

10.31653/smf340.2020.152-161

Журавльов Ю.І., Костюченко Є.Ф.

Національний університет «Одеська морська академія»

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ТЕХНІЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ І РЕМОНТУ СПОЛУЧЕНЬ ВАЛ- ПІДШИПНИК КОВЗАННЯ НА ОСНОВІ МОДЕЛЮВАННЯ ЇХ ПОШКОДЖЕНЬ

Сучасні двигуни внутрішнього згорання працюють в умовах високих навантажень різного походження, перепадів температури і тиску, і тому ці навантаження на рухомі частини двигуна - коленвал і распредвал, шатуні, штовхачі та інші деталі на сьогодні потребують принципово нових підходів до відновлення втраченої працездатності.

В сполученнях вал-підшипник ковзання працездатність підшипників ковзання порушується внаслідок зносу деталей в зоні тертя або через ослаблення втулки (вкладишів) в посадці. По мірі зносу деталей збільшується зазор між ними, що призводить в одних випадках до появи ударних навантажень, а в інших — до разрегулювання з'єднувальних ланцюгів, а також до витoku мастила, тобто порушення змащування деталей.

Для відновлення працездатності підшипника ковзання необхідно усунути ослаблення втулки (вкладишів) в посадці і довести зазор між деталями третьової пари до нормальної величини. На сьогоднішній день не вичерпані всі можливості відновлення нормальних розмірів і форми третьової частини незамінюваної деталі шляхом технічного обслуговування і ремонту робочих поверхонь.

Пропонується основний упор робити на прогнозування та розроблення рекомендацій для експлуатації роботи сполучень на основі підвищення ефективності обслуговування і ремонту та аналізу різноманітних критеріїв надійності [1].

Для цього використовується математичний опис (моделювання) процесів пошкодження. Воно дозволяє аналізувати внутрішні зв'язки та зовнішні впливи. На підставі загальних принципів формування відмов моделі забезпечують: розроблення алгоритмів оцінки надійності складних виробів, облік зворотних зв'язків у стосунках «технологічний процес – вихідні параметри машини», оцінку параметрів взаємодії машини і особливостей втрати нею працездатності. Рішення таких завдань дає можливість розробляти більш досконалі моделі

відмов сполучення вал-підшипник ковзання, і на їх основі вузлів і агрегатів деталей засобів транспорту (малюнок 1).

Більшість процесів накопичення пошкоджень в зазначених деталях відбувається протягом тривалих проміжків часу, тобто мають яскраво виражену динаміку протікання. Ці процеси спричиною відмов деталей обладнання і зміни його стану в часі [4].



Рисунок 1. Направления использования моделирования повреждений деталей вал-подшипник скольжения

Облік в моделях ушкоджень великий інерційності деталей, зростання періодичності зовнішніх впливів, взаємодії оборотних і необоротних процесів, малій швидкості процесів, в сукупності з адаптованими фундаментальними принципами динаміки машин і теорії автоматичного

управління, дозволять вирішити завдання, пов'язані з надійністю складних систем, до

яких відноситься суднові енергетичні системи.

Останнім часом [2-4] найбільш гостро постає проблема подальшого розвитку і реалізації методів прогнозування надійності на основі моделей відмов [5-7], які базуються на закономірностях процесів пошкодження фізики відмов з урахуванням їх імовірнісної природи, що є ключовим для вирішення основних завдань, пов'язаних з удосконаленням технічного обслуговування і ремонту сполучень, оцін-

кою надійності. Найбільш обґрунтованим є використання методів статистичного моделювання ушкоджень, що враховують імовірнісні режими експлуатації обладнання, зовнішні впливи і характер протікання процесів пошкодження [4]. При цьому актуальність такого підходу пояснюється необхідністю подальшого вдосконалення методів прогнозування надійності деталей, що піддаються зносу і втомного руйнування, мають яскраво виражений характер у засобах транспорту, і є основними причинами їх відмов [5].

Актуальним напрямком використання моделей пошкодження є розробка методів розрахунку граничних станів окремих деталей і машини в цілому, а також розробка кваліметрії ушкоджень – методів чисельної оцінки ступеня пошкодження деталей, різних за своєю природою і характером [6].

Найбільш перспективним напрямком використання результатів моделювання пошкодження деталей, є створення спеціальних систем інформації про ступінь ушкодження ремонтіваних деталей, що не досягли граничного стану і не мають відмов, для недопущення яких і проводиться ремонт [8]. Це джерело інформації, який в даний час практично не застосовується, дозволить оцінити ступінь використання параметрів надійності деталі і обґрунтовано призначити ресурс машини [8].

Розгляд принципів накопичення пошкоджень і розробка моделей для їх опису дозволяє досліджувати вплив зношування деталей на динамічні характеристики машини [8]. Цей зв'язок досить складний, так як в рівняннях динаміки присутні члени залежні від часу і мають випадкову природу. Розкриття цих закономірностей на основі моделей ушкоджень дозволить вивчити явища, пов'язані із зміною вихідних параметрів машини в часі і відмовами функціонування через руйнування деталей. Достатньо часто відмови функціонування є наслідком зростання динамічних навантажень в машині при зносі її елементів. Для засобів транспорту, особливо швидкохідних і важко навантажених, саме динамічні явища лімітують допустимі величини зносу і ресурсу деталей [6].

Унікальність транспортного обладнання створює необхідність використання математичного опису процесів накопичення пошкоджень для розробки методики випробування складних об'єктів, до яких відносяться суднові енергетичні системи. Висока функціональність окремих деталей обладнання виключає застосування традицій-

них методів випробування на надійність, що застосовуються для відносно простого обладнання [4].

Науковий напрям технічного обслуговування і ремонту полягає у виявленні впливу надійності сполучень деталей вал-підшипник ковзання, що входять до складу виробу, на надійність всього вузла, агрегату, машини. Це дозволить виявити сполучення і самі деталі, які необхідно удосконалювати в першу чергу, вибрати стратегію підвищення надійності технічного виробу, оцінити кількісно величину поліпшення характеристик надійності машини.

Підтримання та відновлення працездатності транспортної машини є складним процесом, що залежать від таких факторів, як: конструкція машини, методів її експлуатації, організації системи ремонту і технічного обслуговування, економічних факторів і т. д. Виявлення раціональних методів ремонту і технічного обслуговування пов'язане з їх оптимізацією, де перше місце відводиться критерію економічності [9]. Це вимагає обліку і вірогідного аналізу особливостей накопичення пошкоджень деталей, і як наслідок, втрати ними працездатності, а також оцінки реальних можливостей щодо їх відновлення [10]. Правильна організація системи ремонту та обслуговування може при тих же витратах значно підвищити ефективність і надійність функціонування транспортних машин і устаткування, а також забезпечить доцільність і ефективність проведення профілактичних операцій та ремонтно-відновлювальних робіт. Функціонування моделей накопичення пошкоджень деталей, в рамках спеціальної системи, званої ремонтною службою підприємства, забезпечить необхідний рівень працездатності обладнання.

Розглянемо модель, призначену для оцінки підвищення показників надійності машин, напрацювання на відмову яких описуються п'ятьма найбільш поширеними законами: нормальним, логарифмічно нормальним, експоненціальним, Ерланга і Вейбулла.

Науковий напрямок, представлене в доповіді, полягає у виявленні впливу надійності сполучень деталей вал-підшипник ковзання, що входять до складу виробу, на надійність всього вузла, агрегату, машини. Це дозволяє виявити сполучення і самі деталі, які необхідно удосконалювати в першу чергу, вибрати стратегію підвищення надійності технічного виробу, оцінити кількісно величину поліпшення характеристик надійності машини.

Об'єктом цих досліджень є засоби транспорту, що представляють собою функціональну систему, що складається з M послідовно з'єд-

наних сполучень деталей. Відмова будь-якої деталі призводить до відмови виробу. Працездатність виробу відновлюється шляхом заміни, що вийшла з ладу i -ї ($i = 1, 2, \dots, M$) деталі нової. Так як відмова відбувається у випадковий момент, час життя деталі можна описати з допомогою процесів відновлення. При цьому вважається, що кожна i -та деталь виробу характеризується напрацюванням t_{pi} знаходимо i від $(j-1)$ – го до j – го відмови ($j = 1, 2, \dots, Z$), розподіл яких не суперечить одному з наступних законів: нормальному, експоненціальному, логарифмічно-нормальному, Ерланга і двухпараметричному законом Вейбулла.

Основними характеристиками процесу відновлення, є провідна функція потоку відмов $\Omega(t)$ і параметр потоку відмов $\omega(t)$. Так як в ході досліджень розроблені методики розрахунку провідної функції потоку відмови $\Omega(t)$ за аналітичними залежностями [10] та методом статистичного моделювання [12], то це дозволяє аналізувати виробу, життєвий цикл яких описується будь-яким процесом відновлення, зокрема, простим, спільним і загальним нестационарним. З допомогою моделі також можна розглядати системи, у яких закони, що описують напрацювання до чергової заміни, різні. Цільовою функцією математичної моделі прийнятий мінімум сумарних середніх питомих витрат Суд (t) на виготовлення технічного виробу та підтримки його в справному стані:

$$C_{yod}(t) = \frac{(D+1)M}{t} \sum_{i=1}^M C_{di} \Omega_i(t) + \frac{C_u}{t}, \quad (1)$$

де M - кількість елементів, що входять у виріб; D - коефіцієнт, що враховує трудовитрати, витрати матеріалів і втрати від простоїв при заміні деталей виробу; C_{di} - вартість i -ої деталі; C_u - первісна вартість виробу; $\Omega_i(t)$ - провідна функція потоку відмов i -ої деталі.

Крім мінімуму сумарних середніх питомих витрат Суд $_{min}$, в якості оптимізуємих показників надійності прийняті рівень надійності n , оптимальний ресурс $topt$, а також напрацювання виробу на перший відмова t від i .

Для моделювання підвищення показників надійності імітується заміна деталі. Деталь, що має найгірші в порівнянні з іншими деталями виробу надійнісні характеристики, замінюється більш надійною, має більш високі значення показників безвідмовності і довговічності, а, значить, має іншу вартість.

Для обліку підвищення ресурсу і зниження відносного розсіювання значень напрацювань деталей і відповідної зміни вартісних показників прийняті коефіцієнти, введені в роботі / 1,2 /:

- коефіцієнт збільшення ресурсу ρ , показує, у скільки разів збільшується ресурс вдосконаленою деталі по відношенню до вихідної,

$$\rho = t'_{cp\partial} / t_{cp\partial}, \quad (2)$$

де $t'_{cp\partial}$ і $t_{cp\partial}$ – ресурси відповідно деталей вдосконаленої і вихідної;

- коефіцієнт зміни вартості деталі μ , відображає збільшення вартості деталі в результаті її поліпшення,

$$\mu = C'_\partial / C_\partial, \quad (3)$$

де C'_∂ і C_∂ - вартість деталі поліпшеною і вихідної;

- коефіцієнт зміни розсіювання ресурсу деталей η , що показує зниження розсіювання ресурсу деталі виробу при її вдосконаленні,

$$\eta = v_\partial / v'_\partial, \quad (4)$$

де v_∂ і v'_∂ – коефіцієнт варіації вихідної деталі і після її удосконалення;

- коефіцієнт пропорційності k_ρ , що відображає співвідношення збільшення вартості до збільшенню ресурсу деталі при її удосконаленні;

- коефіцієнт пропорційності k_η , що відображає співвідношення збільшення вартості до зменшення розсіювання ресурсу деталі при її удосконалення;

- коефіцієнт k_u , що відображає співвідношення вартості виробу до сумарної вартості деталей

$$k_u = \frac{C_u}{\sum_{i=1}^n C_{\partial i}} \quad (5)$$

де C_u - вартість виробу; $C_{\partial i}$ – вартість і-тої деталі.

Перераховані вище коефіцієнти є керуючими параметрами моделі. В ході моделювання їм присвоюються різні значення, а потім перераховуються основні вартісні і надійнісні характеристики деталі.

Вартість вдосконаленого елемента визначається за формулою

$$C'_\partial = \mu \cdot C_\partial, \quad (6)$$

$$\text{де } \mu = 1 + \sqrt{k_{\rho}^2(\rho - 1)^2 + k_{\eta}^2(\eta - 1)^2} \quad (7)$$

Вартість вдосконаленого виробу розраховується по залежності:

$$C'_u = \frac{1}{k_u} \left((\mu - 1)C_{\partial} + \sum_{i=1}^M C_{\partial i} \right) \quad (8)$$

Коригування середнього ресурсу і коефіцієнта варіації деталі проводяться за допомогою коефіцієнтів, в залежності від виду теоретичного закону розподілу, з урахуванням зміни параметрів закону.

Зокрема, для нормального закону:

$$t' = t \cdot \rho, \quad (9)$$

$$\sigma' = \sigma \cdot \rho / \eta. \quad (10)$$

Так як експоненціальний закон є однопараметричним і не залежить від коефіцієнта розсіювання ресурсу, параметр λ' для нової деталі розраховується за наступною формулою:

$$\lambda' = \lambda / \rho. \quad (11)$$

Для закону Ерланга крок коефіцієнта розсіювання ресурсу змінюється дискретно так, щоб порядок закону m' покращеної деталі змінювався на ціле число. Порядок закону обчислюється за формулою:

$$m' = m \cdot \eta^2 \quad (12)$$

і округляється до цілого значення; параметр закону λ' визначається як

$$\lambda' = \lambda \cdot \eta^2 / \rho. \quad (13)$$

Для двопараметричного закону Вейбулла перерахунок параметрів проводять поетапно. Параметр форми залежить тільки від коефіцієнта розсіювання ресурсу, але пов'язаний з коефіцієнтом варіації за допомогою гамма – функції. Тому обчислюється через коефіцієнт розсіювання ресурсу, коефіцієнт варіації вдосконаленої деталі. Потім з отриманого значення коефіцієнта варіації, за допомогою таблиці, обчислюється параметр форми і значення гамма – функції для поліпшеної деталі. Параметр масштабу λ' обчислюється за наступною формулою:

$$\lambda' = \frac{1}{\alpha'} \sqrt{\frac{\lambda \frac{1}{\alpha} \cdot \Gamma\left(1 + \frac{1}{\alpha}\right)}{\mu \cdot \Gamma\left(1 + \frac{1}{\alpha}\right)}}, \quad (14)$$

де $\Gamma(x)$ - гамма – функція Ейлера, $\alpha\lambda$ -- відповідно параметр форми і масштабу закону розподілу ресурсу вихідної деталі; α' і λ' -- відповідно параметр форми і масштабу закону розподілу ресурсу вдосконаленої деталі.

Для логарифмічно нормального закону, також з початку визначається нове значення параметра σ' , так як цей параметр залежить тільки від зміни коефіцієнта варіації. Формула для розрахунку параметра σ' має вигляд:

$$\sigma' = \sqrt{\ln \left[\frac{e^{\sigma^2} - 1}{\eta^2} + 1 \right]} \quad (15)$$

де σ - параметр розсіювання ресурсу логарифмічно-нормального закону для вихідної деталі.

Параметр t' логарифмічно-нормальної величини перераховується для вдосконаленої деталі по формулі:

$$t' = \frac{2 \ln \left[\sigma + \sigma^2 + 2t - \sigma'^2 \right]}{2} \quad (16)$$

де σ - параметр розсіювання ресурсу і t логарифмічно-нормального закону для вихідної деталі; σ' - параметр розсіювання ресурсу логарифмічно-нормального закону для вдосконаленої деталі.

ВИСНОВКИ

Створення та використання математичних моделей накопичення пошкоджень деталей вал-підшипник ковзання є одним з перспективних напрямків вирішення завдань підвищення їх надійності на всіх етапах існування (проекування, виготовлення, випробування та експлуатація).

При побудові математичних моделей накопичення пошкоджень використовується велика кількість методів і підходів, що мають певні особливості і базуються на різній вихідній статистичній інформації. Побудови математичних моделей передують ретельне вивчення

процесів, що призводять до зародження, розвитку і досягнення критичного рівня пошкодження деталей засобів транспорту.

Наявність великої кількості різноманітних транспортних машин, що мають свої конструктивні та експлуатаційні особливості, вимагає індивідуального підходу до розробки математичного апарату, що описує процес передачі технологічного навантаження, як головного чинника ушкодження, від робочого органу машини до всіх її конструктивних елементів.

Використання моделей пошкодження деталей транспортного обладнання на стадії його проектування і експлуатації, забезпечить вирішення низки завдань, таких як: обґрунтування оптимальної довговічності деталей обладнання, зниження матеріаломісткості та енергоємності конструкцій, підвищення продуктивності машин.

Використання математичних моделей накопичення пошкоджень, є

відправною точкою у вирішенні багатьох завдань дослідницького, технологічного та техніко-економічного спрямування, пов'язаних з підвищенням надійності роботи обладнання та забезпечення безперервності технологічного процесу, що запобігає зниженню техніко-економічних показників виробництва.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Когаев В. П., Дроздов Ю. Н. Міцність і зносостійкість деталей машин:

Навчальний посібник для машинобудівних спеціальностей вищих навчальних закладів. - М.: Вища школа, 1991. - 319 с.

2. Проников А.С. Параметрична надійність машин. - М.: МГТУ ім. Баумана, 2002. - 560 с.

3. Труханів В.М. Надійність в техніці. - М.: Машинобудування, 1999. - 598 с.

4. Риньков Р.Н. Прогнозування усталостного ресурсу елементів виробів при випадковому навантаженні на основі теорії інформації // Надійність і контроль якості. - тисяча дев'яносто дев'яносто п'ять №8. - С. 20-28.

5. Коллінз Дж. Пошкодження матеріалів в конструкціях. Аналіз, прогноз, запобігання. (J. A. Collins Failure of materials in Mechanical Design, New York, 1981): Пер. з англ. - М.: Світ, 1984. - 624 с.

6. Тарасов Ю.Л., Міноранській Е.І., Перов С.Н. прогнозування надійності конструкцій за критерієм втомного пошкодження //

Надійність і довговічність машин і споруд. - К. : Наукова думка. Вип. 6, 1984., С. 91-96.

7. Дроздов Ю.Н. Прогнозування інтенсивності зношування тертьових тіл на основі теоретико-інваріантного методу // Проблеми машинобудування і надійність машин. 1999. №1. С. 28-35.

8. Проников А.С. Надійність машин. - М. : Машинобудування, 1978. - 592 с.

9. Шудра В.Ф. Механізм відновлення парку промислового обладнання. - К. : Техніка, 1990. - 143 с.

10. Кульсеітов Ж.О., ЛІССЄВ В.П. Математичні моделі та підтримання надійності машин. - Алмати: Гилим, 1996. - 222 с.

11. Муздибаєв М.С. Оптимізація показників надійності вузлів транспортних і дорожніх машин. Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук. - Усть-Каменогорськ, 1998..