

УДК 629.5.078:656.075

DOI 10.47049/2226-1893-2023-4-140-151

ОПТИМІЗАЦІЯ ТЕХНІЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ ВАНТАЖНИХ СУДЕН –  
МОДЕЛЮВАННЯ НЕЛІНІЙНИХ ПРОЦЕСІВ ЗМІНИ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ  
СУДНОВИХ ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ

**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.** У контексті технічного обслуговування суднових технічних засобів вантажних суден, ефективне управління процесом обслуговування та оптимізація ресурсоемності є невід'ємною частиною успішного функціонування суднової індустрії. Однак, на сьогоднішній день існуючі методи технічного обслуговування суднових технічних засобів в основному базуються на лінійних моделях, які не завжди враховують складну природу зміни технічного стану. У зв'язку з цим, пріоритетним завданням є розробка і використання більш точних моделей, які б враховували нелінійність процесу зміни технічного стану суднових технічних засобів. Такі моделі дозволять більш точно передбачати зміни технічного стану, визначати оптимальний час та обсяги технічного обслуговування та забезпечувати ефективне управління ресурсами.

Представлена стаття присвячена дослідженню методів моделювання нелінійних процесів зміни технічного стану суднових технічних засобів вантажних суден. У статті визначено, що задачі оптимізації технічного обслуговування вантажних суден можуть бути краще вирішені за допомогою використання нелінійних математичних моделей зміни технічного стану суднових технічних засобів.

Проведено порівняльний аналіз лінійних та нелінійних моделей з урахуванням їх впливу на тривалість циклу обслуговування, залишковий ресурс та витрати на змінно-запасні частини. Досліджено вплив варіації швидкості зміни технічного стану на ефективність технічного обслуговування. Актуальність цього дослідження полягає в покращенні ефективності обслуговування вантажних суден та оптимізації управління ресурсами.

**Ключові слова:** оптимізація, технічне обслуговування, вантажні судна, нелінійні моделі, зміна технічного стану, тривалість циклу обслуговування, витрати на змінно-запасні частини.

UDC 629.5.078:656.075

DOI 10.47049/2226-1893-2023-4-140-151

**OPTIMIZATION OF CARGO SHIP MAINTENANCE –  
MODELING OF NONLINEAR PROCESSES OF CHANGES  
IN THE TECHNICAL CONDITION OF SHIP'S MACHINERY**

**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.** *In the context of maintenance of shipboard machinery of cargo ships, effective management of the maintenance process and optimization of resource intensity are an integral part of the successful operation of the shipping industry. However, today's existing methods of ship's equipment maintenance are mainly based on linear models that do not always consider the complex nature of technical condition changes. In this regard, the priority task is to develop and use more accurate models that would consider the nonlinearity of the process of changing the technical condition of ship's equipment. Such models will allow to predict changes in technical condition more accurately, determine the optimal time and scope of maintenance, and ensure efficient resource management. This article is devoted to the study of methods for modeling nonlinear processes of changes in the technical condition of shipboard technical equipment of cargo ships. The article determines that the tasks of optimizing the maintenance of cargo ships can be better solved by using nonlinear mathematical models of changes in the technical condition of ship's technical equipment. A comparative analysis of linear and nonlinear models is carried out, considering their impact on the duration of the maintenance cycle, residual life and costs of spare parts. The influence of variation in the rate of change of the technical condition on the efficiency of maintenance is investigated. The relevance of this study is to improve the efficiency of cargo ship maintenance and optimize resource management.*

**Keywords:** *optimization, maintenance, cargo ships, nonlinear models, change in technical condition, maintenance cycle time, spare parts.*

**Вступ.** У контексті технічного обслуговування суднових технічних засобів вантажних суден, ефективне управління процесом обслуговування та оптимізація ресурсоемності є невід'ємною частиною успішного функціонування суднової індустрії. Однак, на сьогоднішній день існуючі методи технічного обслуговування суднових технічних засобів в основному базуються на лінійних моделях, які не завжди враховують складну природу зміни технічного стану.

У зв'язку з цим, пріоритетним завданням є розробка і використання більш точних моделей, які б урахували нелінійність процесу зміни технічного стану суднових технічних засобів. Такі моделі дозволять більш точно передбачати зміни

технічного стану, визначати оптимальний час та обсяги технічного обслуговування та забезпечувати ефективне управління ресурсами.

У даній статті розглядається проблема моделювання нелінійних процесів зміни технічного стану суднових технічних засобів вантажних суден. Досліджено вплив нелінійності на процес технічного обслуговування та розглянуто оптимальні стратегії управління обслуговуванням з метою забезпечення безперебійної роботи технічних засобів та економічно ефективного використання ресурсів.

У наступних розділах статті будуть представлені деталі моделей, результати дослідження та практичні рекомендації щодо оптимізації технічного обслуговування вантажних суден на основі нелінійних моделей зміни технічного стану.

Проблема, поставлена в даній науковій статті, пов'язана з оптимізацією технічного обслуговування вантажних суден. Основна увага зосереджена на моделюванні нелінійних процесів зміни технічного стану суднових технічних засобів.

Стаття має на меті вивчити вплив різних закономірностей зміни технічного стану на процес технічного обслуговування суднових технічних засобів вантажних суден.

Важливі наукові та практичні завдання статті включають:

1. Встановлення впливу нелінійності на процес технічного обслуговування суднових технічних засобів вантажних суден.
2. Забезпечення об'єктивного порівняння різних закономірностей зміни технічного стану.
3. Дослідження впливу прийнятих закономірностей на тривалість циклу експлуатації, залишковий ресурс та витрати на змінно-запасні частини.
4. Визначення оптимальних параметрів моделей для забезпечення мінімальних витрат на змінно-запасні частини.

Стаття пропонує математичні моделі, які описують залежності між параметрами, що впливають на технічний стан суднових технічних засобів. Результати досліджень демонструють вплив нелінійності на тривалість циклу експлуатації та витрати на змінно-запасні частини.

Застосування нелінійних моделей дозволить більш точно відтворити складність технічного стану суднових технічних засобів та врахувати нелінійні ефекти зношування, що дозволить нам розробити оптимальні стратегії технічного обслуговування.

Важливістю даного дослідження є можливість покращення ефективності технічного обслуговування вантажних суден та зниження витрат на ремонт та заміну технічних засобів. Результати нашої роботи можуть бути використані судновими компаніями, операторами вантажних суден та дослідницькими установами для вдосконалення технічного обслуговування та оптимізації ресурсоемності.

Ця стаття має важливе значення для наукових та практичних досліджень в галузі технічного обслуговування вантажних суден. Вона надає нові знання про вплив нелінійності на процес обслуговування та може бути використана для оптимізації цього процесу, зменшення витрат та покращення надійності технічних засобів суден.

**Мета дослідження** полягає у розробці та впровадженні нового підходу до вивчення впливу нелінійних процесів зміни технічного стану суднових технічних засобів вантажних суден на процес технічного обслуговування вантажних суден. Основним завданням є розробка та застосування більш точних математичних моделей, які враховують нелінійність цих процесів, для покращення ефективності технічного обслуговування і оптимізації ресурсоємності.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій** вказує на важливість розробки та застосування математичних моделей для покращення ефективності технічного обслуговування та управління ресурсами вантажних суден.

Одна з актуальних тем у дослідженнях є використання нелінійних моделей зміни технічного стану. Результати попередніх досліджень підтверджують, що технічний стан суднових технічних засобів не завжди відповідає лінійному закону зношування [1]. Це вимагає розробки більш точних математичних моделей, які враховують нелінійність цих процесів [2].

Деякі дослідники звертають увагу на вплив нелінійності на тривалість циклу обслуговування та ремонту суднових технічних засобів [3]. Вони вивчають взаємозв'язок між нелійними законами зношування та ефективністю обслуговування. Деякі дослідження спрямовані на розробку оптимальних стратегій обслуговування, які враховують нелінійний характер зміни технічного стану [4].

Також, значний інтерес викликають дослідження, присвячені впливу варіації швидкості зміни технічного стану на витрати на змінно-запасні частини [5]. Вони досліджують взаємозв'язок між швидкістю зношування та економічною ефективністю обслуговування [6]. Також дослідження спрямовані на розробку оптимальних стратегій управління запасами та витратами [7].

В цілому, проведений аналіз останніх досліджень виявляє зосередженість на розвитку більш точних математичних моделей та стратегій обслуговування, які враховують нелінійний характер зміни технічного стану суднових технічних засобів. Ці дослідження відкривають нові можливості для покращення безперебійності, надійності та ефективності роботи вантажних суден [8]. Результати цих досліджень можуть бути використані судновими компаніями та операторами вантажних суден для розробки оптимальних стратегій обслуговування, управління ресурсами та зниження витрат на технічне обслуговування.

**Виклад основного матеріалу.** У контексті технічного обслуговування суднових технічних засобів вантажних суден, пріоритетним є застосування лінійної моделі, особливо у випадку регламентного технічного обслуговування, де інформація про технічний стан стає відомою лише після виконання обслуговування. Існування будь-якої іншої закономірності можна лише припускати. Проте, фактична зміна технічного стану може відрізнятись від лінійного закону, тому необхідно оцінювати вплив нелінійності. З метою дослідження цього питання було розглянуто два варіанти, (1) і (2), закономірності зміни технічного стану:

$$Y = \varepsilon t \quad (1)$$

$$Y = \varepsilon t^n \quad (2)$$

Дослідження проведено з метою вивчення впливу прийнятих закономірностей на процес технічного обслуговування суднових технічних засобів вантажних суден, з метою забезпечення об'єктивного порівняння були враховані такі важливі умови:

1. Значення параметра технічного стану нормовані відносно його аварійного значення, при цьому після проведення технічного обслуговування воно стає рівним нулю;

2. Час також унормовано відносно середнього напрацювання до відмови;

3. Коефіцієнти варіації для швидкості зміни технічного стану  $\varepsilon$  є випадковою величиною, яка приймає значення в діапазоні від 0 до 1 і розподілена за певним законом (наприклад, нормальним або Вейбулла), при цьому варіація цього коефіцієнта задається значенням  $V_v$ ;

4. Показник  $n$  є дійсним невід'язковим числом;

5. Коефіцієнти варіації для швидкості зміни технічного стану  $\varepsilon$  для лінійного і нелінійного законів у задачі порівняння повинні бути такими, щоб забезпечити однакові значення варіації для спостережуваних напрацювань до відмови, при рівних середніх напрацюваннях до відмови. Таким чином, обидва процеси починаються з точки ( $t = 0, y = 0$ ) і закінчуються при досягненні значення  $y = 1$ , якщо технічне обслуговування не виконується і середнє напрацювання дорівнює  $T_{avg} = 1$  зі значенням варіації  $V_t$ .

На рисунках 1 і 2 представлено поверхні, описані формулами (3) і (4), за допомогою яких буде забезпечено п'ять наведених вище умов для нелінійної моделі та закону розподілу Вейбулла для коефіцієнта  $\varepsilon$ .

Як приклад, для отримання коефіцієнта варіації  $V_v$  для напрацювань до відмови, що дорівнює  $V_t = 0,6$ , і розподілі Вейбулла, швидкість зміни технічного стану  $\varepsilon$  повинна мати коефіцієнт варіації за лінійного закону  $V_v = 0,359$  (при  $n = 1,0$ ) за формулою (3) та за нелінійного  $V_v = 0,173$  (при  $n = 0,5$ ) за формулою (4).

$$V_v = 0,060900119 - 0,368050929 \cdot n + 0,121798700 \cdot V_t + \\ + 0,626749910 \cdot n^2 + 1,193311999 \cdot n \cdot V_t - 0,739394205 \cdot V_t^2 - \\ - 0,404056859 \cdot n^2 - 0,248792728 \cdot n^2 \cdot V_t - 0,727603518 \cdot n \cdot V_t^2 + \quad (3)$$

$$+ 0,993675764 \cdot V_t^2 + 0,088019942 \cdot n^4 + 0,043984999 \cdot n^2 \cdot V_t + \\ + 0,050282336 \cdot n^2 \cdot V_t^2 + 0,160721461 \cdot n \cdot V_t^2 - 0,385922421 \cdot V_t^4 \\ V_v = -140,283883939 + 16,044869023 \cdot n + 659,317198286 \cdot K_t + \\ + 1,005549672 \cdot n^2 - 57,631937756 \cdot n \cdot K_t - 1156,605832190 \cdot K_t^2 - \\ - 0,317968737 \cdot n^2 - 1,505070356 \cdot n^2 \cdot K_t + 70,368569766 \cdot n \cdot K_t^2 + \\ + 898,353196296 \cdot K_t^2 + 0,095198128 \cdot n^4 - 0,124996589 \cdot n^2 K_t + \\ + 1,175464456 \cdot n^2 \cdot K_t^2 - 29,120003111 \cdot n \cdot K_t^2 - 260,72963978 \cdot K_t^4 \quad (4)$$

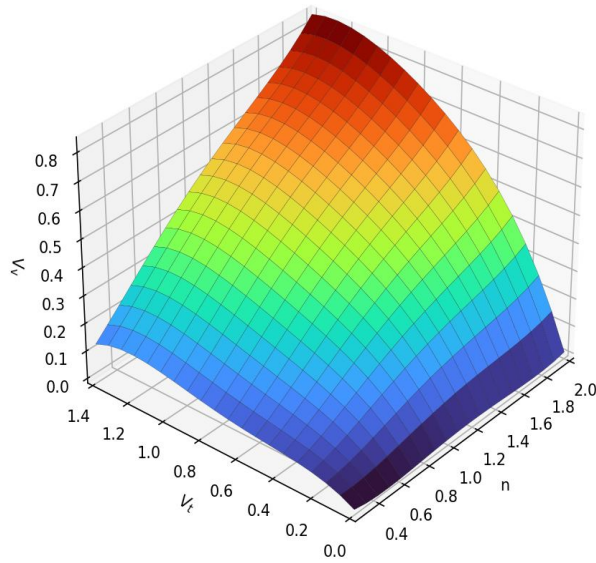


Рис. 1. Коефіцієнти зв'язку між коефіцієнтами варіації для напрацювань до відмови, визначених безпосередньо  $V_t$  за функцією зміни технічного стану  $V_v$ , що змінюється за законом  $Y = \varepsilon t^n$  з розподілом Вейбулла для  $\varepsilon$

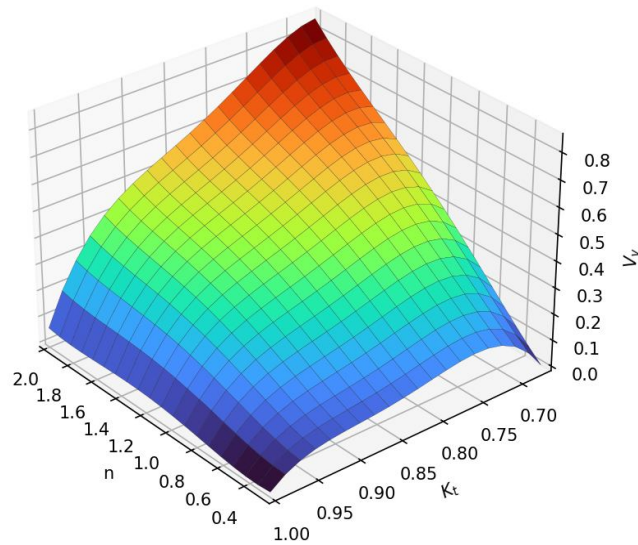


Рис. 2. Коефіцієнти зв'язку між середніми та медіанними напрацюваннями до відмови  $K_t$  та за функцією зміни технічного стану  $V_v$ , що змінюється за законом  $Y = \varepsilon t^n$  із розподілом Вейбулла для  $\varepsilon$

Дослідження були проведені за показником ступеня  $n$  в діапазоні зміни його значень від 0,25 до 2. Цей діапазон прийнято з урахуванням досліджень [9, 10], де зазначається, що в період припрацювання  $n$  дорівнює від 0,45 до 0,75 і досягає значень 1,2 у період інтенсивного зносу.

Рисунок 3 ілюструє отримані залежності тривалості циклу експлуатації.

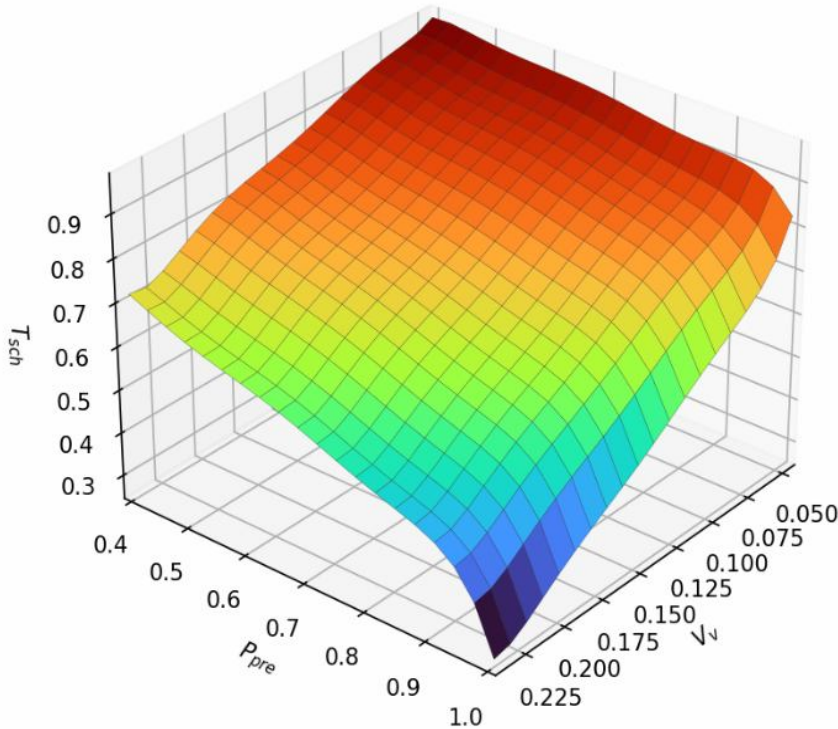


Рис. 3. Залежності тривалості циклу експлуатації від імовірності попередження відмов  $P_{pre}$  регламентним технічним обслуговуванням

для нелінійного закону зміни технічного стану  $Y = \varepsilon t^n$ ,  
де  $n = 0,5$  і закону Вейбулла для розподілу значень коефіцієнта  $\varepsilon$

Рисунок 4 ілюструє залежність залишкового ресурсу, а рисунок 5 ілюструє залежність елементарної функції витрат на змінно-запасні частини для крайніх значень показника нелінійності  $n = 0,5$ . За результатами проведених досліджень, встановлено, що вплив нелінійності на тривалість циклу за одних і тих самих профілактичних властивостей системи ( $P_{pre}$ ), що досягаються, є вельми незначним і за  $n = 0,5$  та коефіцієнтів варіації для напрацювань до відмови  $V_t < 0,7$  не перевищує 3,5-6% і лише за  $V_t = 1,0$  досягає значень 11-16%.

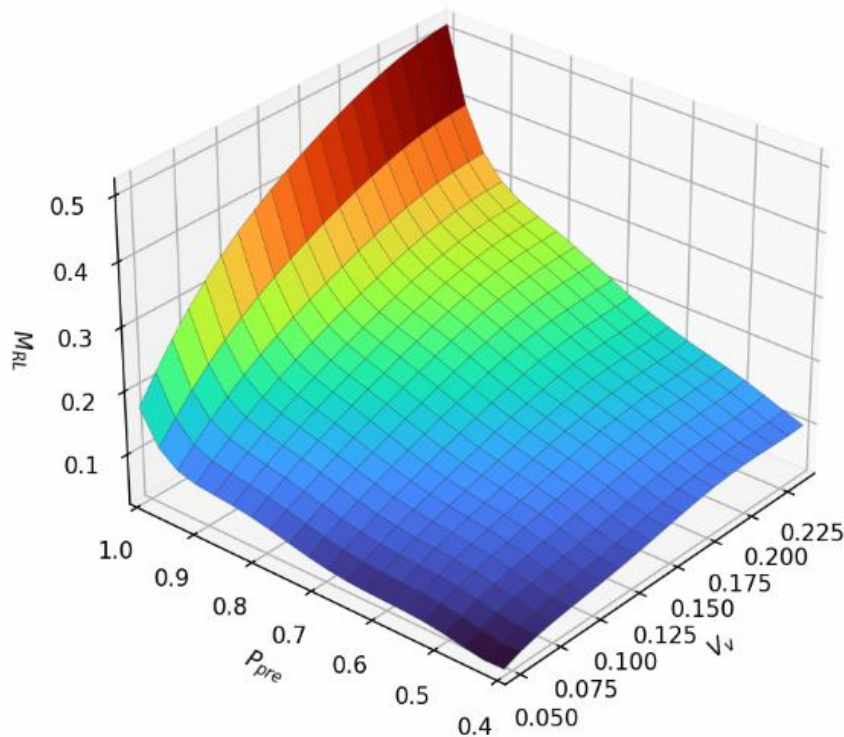


Рис. 4. Залежності залишкового ресурсу від імовірності попередження відмов  $P_{pre}$  регламентним технічним обслуговуванням для нелінійного закону зміни технічного стану  $Y = \varepsilon t^n$ , де  $n = 0,5$  і закону Вейбулла для розподілу значень коефіцієнта  $Y = \varepsilon t^n$ , де  $n = 0,5$

Виходячи зі структури виразу для визначення тривалості циклу експлуатації, малий вплив нелінійності можна пояснити через малу відмінність величин спостережуваних напрацювань до відмови за однакової ймовірності попередження відмов. Більш істотний вплив спостерігається на величині залишкового ресурсу і, відповідно, на величині питомих витрат на змінно-запасні частини (рисунок 5).

Порівнюючи результати розрахунку однакового середнього напрацювання до відмови та однакових коефіцієнтів варіації для напрацювань до відмови за лінійною та нелінійною моделями, доходимо висновку, що результати моделювання лінійної моделі можуть бути використані для порівняльних досліджень, за умови, що витрати на змінно-запасні частини не враховуються. Крім того, ці результати також можуть бути використані для аналізу витрат на змінно-запасні частини, якщо деталі замінюються за призначеним ресурсом.



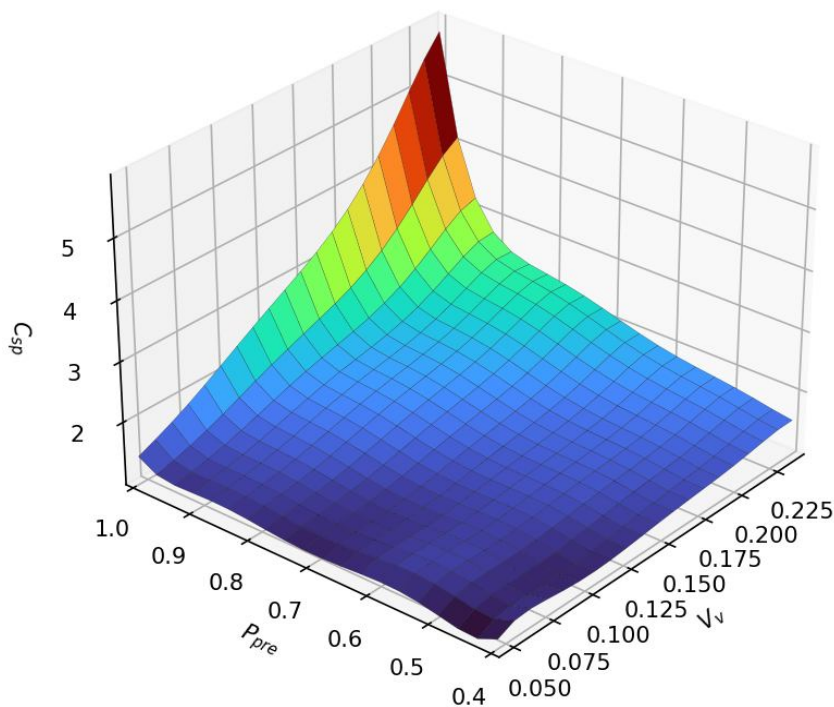


Рис. 5. Залежності питомих витрат на змінно-запасні частини  $C_{sp}$  від імовірності попередження відмов  $P_{pre}$  регламентним технічним обслуговуванням для нелінійного закону зміни технічного стану  $Y = \varepsilon t^n$ , де  $n = 0,5$  і закону Вейбулла для розподілу значень коефіцієнта  $\varepsilon$

Особливу увагу привертає істотний вплив варіації швидкості зміни технічного стану на витрати на змінно-запасні частини, що призводить до багаторазових змін витрат. Варто відзначити, що причини таких різниць у швидкості зміни не обмежуються лише експлуатаційними факторами, а також пов'язані з якістю виготовлення деталей. Іншими словами, можна припустити, що мінімальні питомі витрати на змінно-запасні частини можна досягти для деталей, які мають невеликі швидкості зношування та більшу стабільність властивостей, в той час як протилежні характеристики можуть призводити до збільшення витрат.

**Висновки.** В ході дослідження нелінійних процесів зміни технічного стану суднових технічних засобів вантажних суден були отримані наступні висновки:

1. Застосування нелінійних моделей, зокрема моделі  $Y = \varepsilon t^n$ , дозволяє більш точно відтворити складність технічного стану суднових технічних засобів. Це дозволяє розробити більш точні стратегії технічного обслуговування та управління ресурсами.

2. Вплив нелінійності на тривалість циклу обслуговування при однакових профілактичних властивостях системи був встановлений як незначний. При

показнику ступеня нелінійності  $n = 0,5$  та коефіцієнтах варіації для напрацювань до відмови  $V_t < 0,7$ , вплив нелінійності не перевищував 3,5-6 %, за винятком випадку  $V_t = 1,0$ , де вплив становив 11-16 %. Це можна пояснити малою відмінністю величин спостережуваних напрацювань до відмови за однакової ймовірності попередження відмов.

3. Залежність витрат на змінно-запасні частини від імовірності попередження відмов показала істотний вплив варіації швидкості зміни технічного стану. Різниця у швидкості зміни може призводити до значних змін витрат. Мінімальні питомі витрати досягаються для деталей з невеликими швидкостями зношування та більшою стабільністю властивостей.

4. Результати моделювання лінійної моделі можуть бути використані для порівняльних досліджень, за умови, що витрати на змінно-запасні частини не враховуються. Однак, для покращення точності і ефективності обслуговування рекомендується використовувати нелінійні моделі, які краще враховують особливості зміни технічного стану.

5. Використання нелінійних моделей технічного обслуговування суднових технічних засобів вантажних суден дозволяє покращити безперебійність їх роботи та економічну ефективність. Оптимізація технічного обслуговування на основі цих моделей сприятиме зниженню витрат на ремонт і заміну технічних засобів, а також поліпшить загальну ефективність суднової індустрії.

В цілому, використання нелінійних моделей зміни технічного стану є важливим кроком у напрямку покращення технічного обслуговування вантажних суден та оптимізації ресурсоемності. Отримані результати можуть бути використані судовими компаніями, операторами вантажних суден та дослідницькими установами для впровадження ефективних стратегій обслуговування та управління технічними засобами.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Vališ, D., Žák, L., & Pokora, O. (2015). Failure prediction of diesel engine based on occurrence of selected wear particles in oil. *Engineering Failure Analysis*, 56, 501–511. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2014.11.020>
2. Chen, N. & Fu, S. (2023). Uncertainty quantification of nonlinear Lagrangian data assimilation using linear stochastic forecast models. *Physica D: Nonlinear Phenomena*, 452, 133784. <https://doi.org/10.1016/j.physd.2023.133784>
3. Zohrabi, N., Shi, J., & Abdelwahed, S. (2019). An overview of design specifications and requirements for the MVDC shipboard power system. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 104, 680-693. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2018.07.050>
4. Eriksen, S., Utne, I. B., & Lützen, M. (2021). An RCM approach for assessing reliability challenges and maintenance needs of unmanned cargo ships. *Reliability Engineering & System Safety*, 210, 107550. <https://doi.org/10.1016/j.res.2021.107550>

5. Hellingrath, B., & Cordes, A. (2013). *Approach for integrating condition monitoring information and forecasting methods to enhance spare parts supply chain planning*. *IFAC Proceedings Volumes*. <https://doi.org/10.3182/20130522-3-br-4036.00082>
6. Okumus, D., Gunbeyaz, S. A., Kurt, R. E., & Turan, O. (2023). *Towards a circular maritime industry: Identifying strategy and technology solutions*. *Journal of Cleaner Production*, 382, 134935. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.134935>
7. Yazdani, M., & Aouam, T. (2023). *Shipment planning and safety stock placement in maritime supply chains with stochastic demand and transportation times*. *International Journal of Production Economics*, 108952. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2023.108952>
8. 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>
9. Hou X., Wang Y., Dai L., Yang Y., Du J., Wang Y., & Wan H. (2023). *Study on the corrosion and wear behaviors of cylinder liner in marine diesel engine burning low sulfur fuel oil*. *Engineering Failure Analysis*, 147, 107151. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2023.107151>
10. Zhang, B., Ma, X., Liu, L., Yu, H., Morina, A., & Lu, X. (2023). *Study on the sliding wear map of cylinder liner – piston ring based on various operating parameters*. *Tribology International*, 186, 108632. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2023.108632>

## REFERENCES

1. Vališ, D., Žák, L., & Pokora, O. (2015). *Failure prediction of diesel engine based on occurrence of selected wear particles in oil*. *Engineering Failure Analysis*, 56, 501-511. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2014.11.020>
2. Chen N., & Fu S. (2023). *Uncertainty quantification of nonlinear Lagrangian data assimilation using linear stochastic forecast models*. *Physica D: Nonlinear Phenomena*, 452, 133784. <https://doi.org/10.1016/j.physd.2023.133784>
3. Zohrabi N., Shi J., & Abdelwahed S. (2019). *An overview of design specifications and requirements for the MVDC shipboard power system*. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 104, 680–693. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2018.07.050>
4. Eriksen S., Utne I.B., & Lützen M. (2021). *An RCM approach for assessing reliability challenges and maintenance needs of unmanned cargo ships*. *Reliability Engineering & System Safety*, 210, 107550. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2021.107550>

5. Hellingrath B., & Cordes A. (2013). Approach for integrating condition monitoring information and forecasting methods to enhance spare parts supply chain planning. *IFAC Proceedings Volumes*. <https://doi.org/10.3182/20130522-3-br-4036.00082>
6. Okumus D., Gunbeyaz S. A., Kurt R. E., & Turan O. (2023). Towards a circular maritime industry: Identifying strategy and technology solutions. *Journal of Cleaner Production*, 382, 134935. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.134935>
7. Yazdani M., & Aouam T. (2023). Shipment planning and safety stock placement in maritime supply chains with stochastic demand and transportation times. *International Journal of Production Economics*, 108952. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2023.108952>
8. 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]
9. Hou X., Wang Y., Dai L., Yang Y., Du J., Wang Y., & Wan H. (2023). Study on the corrosion and wear behaviors of cylinder liner in marine diesel engine burning low sulfur fuel oil. *Engineering Failure Analysis*, 147, 107151. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2023.107151>
10. Zhang B., Ma X., Liu L., Yu H., Morina A., & Lu X. (2023). Study on the sliding wear map of cylinder liner – piston ring based on various operating parameters. *Tribology International*, 186, 108632. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2023.108632>

*Стаття надійшла до редакції 20.03.2023*

**Посилання на статтю: Головань А.І.** Оптимізація технічного обслуговування вантажних суден – моделювання нелінійних процесів зміни технічного стану судових технічних засобів // Вісник Одеського національного морського університету: 36. наук. праць, 2023. № 4 (71). С. 140-151. DOI 10.47049/2226-1893-2023-3-140-151.

*Article received 20.03.2023*

**Reference a journalartic: Golovan A.** Optimization of cargo ship maintenance – modeling of nonlinear processes of changes in the technical condition of ship's machinery // Herald of the Odesa national maritime university: Coll. scient. works, 2023. № 4 (71). P. 140-151. DOI 10.47049/2226-1893-2023-3-140-151.