

Автомобільний, річковий, морський та авіаційний транспорт

УДК 629.5.078:656.075

doi: 10.26906/SUNZ.2024.2.018

А. І. Головань

Одеський національний морський університет, Одеса, Україна

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ АДАПТИВІЗАЦІЇ СИСТЕМИ ТЕХНІЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ ЗА РЕЗУЛЬТАТАМИ ЗМІНИ СТАНУ СУДНОВИХ ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ

Анотація. У статті розглянуто важливу проблему оптимізації системи технічного обслуговування суднових технічних засобів з врахуванням їхнього зношення, поточного та прогнозованого стану. Аналіз останніх досліджень і публікацій в цій області вказує на необхідність розробки адаптивних стратегій обслуговування, спрямованих на ефективне використання ресурсів та підвищення надійності суднових систем. Метою статті є дослідження процесів адаптивізації системи технічного обслуговування за результатами зміни стану суднових технічних засобів та розробка практичних рекомендацій щодо оптимізації цих процесів. Результати статті включають дослідження процесів адаптивізації параметрів системи технічного обслуговування внаслідок одного процесу зміни технічного стану. Автор розглядає методику визначення відносної періодичності технічного обслуговування для визначення робочих точок системи. Зокрема, в статті розглядається вплив зміни технічного стану на витрати та оптимізацію процесів обслуговування. Результати дослідження дозволяють визначити оптимальні, за витратами і часом, стратегії обслуговування з урахуванням зношення та несправностей технічних засобів судна. Висновки підкреслюють важливість розвитку адаптивних підходів до технічного обслуговування суднових систем, що дозволить забезпечити їхню ефективну експлуатацію та підвищити загальну продуктивність морського транспорту.

Ключові слова: адаптивізація, технічне обслуговування, вантажні судна, зміна технічного стану, ефективність, витрати обслуговування, аналіз.

Вступ

Постановка проблеми. У контексті морського транспорту та судноплавства, ефективне технічне обслуговування суднових систем визначає не лише безпеку плавання, але й оптимальну експлуатацію та економічність судноплавного процесу. Однак, в умовах постійної зміни стану технічних засобів суден, традиційні методи обслуговування (за відмовами, регламентний та за станом) можуть виявитися недостатньо ефективними.

Однією з ключових проблем управління технічним обслуговуванням суднових систем є необхідність адаптувати процеси обслуговування до актуального стану обладнання. Традиційні регламентні підходи до технічного обслуговування, що ґрунтуються на фіксованих інтервалах обслуговування, не завжди враховують індивідуальні особливості та потреби суднових систем у ремонті та заміні деталей. Тому, актуальним стає питання розробки та впровадження адаптивних стратегій технічного обслуговування, які базуються не лише на поточному стані обладнання, а й на адаптивізації плану технічного обслуговування у відповідності до прогнозованої зміни цього стану. Це вимагає системного аналізу даних про стан обладнання, розробки алгоритмів адаптації технічного обслуговування до змінного стану суднових систем, а також ефективного використання сучасних технологій та методів моделювання для оптимізації цих процесів.

Основною проблемою, яку вирішує дана стаття, є розробка та дослідження процесів адаптивізації системи технічного обслуговування суднових технічних

засобів з метою підвищення ефективності функціонування суден та зменшення експлуатаційних витрат.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проведений аналіз останніх досліджень і публікацій вказує на важливість наукового обґрунтування змін параметрів системи технічного обслуговування технічних засобів вантажних суден. Важливими постають питання: виявлення впливу зміни стану на параметри технічного обслуговування суднових механізмів є критично важливим питанням, що має потенційні наслідки для виходу з ладу обладнання, екологічної безпеки та економічних втрат [1]. Для вирішення цієї проблеми було запропоновано прогнозну модель технічного обслуговування з використанням штучного інтелекту та даних моніторингу в реальному часі [2]. Ця модель може допомогти визначити ключові параметри та потенційні несправності, що уможливило розробку адаптивних стратегій технічного обслуговування. Також рекомендується використовувати підходи до технічного обслуговування на основі стану, що підтримуються управлінням надійністю та ризиками [3]. Крім того, оцінка дестабілізуючих факторів суднових технічних засобів, наприклад факторів у валу головного двигуна може сприяти розробці систем прийняття рішень для компенсації цих впливів [4]. Запропонований напівкількісний метод є більш надійним підходом для вибору стратегій технічного обслуговування суднових машинних систем. [5]. Нова, у час свого появи, методологія поєднує підхід до ризиків і критичності та демонструє з використанням інструментів аналізу режимів, наслідків і критичності відмов (FMCA) та аналізу дерева несправностей (Fault Tree

Analysis) [6]. Запропонована стратегія технічного обслуговування за станом дозволяє мінімізувати загальні витрати, а також вплив на навколишнє середовище [7]. Успіх технічного обслуговування на основі стану залежить від здатності розробляти ефективні моделі прогнозування [8]. У цій статті представлено адаптивну політику технічного обслуговування для систем, що зношуються, з урахуванням як позитивних, так і негативних наслідків, для оптимізації розподілу витрат на технічне обслуговування та порогових значень при збереженні життєвого циклу системи [9]. Очікується, що майбутнє суднових машинних систем буде за технічним обслуговуванням на основі стану, причому більш ефективне управління буде досягнуто за рахунок моніторингу продуктивності та надійності системи [10].

Всі ці дослідження разом підкреслюють важливість розробки та впровадження адаптивних стратегій технічного обслуговування для суднових механізмів. У майбутньому, такий підхід до технічного обслуговування обіцяє бути стандартом в судноплаванні, що дозволить досягти більшої ефективності та надійності суднових механізмів.

Мета статті полягає в дослідженні та аналізі процесів адаптивізації системи технічного обслуговування на основі зміни стану суднових технічних засобів.

Основний матеріал

Задача адаптивізації параметрів системи технічного обслуговування принципово вирішується за допомогою вибору, для реалізації в рамках цифрової стратегії, одного з таких критеріїв:

- Мінімізації відносних витрат часу на усунення відмов або на знаходження в стані технічного обслуговування (знаходження максимуму коефіцієнта технічного використання);
- Мінімізації сумарних витрат на технічне обслуговування (критерій ефективності використання ресурсів);
- Максимальна потрібність в технічному обслуговуванні об'єкта, що зберіг працездатність (критерій – потрібності в ТО).

Варто підкреслити, що задачу адаптивізації параметрів необхідно аналізувати у контексті управління параметрами використовуваної системи технічного обслуговування та її оптимізації через перехід до більш ефективного методу технічного обслуговування. Оптимізаційні процеси мають проводитись з урахуванням допустимих ризиків і відповідно до принципу ALARP (as low as reasonably practicable), що передбачає мінімізацію ризиків до рівня, коли подальше їх зниження стає нераціональним.

Безсумнівно, формування системи технічного обслуговування, яка забезпечить мінімальні витрати, є не зовсім коректною постановкою задачі. Важливою умовою розв'язання цієї задачі є віднесення до витрат на технічне обслуговування не тільки планових витрат, а й непланових, включно з можливою втраченою вигодою в разі відмови обладнання. Таким чином, адаптивізація процесів технічного обслуговування трансформується у безперервну оптимізацію процесів управління відмовами. Визначення запланованих витрат

на технічне обслуговування зазвичай не становить особливих труднощів, за винятком витрат на заміну деталей. Більшість номенклатури змінних частин замінюється при досягненні незадовільного стану, а не за принципом профілактичної заміни (підшипники газотурбонагнітача, тонкостінні підшипники двигунів внутрішнього згоряння). Заводи виробники не прагнуть довести до відома експлуатаційників очікувані ресурси більшості, особливо дорогих деталей. Отже, прогнозування потреби в запасних частинах зазвичай здійснюється на підставі попереднього досвіду чи аналізу надійності. Наприклад, у системі річкового транспорту України існували стандарти витрати деталей двигунів внутрішнього згоряння для групи десяти однакових двигунів за певний період експлуатації. Втрати, асоційовані з відмовами, представляють собою ще більш невизначений параметр.

Часові витрати на непланове технічне обслуговування можуть бути оцінені з певним ступенем достовірності за допомогою аналізу наслідків відмов, в тому числі на основі даних про експлуатацію. Водночас, визначення часових і, зокрема, фінансових витрат на ліквідацію відмов, які призводять до простою транспортного засобу, становить більш складну задачу. Зазвичай, більшість відмов, що спричиняють простій судна, є результатом непередбачуваного співпадіння різних випадкових подій, причому усунення хоча б однієї з цих подій може перервати цю послідовність і запобігти простою.

Такий шлях, заснований на аналізі повних витрат на технічне обслуговування, видається найбільш перспективнішим, хоча його реалізація потребує впровадження системи для всебічного обліку витрат. Існують системи обліку витрат, такі як MOSyS, AMOS, CoCoS, shipmonitoring.org, проте лише MOSyS та shipmonitoring.org передбачають систематичний аналіз операційної діяльності, на відміну від інших зазначених інформаційних систем.

Крім того, в багатьох судноплавних компаніях старші механіки суден навіть не мають доступу до інформації щодо фактичних витрат компанії, як на усунення відмов, так і на планові потреби, що, на думку автора дослідження, є необґрунтованим. У зв'язку з частковою закритістю такої інформації будь-які розробки в області витратної оптимізації повинні бути спрямовані на загальне використання, а не вирішення окремих проблем. Компанія повинна самостійно вирішувати, як використовувати отримані результати, враховуючи особливості своєї діяльності.

1. Дослідження процесів адаптивізації параметрів системи технічного обслуговування за результатами одного процесу зміни технічного стану. З метою забезпечення процесів підвищення ефективності систем технічного обслуговування вантажних суден на основі цифрової стратегії технічного обслуговування суднових технічних засобів досліджувались процеси адаптивізації параметрів обслуговування суднового дизель-генератора на основі аналізу та прогнозування зміни їх технічного стану.

Програма експериментального дослідження зміни стану масляних кілець суднового дизель-генератора включала в себе наступні етапи:

1. Постановка завдання. Визначення об'єкта дослідження (масляні кіліця суднового дизель-генератора). Формулювання завдання: розробка процесів адаптивізації параметрів системи технічного обслуговування на основі аналізу процесів зміни технічного стану.

2. Збір даних. Встановлення сенсорів та засобів моніторингу для збору даних про роботу масляних кіліць суднового дизель-генератора. Запуск системи збору даних та запису інформації про роботу масляних кіліць.

3. Підготовка даних. Обробка та фільтрація зібраних даних. Визначення ключових параметрів для аналізу стану масляних кіліць.

4. Аналіз процесів зміни технічного стану. Визначення залежностей між параметрами та станом масляних кіліць. Виявлення змін у технічному стані та їх причин.

5. Розробка процесів адаптивізації параметрів системи технічного обслуговування. Визначення стратегій зміни параметрів обслуговування на основі результатів аналізу.

6. Тестування та оцінка ефективності. Тестування розроблених процесів на практиці. Оцінка ефективності нової системи технічного обслуговування.

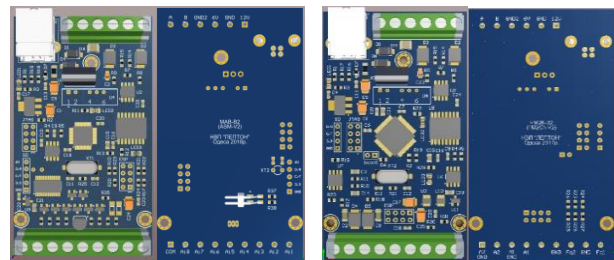
2. **Експериментальні установки для дослідження процесів адаптивізації параметрів системи технічного обслуговування за результатами процесів зміни технічного стану.** Дослідження процесів адаптивізації параметрів системи технічного обслуговування за результатами процесів зміни технічного стану були використані пристрої для збору, аналізу та інтерпретації даних про роботу обслуговуваного обладнання. Вони складаються зі зв'язаних між собою частин і систем: сенсорів для моніторингу параметрів технічного стану, аналітичного програмного забезпечення для обробки та аналізу даних, а також інтегрованих систем збору даних та алгоритмів адаптивного управління. Вимірювальна система містить у собі сенсори для вимірювання різних параметрів роботи обладнання, таких як температура, тиск, оберти, вібрація та інші фізичні величини, які дозволяють визначати стан технічного обладнання та вживати відповідних заходів для підтримки його ефективності. Експериментальна установка для проведення наукового дослідження над двигуном суднового дизель-генератора, заснована на вимірюванні і подальшому аналізі швидкостей зношування кіліць, циліндрової втулки, зміни тиску та витрати палива і масла та складається із таких складових.

Дизель-генератор (рис. 1). Основною складовою експериментальної установки є судновий дизель-генератор, який служить об'єктом дослідження.

Датчики та вимірювальне обладнання. Для вимірювання швидкостей зношування кіліць, циліндрової втулки, зміни тиску та витрати палива і масла проводяться відповідні інструментальні вимірювання. Додатково встановлено вимірювачі (рис. 2, ілюструє 3D візуалізацію плати пристрою спроектованої автором статті у середовищі Altium Designer 18), датчики тиску, температури, витрати палива і масла, а також вимірювачі вібрації підключені за схемою на рис. 3.



Рис. 1. Судновий дизель-генератор



а б

Рис. 2. Пристрої: а – реєстрації аналогових сигналів; б – обчислювач частоти сигналу

Дані та система збору. Отримані від датчиків дані про тиск, температури, витрати палива і масла, а також вимірювачі вібрації та вимірювання швидкості зношування і параметри роботи двигуна збираються системою збору даних ACMS, комп'ютерна система з відповідним програмним забезпеченням для збору, збереження і обробки отриманих даних.

Аналізатори та інструменти аналізу. Для подальшого аналізу даних використовуються спеціалізовані аналізатори та інструменти аналізу ShipDiMRO. Такі, як програмні засоби для статистичного аналізу, машинного навчання та моделювання, які дозволяють встановити взаємозв'язки між параметрами двигуна і швидкістю зношування його складових.

Контрольна система. Для забезпечення надійності та безпеки експерименту встановлена контрольна система, яка виконує функції моніторингу роботи установки та автоматично виконує заходи сигналізації в разі виявлення аномалій або перевищення допустимих значень параметрів.

Описана установка дозволяє проводити експерименти для адаптивізації параметрів системи технічного обслуговування на основі результатів процесів зміни технічного стану суднового дизель-генератора.

3. **Результати дослідження процесів адаптивізації параметрів системи технічного обслуговування за результатами одного процесу зміни технічного стану.** Цей приклад є найпростішим, тому що ідеалізується система процесів, які інтерпретуються як один або обирається один як такий, що визначає потребу в технічному обслуговуванні.

System's "ShipMonitoring" layout on the ship

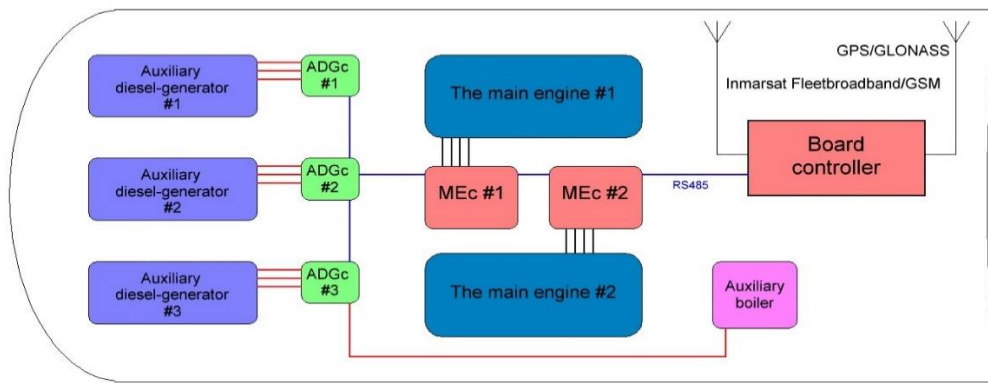


Рис. 3. Схема підключення блоку накопичення даних системи АСМС – моніторингу технічного стану суднових технічних засобів

Відомо, що для допоміжних двигунів необхідність проведення моточистки значною мірою визначається зносом формуючої масляних кілець, унаслідок чого ефективність їхньої роботи падає, що призводить до значного збільшення витрат масла. Знос формуючої кільця призводить до збільшення зазору в замку за формулою: $\Delta\delta = 2\pi \cdot \Delta d$, де Δd – середня зміна ширини масляного кільця в середньому інтервалі між регламентними моточистками Δt_{reg} , коли безпосередньо контролювали зміну зазорів у замках $\Delta\delta$. За експериментальними даними у процесі експлуатації було отримано значення $\Delta d = 0.44$ мм, при $\Delta t_{reg} = 6100$ годин, $\Delta\delta = 2 \cdot \pi \cdot 0.44 = 2.76$ мм.

У безрозмірних одиницях середня швидкість зміни технічного стану вузла визначиться як

$$\gamma_i = \frac{\Delta u_i}{\Delta t_{reg}} = \frac{1}{\Delta t_{reg}} \cdot \frac{\Delta\delta}{\delta_{lim} - \delta_{set}} \quad (1)$$

де установчий зазор $\delta_{set} = 1.15$ мм, а граничний зазор $\delta_{lim} = 4$ мм. Розрахуємо швидкість зміни технічного стану за формулою (1) $\gamma_i = 1/6100 \cdot 2.76/(4 - 1.15) = 0.159$ тис. год⁻¹. При цьому коефіцієнт варіації швидкості зміни технічного стану становив ($V_v = 0.4$). Середнє напрацювання до досягнення гранично допустимого значення зазору в замку (4 мм) унаслідок лінійного прогнозу зміни зазору або фактичних даних за вимірами під час моточистки складало ($T_m = 7900$) годин.

Для того, щоб скористатися розрахунковими кривими параметрів для визначення робочих точок системи технічного обслуговування, необхідно визначити відносну періодичність регламентного технічного обслуговування:

$$\Delta T_{reg} = \frac{\Delta t_{reg}}{T_m} \quad (2)$$

За формулою (2) розрахуємо відносну періодичність технічного обслуговування:

$$\Delta T_{reg} = 6100/7900 = 0.772.$$

Використовуючи поліноміальну залежність результатів відпрацювання циклів експлуатації вантажного судна, представлену у [11] для регламентного методу за встановленої відносної періодичності технічного обслуговування ($\Delta T_{reg} = 0.772$) для

коефіцієнта варіації ($V_v = 0.4$) визначимо ймовірність запобігання досягненню граничного стану регламентною системою ТО ($P_{pre} = 0.5518$), тривалість циклу експлуатації ($T_{cycle} = 0.699$) та залишковий ресурс за зміною стану масляних кілець ($R_{res} = 0.321$).

Трудомісткість планових моточисток двигуна становить ($H_{sch} = 240$ люд. год). Якщо моточистка двигуна виконується в результаті досягнення граничного стану, збільшення трудомісткості оцінюється у 20%, тобто ($k = 1.2$).

Визначимо функцію витрат на виконання регламентного технічного обслуговування:

$$w = P_{pre} \cdot (1 - k) + k \quad (3)$$

За формулою (3) розрахуємо функцію витрат $w = 0.5518 \cdot (1 - 1.2) + 1.2 = 1.08964$.

Витрати віднесені до тривалості циклу експлуатації:

$$Y_{reg} = w/T_{cycle} \quad (4)$$

дорівнюють: $Y_{reg} = 1.08964/0.699 = 1.55886$.

Виражені в абсолютних одиницях витрати на виконання моточисток без урахування витрат на запасні частини становитимуть:

$$\frac{S_{reg}}{T_{cycle}} = \frac{Y_{reg} \cdot S_{sch}}{T_m} = \frac{Y_{reg} \cdot H_{sch} \cdot q \cdot 10^3}{T_m} \quad (5)$$

де годинна ставка виконавців робіт встановлена в компанії ($q = 10$ дол. США/тис. год). За формулою (5) визначимо:

$$\frac{S_{reg}}{T_{cycle}} = \frac{1.55886 \cdot 240 \cdot 10 \cdot 10^3}{7900} = 473.58 \frac{\text{дол. США}}{\text{тис. год}}$$

Слід звернути увагу на відмінність отриманої величини витрат порівняно з величиною, що не враховує можливість виконання моточистки при досягненні граничного стану:

$$\frac{S_{reg}}{T_{cycle}} = \frac{H_{sch} \cdot q \cdot 10^3}{\Delta t_{reg}} \quad (6)$$

За формулою (6) визначимо:

$$\frac{S_{reg}}{T_{cycle}} = \frac{240 \cdot 10 \cdot 10^3}{6100} = 393.44 \frac{\text{дол. США}}{\text{тис. год}}$$

Слід зазначити, що прийняття збільшувального коефіцієнта ($k = 1.2$) до витрат на виконання робіт

унаслідок досягнення двигуном граничного стану, є заниженим. Це особливо справедливо, якщо двигун головний, що визначає провізну здатність судна. Витрати на придбання комплексу поршневих кілець для виконання моточистки становлять $s_2 = 500$ дол. США, проте з огляду на те, що замініні поршневі кільця мають залишковий ресурс ($R_{res} = 0.321$) фактичні витрати на змінно-запасні частини становитимуть:

$$S_{sp} = (1 + R_{res}) \cdot s_2. \quad (7)$$

За формулою (7) визначимо:

$$S_{sp} = (1 + 0.321) \cdot 500 = 660.5 \frac{\text{дол. США}}{\text{тис. год}}$$

Отримана величина витрат може бути уточнена підстановкою залишкових ресурсів для кожної із замінних деталей. Крім того, в цьому разі не враховували витрати довговічніших деталей, тобто тих, що замінюються через дві, три тощо моточистки – у цьому разі витрати на їхнє придбання з урахуванням залишкових ресурсів розподіляються на всі попередні операції технічного обслуговування. Витрати на змінно-запасні частини, віднесені до напрацювання, визначаються за формулою:

$$\frac{S_{sp}}{t} = \frac{1 \cdot 10^3}{T_{cycle} \cdot T_m} \sum_{i=1}^n s_i. \quad (8)$$

За формулою (8) визначимо:

$$\frac{S_{sp}}{t} = \frac{1 \cdot 10^3}{0.699 \cdot 7900} \cdot 660.5 = 124.97 \frac{\text{дол. США}}{\text{тис. год}}$$

Таким чином сумарні витрати на виконання технічного обслуговування становлять:

$$473.58 + 124.97 = 598.55 \text{ дол. США/тис. год.}$$

Якщо перейти на ТО за станом за допомогою застосування контролю стану циліндрів двигуна за допомогою пневматичного індикатора, обліку витрати мастила на дизель, то прогнозовані витрати можуть істотно змінитися. Якщо, як і раніше, забезпечувати таку саму ймовірність запобігання досягненню граничного стану ($P_{pre} = 0.5518$), але виконувати чотири контрольні операції між моточистками, інтервал між якими може бути збільшено до $T_{cycle} = 0.92$ або в абсолютних одиницях $\Delta t_{reg} = 0.92 \cdot 7900 = 7268 \approx 7300$ годин. При цьому залишковий ресурс становитиме ($R_{res} = 0.24$). Крім того, якщо передбачити вісім контрольних операцій за періодичності моточисток 7300 годин ймовірність запобігання граничному стану може бути піднято до величини ($P_{pre} = 0.75$), але залишковий ресурс буде на дещо нижчому рівні ($R_{res} = 0.28$). Тривалість циклу експлуатації становитиме ($T_{cycle} = 0.783$).

Безрозмірна функція витрат (3):

$$w = 0.75 \cdot (1 - 1.2) + 1.2 = 1.05.$$

Витрати віднесені до тривалості циклу експлуатації (4):

$$Y_{reg} = 1.05/0.783 = 1.341.$$

Виражені в абсолютних одиницях витрати на виконання моточисток без урахування витрат на запасні частини становитимуть (5):

$$\frac{S_{reg}}{T_{cycle}} = \frac{1.341 \cdot 240 \cdot 10 \cdot 10^3}{7900} = 407.39 \frac{\text{дол. США}}{\text{тис. год}}.$$

Витрати на змінно-запасні частини віднесені до напрацювання визначаються за формулою (8):

$$\frac{S_{sp}}{t} = \frac{1 \cdot 10^3 \cdot (1 + 0.28) \cdot 500}{0.783 \cdot 7900} = 103.46 \frac{\text{дол. США}}{\text{тис. год}}.$$

Таким чином сумарні витрати на виконання технічного обслуговування становлять: $407.39 + 103.46 = 510.85$ дол. США/тис. год. Таким чином перехід на збільшену періодичність між регламентними технічними обслуговуваннями до 7300 годин забезпечить приблизно 15 % економії коштів на технічне обслуговування двигуна, однак при цьому необхідно збільшити витрати на контроль технічного стану. Якщо одна контрольна операція має трудомісткість 1 люд. год, то витрати на 7 контрольних операцій становитимуть:

$$\frac{S_c}{T_{cycle}} = \frac{Y_{reg} \cdot S_c}{T_m} = \frac{Y_{reg} \cdot H_{sch} \cdot q \cdot 10^3}{T_m}. \quad (9)$$

За формулою (9) визначимо:

$$\frac{S_c}{T_{cycle}} = \frac{1 \cdot 7 \cdot 10 \cdot 10^3}{7900} = 8.86 \frac{\text{дол. США}}{\text{тис. год}}.$$

Якщо на судні встановлено три таких двигуни як дизель-генератори, то сумарний ефект для судна становитиме:

$$\begin{aligned} E &= N \cdot (598.55 + 8.86 - 510.85) = \\ &= 3 \cdot 96.56 = 289.68 \frac{\text{дол. США}}{\text{тис. год}}. \end{aligned}$$

При напрацюванні кожного допоміжного двигуна на рік 4000 годин: $289.68 \cdot 4 = 1158.72$ дол. США/рік. Якщо засіб контролю (пневмоіндикатор) коштує 250 дол.США, то він окупиється приблизно за 78 діб.

У тому разі, якщо вартість засобу контролю істотно вища, завдання можна поставити в дещо іншому формулюванні: яку максимальну ціну засобу контролю за передбачуваного терміну окупності може заплатити судноплавна компанія, коли застосує його для відомої кількості контрольованих об'єктів.

Отримані результати процесів адаптивізації параметрів системи технічного обслуговування за результатами одного процесу зміни технічного стану використовуються у рамках цифрової стратегії адаптивного призначення попереджувальних профілактичних робіт [12].

Висновки

У даній статті розглянуто важливі аспекти адаптивізації системи технічного обслуговування суднових технічних засобів з урахуванням зміни їхнього технічного стану. Отримано наступні висновки:

1) технічне обслуговування судових систем є критичним аспектом для забезпечення безпеки та ефективності морського транспорту;

2) традиційні методи технічного обслуговування, що ґрунтуються на фіксованих інтервалах та

регламентованих підходах, можуть бути неефективними в умовах постійної зміни стану обладнання;

3) адаптивні стратегії технічного обслуговування, які базуються на аналізі змінного стану обладнання та прогнозуванні потреб у ремонті та заміні деталей, виявляються більш ефективними для забезпечення оптимальної експлуатації суден;

4) розробка адаптивних стратегій технічного обслуговування вимагає системного аналізу даних про стан обладнання, розробки алгоритмів адаптації та використання сучасних технологій та методів моделювання;

5) впровадження адаптивних підходів до технічного обслуговування може призвести до зменшення

експлуатаційних витрат та підвищення ефективності функціонування суднових систем.

6) зазначені у статті підходи до розробки адаптивних стратегій технічного обслуговування, що базуються на адаптації плану обслуговування до змінного стану суднових систем, виявляються перспективними.

Основним результатом проведених досліджень є визначення впливу зміни технічного стану на параметри технічного обслуговування суднових систем. Отримані висновки мають бути використані для підвищення ефективності функціонування суден та зменшення експлуатаційних витрат у морському транспорті.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Lazakis, I., Raptodimos, Y., & Varelas, T. J. (2018). Predicting ship machinery system condition through analytical reliability tools and artificial neural networks. *Ocean Engineering*, 152, 404–415. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2017.11.017>
2. Karatuğ, Ç., Arslanoğlu, Y., & Soares, C. G. (2023). Review of maintenance strategies for ship machinery systems. *Journal of Marine Engineering & Technology*, 22(5), 233–247. <https://doi.org/10.1080/20464177.2023.2180831>
3. Jimenez, V. J., Bouhmala, N., & Gausdal, A. H. (2020). Developing a predictive maintenance model for vessel machinery. *Journal of Ocean Engineering and Science*, 5(4), 358–386. <https://doi.org/10.1016/j.joes.2020.03.003>
4. 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>
5. Animah, I., & Shafiee, M. (2019). Maintenance strategy selection for critical shipboard machinery systems using a hybrid AHP-PROMETHEE and cost benefit analysis: a case study. *Journal of Marine Engineering & Technology*, 20(5), 312–323. <https://doi.org/10.1080/20464177.2019.1572705>
6. Lazakis, I., Turan, O., Alkaner, S., & Ölçer, A. I. (2009). Effective ship maintenance strategy using a risk and criticality-based approach. *Proceedings of 13th Congress of Intl. Maritime Assoc. Of Mediterranean Sea*. https://pure.strath.ac.uk/portal/files/39330169/Lazakis_et_al_IMAM2009_ship_maintenance_strategy_using_a_risk_and_criticality.pdf
7. Jiang, A., Dong, N., Tam, K. L., & Lyu, C. (2018). Development and Optimization of a Condition-Based Maintenance Policy with Sustainability Requirements for Production System. *Mathematical Problems in Engineering*, 2018, 1–19. <https://doi.org/10.1155/2018/4187575>
8. Coraddu, A., Oneto, L., Ghio, A., Savio, S., Anguita, D., & Figari, M. (2014). Machine learning approaches for improving condition-based maintenance of naval propulsion plants. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment*, 230(1), 136–153. <https://doi.org/10.1177/1475090214540874>
9. Chen, Y., Gong, W., Xu, D., & Kang, R. (2018). Imperfect Maintenance Policy Considering Positive and Negative Effects for Deteriorating Systems With Variation of Operating Conditions. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 15, 872–878. <https://doi.org/10.1109/TASE.2017.2675405>
10. Сучасні технології і методи моделювання інформаційних процесів в галузі водного транспорту з оглядом на морську безпеку : монографія / А.І. Головань, Є.В. Калініченко, І.П. Гончарук, та ін. – Одеса : НУ «ОМА», 2023. – 244 с. ISBN 978-617-7857-26-5
11. Головань, А. (2023). Формування цифрових стратегій для вирішення задач підвищення ефективності систем технічного обслуговування вантажних суден. *Вісник Приазовського Державного Технічного Університету. Серія: Технічні науки*, (46), 149–158. <https://doi.org/10.31498/2225-6733.46.2023.288184>

Received (Надійшла) 12.02.2024

Accepted for publication (Прийнята до друку) 10.04.2024

Study of the processes of adaptation of the maintenance system based on the results of changes in the condition of ship's machinery

A. Golovan

Abstract. The article deals with the important problem of optimizing the maintenance system of ship's machinery, considering their wear and tear, current and predicted condition. The analysis of recent research and publications in this area indicates the need to develop adaptive maintenance strategies aimed at efficient use of resources and increasing the reliability of ship systems. The purpose of the article is to study the processes of adaptation of the maintenance system based on the results of changes in the condition of ship's technical means and to develop practical recommendations for optimizing these processes. The results of the article include a study of the processes of adaptation of the parameters of the maintenance system as a result of one process of changing the technical condition. The author considers the methodology for determining the relative frequency of maintenance to determine the operating points of the system. In particular, the article discusses the impact of technical condition changes on costs and optimization of maintenance processes. The results of the study make it possible to determine the optimal maintenance strategies in terms of costs and time, considering the wear and tear and malfunctions of the ship's machinery. The conclusions emphasize the importance of developing adaptive approaches to the maintenance of ship systems, which will ensure their efficient operation and increase the overall productivity of maritime transport.

Keywords: adaptation, maintenance, cargo ships, change of technical condition, efficiency, maintenance costs, analysis.