану (*a*) та незадовільного (*b*). Якщо дотримуватися стратегії прогностичного ТО, то не можна допускати досягнення об'єктом аварійного стану, а ТО необхідно виконувати в інтервалі між незадовільним та аварійним станами, причому виконувати ТО раніше настання незадовільного стану нерозумно, оскільки це буде

передчасно і в багатьох випадках скорочує ресурс об'єкта та збільшує витрати на ТО.

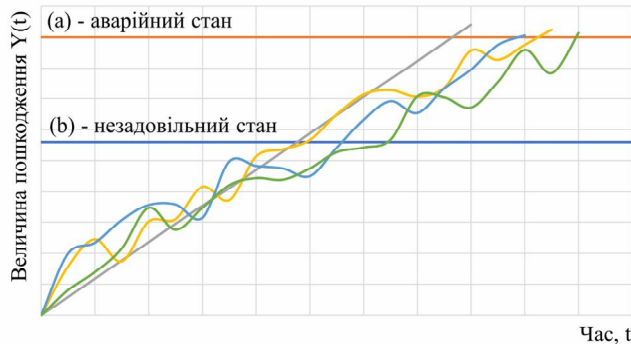


Рис. 1. Зміна технічного стану

Для реалізації цілі прогностичного технічного обслуговування - запобігання відмов, необхідно визначити моменти часу досягнення параметром технічного стану значень, що відповідають незадовільному і, відповідно, аварійному стану.

Визначення цих моментів часу принципово можливе за допомогою двох методів:

1. Безпосередньо вирішуючи рівняння опису процесу зміни технічного стану відносно часу t при відомому аварійному значенні параметра технічного стану (a) і незадовільному значенні параметра (b) . За цими даними побудувати залежності ймовірностей досягнення незадовільного, відповідно, аварійного станів.

2. Не займаючись проблемою опису процесу зміни технічного стану, а просто зібрати достатню статистику фактичних наробітків до аварійного стану і незадовільного стану і відразу побудувати залежності ймовірностей досягнення незадовільного і, відповідно, аварійного станів.

Припустимо, що в результаті реалізації першого або другого методу визначені середні наробітки до аварійного стану (відмови) T_{avg2} і до незадовільного стану – T_{avg1} . Припустимо, що знайдені коефіцієнти варіації для відповідних наробітків – $R_s = \frac{\sigma_s}{T_{avg2}}$ і $R_u = \frac{\sigma_u}{T_{avg1}}$, де σ_s – середнє квадратичне відхилення для наробітків до відмови, а σ_u – середнє квадратичне відхилення для наробітків до незадовільного стану. Припустимо, що підібрані відповідні закони розподілу для наробітків до незадовільного стану і аварійного стану.

Якщо, наприклад, вони описуються нормальним законом розподілу, то для наробітків до незадовільного стану густина розподілу

$$f_u(t) = \frac{1}{\sigma_u \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(T_{avg1}-t)^2}{2\sigma_u^2}}, \quad (5)$$

а для наробітків до аварійного стану

$$f_e(t) = \frac{1}{\sigma_e \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(T_{avg2}-t)^2}{2\sigma_e^2}} \quad (6)$$

Враховуючи цілі запобігання відмовам, необхідно спочатку прийняти певне значення допустимої ймовірності виникнення відмови Q_{acc} . Визначення необхідної величини періодичності регламентного технічного обслуговування t_{reg} впливає з рівняння

$$Q_{acc} = \int_0^{t_{reg}} f_e(t) dt \quad (7)$$

Для отриманого значення періодичності регламентного технічного обслуговування t_{reg} буде забезпечено визначене значення ймовірності досягнення незадовільного стану за рівнянням

$$Q_u = \int_0^{t_{reg}} f_u(t) dt \quad (8)$$

Таким чином, для запобігання певному числу відмов необхідно встановити такий час виконання регламентного технічного обслуговування t_{reg} , який чітко визначить, в яких випадках з загального числа технічних обслуговувань вони будуть своєчасними, тобто буде досягнуто незадовільний стан. Однак це не завжди може бути задовільним, оскільки при невеликій досягнутій ймовірності незадовільних станів зростатимуть витрати, пов'язані з неповним використанням закладеного ресурсу. Це ілюструється на рис. 2, на якому зображені криві щільності $f_e(t)$ та $f_u(t)$. І величина періодичності регламентного технічного обслуговування, при якій забезпечується ймовірність відмови $Q_e = Q_{acc}$.

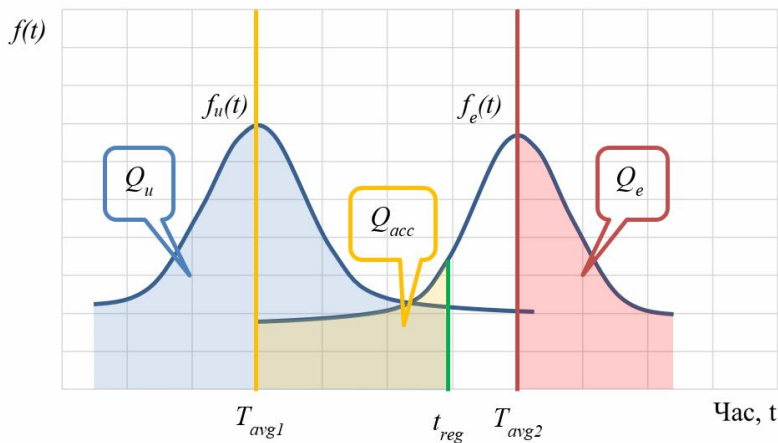


Рис. 2. Зв'язок між призначеним часом виконання ТО t_{reg} і ймовірністю досягнення при цьому незадовільного стану Q_u

Також варто враховувати, що регулярне технічне обслуговування та моніторинг стану обладнання є важливими елементами для забезпечення надійності та продовження терміну служби суднових технічних засобів. Використання автоматизованих систем діагностики та прогнозування може допомогти виявити потенційні проблеми на ранніх стадіях та запобігти відмовам обладнання [11].

Як відомо, інтегральні характеристики розподілу наробітків до відмови, такі як повнота кривих щільності, залежать від статистичних параметрів цього розподілу. Коефіцієнт варіації фактичних значень наробітків відносно середнього значення впливає на форму цих кривих, а середнє значення наробітків визначає положення кривої відносно часової осі t . Отже, ефективність регламентованого методу обслуговування, який базується на одночасному вирішенні завдання профілактики відмови та максимального використання ресурсу, не завжди може бути гарантована.

Систематичний моніторинг технічного стану об'єкта дозволяє вчасно виявити перехід його в незадовільний стан і забезпечити своєчасне планове обслуговування. Це відрізняється від методу попереднього визначення термінів обслуговування на основі аналізу даних про наробітки до відмови багатьох об'єктів, коли можливе як передчасне, так і запізнене технічне обслуговування.

Важливою особливістю є те, що найбільш повну інформацію про фактичний технічний стан об'єкта можна отримати під час його технічного обслуговування, після якого відбувається відновлення його стану, і процес зміни технічного стану повертається на початок (точка 0). Таким чином, обслуговуючий персонал має повну інформацію про технічний стан об'єкта на момент завершення попереднього технічного обслуговування та на момент виконання наступного технічного обслуговування. Інформація про проміжні стани, як правило, неповна або відсутня, або має опосередкований характер, що базується на даних проміжних оглядів, системи робочих параметрів і характеристик, а також діагностичних ознак.

Вказана особливість експлуатаційної інформації про технічний стан свідчить про те, що отримати фактичні залежності від часу для швидкості зміни технічного стану $\alpha(t)$, а також випадкової $\delta(\alpha)$ для закономірностей, відмінних від лінійних, практично неможливо.

Залежно від того, чи отримує обслуговуючий персонал інформацію про технічний стан між технічним обслуговуванням, використовуються дві основні стратегії призначення терміну виконання технічного обслуговування:

1. Рішення про виконання технічного обслуговування приймається в залежності від контрольованого стану.
2. Терміни технічного обслуговування призначаються заздалегідь за деякою середньою реалізацією неконтрольованого процесу між технічним обслуговуванням.

Ці дві стратегії забезпечуються застосуванням різних методів технічного обслуговування.

Метод технічного обслуговування та ремонту – це сукупність технологічних та організаційних правил виконання технічного обслуговування та ремонту, а також правил щодо визначення обсягів та періодичності робіт, які забезпечують

підтримку необхідного рівня технічного стану та надійності об'єкта. Залежно від характеру інформації про надійність та технічний стан об'єктів, що використовуються для призначення періодичності та обсягу технічного обслуговування та ремонту, розрізняють наступні методи технічного обслуговування та ремонту техніки:

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

На практиці частіше за все використовуються комбінації методів, і значно рідше вказані методи в чистому вигляді. Найбільш поширеним варіантом комбінованого методу є застосування послідовності оглядів та ревізій, коли фактично встановлюється крайній термін виконання ревізії, який не може бути пізніше, а за результатами проміжного огляду може бути прийнято рішення про позапланову ревізію або внесені зміни в режим використання об'єкта.

Таким чином, для підвищення ефективності технічного обслуговування вантажних суден необхідно розробити методіку, яка би враховувала динаміку зміни технічного стану об'єкта і дозволяла проводити своєчасне обслуговування на основі актуальних даних про його стан. Одним з шляхів вирішення цієї проблеми є методологія, заснована на цифрових двійниках і аналізу даних в реальному часі [12].

Висновки. Основні висновки дослідження сформульовані наступним чином:

1. Моделювання процесів зміни технічного стану суднових технічних засобів вантажних суден вимагає врахування випадкової складової, що відображає вплив різних випадкових експлуатаційних факторів.
2. Аналітичні моделі, хоча і є суворо обґрунтованими, можуть бути не ефективними для моделювання випадкових експлуатаційних факторів, що діють в інтервалі між технічним обслуговуванням суднових технічних засобів.
3. Швидкість зміни технічного стану може бути представлена як сума детермінованої складової та випадкової складової, що розподілена відносно математичного очікування за законом розподілу наближеним до реальності.
4. Застосування моделі, що враховує випадкову складову, дозволяє більш точно прогнозувати технічний стан суднових технічних засобів та планувати технічне обслуговування на основі реального стану, а не лише на основі стандартного регламенту.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Hu L., Hu N.Q., Fan B., Gu F.L., & Zhang X. (2015). *Modeling the Relationship between Vibration Features and Condition Parameters Using Relevance Vector Machines for Health Monitoring of Rolling Element Bearings under Varying Operation Conditions. Mathematical Problems in Engineering*, 2015, 1-10. <https://doi.org/10.1155/2015/123730>

2. Chong H.Y., Tan S.C., & Yap H.J. (2021). Hybridization of harmonic search algorithm in training radial basis function with dynamic decay adjustment for condition monitoring. *Soft Computing*, 25(15), 10221-10235. <https://doi.org/10.1007/s00500-021-05963-3>
3. Zhao J., Gao C., Tang T., Xiao X., Luo M., & Yuan B. (2022). Overview of Equipment Health State Estimation and Remaining Life Prediction Methods. *Machines*, 10(6), 422. <https://doi.org/10.3390/machines10060422>
4. Jenab K., Rashidi K., & Moslehpour, S. (2013). An Intelligence-Based Model for Condition Monitoring Using Artificial Neural Networks. *International Journal of Enterprise Information Systems*, 9(4), 43-62. <https://doi.org/10.4018/ijeis.2013100104>
5. Oneto L., Anguita D., Coraddu A., Cleophas T.F., & Херара К. (2016). Vessel monitoring and design in industry 4.0: A data driven perspective. <https://doi.org/10.1109/rtsi.2016.7740594>
6. Ying-Yun H., Hao-Peng G., & Yu-Peng S. (2012). The Boundary Condition's Study and Application of Diesel Dynamics Analysis on Unsteady Working Condition. <https://doi.org/10.2991/mems.2012.44>
7. Aqueveque P., Radrigan L., Pastene F., Morales A. S., & Guerra E. (2021). Data-Driven Condition Monitoring of Mining Mobile Machinery in Non-Stationary Operations Using Wireless Accelerometer Sensor Modules. *IEEE Access*, 9, 17365-17381. <https://doi.org/10.1109/access.2021.3051583>
8. Головань А.І. (2023). КОНЦЕПТУАЛЬНА МОДЕЛЬ ПЛАНУВАННЯ ТА ОПТИМІЗАЦІЇ ГРАФІКІВ ТЕХНІЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ ВАНТАЖНИХ СУДЕН. *Vodnij Transport*, 1(37), 41-49. <https://doi.org/10.33298/2226-8553.2022.1.37.11>
9. Golovan A., & Gritsuk I. (2023). ОСНОВНІ ПРИНЦИПИ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ТЕХНІЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ СУДНА. *Розвиток Транспорту*, 1(16), 47-60. <https://doi.org/10.33082/td.2023.1-16.04>
10. Jerrelind J., & Stensson A. (2000). Nonlinear dynamics of parts in engineering systems. *Chaos Solitons & Fractals*, 11(15), 2413-2428. [https://doi.org/10.1016/s0960-0779\(00\)00016-3](https://doi.org/10.1016/s0960-0779(00)00016-3)
11. Golovan A., Honcharuk I., Deli O., Kostenko O., & Nykyforov Y. (2021). System of Water Vehicle Power Plant Remote Condition Monitoring. *IOP Conference Series*, 1199(1), 012049. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/1199/1/012049>
12. Головань А. (2023). Розроблення систем інформаційного забезпечення підтримки технічної придатності суден торгового флоту України на основі цифрових двійників і аналізу даних в реальному часі (0123U10 2159). <https://nddkr.ukrintei.ua/view/rk/d1025734d23e9a0005f89ffa7dc9a215>

REFERENCES

1. Hu L., Hu N.Q., Fan B., Gu F.L., & Zhang, X. (2015). *Modeling the Relationship between Vibration Features and Condition Parameters Using Relevance Vector Machines for Health Monitoring of Rolling Element Bearings under Varying Operation Conditions*. *Mathematical Problems in Engineering*, 2015, 1-10. <https://doi.org/10.1155/2015/123730>
2. Chong H.Y., Tan S.C., & Yap H.J. (2021). *Hybridization of harmonic search algorithm in training radial basis function with dynamic decay adjustment for condition monitoring*. *Soft Computing*, 25(15), 10221-10235. <https://doi.org/10.1007/s00500-021-05963-3>
3. Zhao J., Gao C., Tang T., Xiao X., Luo M., & Yuan B. (2022). *Overview of Equipment Health State Estimation and Remaining Life Prediction Methods*. *Machines*, 10(6), 422. <https://doi.org/10.3390/machines10060422>
4. Jenab K., Rashidi K., & Moslehpour S. (2013). *An Intelligence-Based Model for Condition Monitoring Using Artificial Neural Networks*. *International Journal of Enterprise Information Systems*, 9(4), 43-62. <https://doi.org/10.4018/ijeis.2013100104>
5. Oneto L., Anguita D., Coraddu A., Cleophas T.F., & Xepapa K. (2016). *Vessel monitoring and design in industry 4.0: A data driven perspective*. <https://doi.org/10.1109/rtsi.2016.7740594>
6. Ying-Yun H., Hao-Peng G., & Yu-Peng S. (2012). *The Boundary Condition's Study and Application of Diesel Dynamics Analysis on Unsteady Working Condition*. <https://doi.org/10.2991/mems.2012.44>
7. Aqueveque P., Radrigan L., Pastene F., Morales A.S., & Guerra E. (2021). *Data-Driven Condition Monitoring of Mining Mobile Machinery in Non-Stationary Operations Using Wireless Accelerometer Sensor Modules*. *IEEE Access*, 9, 17365-17381. <https://doi.org/10.1109/access.2021.3051583>
8. Golovan A.I. (2023). *Conceptual model of planning and optimization of cargo vessel maintenance schedules [Kontseptualna model planuvannia ta optymizatsii hrafikiv tekhnichnoho obsluhovuvannia vantazhnykh suden]*. *Vodnij Transport*, 1(37), 41-49. <https://doi.org/10.33298/2226-8553.2022.1.37.11> [in Ukrainian].
9. Golovan A., & Gritsuk I. (2023). *The main principles of assessing the efficiency of ship maintenance [Osnovni pryntsypy doslidzhennia efektyv-nosti tekhnichnoho obsluhovuvannia sudna]*. *Transport development*, 1(16), 47-60. <https://doi.org/10.33082/td.2023.1-16.04> [in Ukrainian].
10. Jerrelind J., & Stensson A. (2000). *Nonlinear dynamics of parts in engineering systems*. *Chaos Solitons & Fractals*, 11(15), 24132428. [https://doi.org/10.1016/s0960-0779\(00\)00016-3](https://doi.org/10.1016/s0960-0779(00)00016-3)
11. Golovan A., Honcharuk I., Deli O., Kostenko O., & Nykyforov Y. (2021). *System of Water Vehicle Power Plant Remote Condition Monitoring*. *IOP Conference Series*, 1199(1), 012049. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/1199/1/012049>

12. 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 tsyfrovyykh dviinykiv i analizu danykh v realnomu chasi]* (0123U102159). <https://nddkr.ukrintei.ua/view/rk/d1025734d23e9a0005f89ffa7dc9a215> [in Ukrainian].

Стаття надійшла до редакції 20.03.2023

Посилання на статтю: Головань А.І. Особливості моделювання процесів зміни технічного стану з складовою випадковості // Вісник Одеського національного морського університету: Зб. наук. праць, 2023. № 3 (70). С. 71-83. DOI 10.47049/2226-1893-2023-3-71-83.

Article received 20.03.2023

Reference a journalartic: Golovan A. Peculiarities of modeling processes of technical condition change with a component of randomness // Herald of the Odesa national maritime university: Coll. scient. works, 2023. № 3 (70). P. 71-83. DOI 10.47049/2226-1893-2023-3-71-83.