

УДК 004.05

Ар.А. МУХА*

ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДУ БАЙЄСА ПРИ ОЦІНЮВАННІ НАДІЙНОСТІ НЕСУЧИХ КОНСТРУКЦІЙ ТЕПЛОВОЗІВ

*Інститут проблем математичних машин і систем НАН України, м. Київ, Україна

Анотація. Тепловози серії ЧМЕЗ є основою парку маневрових локомотивів України. На сьогодні середній термін експлуатації цих машин становить 35–38 років при встановленому нормативному 25 років. Відповідно, що при довготривалій експлуатації постають проблеми, пов'язані не тільки з відмовами устаткування, але й з відмовами несучих конструкцій цих машин. Основними серед відмов, які спричинені втому металу, є виникнення тріщин по контуру вертикального листа рами візка по зварних з'єднаннях та виникнення тріщин у зоні кріплення кронштейнів тягових електродвигунів. Визначення таких пошкоджень вимагає значних затрат та простоїв рухомого складу, адже здійснити якісний контроль об'єктивного стану та придатності можливо виконати лише при піднятті кузова тепловоза, від'єднанні візків та повному очищенні їх від бруду. Такий контроль здійснюється раз у 3 роки, не зважаючи на обставини. У цьому плані ймовірнісний підхід щодо оцінювання стану несучих конструкцій та прогнозування як періоду контролю стану, так і терміну експлуатації, отримує свої переваги. Він вимагає значно менших витрат і може бути застосований для отримання рекомендацій щодо відбору зразків саме для своєчасного контролю, враховуючи ймовірність відмов, що базується на врахуванні різного роду показників. У статті пропонується використовувати метод Байєса, який знайшов широке застосування в теорії надійності. Продемонстровано, що він дозволяє враховувати ймовірнісні характеристики процесів та умов експлуатації, на основі чого можливо найбільш достовірно судити про надійність несучих конструкцій тепловозів. Застосовавши сумісно з байєсівським ймовірнісно-фізичний метод, у якому використовується дифузійно-монотонний розподіл, з'являється можливість обчислювати середній наробіток до відмови та прогнозувати час безпечної експлуатації досліджуваної техніки.
Ключові слова: метод Байєса, ймовірність відмови несучої конструкції.

Abstract. Diesel locomotives of the ČKD ČME3 class are the basis of the fleet of shunting locomotives of Ukraine. Today, the average service life of these machines is 35–38 years, while the established standard is 25 years. Accordingly, if the operation is too long, there arise some problems which are associated not only with equipment failures, but also with failures of the supporting structures of the corresponding machines. The main failures caused by metal fatigue are the occurrence of cracks along the contour of the vertical sheet of the bogie frame along the welded joints and the occurrence of cracks in the area of fastening of the traction motor brackets. Determination of such damages requires significant costs and downtime of the rolling stock, because quality control of the objective condition and suitability is possible only when lifting the locomotive body, disconnecting the bogies and completely cleaning them from dirt. Now such control is carried out every 3 years, regardless of the circumstances. In this regard, the probabilistic approach to assessing the state of supporting structures and predicting both the period of condition monitoring and the service life have its advantages. It requires much lower costs and can be used to obtain recommendations for the selection of samples specifically for timely control, including the probability of failure, which is based on taking into account various kinds of indicators. The article proposes to use the Bayesian method which has found wide application in the theory of reliability. It has been demonstrated that it allows one to take into account the probabilistic characteristics of processes and operating conditions, on the basis of which it is possible to judge the reliability of load-bearing structures of diesel locomotives most reliably. Applying the Bayesian method together with the probabilistic-physical one, which uses a diffusion-monotonic distribution, it becomes possible to calculate the average operating time before failure and predict the time of safe operation of the equipment under study.

Keywords: Bayesian method, the probability of failure of the supporting structure.

DOI: 10.34121/1028-9763-2021-2-90-94

1. Вступ

Маневрові тепловози серії ЧМЕЗ (Чехословацький тепловоз з електричною передачею, маневровий, 3-й тип) є основою парку рухомого складу Укрзалізниці. Нормативний строк служби цих машин становить 25 років. Зважаючи на їх значний запас міцності та надійності, на сьогоднішній час чинними документами регламентовано безпечну експлуатацію тепловозів даної серії строком служби до 50 років. Згідно зі статистичними даними, що містяться у звіті [1], середній час експлуатації тепловозів на 2018 рік становить 38 років, у той же час певна їх кількість у найближчі 2–5 років перетне межу часу експлуатації 50 років. Основною та найважливішою причиною, через яку відбувається списання цієї техніки, є неможливість відновлення внаслідок значних пошкоджень конструкції рами.

У даний час дослідження резервного запасу експлуатації основним чином базуються на дослідженнях міцності, що проводяться за рахунок вимірювання коефіцієнта опору втоми несучих конструкцій. Тому *метою статті* є заходження альтернативних шляхів визначення реального резервного запасу експлуатації, а саме більш доступними розрахунковими та ймовірнісними методами.

2. Визначення ймовірності відмови за методом Байєса

У разі, коли є відомими числові значення параметрів, що визначають технічний стан системи, а також має місце невелика кількість відмов (недостатня для точної оцінки показників надійності тільки на підставі зафіксованих відмов), доцільним є спільне використання статистичних і ймовірнісно-фізичних моделей.

Об'єднавши ці моделі (відмов та зміни параметрів) за рахунок використання байєсівського методу, стає можливим достовірно оцінювання показників надійності досліджуваних систем. Апостеріорна (результуюча) ймовірність визначається за заданою апіорною (вихідною) ймовірністю відмови (оціненої за моделлю зміни параметрів) і функцією вірогідності (враховує додаткові відмови) [2].

Формула Байєса записується як

$$P(D_i / K_j) = P(D_i) \frac{P(K_j / D_i)}{P(K_j)} \quad (1)$$

або

$$P(D_i / K_j) = P(D_i) \frac{P(K_j / D_i)}{\sum_{s=1}^m P(D_s) P(K_j / D_s)},$$

де i – дана гіпотеза;

s – довільна гіпотеза;

m – число гіпотез;

D_i – діагноз;

$P(D_i / K_j)$ – ймовірність діагнозу D_i після того, як стало відомо про наявність ознаки K_j (апостеріорна ймовірність діагнозу);

K_j – ознака, що зустрічається при діагнозі D_i ;

$P(D_i)$ – апіорна ймовірність діагнозу D_i , отримана за статистичними даними (ймовірність виникнення ознаки K_i у виробі зі станом D_i);

$P(K_j)$ – повна ймовірність, тобто ймовірність виникнення ознаки K_i , довільної з гіпотез.

Приклад 1. Обчислимо ймовірність відмови несучої конструкції тепловоза за таких умов: пробіг складає 160 тис. км, корозія конструкції 7 мм, зразок не проходив модернізацію, а на горизонтальному листі є ознаки тріщин. Напрацювання тепловоза на момент розрахунку становить 10000 год.

На основі статистичної інформації щодо відмов несучих конструкцій рами локомотивів отримана діагностична матриця за ознаками $P(K_j / D_i)$. Значення $P(K_i / D_i)$ представлені в табл. 1, 2.

Таблиця 1 – Діагностична матриця

Діагноз	Ознака					
	Пробіг, тис. км			Корозія конструкцій		
	K ₁₁	K ₁₂	K ₁₃	K ₂₁	K ₂₂	K ₂₃
	0-750	750-150	150-250	1-3 мм	3-6 мм	>6 мм
D ₁	0,441	0,352	0,207	0,352	0,346	0,302
D ₂	0,286	0,333	0,382	0,312	0,316	0,372

Таблиця 2 – Діагностична матриця (продовження)

Діагноз	Ознака					
	Тріщини на конструкції рами			Модернізація		
	K ₃₁	K ₃₂	K ₃₃	K ₄₁	K ₄₂	K ₄₃
	Горизонтальний лист	Кріплення двигуна	Інші	Без модернізації	Т3. 248	Т3.247
D ₁	0,361	0,321	0,318	0,349	0,288	0,363
D ₂	0,384	0,365	0,251	0,357	0,332	0,311

Розрахунок імовірності відмови при розглянутих умовах будемо проводити в такій послідовності:

– визначення ймовірності безвідмовної роботи в результаті обробки статистичної інформації за локомотивами, що відмовили;

– визначення ймовірності настання події D (відмови чи безвідмовної роботи) за різних ознак K_i – $P(D_i / K_i)$.

Приклад 2. Загальна кількість тепловозів серії ЧМЕЗ становить 1246 од., серед яких 762 знаходяться в робочому стані, 484 од. в неробочому. Згідно з додатковою статистикою, у неексплуатованому парку 257 од. техніки вийшли з ладу через несправності.

Визначивши вхідні дані $N = 1246$, $n(t) = 257$ та зважаючи на те, що працездатність конструкції рами в рівній мір залежить від пошкоджень як поперечних листів, так і місць кріплень двигуна, можливо стверджувати, що ймовірності виникнення цих подій повинні вираховуватися за формулою 2:

$$R(t) = \frac{N - n(t)}{N}, \quad (2)$$

$$Q(t) = 1 - R(t), \quad (3)$$

$$R(t) = (1246 - 257) / 1246 = 0,79; \quad Q(t) = 1 - 0,79 = 0,21.$$

Введемо такі переозначення. Відповідно ймовірність безвідмовної роботи позначимо, як $D_1 = 0,79$, а ймовірність відмови, як $D_2 = 0,21$.

За формулою 1 знаходимо

$$P(D_2 / K_i) = 0,21 \frac{0,382 \cdot 0,372 \cdot 0,384 \cdot 0,357}{0,79 \cdot 0,207 \cdot 0,302 \cdot 0,361 \cdot 0,349 + 0,21 \cdot 0,382 \cdot 0,372 \cdot 0,384 \cdot 0,357}, \quad (4)$$

$$P(D_2 / K_i) = 0,409.$$

Маючи ймовірність відмови, стає можливим обчислення середнього наробітку до відмови (на відмову). Для цього скористаємося ймовірнісно-фізичним методом, описаним у [3].

Оскільки природу такого роду пошкоджень можливо описувати дифузійним монотонним процесом деградації і воно не може мати зворотного характеру, тобто значення параметрів, що визначають технічний стан конструкції, не покращуються і наближаються до гранично допустимої межі, оберемо за основу розрахунку *DM*-розподіл (дифузійний монотонний розподіл) [4]. Приймаючи гіпотезу про *DM*-розподіл, інтегрована функція якого має вид

$$F(t) = DM(t; \mu, \nu) = \Phi\left(\frac{t - \mu}{\nu \sqrt{\mu t}}\right), \quad (5)$$

де $\Phi(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^z \exp\left(-\frac{U^2}{2}\right) dU$ – нормований нормальний розподіл;

μ – параметр масштабу, середній наробіток до відмови;

ν – параметр форми, коефіцієнт варіації узагальненого процесу деградації;

t – сумарне напрацювання.

Оцінка коефіцієнта варіації напрацювання досліджуваних конструкцій рам визначається згідно з рекомендаціями стандарту [5]. Аналіз відмов виробів показав, що головними їх причинами є втома металу, тому, відповідно до методики стандарту, очікуване значення коефіцієнта варіації приймається рівним $\tilde{\nu} = 0,5$. Визначимо $x(F; \nu)$ – відносну величину напрацювання залежно від значень імовірності відмови (інтегрованої функції розподілу) F і значень коефіцієнта варіації ν із таблиць функцій *DM*-розподілу [4]. У нашому випадку для $P = 0,409$ (4) $x = 0,7879$.

Далі, приймаючи, що $x = t_n / T_{cp}$, де T_{cp} – середній наробіток до відмови (на відмову), визначаємо $T_{cp} = t_n / x = 38 / 0,7879 = 48,22$ років.

Таким чином, за отриманими даними можна зробити висновок, що термін експлуатації досліджуваного типу локомотивів не повинен перевищувати 48 років, після чого слід виконувати його ремонт або модернізацію шляхом заміни вузлів на нові.

3. Висновки

Використання методу Байєса при оцінці технічного стану експлуатованого фонду маневрових тепловозів надає можливість аналізувати надійність їх несучих конструкцій, враховуючи різні умови експлуатації. Визначивши поточний стан обладнання, можливо спрогнозувати вчасні ремонтні заходи. Діагностична матриця дозволяє виявити вплив різних чинників на надійність досліджуваних зразків техніки і визначити напрями робіт щодо підвищення їх працездатності. Для підвищення досконалості аналізу статистичні дані, на яких базується діагностична матриця, необхідно актуалізувати у відповідності з різними умовами експлуатації.

СПИСОК ДЖЕРЕЛ

1. Малишко І.В. Дослідження несучих конструкцій тепловозів ЧМЕЗ та визначення залишкового ресурсу на продовження строку служби понад 50 років: звіт про науково-дослідну роботу. *ПАТ «Українська залізниця»*. К., 2018. 106 с.
2. Савчук В.П. Байесовские методы статистического оценивания: Надежность технических объектов. М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1989. 328 с.
3. Серебровский А.Н., Стрельников В.П. Об использовании вероятностно-физических моделей отказов для оценки вероятностей элементарных событий, порождающих техногенную опасность. *Математичні машини і системи*. 2007. № 1. С. 137–143.
4. Стрельников В.П. Параметризация DM -распределения. *Математичні машини і системи*. 2007. № 2. С. 117–124.
5. ДСТУ 3942-2000 (ГОСТ 27.506-2000). Надежность в технике. Планы испытаний для контроля средней наработки до отказа (на отказ). К.: Изд-во стандартов, 2000. Ч. 2: Диффузионное распределение. 32 с.

Стаття надійшла до редакції 11.02.2021