

Визначення імовірності відмов деталей судових дизельних двигунів

Анотація. Морські перевезення є суттю міжнародної економіки. Сьогодні близько дев'яноста відсотків світової торгівлі здійснюється морським транспортом через 50000 торгових суден. Більшість цих суден приводиться в рух головними дизельними двигунами завдяки їх надійності та паливній ефективності. Надійність елементів системи в загальному випадку залежить від випадкових відмов, значного зносу в процесі експлуатації, додаткового зносу при пуску. Випадкова поломка компонентів дизельного двигуна є великою небезпекою під час експлуатації, оскільки деякі деталі (наприклад, втулки циліндрів і поршні) зазвичай замінюються під час ремонту. З іншого боку, профілактична служба не усуває випадкові несправності. Тому в загальній проблемі оцінки надійності дизеля – математична задача оцінки надійності і довговічності з урахуванням тільки випадкових відмов її елементів, що мають найбільше практичне значення. Метою роботи є математичне дослідження надійності деталей циліндро-поршневої групи головних двигунів суховантажних суден. Використовуючи системний підхід та ймовірно-статистичний метод, було встановлено, що найбільш загальним і важким є випадок одночасної дії на елемент системи (наприклад на гільзу циліндра) факторів, що викликають зноси в період експлуатації (в тому числі в період пусків) і випадкові відмови. Визначено, що якість циліндро-поршневої системи у суден типу «Острів російський» вища, ніж у суден типу «Сімферополь» і «Муром». Отримано емпіричні формули оцінки ймовірності аварійної відмови елементів системи головних двигунів за період експлуатації між заводськими ремонтами, де основну небезпеку в період роботи несли випадкові відмови. За результатами дослідження можна встановити графік періодичності проведення технічного обслуговування головного судового двигуна та вартість збитків простоїв судна внаслідок відмов, а також можуть бути використані при дослідженні надійності інших типів судових головних двигунів. Результати дають можливість визначити надійність роботи деталей циліндро-поршневої групи головних двигунів суховантажних суден. і, зокрема, встановити графік проведення технічного обслуговування головного судового двигуна та вартість збитків внаслідок простоїв судна через відмови, а також можуть бути використані при дослідженні надійності інших типів головних двигунів інших серій суден

Ключові слова: знос, експлуатаційний час, втулка циліндра, поршень, кришка циліндра.

Вступ

Проблема якості і надійності для морського транспорту має особливе значення, так як пов'язана з безпекою мореплавання. Для прогнозування якості і надійності судових головних дизельних двигунів потрібно вивчити умови експлуатації головних енергетичних установок, визначити і прогнозувати ймовірності аварійної відмови в будь-якому проміжку часу, а також ймовірності того, що весь строк не буде аварійних відмов або аварійна відмова відбудеться в першій перехід.

Trampert et al, (2008) підкреслює важливість точного визначення граничних умов і чутливість терміну служби чавунних головок циліндрів щодо визначених граничних умов роботи двигуна.

На підставі експлуатаційних даних та результатів, які перевірені за допомогою комп'ютерної програми для визначення релевантності отриманих результатів, встановлено, що надійність елементів системи загалом залежить від вплив старіння компонентів на надійність систем (Mihanović et al., 2021).

Munir&Shah, (2015) обговорює доступні методи аналізу, також покроковий підхід до систематичного якісного аналізу надійності двигуна.

J. Kowalski, B. Krawczyk, & M. Woźniak (2017) пропонують автоматичну систему на основі машинного навчання для інтелектуальної діагностики несправностей дизельних суднових двигунів.

Зношення деталей головного двигуна при роботі на маневрах для транспортних рефрижераторних суден серії «Прибой» середнє число пусків і реверсів за час однієї стоянки (7 діб) дорівнює 20. Для кількісної оцінки прийнято, що один пуск із холодного стану відповідає величині зносу за 5 годин ходового часу. Величина зносу при одному пуску з гарячого стану або реверсу – одному часу ходового часу. В загальній кількості пусків до холодного стану належить 25 %. Реверси рахуються всі гарячі, так як до холодного стану належить менше 4 %. Тоді середній знос за час однієї стоянки відповідає зносу за 34.5 годин нормальної роботи. Додатковий час, пропорційний маневровому зносу (за час стоянок) буде: при 31 стоянці за рік цей час складає 1070 годин/рік. При середньорічному ходовому часі 2300 годин додатковий час дорівнює 46,5 %.

Ідентифікація відмов автомобіля як спосіб підвищення його надійності розглянуто в роботі (Pagán Rubio et al., 2018; Vera-García et al., 2019). В умовах експлуатаційного підприємства, з метою підвищення експлуатаційної надійності автомобіля, важливим є саме класифікація відмов за джерелом виникнення. На сьогодні на більшості сучасних підприємств впроваджується система менеджменту якості з метою підвищення ефективності діяльності. З точки зору системи менеджменту якості, враховуючи постійне її поліпшення, необхідно виявити проблемні ділянки експлуатаційної надійності та спрямувати відповідні зусилля на її підвищення.

Питання про інформаційні системи моніторингу технічного стану автомобілів, загальний підхід до формування моделей оцінювання технічного стану автомобіля в умовах експлуатації та дослідження агентного підходу контролю технічного стану транспортних засобів розглянуто в роботах (Anantharaman et al., 2019, Fang & Cui, 2020, Zhang et al., 2022).

Прогнозування втомного ресурсу головки блоку циліндрів головного двигуна та врахування точних і прийнятних моделей розглянуто в роботі (Jing et al., 2022).

Виявлення та усунення відмов судового дизельного двигуна, що базується на діагностичних сигналах у реальному часі, тобто симптомах та їхньому відношенні до відмов у розширеній формі з відстеженням часу появи симптомів і на основі експертних евристичних знань людини розглянуто в роботі (Sánchez-Herguedas et al., 2021), а для більш точної ідентифікації дефектів зносу запропонована багатомодельна система злиття, яка заснована на правилі доказової аргументації (Xu et al., 2020).

У статті (Lazakis et al., 2018) пропонується систематичний підхід до ідентифікації критичних систем/компонентів судового обладнання та аналізу їхніх фізичних параметрів. Критичні системи/компоненти головного двигуна судна використовуються як вхідні дані в нейронну мережу динамічних часових рядів для моніторингу та прогнозування майбутніх значень фізичних параметрів, пов'язаних із критично важливими системами судна.

Розробка 4-тактного високошвидкісного морського дизельного двигуна, який використовується на військових і цивільних суднах як основний двигун, описано у роботі (Pagán Rubio et al., 2018). Імітатор відмов базується на одновимірній термодинамічній моделі, розробленій, скоригованій та підтвердженій експериментальними даними з реального двигуна на випробувальному стенді. Новизною цієї роботи є застосована методологія, яка поєднує експертні знання активу, методологію та моделювання відмов для отримання точної та надійної бази даних для прогнозування відмов, яка є ключовим елементом відмови дизельного двигуна.

Авторами статті (Sánchez-Herguedas et al., 2022) представлено новий метод для розрахунку оптимального інтервалу часу до проведення профілактичного технічного обслуговування та розроблено математичний вираз, представлений системою різницевих рівнянь.

У дослідженні (Zhang et al., 2022) аналізуються відповідні дані, зібрані з різних джерел, щоб визначити найбільш аргументовану модель відмови, що представляє конкретний компонент. Зібрані дані та розроблена модель будуть дуже корисними для оцінки надійності суднових двигунів і планування заходів з технічного обслуговування на борту судна. Це може призвести до зменшення несправності суднових двигунів, що в кінцевому підсумку сприятиме зменшенню аварій у судноплавній галузі.

Мета дослідження – вивчити умови експлуатації головних енергетичних установок, визначати і прогнозувати ймовірності аварійної відмови в будь-якому проміжку часу, а також ймовірності того, що весь строк не буде аварійних відмов або аварійна відмова відбудеться в першій переході.

Матеріали та методи

Для отримання емпіричних формул, які дозволяють визначити ймовірності, що за весь період аварійних відмов не буде або аварійна відмова відбудеться на першому переході та прогнозувати ймовірності аварійних відмов деталей циліндро-поршневої групи головних двигунів, використовували системний підхід та ймовірностно-статистичний метод.

Представлено, що судновий головний дизельний двигун являє послідовність ланцюгів із N елементів (деталей або складальних одиниць), від надійності роботи яких залежить загальна безвідмовність роботи двигуна.

Спочатку визначається закон розподілу випадкових відмов елементів, що виражається функцією надійності-імовірністю безаварійної роботи $P(t)$ за час від 0 до моменту t , а також час роботи, зношення і відмови кожного елемента, окремо для таких випадків: 1 – відмова з заміною, де можна визначити, через який час вийдуть з ладу всі початкові поставлені деталі, тобто термін їхньої роботи; 2 – відмова з заміною і відновленням, де деталі, які відказали, замінюються новими, тому в роботі будуть знаходитись змішані деталі. Це дозволить вирахувати кількість виходів із ладу деталей даного виду за заданим відрізком часу.

Знаючи закони розподілу (кількість безаварійних переходів за нормативний період) знаходимо математичне очікування – середню кількість безвідмовних переходів. Інтервал часу T можна вважається випадковим, оскільки його вибір не вимагав умови, що T – нормативний термін служби, і його можна замінити будь-яким проміжком часу від початку експлуатації до моменту t . Проводимо розрахунок для втулок циліндрів двигунів. Отримавши результат можна стверджувати, що при нинішній швидкості виходу з ладу втулок жодна з них не досягне межі зносу.

Значний знос відбувається при запуску і реверсі двигуна. Кількісна оцінка цього додаткового зносу проводиться залежно від кількості пусків і реверсів.

Для підтримання надійності на достатньо високому рівні в моменти часу t_1, t_2, \dots, t_i визначається кількість профілактичних оглядів та ремонтів. Вони повинні виконуватися в стоянковий час щоб на ходовий час не впливали.

Дані про відмову використовуємо разом із часом появи відмов, порівнюючи профілактичний інтервал, отриманий після застосування методології, з інтервалом, отриманим, коли лише відмова відомі дані без годин явки. В результаті порівнюємо розрахунок за експонентою для циліндрових втулок із середніми даними, для визначення адекватності і дійсності наших залежностей.

Визначивши втрати часу по відмовах кожної деталі за весь міжремонтний період або число відмов деталей дозволяє вже оцінити повну витрату експлуатаційного часу на відмови в море (в годинах), що є одним із основних факторів, які впливають на вартість перевезень та утримання головних дизельних двигунів в безвідмовній роботі.

Результати

Дизельний турбопоршневий двигун розглядається як послідовний ланцюг із N елементів (деталей або складальних одиниць), від надійності яких залежить загальна надійність

двигуна. Надійність елементів системи переважно залежить від випадкових відмов, основних зношень під час роботи, додаткових зношень під час пусків.

Випадкові відкази елементів системи дизельного двигуна становлять першочергову небезпеку в період експлуатації, тому що деякі деталі (наприклад, гільзи циліндрів і поршні) замінюються, як правило, під час ремонтів. З іншого боку, випадкові відмови не ліквідуються профілактичною службою. От чому в загальній проблемі оцінки надійності дизеля математична задача оцінки надійності і довговічності з урахуванням тільки випадкових відказів її елементів має найбільше практичне значення.

Закон розподілу випадкових відмов елементів виражається функцією надійності-імовірністю безаварійної роботи $P(t)$ за час від 0 до моменту t :

$$P(t) = \exp(-\alpha t), \quad (1)$$

де t – час в тис. год;

α – коефіцієнт експоненціального закону розподілення часу стоянок.

Швидкість зносу гільз циліндрів за час роботи будемо брати постійну і незалежну від випадковостей, що природно для періоду нормальної експлуатації. Величина зносу ξ за час одного переходу-випадкова величина ($\xi = v \cdot \tau$) з експоненціальним законом розподілення:

$$f(x) = \lambda \exp(-\lambda x). \quad (2)$$

Тут $\lambda = \frac{\beta}{v}$, $x \geq 0$; β – коефіцієнт експоненціального закону розподілення часу переходів.

Для наступних рішень необхідно мати значення α , що відноситься до необхідних нам деталей за різних умов. Відмітимо, що показник експоненти відмов слід визначати для відносної долі деталей, що виходять із ладу. Якщо маємо інформацію по Z_c суден, а двигун судна має Z_u деталей даного виду, то їх загальна кількість дорівнює добутку $Z_c Z_u$. Число виходів з ладу в будь-якому проміжку статистичного ряду визначається відношенням $\frac{m_i}{Z_c Z_u}$.

Кінцевий вираз запишеться у такому вигляді:

$$\exp(-\alpha t) = 1 - \frac{m_i}{Z_c Z_u}. \quad (3)$$

Звідси при заданих значеннях t можемо знайти значення α для таких випадків:

1. Відмова з заміною α_z . Можна визначити, через який час вийдуть з ладу всі початкові поставлені деталі, тобто термін їхньої роботи.

2. Відмова з заміною і відновленням α_v . Деталі, які відказали, замінюються новими, тому в роботі будуть знаходитись змішані деталі. Це дозволить вирахувати кількість виходів із ладу деталей даного виду за заданим відрізком часу (змішані виходи).

Значення α для головних двигунів деяких типів суден наведено в табл. 1.

Таблиця 1. Значення α для головних двигунів деяких типів суден

Судна серій	Значення $\alpha \cdot 10^{-2}$, 1/тис. год.		
	циліндрові втулки	поршні	циліндрові кришки
«Сімферополь»	2,08/3,38	2,08/2,40	–
«Муром»	2,80/3,38	2,70/3,04	3,13/3,46
«Лисичанськ»	1,75/2,38	–	–
ТР «Острів Російський»	0,47/0,74	0,75/1,21	0,87/0,87

Примітка. Чисельник – значення α_z знаменник – α_v .

Source: власна розробка автора

Нині судноплавними компаніями та адміністраціями введено чотирирічний період експлуатації суден між заводськими ремонтами, тому розрахунок надійності на цей період має безсумнівний інтерес. Час роботи, що відповідає цьому періоду, буде визначено, як і називається, нормативним.

Знаючи закони розподілу значення η_T (кількість безаварійних переходів за нормативний період),

$$P(\eta_T = k) = \frac{a^k(1-a)}{(k-1)!} [k, (\alpha + \beta_n) T_n] + a \frac{(\beta_n T_n)^k}{k!} \exp[-(\alpha + \beta_n) T_n]. \quad (4)$$

$$P(\eta_T = 0) = \frac{\alpha}{\alpha + \beta_n} \exp[-(\alpha + \beta_n) T_n]. \quad (5)$$

знаходимо математичне очікування – середню кількість безвідмовних переходів:

$$M\eta_T = \frac{\beta}{\alpha} [1 - \exp(-\alpha T)]. \quad (6)$$

Формули (4) і (5) дають остаточне розв'язання задачі. Перша формула дає ймовірність того, що за весь період аварійних відмов не буде, а друга – що аварійна відмова відбудеться на першому переході.

Вираз (6) можна представити у вигляді

$$M\eta_T = Q(T) \cdot M\eta. \quad (7)$$

Тобто середня кількість безвідмовних переходів за нормативний період T дорівнює множенню ймовірності випадкової відмови за цей період на середню теоретичну кількість безвідмовних переходів.

У формулах (6) і (7) інтервал часу T вважається випадковим, оскільки його вибір не вимагав умови, що T – нормативний термін служби, і його можна замінити будь-яким проміжком часу від початку експлуатації до моменту t .

Для втулок циліндрів двигунів посудин розрахунок за формулою (8) дає результат (значення коефіцієнтів α , β , b і λ наведено в таблиці 2).

Тобто при нинішній швидкості виходу з ладу втулок жодна з них не досягне межі зносу. Це твердження справедливо і для поршнів.

Таблиця 2. Значення коефіцієнтів $\alpha, \beta, b, \lambda$

Судна серій	$\alpha, 1/(\text{тис. год.})$	$\beta, 1/(\text{тис. год.})$	$b, \text{мм}$	$\lambda, 1/\text{мм}$
«Сімферополь»	0,0208	5,75	6,5	261
«Муром»	0,0280	7,00	6,5	279
«Лисичанськ»	0,0175	3,40	7,0	170
ТР «ОстрівРосійський»	0,0047	7,40	4,5	7350

Source: власна розробка автора

Як відомо, значний знос відбувається при запуску і реверсі двигуна. Кількісна оцінка цього додаткового зносу проводиться залежно від кількості пусків і реверсів. Наприклад, для транспортних рефрижераторних суден (ТР) типу «Гори Камчатка» додатковий час, пропорційний зносу на маневрах (під час стикування), становить 870 годин або 38 % напрацювання. На суховантажах серії «Муром» це значення становить 800 годин або 20 % середньорічного напрацювання.

Ймовірність безвідмовної роботи елемента до його заміни на заданому рівні « b » межі зносу становить:

$$P(b) = \left(\frac{\beta}{\alpha + \beta} \right) \exp \left(- \frac{\alpha \lambda \beta}{\alpha + \beta} \right). \quad (8)$$

Дійсно, середній час досягнення межі зносу, що виражається в кількості переходів, можна визначити як

$$M(b) = \lambda \cdot b. \quad (9)$$

Календарний час досягнення межі зносу (у годинах і тисячах годин) знаходимо з виразу:

$$T_k = \frac{M(b)}{k}, \quad (10)$$

де k – середньорічна кількість конверсій.

Нарешті, буде період випадкового виходу з ладу втулок циліндрів через випадкові поломки

$$(11)$$

Значення чисел, що входять до формул (9)-(11), наведено в табл. 3.

Таблиця 3. Значення величин $M(b)$, T_k ,

Судна серій	$M(b)$, переходи	T_k		, тис. годин
		роки	тис. годин	
«Сімферополь»	1700/1410	69,0/57,0	290/240	221
«Муром»	1830/1500	65,5/53,5	262/214	164
«Лисичанськ»	1190/995	59,0/49,3	352/294	263

Source: власна розробка автора

Час досягнення граничного зносу такий, що втулки вибраковуються набагато раніше, ніж потрібно, а термін їх зносу перевищить ще один період між заводськими ремонтами (чотири роки).

Таким чином, основну безпеку під час експлуатації, зокрема безпосередньо під час переходів, створюють випадкові (аварійні) відмови, що викликають зупинки (затримки) на морі для їх усунення. Це призводить до непродуктивної втрати часу, збільшуючи час переходу. Крім того, іноді після усунення збою в морі доводиться закінчувати перехід або навіть подорож на зниженій швидкості.

Різні деталі та агрегати можуть вийти з ладу в головних двигунах у морі. Приклад показників для транспортування рефрижераторів і суховантажів наведено в таблиця 4.

Таблиця 4. Показники по транспортним рефрижераторним і суховантажним суднам

Деталі та складальні одиниці головних двигунів	Відмови в морі	
	кількість	відсоток від загального
1	2	3
ТР «Острів Російський»:		
Паливні насоси високого тиску	396	53,0
Форсунки	227	30,0
ТР «Охотське море» :		
Форсунки	102	16,0
Кришка циліндра	89	14,0
Паливні насоси високого тиску	84	13,5

«Муром»		
Форсунки	56	26,0
Підшипники	51	24,0

Source: власна розробка автора

Середні показники кількості відмов, попередження та розкриття основних деталей і складальних одиниць головних двигунів кораблів серії «Муром» у морі наведені в табл. 5.

Їх отримують шляхом розрахунків за формулами:

Тут – кількість відмов у морі на одне судно за 1 тис. годин роботи;

n_m – кількість відмов на морі; Z_c – кількість суден; – час роботи судна, тис. годин; – кількість розкриття та попередження на елемент на 1 тис. годин роботи; – кількість випадків відкриття, переміщення та запобігання на лаві підсудних; Z_u – кількість деталей цього типу двигуна; – середній час роботи судна між відмовами елементів, тис. годин; – середній час роботи елемента між відкриттям і попередженням, тис. год.

Таблиця 5. Середні показники кількості відмов від ладу, профілактик деталей головних двигунів суден серії «Муром» в морі

Деталі та складальні одиниці	Величини			
Форсунки	0,3800	0,1680	2,63	5,95
Підшипники	0,3460	0,2380	2,89	4,20
Поршень-втулка	0,2720	0,7760	3,67	1,29
Паливні насоси	0,1360	0,1145	7,35	8,74
Кришки циліндра	0,1220	0,2415	8,20	4,15
Випускні заслінки	0,0952	0,1350	10,50	7,40
Газотурбонагнітачі	0,0340	0,2210	29,40	4,53
Телескопія поршнів	0,0340	0,1520	29,40	6,58

Source: власна розробка автора

Імовірність безвідмовної роботи деталі за нормативний час визначається за формулою:

$$P(T_n) = \exp(-\alpha_v T_n),$$

де α_v – показник відмов із заміною та відновленням, 1 / (тис. годин), див. таблицю 1; T_n – стандартний час, тис. годин. Значення частин циліндрово-поршневої групи кораблів серій «Сімферополь», «Муром» і «Русский остров» наведено в табл. 6.

Таблиця 6. Значення $P(T_n)$ для деталей циліндрово-поршневої групи суден серій «Сімферополь», «Муром» і «Острів Російський»

Деталі	Інтервали часу, тис. годин	$P(T_n)$		
		«Сімферополь»	«Муром»	«Острів Російський»
Циліндрові втулки	0-8	0,763	0,763	0,943
	0-16	0,583	0,583	0,888
	0-32	0,340	0,340	0,790
Поршні	0-8	0,825	0,784	0,908
	0-16	0,682	0,616	0,823
	0-32	0,464	0,379	0,678
Циліндрові кришки	0-8	–	0,758	0,880
	0-16	–	0,574	0,774
	0-32	–	0,330	0,599

Source: власна розробка автора

Середня кількість безаварійних переходів за стандартний період визначається за формулою (6). Середня кількість переходів за встановлений період між заводськими ремонтами базується на статистичній інформації про досвід експлуатації. Він дорівнює 112 і 32 відповідно за чотирирічний період експлуатації кораблів серій «Муром» і «Острів Російський». Наведені вище залежності дозволяють розрахувати кількість відмов.

Кількість поломок елемента, які можуть виникнути протягом встановленого терміну ремонту, можна визначити за формулою:

Значення середньої кількості безаварійних переходів і числа відмов деталей двигуна вищевказаних суден наведені в табл. 7.

Таблиця 7. Значення середнього числа безаварійних переходів і числа відмов деталей двигунів суховантажних і транспортних рефрижераторних суден

Інтервали часу, тис. год.	$M(T_n)$			Z , штук		
	«Сімферополь»	«Муром»	«Острів Російський»	«Сімферополь»	«Муром»	«Острів Російський»
Циліндрові втулки						
0 – 8	40,2	49,0	57,2	2,40/2,0	2,30/2,0	0,55/1,0
0 – 16	71,0	86,5	113,0	1,40/1,0	1,30/1,0	0,28/0
0 – 32	112,0	137,0	212,0	0,88/1,0	0,82/1,0	0,82/1,0
Поршні						
0 – 8	42,0	49,7	56,0	2,36/2,0	2,25/2,0	0,56/1,0
0 – 16	76,0	88,5	108,0	1,30/1,0	1,27/1,0	0,28/0
0 – 32	128,0	143,0	196,0	0,78/1,0	0,78/1,0	0,16/0
Циліндрові кришки						
0 – 8	–	48,0	56,0	–	2,33/2,0	1,57/1,0
0 – 16	–	86,0	104,0	–	1,30/1,0	0,31/0
0 – 32	–	136,0	181,0	–	0,83/1,0	0,17/0

Примітка. В знаменнику – прийняте для розрахунку кількість відмов.

Source: власна розробка автора

Порівняємо розрахунок за експонентою для циліндрових втулок із середніми даними табл. 5. Ходовий час судна серії «Муром» за чотири роки експлуатації складає $T_n = 16$ тис. годин. Тоді імовірність відмов буде $Q(16) = 1 - \exp(-0,28 \cdot 16) = 0,36$. Отже, із шести втулок двигуна (на одному судні) вийдуть із ладу і потребують заміни $0,36 \cdot 6 = 2,16$ втулки. Це викличе дві затримки судна в морі. Середній час між виходами складає $16:2,16 = 7,31$ тис. годин. Згідно табл. 5 рахуємо, що відмови втулки і поршня розподілені нарівно, середній час роботи між відмовами буде дорівнювати тис. год., тобто трішки більше розрахункового. Таке співвідношення справедливе і для поршнів.

Для циліндрових кришок співвідношення між результатами розрахунку і даними табл. 5 буде інше. Дійсно, для $T_n = 16$ тис. годин будемо мати: $Q(16) = 1 - \exp(-0,0313 \cdot 16) = 0,39$. Отже, потребують заміни $0,39 \cdot 6 = 2,34$ кришки. Середній час роботи кришки між відмовами складе $16:2,34 = 6,85$ тис. год., що менше даних табл. 5. Це пояснюється тим, що кришки, які отримали водотечність, можна замінити на стоянці, і це не призводить до затримок в морі. Одночасно слід замітити, що результати розрахунку і дані табл. 5 близькі між собою.

Розрахункові дані для ТР типу «Острів Російський» (при значенні ходового часу за 4 роки експлуатації $T_n = 10$ тис. годин) наведені в таблиця 8.

Таблиця 8. Розрахункові дані для ТР типа «Острів Російський»

Показники	Деталі циліндро-поршневої групи		
	циліндрові втулки	поршні	циліндрові кришки

Імовірність відмови $Q(10)$			
Кількість виходу із ладу	$0,09 \cdot 24 = 2,16.$	$0,073 \cdot 24 = 1,75.$	$0,05 \cdot 24 = 1,2.$
Середній час між виходами із ладу, тис. год.	$\frac{10}{2,16} = 4,64.$	$\frac{10}{1,75} = 6,45.$	$\frac{10}{1,2} = 8,30.$

Source: власна розробка автора

Головний від’ємний результат відмов у морі – це втрата експлуатаційного часу. Наприклад, середній час вимушених зупинок, отриманий шляхом осереднення інформації по судах серії «Муром», складає від 0,5 до 4 годин. Втрата часу по відмовах кожної деталі за весь міжремонтний період складає (у годинах) Тут Z_1 – число відмов деталей.

Повна витрата експлуатаційного часу на відмови в море (в годинах):

Збиток (тис. грн.), що виникає від вимушених простоїв в море внаслідок відмов,

Тут C – вартість утримання одного судна протягом доби, тис. грн.

В якості прикладу порахуємо збиток тільки для деталей циліндро-поршневої групи (поршень, втулка, кришка) суден серії «Муром» за період 4 роки. Враховуючи, що за рік виходять із ладу по дві із названих деталей, а витрати часу на кожний вихід по втулках і поршнях складають 4 години, по кришках – 2,3 години, отримуємо для чотирьохрічного періоду:

$$R = 2,98 \frac{4}{24(2 \cdot 4 + 2 \cdot 4 + 2 \cdot 2,3)} = 10,23 \text{ тис. грн.}$$

Обговорення

Науковці статті (Xu, та ін., 2020) для більш точної ідентифікації дефектів зносу запропонували багатомодельну систему злиття. Погоджуємося, що потрібно розглядати судові дизельні двигуни, які складаються з багатьох трибологічних систем, таких як система гільза циліндро-поршневе кільце, система корінних підшипників, і що майже 50% несправностей двигуна викликані аномальним зносом пар тертя, автори розглядають послідовність ланцюгів із N елементів (деталей або складальних одиниць), від надійності роботи яких залежить загальна справність двигуна.

Авторами статті (Sánchez-Herguedas та ін., 2022) запропоновано метод виявлення та усунення відмов судового дизельного двигуна, на базі діагностичних сигналів у реальному часі та на основі експертних евристичних знань людини, що можуть давати не в повній мірі точну інформацію про істинний стан деталей та занижувати термін безвідмовної роботи. Проте авторами дослідження виведені залежності, які дозволяють визначити імовірність безвідмовної роботи елементів на основі статистичних даних.

Авторами наукової роботи (Vera-García та ін., 2019) використовують методологію, яка поєднує експертні знання об’єкта та моделювання технічного огляду для отримання точної та надійної бази даних для прогнозування відмов дизельного двигуна на основі імітатора відмов. Автори статті (Lazakis та ін., 2018) пропонується систематичний підхід до ідентифікації критичних систем / компоненти головного двигуна судна/ використовуються як вхідні дані в нейронну мережу динамічних часових рядів для моніторингу та прогнозування майбутніх значень фізичних параметрів, пов’язаних із критично важливими системами судна. Автори (Zhang та ін., 2022) пропонують метод відновлення динамічних дерев несправності для пошуку слабких ланок на рівні компонентів. Автори (Basurko та ін., 2022) представлено моніторинг продуктивності двигуна і виявлення несправностей для створення тришарової прямої нейронної мережі роботи двигуна. Автори статті (Kowalski, та

ін., 2017) представили експеримент який складається з вимірювань, проведених під час роботи лабораторного двигуна, з імітацією несправностей для створення класифікації шаблонів несправностей. Автори статті (Rao, та ін., 2022) пропонують онлайн-моніторинг стану та самовідновлення для експлуатованих дизельних CLPR з точки зору трибосистем в контексті технічного обслуговування в режимі реального часу. Проте, автори дослідження використовують ймовірностно-статистичний метод, що є більш швидкий спосіб визначити прогнозування відмов дизельного двигуна. Дослідження експлуатаційної надійності головних двигунів морських транспортних суден виконано з врахуванням умов експлуатації та рівня навантаження. Застосований апарат теорії відновлення найбільш зручний в умовах роботи двигуна з чергуванням переходів та стоянок судна.

Автори статті (Sánchez-Herguedas, та ін., 2022) пропонують метод для розрахунку оптимального інтервалу часу до проведення профілактичного технічного обслуговування, що залежить від часу використання активу, від статистики його несправностей, від вартості завдань з обслуговування та штрафу за його бездіяльність і від доходу від його експлуатації. Проте, автори визначають ймовірність безвідмовної роботи елемента за нормативний час із заміною та відновленням.

У статті (Trampert та ін., 2008) прогнозується втомний ресурс головки блоку циліндрів головного двигуна. Авторами подібно було досліджено граничний знос втулки. В додаток авторами було розглянуто спільну дію напіввипадкових та випадкових відмов: основного зносу у ходовий час; додаткового зносу в маневровий час, пов'язаний зі стоянками; випадкових (аварійних) відмов.

Автори статті (Anantharaman, та ін., 2019) запропоновано складати оптимальний план технічного обслуговування враховуючи поради виробників двигунів та/або головних інженерів і капітанів судна. Автори отримали емпіричні формули, які дозволяють визначити ймовірність роботи за весь період або при першому переході. Даний спосіб розрахунку: кількості відмов, зупинок у морі із заміною або без замін, аварійних відмов деталей циліндро-поршневої групи. Для цього визначено значення показника експонентів відмов для декількох випадків: відмови із заміною, що дозволяє простежити поступовий вихід з ладу початкової групи деталей. Можна визначити, через який час вийдуть з ладу всі спочатку поставлені деталі, тобто простежити їх термін служби; відмови із заміною та відновленням. Деталі, що відмовили, замінюються новими, тому в роботі перебуватиме змішаний склад деталей. Це дозволяє визначити кількість виходів з ладу деталей даного виду в заданому відрізьку часу (змішані виходи), відмови із заміною та зупинкою в морі; відмов без заміни, але з зупинкою в морі.

Висновки

Дизельний турбопоршневий двигун було розглянуто як послідовний ланцюг із N елементів (деталей або складальних одиниць). Від його надійності залежить загальна надійність двигуна. На підставі досліду експлуатації встановлено, що надійність елементів системи, здебільшого, залежить від випадкових відмов, основних зношень під час роботи, додаткових зношень під час пусків.

Елементи, що складають систему судового двигуна, які розглядаються, працюють в умовах, означених різними законами розподілу, які встановлюють при статистичній обробці інформації, отриманої від експлуатаційних документів.

Наведені залежності дозволяють визначити ймовірність безвідмовної роботи елемента до його заміни та ймовірність безвідмовної роботи деталі за нормативний час.

Доведено що загальним і важким є випадок одночасної дії на елемент (наприклад на гільзу циліндра) факторів, що викликають зноси в період експлуатації (в тому числі в період пусків) і випадкові відмови. Іншим елементам системи, що розглядається, відповідає такий же комплекс умов або його частковий випадок.

Розрахунок показав, що імовірність безвідмовної роботи деталей циліндро-поршневої групи за нормативний час 8 і 32 тис. год у судна типу «Острів Російський» складає відповідно 0,943 і 0,790, а у суховантажних суден серії «Сімферополь», «Муром» – 0,763 і 0,340, що свідчить про більш якісні деталі у першого типу суден.

Досліджено що при досягненні елементами системи граничного зносу за час встановленого періоду експлуатації між заводськими ремонтами практично виключене, тому основну небезпеку в період роботи становлять випадкові відмови. Визначено період випадкового виходу з ладу втулок циліндрів.

Вперше отримано емпіричні формули, які дозволяють визначити ймовірність, що за весь період аварійних відмов не буде; що аварійна відмова відбудеться на першому переході.

Враховуючи різну надійність елементів системи суднового двигуна, які впливають на характер поведінки системи управління в цілому, результати дають можливість встановити періодичність їх технічного обслуговування та вартість збитків простоїв внаслідок відмов.

References

- [1] Anantharaman, M., Islam, R., Khan, F., Garaniya, V., & Lewarn, B. (2019). Data Analysis to Evaluate Reliability of a Main Engine. *TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, 13(2), 403–407. <https://doi.org/10.12716/1001.13.02.18>.
- [2] Antičić, R., Vukić, Z., & Kuljača, O. (2003a). Marine Diesel Engine Faults Diagnosis Based on Observed Symptoms and Expert Knowledge. *IFAC Proceedings Volumes*, 36(21), 133–138. [https://doi.org/10.1016/s1474-6670\(17\)37796-0](https://doi.org/10.1016/s1474-6670(17)37796-0).
- [3] Aziz, A., Ahmed, S., Khan, F., Stack, C., & Lind, A. (2019). Operational risk assessment model for marine vessels. *Reliability Engineering & System Safety*, 185, 348–361. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2019.01.002>.
- [4] Basurko, O. C., & Uriondo, Z. (2015). Condition-Based Maintenance for medium speed diesel engines used in vessels in operation. *Applied Thermal Engineering*, 80, 404–412. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.01.075>.
- [5] Fang, C., & Cui, L. (2020). Reliability analysis for balanced engine systems with m sectors by considering start-up probability. *Reliability Engineering & System Safety*, 197, 106829. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2020.106829>.
- [6] Jing, G., Li, S., Chen, G., Wei, J., Sun, S., & Zhang, J. (2022). Research on Creep Test of Compacted Graphite Cast Iron and Parameter Identification of Constitutive Model under Wide Range of Temperature and Stress. *Applied Sciences*, 12(10), 5032. <https://doi.org/10.3390/app12105032>.
- [7] Kowalski, J., Krawczyk, B., & Woźniak, M. (2017). Fault diagnosis of marine 4-stroke diesel engines using a one-vs-one extreme learning ensemble. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 57, 134–141. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2016.10.015>.
- [8] Lazakis, I., Raptodimos, Y., & Varelas, T. (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>.
- [9] Mihanović, L., Karna, H., & Matika, D. (2021). Research, processing and analysis of exploitation reliability results of high-speed radial diesel engine. *Engineering review*, 41(2). <https://doi.org/10.30765/er.1580>.
- [10] Munir, A., & Shah, H. (2015). FPSO Propulsion Machinery Reliability Analysis – A Systematic Approach. *SNAME 20th Offshore Symposium*, Стаття SNAME-TOS-2015-035. <https://onepetro.org/SNAMETOS/proceedings-abstract/TOS15/1-TOS15/D013S010R001/3729>.
- [11] Sánchez-Herguedas, A., Mena-Nieto, Á., & Rodrigo-Muñoz, F. (2022). A method for obtaining the preventive maintenance interval in the absence of failure time data. *Eksplotacja*

- [12] Pagán Rubio, J. A., Vera-García, F., Hernandez Grau, J., Muñoz Cámara, J., & Albaladejo Hernandez, D. (2018). Marine diesel engine failure simulator based on thermodynamic model. *Applied Thermal Engineering*, 144, 982–995. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.08.096>.
- [13] Rao, X., Sheng, C., Guo, Z., & Yuan, C. (2022). A review of online condition monitoring and maintenance strategy for cylinder liner-piston rings of diesel engines. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 165, 108385. <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2021.108385>.
- [14] 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 & System Safety*, 207, 107394. <https://doi.org/10.1016/j.res.2020.107394>.
- [15] Trampert, S., Gomez, T., & Pischinger, S. (2008). Thermomechanical Fatigue Life Prediction of Cylinder Heads in Combustion Engines. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 130(1). <https://doi.org/10.1115/1.2771251>.
- [16] Ünver, B., Altın, İ., & Gürgen, S. (2021). Risk ranking of maintenance activities in a two-stroke marine diesel engine via fuzzy AHP method. *Applied Ocean Research*, 111, 102648. <https://doi.org/10.1016/j.apor.2021.102648>.
- [17] Ünver, B., Altın, İ., & Gürgen, S. (2021). Risk ranking of maintenance activities in a two-stroke marine diesel engine via fuzzy AHP method. *Applied Ocean Research*, 111, 102648. <https://doi.org/10.1016/j.apor.2021.102648>.
- [18] Vera-García, F., Pagán Rubio, J. A., Hernández Grau, J., & Albaladejo Hernández, D. (2019). Improvements of a Failure Database for Marine Diesel Engines Using the RCM and Simulations. *Energies*, 13(1), 104. <https://doi.org/10.3390/en13010104>.
- [19] Xu, X., Zhao, Z., Xu, X., Yang, J., Chang, L., Yan, X., & Wang, G. (2020). Machine learning-based wear fault diagnosis for marine diesel engine by fusing multiple data-driven models. *Knowledge-Based Systems*, 190, 105324. <https://doi.org/10.1016/j.knosys.2019.105324>.
- [20] Zhang, M., Liu, S., Hou, X., Dong, H., Cui, C., & Li, Y. (2022). Reliability Modeling and Analysis of a Diesel Engine Design Phase Based on 4F Integration Technology. *Applied Sciences*, 12(13), 6513. <https://doi.org/10.3390/app12136513>.