

## ОСНОВНІ ПРИНЦИПИ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ТЕХНІЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ СУДНА

А.І. Головань<sup>1</sup>, І.В. Грицук<sup>2</sup>

<sup>1</sup>к.т.н., доцент кафедри судноводіння і морської безпеки,  
Одеський національний морський університет, Одеса, Україна,  
ORCID ID: 0000-0001-6589-4381

<sup>2</sup>д.т.н., професор кафедри експлуатації судових енергетичних установок,  
Херсонська державна морська академія, Херсон, Україна,  
ORCID ID: 0000-0001-7065-6820

### Анотація

**Вступ.** У статті розглядаються сучасні проблеми дослідження ефективності системи технічного обслуговування вантажних суден. Комплексні способи гарантування необхідної ефективності систем технічного обслуговування вантажних суден складаються з сукупності заходів щодо оцінки, підвищення і контролю надійності, точності, працездатності, якості функціонування та інших експлуатаційних характеристик вантажних суден та наявних судових технічних засобів. Комплексні способи гарантування реалізуються як у сфері розробки і виробництва вантажних суден, так і безпосередньо в процесі їх експлуатації судноплавною компанією. Комплексне використання методів підвищення ефективності систем технічного обслуговування вантажних суден відкриває шляхи для суттєвого підвищення надійності і якості роботи функціональних систем вантажного судна. Основу цих методів складає кількісна оцінка ефективності систем технічного обслуговування – інструмент, що дозволяє оцінити ефективність виконаних дій щодо забезпечення необхідної надійності і якості роботи засобів морського транспорту. Проведений аналіз попередніх досліджень і публікацій вказує на відсутність єдиного методологічного підходу визначення показників ефективності систем технічного обслуговування вантажних суден, який би надавав можливість враховувати структуру і періодичність технічного обслуговування, вид експлуатаційного контролю, глибину відновлення і зовнішній прояв відмов. **Метою** статті є розгляд найбільш характерних з опублікованих математичних моделей технічного обслуговування, виявлення загальних рис розглянутих моделей і аналіз найбільш характерних математичних моделей технічного обслуговування з метою пошуку єдиного методологічного підходу визначення показників ефективності систем технічного обслуговування засобів морського транспорту. **Результати.** Розглянуто найбільш характерні з опублікованих математичних моделей технічного обслуговування з періодичним контролем технічного стану. Узагальнено риси представлених у цьому дослідженні математичних моделей технічного обслуговування. **Висновки.** Таким чином, кількісна оцінка рівнів ефективності систем технічного обслуговування є важливим елементом у схемі розрахунку ефективності використання вантажних

суден як комерційних транспортних засобів метою експлуатації яких є отримання максимальних прибутків при заданих високих рівнях безпеки і регулярності використання. При детальному розгляді системи технічного обслуговування в її властивостях вбачаються всі ознаки складної ергатичної системи. У теперішній час теорія дослідження складних ергатичних систем має досить розвинутий математичний апарат. Тому, для розробки методологічних основ аналізу і оцінки ефективності систем технічного обслуговування вантажних суден та судових технічних засобів доцільно використовувати саме теорію дослідження складних ергатичних систем.

**Ключові слова:** ефективність, технічне, обслуговування, оцінювання, судно, експлуатація, СУБ, МКУБ, ІМО.

### THE MAIN PRINCIPLES OF ASSESSING THE EFFICIENCY OF SHIP MAINTENANCE

A.I. Golovan<sup>1</sup>, I.V. Gritsuk<sup>2</sup>

<sup>1</sup>PhD (Engineering), Associate Professor of Navigation and Maritime Safety Department,  
Odesa National Maritime University, Odesa, Ukraine,  
ORCID ID: 0000-0001-6589-4381

<sup>2</sup>DSc (Engineering), Professor of Ship Power Plants Operation Department,  
Kherson State Maritime Academy, Kherson, Ukraine,  
ORCID ID: 0000-0001-7065-6820

#### **Summary**

**Introduction.** The article considers modern problems of researching the efficiency of the cargo ship maintenance system. Comprehensive methods of guaranteeing the required efficiency of cargo ship maintenance systems consist of a set of measures to assess, improve, and control the reliability, accuracy, efficiency, quality of operation and other operational characteristics of cargo ships and available shipboard technical means. Integrated assurance methods are implemented both in the development and production of cargo ships and directly during their operation by the shipping company. The integrated use of methods for improving the efficiency of cargo ship maintenance systems opens ways to significantly improve the reliability and quality of operation of the cargo ship's functional systems. The basis of these methods is a quantitative assessment of the effectiveness of maintenance systems - a tool that allows to evaluate the effectiveness of the actions taken to ensure the required reliability and quality of maritime transport. The analysis of previous studies and publications indicates the absence of a single methodological approach to determining the performance indicators of cargo ship maintenance systems, which would allow considering the structure and frequency of maintenance, type of operational control, depth of recovery and external manifestation of failures. The purpose of the article is to consider the most typical of the published mathematical models of maintenance, to identify the common features of the models under consideration and to analyze the most typical mathematical models of maintenance to find a single methodological approach to determining the performance indicators of maintenance systems for maritime transport. **Results.** The most characteristic of the published mathematical models of maintenance with periodic monitoring of technical condition are considered. The features of the mathematical

*models of maintenance presented in this study are generalized. Conclusions. Thus, quantitative assessment of the levels of efficiency of maintenance systems is an important element in the scheme of calculating the efficiency of using cargo ships as commercial vehicles whose purpose of operation is to maximize profits at given high levels of safety and regularity of use. A detailed examination of the maintenance system reveals all the features of a complex ergatic system. At present, the theory of complex ergatic systems has a well-developed mathematical apparatus. Therefore, it is advisable to use the theory of complex ergatic systems to develop methodological foundations for analyzing and evaluating the efficiency of cargo ship maintenance systems and ship equipment.*

**Key words:** *efficiency, technical, maintenance, assessment, ship, operation, SMS, ISM Code, IMO.*

**Вступ.** Комплексні способи гарантування необхідної ефективності систем технічного обслуговування вантажних суден складаються з сукупності заходів щодо оцінки, підвищення і контролю надійності, точності, працездатності, якості функціонування та інших експлуатаційних характеристик вантажних суден та наявних судових технічних засобів. Комплексні способи гарантування реалізується як у сфері розробки і виробництва вантажних суден, так і безпосередньо в процесі їх експлуатації судноплавною компанією. Комплексне використання методів підвищення ефективності систем технічного обслуговування вантажних суден відкриває шляхи для суттєвого підвищення надійності і якості роботи функціональних систем вантажного судна. Основу цих методів складає кількісна оцінка ефективності систем технічного обслуговування – інструмент, що дозволяє оцінити ефективність виконаних дій щодо забезпечення необхідної надійності і якості роботи засобів морського транспорту.

**Постановка проблеми.** Під ефективністю системи технічного обслуговування прийнято розуміти сукупність ознак системи технічного обслуговування, які характеризують співвідношення між матеріальними, часовими або трудовими витратами на підтримку і відновлення працездатності засобів морського транспорту і ефектом, що досягається. Ефективність систем технічного обслуговування суттєво залежить від таких системних властивостей засобів морського транспорту як: безвідмовність, ремонтпридатність і довговічність, а також від імовірності результатів і тривалості експлуатаційного контролю. Але існує суттєва розбіжність між показниками ефективності систем технічного обслуговування засобів морського транспорту що визначені в науковій літературі і тими, що використовуються в судноплавних компаніях.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Поданий короткий аналіз найбільш характерних математичних моделей технічного обслуговування [1–30] вказує на відсутність єдиного методологічного підходу визначення показників ефективності систем технічного обслуговування засобів морського транспорту, який би надавав можливість враховувати структуру і періодичність технічного обслуговування, вид експлуатаційного контролю, глибину відновлення і зовнішній прояв відмов.

**Формулювання цілей статті.** Метою статті є розгляд найбільш характерних з опублікованих математичних моделей технічного обслуговування, виявлення загальних рис розглянутих моделей і аналіз найбільш характерних математичних

моделей технічного обслуговування з метою пошуку єдиного методологічного підходу визначення показників ефективності систем технічного обслуговування засобів морського транспорту.

**Виклад основного матеріалу.**

До показників ефективності систем технічного обслуговування засобів морського транспорту що визначені в науковій літературі найбільш часто відносять наступні показники імовірності і тривалості експлуатаційного контролю, безвідмовності, ремонтпридатності і довговічності засобів морського транспорту, а саме:

$F(t)$  – функція яка характеризує напрацювання до відмови;

$t_r$  – тривалість відновлювальних робіт;

$M$  – середній ресурс;

$r(t)$  і  $\mu(t)$  – умовні імовірності «помилкової відмови» і «невиявленої відмови» при контролі технічного стану в момент  $t$ ;

$t_c$  – тривалість контролю технічного стану.

Класичні та сучасні публікації в області математичного моделювання процесів технічного обслуговування засобів морського транспорту присвячено задачам пошуку, за обраним критерієм, оптимальних проміжків часу для проведення технічного обслуговування. У 1959 і 1960 роках Барлоу і Хантер опублікували дві статті на тему «Математичні моделі для надійності систем» [1, 2], в яких оптимальні проміжки часу для проведення технічного обслуговування визначаються з умови мінімізації середніх експлуатаційних витрат:

$$R = \sum_{i=0}^{\infty} \int_{t_i}^{t_{i+1}} [C_c t_c (i+1) + Z(t_{i+1} - \theta)] dF(\theta) + C_r t_r, \quad (1)$$

де  $C_c$  – середні витрати в одиницю часу на роботи по контролю технічного стану;

$C_r$  – середні витрати в одиницю часу на відновлювальні роботи;

$t_r$  – тривалість відновлювальних робіт;  $t_c$  – тривалість контролю технічного стану;  $Z$  – середній збиток в одиницю часу через перебування засобу морського транспорту у стані прихованої відмови;  $\theta$  – момент відмови засобу морського транспорту;  $t_i$  – момент проведення технічного обслуговування. В формулі (1) передбачається, що умовні імовірності «помилкової відмови» –  $r(t)$  і «невиявленої відмови» –  $\mu(t)$  при контролі технічного стану дорівнюють нулю  $\gamma(t) = \mu(t) = 0$ ,  $M = \infty$  і відмови засобу морського транспорту виявляються тільки під час технічного обслуговування.

Майже через 50 років, після Барлоу і Хантера у 2008 році, Епштейн та Вайсман продовжили роботу за цією тематикою та опублікували статтю також на тему «Математичні моделі для надійності систем» [3], в якій приведена формула для розрахунку середніх експлуатаційних витрат при експоненціальному законі розподілу напрацювання до відмови і  $t_i = i\tau$ :

$$R = \frac{C_c t_c + Z\tau}{1 - e^{-\lambda\tau}} - \frac{Z}{\lambda} + C_r t_r, \quad (2)$$

де  $\tau$  – періодичність технічного обслуговування;  $\lambda$  – інтенсивність відмов засобів морського транспорту. З формули (2) неважко отримаємо формулу (3) для

розрахунку коефіцієнта готовності при ідеальній системі технічного обслуговування:

$$A_R = \frac{1 - e^{-\lambda\tau}}{\lambda[\tau + t_r(1 - e^{-\lambda\tau})]}, \quad (3)$$

Фітч у статті на тему «Технологія технічного обслуговування» [4] отримав функцію визначення експлуатаційних витрат з урахуванням помилок контролю у наступному вигляді:

$$C_\theta = \begin{cases} \gamma \sum_{m=1}^i \omega^{m-1}(mc + s) + \chi\omega^i, & \text{коли } t_i < \theta \leq t_{i+1} \\ \sum_{i=1}^n \omega^{i-1}\chi(ic + s) + \omega^n(nc + Z(M - \theta)), & \text{коли } t_n < \theta \leq M, \\ \sum_{i=1}^n \omega^{i-1}\chi(ic + s) + nc\omega^n, & \text{коли } \theta > M \end{cases} \quad (4)$$

де  $c = C_c t_c$ ;  $n$  – число контрольних операцій всередині інтервалу  $(\theta, T)$ ;  $\chi = (1 - \mu) \sum_{m=i+1}^n \mu^{m-i-1}(mc + Z(t_m - \theta)) + \mu^{n-i}(nc + Z(M - \theta))$ ;  $s$  – штраф за визнання засобу морського транспорту неприцездатним тоді, як він є працездатним;  $M$  – середній ресурс;  $\omega = 1 - \gamma$ . Формула (4) отримана з наступних припущень – імовірності "помилкової відмови" і "невиявленої відмови" не залежать від напрацювання засобу морського транспорту і результатів попереднього технічного обслуговування. В статті авторства Фітча [5] показано, що дані допущення справедливі тільки в тому випадку, коли закон розподілу напрацювання до відмови є експоненціальним, математичні очікування і дисперсія похибки виміру кожного з контрольованих параметрів не залежать від напрацювання.

В роботі Гарланда та Стейнера [6] отримана формула для коефіцієнту готовності засобів морського транспорту з періодичним контролем технічного стану при експоненціальному законі розподілу напрацювання до відмови:

$$A_r = \frac{1 - e^{-\lambda\tau}}{(1 - e^{-\lambda\tau})\left(e^{-\lambda\tau} + \lambda\tau\frac{1}{\varpi}\right) + \lambda t_c \left[1 + \frac{1}{\varpi}(1 - e^{-\lambda\tau})\right] + \lambda t_r[1 - \omega e^{-\lambda\tau}]}, \quad (5)$$

де  $\omega = 1 - \lambda$ ;  $\varpi = 1 - \mu$ .

Якщо по аналогії з формулою (1) припустити що умовні імовірності «помилкової відмови» –  $\gamma(t)$  і «невиявленої відмови» –  $\mu(t)$  при контролі технічного стану дорівнюють нулю  $\gamma(t) = \mu(t) = 0$ , то отримуємо формулу (6) для розрахунку коефіцієнту готовності при ідеальному технічному обслуговуванні:

$$A_R = \frac{1 - e^{-\lambda\tau}}{e^{-\lambda\tau}(1 - e^{-\lambda\tau}) + \lambda t_c + \lambda[\tau + t_r(1 - e^{-\lambda\tau})]}, \quad (6)$$

В роботі Моблі [7] приведені наступні вираження для розрахунку коефіцієнту готовності засобів морського транспорту непостійного використання, або таких, які знаходяться на збереженні:

$$A_r = \frac{1 - e^{-\lambda\tau}}{\lambda \left( (\tau + t_c + \gamma_r) q e^{-\lambda\tau} + \left[ (\tau + t_r) \frac{1}{1 - \mu} + t_r \right] \frac{1}{1 - \alpha} (1 - q e^{-\lambda\tau}) \right)}, \quad (7)$$

де  $\alpha$  – імовірність того що відновлення не завершено;  $q$  – імовірність безвідмовної роботи засобів морського транспорту до моменту їх технічного обслуговування.

В роботі Фітча [8] визначена стратегія обслуговування засобів морського транспорту, що зберігається на інтервалі ресурсу  $(M, \theta)$ . Функція експлуатаційних витрат має вид:

$$C(\theta) = \begin{cases} \varpi(i+1)c + \varpi Z(t_{i+1} - \theta) + \chi, & \text{коли } t_i < \theta \leq t_{i+1} \\ nc + Z(M - \theta), & \text{коли } t_n < \theta \leq M \\ nc, & \text{коли } \theta > M \end{cases}, \quad (8)$$

де  $\chi = (1 - \mu) \sum_{m=i-1}^{n-1} \mu^{m-i} ((m+1)c + Z(t_{m+1} - \theta)) + \mu^{n-i} (nc + \varpi = 1 - \mu)$ .

Формулу (9) для розрахунку коефіцієнту готовності засобів морського транспорту з періодичним контролем технічного стану отримано в роботах Гірджара, Шеффера, Бібе, Гайтнера і Блока [9, 10, 11]:

$$A_R = \frac{t_1(1 - \mu)(1 - P_s(\tau))}{\tau + t_2(1 - P_{ms}(\tau)) + (\gamma P_{ms}(\tau) - \mu t_2(1 - P_s(\tau))) + 2t_4 t_5(1 - P_s(\tau)) + t_6} \quad (9)$$

де  $P_{ms}(\tau)$  і  $P_s(\tau)$  – імовірності того, що в засобі морського транспорту і засобі контролю не виникає жодного дефекту протягом напрацювання  $M$  відповідно;  $t_1 \dots t_6$  – середні тривалості безвідмовної роботи засобу морського транспорту, відновлення засобу морського транспорту, відновлення засобу контролю, самоконтролю, технічного обслуговування засобу морського транспорту відповідно.

Середні експлуатаційні витрати пов'язані з технічним обслуговуванням засобів морського транспорту і з втратами внаслідок прихованих відмов визначені в роботі Ленахена [12]:

$$R = \sum_{i=0}^{\infty} \int_{t_i}^{t_{i+1}} \left[ \int_0^{t_{i+1}-t} (ic + Zy) dG(y) + [c(i+1) + Z(t_{i+1} - t)] \bar{G}(t_{i+1} - t) \right] dF(t), \quad (10)$$

де  $\bar{G}(t) = 1 - G(y)$  – функція розподілу часу прояву відмови. Умови за яких отримана формула (10) –  $\gamma(t) = \mu(t) = 0$  і  $M - \infty$ .

Показник ефективності запропонований в роботі Уїлмотта і Маккарті [13] отриманий на основі прогнозування технічного стану засобів морського транспорту:

$$E(\tau) = \frac{W(\tau)}{C_i(\tau)}, \quad (11)$$

де  $W(\tau)$  – користь у середньому напрацюванні засобів морського транспорту за рахунок попередження відмов;  $C_i(\tau)$  – середні витрати на прогнозування технічного стану, яке здійснюється з періодичністю  $\tau$ . Недолік цього показника ефективності полягає в тому, що він не враховує характеристик ремонтпридатності

і довговічності засобів морського транспорту, а також імовірностей здійснення помилок у процесі прогнозування технічного стану.

Показник ефективності системи технічного обслуговування з тестовим контролем запропонований в роботі Майєра і ЛеФрансуа [14] у наступному вигляді:

$$E(t) = \frac{(1 - \chi(t_0))P(t)}{(1 - \chi(t_0))P(t_0) + \mu(t_0)(1 - P(t_0))}, \text{ коли } t \geq t_0 \quad (12)$$

де  $P(t)$  – імовірність безвідмовної роботи протягом напрацювання  $t$ ,  $t_0$  – момент проведення технічного обслуговування. Показник ефективності 12 не враховує факту багаторазового проведення технічного обслуговування засобів морського транспорту в процесі експлуатації.

В роботі Хольнагеля [15] розглянута трирівнева стратегія технічного обслуговування засобів морського транспорту і визначені рекурентні моделі знаходження імовірностей експлуатації суден із відмовами. Математична модель побудована при тих же граничних умовах про характер поведінки показників імовірності, що і в роботі Фітча на тему «Технологія технічного обслуговування» [4].

В статті Міловановича і Папіча [16] запропоновано ряд математичних моделей управління експлуатаційною надійністю засобів морського транспорту, які дозволяють виконувати аналіз впливу багатоетапного технічного обслуговування на характеристики безвідмовності засобів морського транспорту. В представлених моделях систем технічного обслуговування регенерація стану контрольованої частини судна виконується незалежно від результатів контролю його технічного стану, а характеристики імовірності цього контролю в представлених моделях не враховуються.

Моделі з використанням напівмарківських процесів для розрахунку параметрів потоку відмов і коефіцієнту готовності при різних стратегіях контролю технічного стану засобів морського транспорту представлені в роботі Грабського [17]. Представлені залежності для розрахунку коефіцієнту готовності не враховують характеристик імовірності результатів контрольних операцій.

Математичні моделі для розрахунку коефіцієнту готовності засобів морського транспорту з періодичним контролем технічного стану представлені в роботах Кістера і Хокінса [18, 19, 20, 21]. У вказаних моделях застосовано припущення ідеальності засобів контролю і забраковану, через відмову, систему замінюють на нову.

Формула для визначення імовірність працездатності засобів морського транспорту у будь-який момент часу  $\Delta t$  після технічного обслуговування  $n$  отримана в роботі Веласко-Галлего та Лазакіса [22] для однорідного марківського процесу контролю і відновлення працездатності, і має вид:

$$P(t_n + \Delta t) = \prod_{i=1}^s P_i(t_n) P_{i\sigma}(\Delta t) \prod_{b=s+1}^S P_b(0) P_{b\sigma}(t_n + \Delta t) \quad (13)$$

де  $P_i(t_n)$  – імовірність працездатності за контрольованим параметром  $i$  в момент  $t_n$ ;  $P_{i\sigma}(\Delta t_n)$  – імовірність безвідмовної роботи за контрольованим параметром  $i$  за час  $\Delta t$  після технічного обслуговування;  $P_b(0)$  – імовірність початкової працездатності

за неконтрольованим параметром  $b$ ;  $P_{b\sigma}(t_n + \Delta t)$  – імовірність безвідмовної роботи за неконтрольованим параметром  $b$  за час  $(t_n + \Delta t)$ ;  $s$  – число контрольованих параметрів;  $S$  – загальне число параметрів засобу морського транспорту.  $\gamma = \mu = 0$  – умови при яких було знайдено формулу (13).

Середні питомі витрати на технічне обслуговування розраховуються на основі Марківської моделі що представлена в роботі Санчес-Ергедаса, Мена-Ньето та Родріго-Муньоса [23], і має вид:

$$E(C_0) = PE_1(C_0) + (1 - P)E_2(C_0), \quad (14)$$

де  $P$  – імовірність правильного визначення стану системи;  $E_1(C_0)$  – математичне очікування витрат за один крок для випадку, коли збігаються дійсний і вимірний стани системи;  $E_2(C_0)$  – математичне очікування витрат через похибки засобів контролю. Формула (14) не враховує багаторазового технічного обслуговування засобів морського транспорту в процесі експлуатації і не чутлива до внесення змін у періодичність технічного обслуговування.

В роботі Каратуга [24] приведений техніко-економічний показник ефективності стратегії технічного обслуговування за станом з контролем параметрів:

$$E(t) = \frac{C_M}{P[\omega C_c + \gamma C_{cM}] + q[\mu(C_c + C_b) + \varpi C_{cM}]} \quad (15)$$

де  $C_M$  і  $C_c$  – відповідно середні витрати на технічне обслуговування і визначення технічного стану засобу морського транспорту;  $C_b$  – втрати через невиконання оперативної задачі;  $P$  – імовірність працездатного стану засобу морського транспорту;  $q = 1 - P$ ;  $\omega = 1 - \gamma$ ;  $\varpi = 1 - \mu$ ;  $C_c = C_c + C_M$ . Цей показник надає змогу оцінювати ефективність одноразового виконання технічного обслуговування.

В статті Лазакіса, Дікіса, Міхала та Феотокатоса [25] приведена напівмарківська модель технічного обслуговування, яка дозволяє визначити середні питомі витрати на технічне обслуговування, коефіцієнт готовності і коефіцієнт технічного використання. В формулах для розрахунку показників ефективності технічного обслуговування враховані імовірності  $\gamma$  – «помилкової відмови» і  $\mu$  – «невиявленої відмови». Математична модель побудована при тих же граничних умовах про характер поведінки показників імовірності, що і в роботі Фітча на тему «Технологія технічного обслуговування» [4].

В роботі Дуан, Лі, Ліу [26] розглянута математична модель системи технічного обслуговування з періодичним обслуговуванням. Представлена наступна формула для розрахунку коефіцієнта готовності:

$$A_R = \sum_{n=1}^{\infty} P_n \prod_{m=0}^{n-1} \frac{1 - \mu_m}{\sum_{n=1}^{\infty} \left[ P_n + (P_{n-1} P_n) \frac{1 - \mu_n}{1 - \mu_n} \prod_{m=0}^n (1 - \mu_m) \right] + 1} \quad (16)$$

де  $\gamma_n$ ,  $\mu_n$  – умовні імовірності «помилкової відмови» і «невиявленої відмови» при технічному обслуговуванні  $n$ ;  $P_n$  – імовірність безвідмовної роботи засобів морського транспорту протягом наробітку  $n \cdot \Delta t$ . Але ця формула не враховує характеристик ремонтпридатності і довговічності засобів морського транспорту. В розглянутій математичній моделі відсутня формалізація правила заміни забракованих



елементів засобів морського транспорту, що надало б змогу визначити кількісні характеристики суднових технічних засобів, які поступають на заміну.

В роботі Кандеміра і Целіка [27] досліджена стратегія проведення технічного обслуговування засобів морського транспорту, у якій виникають явні і приховані відмови. Передбачається, що відмови засобів морського транспорту можуть бути виявлені з імовірністю  $1 - \mu$ . При експоненціальному законі розподілу напрацювання до відмови отримано формулу для коефіцієнта готовності в якій прийнята нульова імовірність «помилкової відмови»  $\gamma_n = 0$ .

В роботі Ямашіро, Сатох і Юаса [28] досліджена паралельна система, яка складається з двох блоків, відмови кожного з блоків якої можуть бути виявлені тільки під час технічного обслуговування. Виникнення відмов в кожному з блоків розподілені за експоненціальним законом. Формула для розрахунку коефіцієнта готовності отримана з використанням математичного апарата Марківських процесів.

В [29] на відміну від [27] передбачається миттєва індикація блоку, що відмовив. А в [30] вирішена задача визначення оптимальної періодичності ТО за критерієм максимуму  $K_g$  для відновлюваної резервованої системи. В [31] побудована математична модель обслуговування резервованої системи з двох блоків, відмови якої виявляються тільки під час ТО. Вважається, що наробіток системи до відмови розподілений за експонентним законом. В роботах [28, 29, 30] передбачається нульова імовірність «помилкової відмови» і «невиявленої відмови»  $\gamma = \mu = 0$ .

**Висновки.** Розглянуто найбільш характерні з опублікованих математичних моделей технічного обслуговування з періодичним контролем технічного стану. Загальна риса представлених у цьому дослідженні математичних моделей технічного обслуговування полягає в тому що в них не враховується структура засобів морського транспорту.

Сучасні методи оцінки ефективності систем технічного обслуговування вантажних суден мають ряд суттєвих недоліків і обмежень, які знижують ефективність розроблених і проведених заходів. Вказаний факт лежить в основі того, що реальні показники ефективності багатьох систем технічного обслуговування в процесі експлуатації часто нижче від розрахункових значень і не задовольняють вимогам нормативних документів, СУБ судна і судноплавної компанії та суттєво впливають на конкурентоспроможність судна і судноплавної компанії. Така ситуація обумовлена наступними основними причинами:

По-перше, для нормування і оцінки ефективності систем технічного обслуговування вантажних суден, як правило, використовуються показники, запозичені з теорій надійності і експлуатації простих систем. Ці показники враховують лише факт зміни ефективності елементів системи технічного обслуговування, але не висвітлюють вплив окремих факторів на підсумковий результат функціонування систем технічного обслуговування і розглядають вантажні судна як складні технічні системи, а не як комерційні засоби транспорту.

По-друге, зараз практично відсутні науково-обґрунтовані методи оцінки ефективності систем технічного обслуговування і оцінки її впливу на ефективність функціонування вантажних суден.

По-третє, важливою особливістю сучасних вантажних суден є функціональна надлишковість більшості їхніх функціональних систем, що дозволяє вирішувати,

різними способами, задачі з технічного обслуговування поставлені перед судноплавною компанією. В свою чергу, ці способи характеризуються властивим рівнем ефективності систем технічного обслуговування.

Виходячи із зазначеного, кількісна оцінка рівнів ефективності систем технічного обслуговування є важливим елементом у схемі розрахунку ефективності використання вантажних суден як комерційних транспортних засобів метою експлуатації яких є отримання максимальних прибутків при заданих високих рівнях безпеки і регулярності використання.

При детальному розгляді системи технічного обслуговування в її властивостях вбачаються всі ознаки складної ергатичної системи. У теперішній час теорія дослідження складних ергатичних систем має досить розвинутий математичний апарат. Тому, для розробки методологічних основ аналізу і оцінки ефективності систем технічного обслуговування вантажних суден та суднових технічних засобів доцільно використовувати саме теорію дослідження складних ергатичних систем.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. R.E. Barlow, L.C. Hunter, "Mathematical models for system reliability", Sylvania Electronic Defense Labs., Rept. No. EDL-E35, Aug 1959.
2. R.E. Barlow, L.C. Hunter, "Mathematical models for system reliability, part II", The Sylvania Technologist, vol. 13, 1960, pp. 55-65.
3. Epstein, B. J., & Weissman, I. (2008). Mathematical Models for Systems Reliability. <https://doi.org/10.1201/9781420080834>
4. Fitch, E. (1992). Maintenance Technology. Elsevier eBooks, 1–18. <https://doi.org/10.1016/b978-1-85617-166-3.50004-4>
5. Fitch, E. (1992). Wear Stability. Elsevier eBooks, 217–259. <https://doi.org/10.1016/b978-1-85617-166-3.50011-1>
6. Garland, D., & Stainer, F. (1970). Modern Electronic Maintenance Principles: FAULT-FINDING GUIDES. <https://doi.org/10.1016/b978-0-08-014188-6.50015-0>
7. Mobley, R.K. (2004). Maintenance Fundamentals (Second Edition): Planning and Scheduling. <https://doi.org/10.1016/b978-075067798-1/50025-x>
8. Fitch, E. (1992). Proactive Maintenance for Mechanical Systems: The Proactive Approach. In Elsevier eBooks (pp. 287–317). Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/b978-1-85617-166-3.50013-5>
9. Girdhar, P., & Scheffer, C. (2004). Practical Machinery Vibration Analysis and Predictive Maintenance: Machinery fault diagnosis using vibration analysis. In Elsevier eBooks (pp. 89–133). Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/b978-075066275-8/50005-9>
10. Beebe, R. S. (2004). Predictive Maintenance of Pumps Using Condition Monitoring: Performance analysis and its application to optimise time for overhaul. In Elsevier eBooks (pp. 56–71). Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/b978-185617408-4/50004-8>
11. Geitner, F. K., & Bloch, H. P. (2012). Machinery Failure Analysis and Troubleshooting: The “Seven Cause Category Approach” to Root-Cause

- Failure Analysis. In Elsevier eBooks. Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-386045-3.00009-x>
12. Lenahan, T. (2005). Turnaround, Shutdown and Outage Management. Effective Planning and Step-by-Step Execution of Planned Maintenance Operations: Cost control. <https://doi.org/10.1016/b978-075066787-6/50010-9>
  13. Willmott, P., & McCarthy, D. D. (2001). Total Productivity Maintenance (Second Edition): Assessing the true costs and benefits of TPM. In Elsevier eBooks (pp. 17–22). Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/b978-075064447-1/50005-9>
  14. Mayer, P., & LeFrancois, D. (1991). SURFWEAR-EXPERT SYSTEM FOR ENGINEERING OF WEAR RESISTANT SURFACES AND FOR WEAR PROBLEM DIAGNOSIS. Proceedings of Metallurgical Society of Canadian Institute of Mining and Metallurgy. <https://doi.org/10.1016/b978-0-08-041441-6.50029-1>
  15. Hollnagel, E. (1998). Cognitive Reliability and Error Analysis Method (CREAM): Qualitative Performance Prediction. In Elsevier eBooks (pp. 216–233). Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/b978-008042848-2/50008-7>
  16. Milovanovic, Z., Papić, L. R., Milovanovic, V., Milovanović, S., Dumonjić-Milovanović, S., & Branković, D. (2021). Methods of modeling the maintenance of a steam turbine based on condition assessment. Elsevier eBooks, 135–177. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-819582-6.00007-1>
  17. Grabski, F. (2015). Semi-Markov Processes: Applications in System Reliability and Maintenance. In Elsevier eBooks. Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/c2013-0-14260-2>
  18. Kister, T.C., & Hawkins, B.L. (2006). Performing the Maintenance Scheduling Function. Maintenance Planning and Scheduling, 189–210. <https://doi.org/10.1016/b978-075067832-2/50009-4>
  19. Kister, T.C., & Hawkins, B.L. (2006). Special Case: Maintenance Planning and Scheduling for Maintenance Outages – The Plant Shutdown. Maintenance Planning and Scheduling. <https://doi.org/10.1016/b978-075067832-2/50010-0>
  20. Kister, T.C., & Hawkins, B.L. (2006). Metrics: Measuring Planning and Scheduling Performance. Maintenance Planning and Scheduling. <https://doi.org/10.1016/b978-075067832-2/50012-4>
  21. Kister, T.C., & Hawkins, B.L. (2006). Planning and Scheduling Fundamentals-Self-Test. Maintenance Planning and Scheduling. <https://doi.org/10.1016/b978-075067832-2/50013-6>
  22. Velasco-Gallego, C., & Lazakis, I. (2022). A real-time data-driven framework for the identification of steady states of marine machinery. Applied Ocean Research, 121, 103052. <https://doi.org/10.1016/j.apor.2022.103052>
  23. Sánchez-Herguedas, A., Mena-Nieto, A., & Rodrigo-Muñoz, F. (2021). A new analytical method to optimise the preventive maintenance interval by using a semi-Markov process and z-transform with an application to

- marine diesel engines. *Reliability Engineering and System Safety*, 207, 107394. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2020.107394>
24. Karatuğ, A., & Arslanoğlu, Y. (2022). Development of condition-based maintenance strategy for fault diagnosis for ship engine systems. *Ocean Engineering*, 256, 111515. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.111515>
25. Lazakis, I., Dikis, K., Michala, A. L., & Theotokatos, G. (2016). Advanced Ship Systems Condition Monitoring for Enhanced Inspection, Maintenance and Decision Making in Ship Operations. *Transportation Research Procedia*, 14, 1679–1688. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2016.05.133>
26. Duan, C., Li, Z., & Liu, F. (2020). Condition-based maintenance for ship pumps subject to competing risks under stochastic maintenance quality. *Ocean Engineering*, 218, 108180. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.108180>
27. Kandemir, C., & Celik, M. (2021). Determining the error producing conditions in marine engineering maintenance and operations through HFACS-MMO. *Reliability Engineering and System Safety*, 206, 107308. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2020.107308>
28. Yamashiro, M., Satoh, M., & Yuasa, Y. (1992). Parallel-series and series-parallel redundant systems consisting of units having two kinds of failure rates. *Microelectronics Reliability*, 32(5), 611–613. [https://doi.org/10.1016/0026-2714\(92\)90615-r](https://doi.org/10.1016/0026-2714(92)90615-r)
29. Kandemir, C., Celik, M., Akyuz, E., & Aydin, O. (2019). Application of human reliability analysis to repair & maintenance operations on-board ships: The case of HFO purifier overhauling. *Applied Ocean Research*, 88, 317–325. <https://doi.org/10.1016/j.apor.2019.04.019>
30. Akyuz, E., Akgun, I., & Celik, M. (2016). A fuzzy failure mode and effects approach to analyse concentrated inspection campaigns on board ships. *Maritime Policy*, 43(7), 887–908. <https://doi.org/10.1080/03088839.2016.1173737>

## REFERENCES

1. R.E. Barlow, L.C. Hunter, "Mathematical models for system reliability", *Sylvania Electronic Defense Labs., Rept. No. EDL-E35*, Aug 1959.
2. R.E. Barlow, L.C. Hunter, "Mathematical models for system reliability, part II", *The Sylvania Technologist*, vol. 13, 1960, pp. 55-65.
3. Epstein, B. J., & Weissman, I. (2008). *Mathematical Models for Systems Reliability*. <https://doi.org/10.1201/9781420080834>
4. Fitch, E. (1992). *Maintenance Technology*. Elsevier EBooks, 1–18. <https://doi.org/10.1016/b978-1-85617-166-3.50004-4>
5. Fitch, E. (1992). *Wear Stability*. Elsevier EBooks, 217–259. <https://doi.org/10.1016/b978-1-85617-166-3.50011-1>
6. Garland, D., & Stainer, F. (1970). *Modern Electronic Maintenance Principles: FAULT-FINDING GUIDES*. <https://doi.org/10.1016/b978-0-08-014188-6.50015-0>

7. Mobley, R. K. (2004). *Maintenance Fundamentals (Second Edition): Planning and Scheduling*. <https://doi.org/10.1016/b978-075067798-1/50025-x>
8. Fitch, E. (1992). Proactive Maintenance for Mechanical Systems: The Proactive Approach. In Elsevier eBooks (pp. 287–317). Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/b978-1-85617-166-3.50013-5>
9. Girdhar, P., & Scheffer, C. (2004). Practical Machinery Vibration Analysis and Predictive Maintenance: Machinery fault diagnosis using vibration analysis. In Elsevier eBooks (pp. 89–133). Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/b978-075066275-8/50005-9>
10. Beebe, R. S. (2004). Predictive Maintenance of Pumps Using Condition Monitoring: Performance analysis and its application to optimise time for overhaul. In Elsevier eBooks (pp. 56–71). Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/b978-185617408-4/50004-8>
11. Geitner, F. K., & Bloch, H. P. (2012). Machinery Failure Analysis and Troubleshooting: The “Seven Cause Category Approach” to Root-Cause Failure Analysis. In Elsevier eBooks. Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-386045-3.00009-x>
12. Lenahan, T. (2005). Turnaround, Shutdown and Outage Management. Effective Planning and Step-by-Step Execution of Planned Maintenance Operations: Cost control. <https://doi.org/10.1016/b978-075066787-6/50010-9>
13. Willmott, P., & McCarthy, D. D. (2001). Total Productivity Maintenance (Second Edition): Assessing the true costs and benefits of TPM. In Elsevier eBooks (pp. 17–22). Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/b978-075064447-1/50005-9>
14. Mayer, P., & LeFrancois, D. (1991). SURFWEAR-EXPERT SYSTEM FOR ENGINEERING OF WEAR RESISTANT SURFACES AND FOR WEAR PROBLEM DIAGNOSIS. Proceedings of Metallurgical Society of Canadian Institute of Mining and Metallurgy. <https://doi.org/10.1016/b978-0-08-041441-6.50029-1>
15. Hollnagel, E. (1998). Cognitive Reliability and Error Analysis Method (CREAM): Qualitative Performance Prediction. In Elsevier eBooks (pp. 216–233). Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/b978-008042848-2/50008-7>
16. Milovanovic, Z., Papić, L. R., Milovanovic, V., Milovanović, S., Dumonjić-Milovanović, S., & Branković, D. (2021). Methods of modeling the maintenance of a steam turbine based on condition assessment. Elsevier eBooks, 135–177. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-819582-6.00007-1>
17. Grabski, F. (2015). Semi-Markov Processes: Applications in System Reliability and Maintenance. In Elsevier eBooks. Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/c2013-0-14260-2>
18. Kister, T. C., & Hawkins, B. L. (2006). Performing the Maintenance Scheduling Function. *Maintenance Planning and Scheduling*, 189–210. <https://doi.org/10.1016/b978-075067832-2/50009-4>
19. Kister, T. C., & Hawkins, B. L. (2006). Special Case: Maintenance Planning and Scheduling for Maintenance Outages – The Plant Shutdown.

- Maintenance Planning and Scheduling. <https://doi.org/10.1016/b978-075067832-2/50010-0>
20. Kister, T. C., & Hawkins, B. L. (2006). Metrics: Measuring Planning and Scheduling Performance. *Maintenance Planning and Scheduling*. <https://doi.org/10.1016/b978-075067832-2/50012-4>
  21. Kister, T.C., & Hawkins, B.L. (2006). Planning and Scheduling Fundamentals-Self-Test. *Maintenance Planning and Scheduling*. <https://doi.org/10.1016/b978-075067832-2/50013-6>
  22. Velasco-Gallego, C., & Lazakis, I. (2022). A real-time data-driven framework for the identification of steady states of marine machinery. *Applied Ocean Research*, 121, 103052. <https://doi.org/10.1016/j.apor.2022.103052>
  23. Sánchez-Herguedas, A., Mena-Nieto, A., & Rodrigo-Muñoz, F. (2021). A new analytical method to optimise the preventive maintenance interval by using a semi-Markov process and z-transform with an application to marine diesel engines. *Reliability Engineering and System Safety*, 207, 107394. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2020.107394>
  24. Karatuğ, A., & Arslanoğlu, Y. (2022). Development of condition-based maintenance strategy for fault diagnosis for ship engine systems. *Ocean Engineering*, 256, 111515. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.111515>
  25. Lazakis, I., Dikis, K., Michala, A. L., & Theotokatos, G. (2016). Advanced Ship Systems Condition Monitoring for Enhanced Inspection, Maintenance and Decision Making in Ship Operations. *Transportation Research Procedia*, 14, 1679–1688. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2016.05.133>
  26. Duan, C., Li, Z., & Liu, F. (2020). Condition-based maintenance for ship pumps subject to competing risks under stochastic maintenance quality. *Ocean Engineering*, 218, 108180. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.108180>
  27. Kandemir, C., & Celik, M. (2021). Determining the error producing conditions in marine engineering maintenance and operations through HFACS-MMO. *Reliability Engineering and System Safety*, 206, 107308. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2020.107308>
  28. Yamashiro, M., Satoh, M., & Yuasa, Y. (1992). Parallel-series and series-parallel redundant systems consisting of units having two kinds of failure rates. *Microelectronics Reliability*, 32(5), 611–613. [https://doi.org/10.1016/0026-2714\(92\)90615-r](https://doi.org/10.1016/0026-2714(92)90615-r)
  29. Kandemir, C., Celik, M., Akyuz, E., & Aydin, O. (2019). Application of human reliability analysis to repair & maintenance operations on-board ships: The case of HFO purifier overhauling. *Applied Ocean Research*, 88, 317–325. <https://doi.org/10.1016/j.apor.2019.04.019>
  30. Akyuz, E., Akgun, I., & Celik, M. (2016). A fuzzy failure mode and effects approach to analyse concentrated inspection campaigns on board ships. *Maritime Policy*, 43(7), 887–908. <https://doi.org/10.1080/03088839.2016.1173737>