

УДК 629.113



І. К. Шаша



О. І. Шаповалов

МЕТОДИ ОЦІНЮВАННЯ НАДІЙНОСТІ ТРАНСПОРТНИХ МАШИН З УРАХУВАННЯМ УМОВ ЕКСПЛУАТАЦІЇ

У статті розглянуто актуальне питання розроблення методу оцінювання надійності роботи транспортної машини з урахуванням кореляційного зв'язку між надійністю конструкції та рівнем розрахункових навантажень. Появу відмов систем та агрегатів можна подати як факт досягнення або перевищення зовнішнього навантаження залежно від витрат енергії двигуном. Адаптивна система технічного обслуговування і ремонту передбачає проведення заходів за індивідуальною програмою з метою підвищення ресурсу транспортних машин. Вид робіт у цьому випадку призначають на основі індивідуальних діагностичних даних.

К л ю ч о в і с л о в а: метод, надійність, ймовірність, навантаження.

Постановка проблеми. Ймовірно-статистичні методи оцінювання надійності транспортних машин – це сукупність математичних методів, які використовуються для аналізу випадкових явищ та процесів, де результати не є точними, а мають певний розподіл ймовірностей. Ці методи дозволяють вивчати закономірності, робити прогнози та приймати рішення в умовах невизначеності [1].

Вони зазвичай використовуються для оцінювання достовірності кількісних показників, значення яких можуть набувати неперервного ряду значень, і найчастіше оцінювання полягає у розрахунку довірчого інтервалу (похибки) при заданій довірчій ймовірності. Здебільшого довірчу ймовірність задають в інтервалі 0,95–0,999 і за відомого її значення обчислюють похибку.

Такі методи мають як переваги, так і недоліки. До перших належать можливість моделювання складних процесів, обчислення ймовірностей подій, виявлення закономірностей та тенденцій. Недоліки включають необхідність великої кількості даних, чутливість до якості даних та можливу складність інтерпретації результатів [2, 3].

Ймовірно-статистичні методи оцінювання надійності експлуатації транспортної машини (ТМ) ґрунтуються на положенні, що існує кореляційний зв'язок між надійністю конструкції та рівнем розрахункових навантажень [4].

Це дозволяє для рівня надійності, що задається, визначати відповідну величину розрахункових навантажень. Появу відмов можна подати як факт досягнення або перевищення зовнішнього навантаження, що впливає на витрати енергії двигуном.

Вирішення завдання оцінювання надійності ТМ з урахуванням умов експлуатації є актуальним, оскільки дозволить збільшити коефіцієнт технічної готовності автомобільного парку, підвищити рівень безпеки дорожнього руху та знизити екологічне навантаження на навколишнє середовище завдяки зменшенню витрати пального та вибору оптимального швидкісного режиму.

Практичне завдання зводиться до визначення кількості відмов за витратами енергії автомобілем залежно від умов експлуатації (дорожніх, транспортних, атмосферно-кліматичних і рівня культури сервісного обслуговування).

Для визначення максимальної кількості відмов ТМ вважатимемо:

- якщо $P_{i\max}^e \geq P_i^p$, то має місце руйнація;
- якщо $P_{i\max}^e \leq P_i^p$, то руйнація відсутня.

Формулюємо висновок, що ймовірність руйнації конструкції залежить від функції розподілу максимальних величин зовнішніх навантажень двигуна ТМ.

Такий підхід до визначення величини ймовірності руйнації може бути використаний за будь-якої форми розподілу відмов (дискретний або безперервний опис зовнішніх навантажень).

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Результатом наукових досліджень є висновок, що суттєвий вплив на надійність роботи ТМ чинять умови експлуатації [5].

Умови експлуатації ТМ у межах спектральної теорії випадкових величин характеризуються такими параметрами:

– функцією математичного сподівання

$$\bar{X}(t) = \frac{1}{n} \sum x_i(t); \quad (1)$$

– дисперсією процесу

$$D_x(t) = \sum [x(t) - \bar{x}(t)]^2 / n - 1; \quad (2)$$

– кореляційною функцією

$$k_x(t_k, t_i) = \frac{\sum [x(t_k)] [x(t_i) - \bar{x}(t_i)]}{n} - 1; \quad (3)$$

– нормованою кореляційною функцією

$$P_x(\tau) = \frac{k_x(\tau)}{\sqrt{D_x(t_k)D_x(t_e)}}; \quad (4)$$

– спектральною щільністю процесу

$$S(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} P_x(\tau) e^{-i\omega\tau} d\tau, \quad (5)$$

де n – число реалізацій;

$x_i(t)$ – значення процесу в перетині t ;

t_k, t_e – перетин процесу в моменти K, e ;

τ – інтервал процесу між перетинами;

ω – частота процесу;

$P_x(\tau) e^{-i\omega\tau}$ – інтегральне перетворення Фур'є.

Наведені залежності справедливі за умови, що випадковий процес ергодичний і стаціонарний.

Оскільки досліджувані параметри формуються під впливом спектра випадкових факторів на підставі центральної граничної теореми теорії ймовірностей, їх розподіл у кожному перерізі процесу можна вважати нормальним із щільністю розподілу

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\bar{x})^2}{2\sigma^2}}, \quad (6)$$

де \bar{x}, σ – математичне сподівання і середньоквадратичне відхилення випадкової величини.

Для визначення кількості відмов протягом часу t зовнішні навантаження подають у формі деякого процесу $P^e(t)$.

Існує гіпотеза, що для визначення кількості відмов внаслідок досягнення чи перевищення зовнішнього навантаження протягом часу t , необхідно встановити рівень міцності конструкції ТМ P_i^p (функція номера i – випадкова величина). Енергетичні показники двигуна ТМ (максимальний крутний момент, індикаторний коефіцієнт корисної дії, число обертів колінчастого вала, лінійна витрата пального) за цей період спричиняють процеси руйнації [5].

Метою статті є розроблення ймовірнісно-статистичного методу оцінювання надійності транспортних машин з урахуванням умов експлуатації.

Виклад основного матеріалу. Наразі розглядаються три способи забезпечення надійності ТМ з урахуванням умов експлуатації:

– встановлення безпечного ресурсу;

– забезпечення ресурсу за принципом безпечного або допустимого пошкодження з частковим його обмеженням;

– експлуатація автомобіля за станом без обмеження ресурсу.

Принцип безпечного ресурсу застосовується для деталей, пошкодження яких зазвичай призводить до руйнування всього агрегату і не може бути виявлене під час проведення технічних обслуговувань або ремонтів.

При цьому допустима надійність обмежується величиною безпечного ресурсу як парку автомобілів загалом, так і окремих екземплярів при індивідуальному оцінюванні умов експлуатації.

Принцип допустимого пошкодження (забезпечення експлуатаційної живучості) застосовується для ТМ, агрегатів або деталей, пошкодження яких не призводять до миттєвого руйнування конструкції в цілому і можуть бути виявлені під час проведення технічних обслуговувань або ремонтів (ТО і Р).

Наявна система ТО і Р сформувалася на базі спрощеної моделі функціонування транспортної інфраструктури, яка не підтримує надійність ТМ на необхідному рівні.

Існують адаптивні системи, що передбачають необхідність проведення ТО і Р за індивідуальною програмою з метою підвищення ресурсу ТМ. Такі ТО і Р умовно називають індивідуальним технічним обслуговуванням (ІТО). Вид робіт у цьому випадку призначають на основі індивідуальних діагностичних даних [1]. Рівень, якого досягла сучасна технічна діагностика, дозволяє при технічній експлуатації ТМ реалізувати практично будь-які завдання з виявлення та прогнозування виникнення пошкоджень [6].

Оскільки основним завданням безпечного ресурсу є недопущення руйнувань в період експлуатації, то можна за критерій надійності прийняти реальну ймовірність відсутності руйнувань, яка може бути визначена за витратами енергії автомобілем таким чином.

Нехай ймовірність відсутності руйнувань конструкції є деякою функцією ресурсу, що дорівнює числу циклів дії змінних зовнішніх навантажень. Тоді функція розподілу циклів до руйнування конструкції дорівнюватиме

$$\tilde{B} = 1 - F(N_{\text{ц}}), \quad (7)$$

де $F(N_{\text{ц}}) = \int_{-\infty}^N f(o) d_o$ – інтегральний розподіл надійності за кількістю циклів $N_{\text{ц}}$ навантаження.

Ймовірність того, що одна деталь агрегата або вузла не зруйнується протягом встановленого терміну, може бути записана у вигляді

$$\tilde{B} = \int_{-\infty}^{\infty} [1 - F(N_{\text{ц}})] f_d(N_{\text{ц}}) dN_{\text{ц}}, \quad (8)$$

де $f_d(N_{\text{ц}})$ – щільність ймовірності допустимого ресурсу за результатами випробування.

У кожній ТМ є велика кількість однотипних деталей (підшипники, кріпильні з'єднання, зубчасті передачі, гальмівні диски тощо). Позначимо ці деталі μ .

Ймовірність цілісності всіх деталей дорівнює

$$\tilde{B}_{\text{м}} = \int_{-\infty}^{\infty} [1 - F(x)]^{\mu} f_d(N_{\text{ц}}) dN_{\text{ц}}. \quad (9)$$

Величину \tilde{B} доцільно прийняти за основний критерій надійності за умовами опору силам тертя, тому що вона має низку необхідних властивостей.

1. Існує кореляційний зв'язок між величиною \tilde{B} та запасом довговічності при встановленні ресурсу. Якщо термін служби встановлюється відношенням результату випробувань до коефіцієнту надійності η , тоді

$$\tilde{B} = \int_{-\infty}^{\infty} \left[1 - F\left(\frac{N_{\text{ц}}}{\eta}\right)\right]^{\mu} f_d(N_{\text{ц}}) dN_{\text{ц}}. \quad (10)$$

2. Величина $\tilde{B}_{\text{м}}$ є ймовірністю того, що весь парк автомобілів даної марки не матиме жодної руйнації вузла чи агрегату за відповідний період експлуатації.

3. Критерій $\tilde{B}_{\text{м}}$ є достатньо гнучким і дозволяє враховувати особливості законів розподілу та спосіб встановлення терміну служби кожного елемента конструкції. Наприклад, закон розподілу втомної

довговічності $F(N_{ц})$ є порівняно слабо зростаючою функцією при малих імовірностях і функція f_d займає досить вузький діапазон довговічності (що відповідає наявності великої кількості зразків у експериментальних дослідженнях) $F(N_{ц}) = \text{const}$.

Зазначені властивості дозволяють вважати \tilde{B}_M прийнятним критерієм оцінювання ресурсу для різних величин порога чутливості N_0 . При достатньо великих значеннях порога чутливості надійність визначається величиною довірчої ймовірності безпечного терміну служби ТМ. Таке припущення дозволяє встановити кількісні величини запасів надійності.

Термін працездатності деталей за результатами випробувань дорівнює

$$N_{\text{доп}} = \tilde{N}_0 - U_{\text{нм}} y_{N_0}^{\approx}, \quad (11)$$

де \tilde{N}_0 – величина середнього порога чутливості за результатами випробувань – значення випадкової величини (квантиль) нормального розподілу, що відповідає ймовірності \tilde{B}_M ;

$y_{N_0}^{\approx}$ – середньоквадратичне значення порога чутливості деталі до руйнування.

Якщо термін служби встановлюється відношенням результату випробувань до коефіцієнта надійності $N_{\text{доп}} = N_n/3$, то отримаємо формулу для визначення потрібного запасу довговічності з урахуванням порога чутливості:

$$3 = \frac{1}{1 - \frac{k_1}{\sqrt{n}} \frac{e^n}{N_0} U_{\text{нм}} e^{-y^2}}, \quad (12)$$

де $k_1 = \frac{y_{N_0}}{\sqrt{y_{N_0}^2 + 1 - 0,5(4y_{N_0}^4 + y_{N_0}^2 + 2)e^{-y_{N_0}^2}}}$;
 n – кількість ТМ.

Висновки

1. Модель забезпечення ресурсу за критерієм одиначної допустимої відмови можливо отримати шляхом імовірнісного оцінювання опору силам тертя в механізмах та деталях ТМ.

2. Принцип безпечного ресурсу встановлюється для деталей, пошкодження яких найчастіше призводить до руйнування всього агрегату і не може бути виявлене під час проведення ТО або ремонтів. Імовірність відсутності руйнувань конструкції є деякою функцією ресурсу, що дорівнює числу циклів дії змінних зовнішніх навантажень.

3. Адаптивна система ТО і Р передбачає проведення заходів за індивідуальною програмою з метою збільшення ресурсу ТМ. Вид робіт у цьому випадку призначають на основі індивідуальних діагностичних даних.

Перелік джерел посилання

1. Макаров В. А., Біліченко В. В., Макарова Т. В. Імовірнісно-статистичні методи в задачах автомобільної техніки : навч. посіб. Вінниця : ВНТУ, 2019. 105 с.

2. Елементи теорії ймовірностей і математичної статистики в управлінні процесами перевезень : навч. посіб. / Т. В. Бутько та ін. Харків : УкрДАЗТ, 2011. 308 с.

3. Оцінка ефективності військових перевезень в системі логістичного забезпечення Національної гвардії України / Шаповалов О. І. та ін. *Збірник наукових праць Національної академії Національної гвардії України*. Харків, 2024. Вип. 2 (44). С. 138–142.

4. Шаша І. К., Рогозін І. В., Новічонок С. М. Математичні методи оцінки експлуатаційної надійності засобів рухомості озброєння та військової техніки. *Збірник наукових праць Харківського національного університету Повітряних Сил*. Харків, 2020. № 2 (64). С. 135–140.

5. Шаша І. К. Технічні напрями підтримки працездатності автобронетанкової техніки Національної гвардії України. *Збірник наукових праць Національної академії Національної гвардії України*. Харків, 2021. Вип. 1 (37). С. 89–95.

6. Шаша І. К., Цебрюк І. В., Маренко Г. М. Теоретичні основи побудови адаптивної системи технічного обслуговування і ремонту військової техніки Національної гвардії України. *Збірник наукових праць Національної академії Національної гвардії України*. Харків, 2022. Вип. 1 (39). С. 70–75.

Стаття надійшла до редакції 13.10.2025 р.

UDC 629.113

I. Shasha, O. Shapovalov

METHODS OF ASSESSING THE RELIABILITY OF TRANSPORT MACHINES TAKING INTO ACCOUNT OPERATING CONDITIONS

The article considers probabilistic-statistical methods for assessing the reliability of transport vehicles. This is a set of mathematical methods used to analyze random phenomena and processes where the results are not certain, but have a certain probability distribution. These methods allow you to study patterns, make predictions and make decisions under conditions of uncertainty.

They are usually used to assess the reliability of quantitative indicators, the values of which can take a continuous series of values, and most often consist in calculating the confidence interval (error) at a given confidence probability. Usually, the confidence probability is set equal to 0,95–0,999 and with its known value, the error is calculated. The current issue of developing a method for assessing the reliability of the operation of a transport vehicle is considered, taking into account the correlation between the reliability of the structure and the level of design loads. This allows you to determine the appropriate value of design loads for the given level of reliability. The occurrence of failures can be presented as the fact of reaching or exceeding the external load acting on , depending on the energy consumption by the engine. Solving this problem is relevant, since it will allow increasing the technical readiness coefficient of the vehicle fleet, increasing the level of road safety and reducing the environmental load on the environment by reducing fuel consumption and choosing the optimal speed mode.

Three ways of ensuring the reliability of transport vehicles are considered, taking into account operating conditions: establishing a safe resource; ensuring the resource according to the principle of safe or permissible damage with its partial limitation; operating the vehicle in its condition without limiting the resource. The principle of a safe resource is established for parts, damage to which usually leads to the destruction of the entire unit and cannot be detected during maintenance or repairs. In this case, the permissible reliability is limited by the value of the safe resource of both the vehicle fleet as a whole and individual instances with an individual assessment of operating conditions. The principle of permissible damage (ensuring operational survivability) is applied to transport vehicles, units or parts, the occurrence of damage to which does not lead to the immediate destruction of the structure as a whole and can be detected during maintenance or repairs. The existing maintenance and repair system was formed on the basis of a simplified model of the functioning of the transport infrastructure, which does not support the reliability of transport vehicles at the required level. The adaptive maintenance and repair system involves carrying out measures according to an individual program in order to increase the resource of transport vehicles. The type of work in this case is assigned on the basis of individual diagnostic data. The task of a safe resource is to prevent destruction in operation, so the real probability of the absence of destruction can be taken as a reliability criterion, which can be determined by the energy consumption of the car as follows.

К e y w o r d s: method, reliability, probability, load, failure, destruction, parameter, resource, property.

Шаша Ігор Костянтинівич – доктор технічних наук, професор, професор кафедри автомобільної техніки Національної академії Національної гвардії України.
<https://orcid.org/0000-0001-7549-3119>

Шаповалов Олександр Ігорович – кандидат технічних наук, доцент, начальник кафедри автомобільної техніки Національної академії Національної гвардії України.
<https://orcid.org/0000-0001-8518-4336>