

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

УДК 629.45/46-049.6

Л. А. МУРАДЯН^{1*}

^{1*}Каф. «Вагони та вагонне господарство», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 19, ел. пошта leon59@bk.ru, ORCID 0000-0003-1781-4580

ЙМОВІРНІСНО-ФІЗИЧНИЙ ПІДХІД ДЛЯ ОПИСАННЯ ТА ВИЗНАЧЕННЯ НАДІЙНОСТІ ВАГОНІВ

Мета. У роботі передбачається на основі ймовірнісно-фізичного підходу розробити алгоритм і послідовність описання та визначення надійності вагонів для прогнозування окремих кількісних показників досліджуваних елементів, деталей та вузлів або вагона в цілому. **Методика.** Для розрахунку показників безвідмовності, довговічності й збережуваності вагонів застосовано ймовірнісно-фізичний метод, що враховує неминучі під час експлуатації вагонів витрати ресурсу. Методика встановлення кількісних показників надійності ґрунтується на вивченні фізико-механічних та фізико-хімічних властивостей і параметрів різних елементів, із виявленням закономірностей процесів старіння елементів чи деталей (з часом чи напрацюванням) для визначення аналітичних залежностей зазначених процесів від показників надійності вагонів. **Результати.** На основі ймовірнісно-фізичного підходу розроблено модель для описання та визначення надійності вагонів. При цьому метод розрахунку на основі ймовірнісно-фізичної моделі принципово відрізняється від усіх відомих строгих ймовірнісних методів тим, що він розглядає неперервну множину станів елементів, деталей і систем вагона впродовж неперервного часу. При існуванні (чи можливості знаходження) інформаційного параметра про витрату ресурсу елемента вагона з оцінкою швидкості його зміни і, знаючи його граничне значення, на основі побудованої моделі надійності вагона із залученням ймовірнісно-фізичного підходу можна прогнозувати всі необхідні кількісні показники надійності досліджуваних елементів, деталей та вузлів або вагона в цілому. **Наукова новизна.** У роботі набула подальшого розвитку методологія побудови надійності вагонів із використанням ймовірнісно-фізичної моделі з DN-розподілом. Конкретна фізична інтерпретація констант DN-розподілу відмов дає можливість оцінити їх за результатами дослідження окремих параметрів, що характеризують технічний стан вагона. На основі ймовірнісно-фізичного підходу розроблено алгоритм і послідовність описання та визначення надійності вагонів для прогнозування окремих кількісних показників досліджуваних елементів, деталей та вузлів і вагона в цілому. **Практична значимість.** Результати роботи дозволяють практично розрахувати кількісні показники надійності вагонів чи їх окремих елементів для подальшого прогнозування загальної надійності під час експлуатації.

Ключові слова: ймовірнісно-фізичний підхід; надійність; технічний стан вагонів; модель відмов; напрацювання

Вступ

У теорії надійності співіснують два напрями, споріднені за ідеологією та загальною системою понять, але відрізняються за підходами [5-8, 11, 13-16].

Перший напрямок полягає у системності, статистичності, тобто математична теорія надійності, другий – можна назвати фізичною теорією надійності. Об'єктом системної (статистичної, математичної) теорії надійності служать системи з елементів, взаємодіючих між собою в сенсі збереження працездатності по логічних схемах: графах, деревах відмов тощо.

Вихідну інформацію в системній теорії надійності, як правило, утворюють показники надійно-

сті елементів, що визначають шляхом статистичної обробки результатів випробувань і (або) експлуатаційних даних. Завдання системної теорії надійності вирішують в рамках теорії ймовірностей і математичної статистики, тобто без залучення фізичних моделей відмов і тих фізичних явищ, які викликають і супроводжують виникнення відмов.

Джерела, початок фізичної теорії надійності можна знайти в ранніх роботах щодо статистичного тлумачення коефіцієнтів запасу під час розрахунку інженерних конструкцій [3, 4]. Відмінна риса фізичної теорії надійності полягає в тому, що підтримання працездатності системи і можливості виникнення відмов розглядають в ній як результат взаємодії між системою і зовнішнім впливом

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

(експлуатаційними навантаженнями, умовами середовища тощо), а також механічними, фізичними і хімічними процесами, які відбуваються в компонентах системи під час її експлуатації. Поряд із засобами теорії ймовірностей і математичної статистики у фізичній теорії надійності широко використовують моделі і методи природничих і технічних наук.

Фізична теорія надійності вказує, що в першу чергу, безвідмовність вагонів забезпечується постійністю або незначною зміною фізико-механічних та фізико-хімічних властивостей (в допустимих межах) кожного елемента. Тобто повинна бути забезпечена збережуваність фізико-механічних та фізико-хімічних властивостей кожного елемента вагона в первісному (вихідному) вигляді або з деякою їх незначною зміною, яка не призведе до істотного погіршення внутрішнього стану матеріалів елементів, деталей та вузлів. В першу чергу, це стосується збережуваності таких властивостей як: мікроструктура, хімічний і фазовий склад матеріалів, які безпосередньо впливають на зміну твердості, міцності, пластичності, зносостійкості, корозійної, ерозійної стійкості і інших властивостей. У свою чергу незмінність або незначна зміна (в допустимих межах) зазначених властивостей забезпечує тривалу і безвідмовну роботу елементів та вагона в цілому, в основі якої і лежить фізична надійність.

Мета

На основі ймовірно-фізичного підходу розробити алгоритм та послідовність описання та визначення надійності вагонів для прогнозування окремих кількісних показників надійності досліджуваних елементів, деталей та вузлів, або вагона в цілому.

Методика

Фізична надійність різного роду матеріалів і є основою будь-якої надійності (експлуатаційної, локальної, комплексної та ін.) як окремих елементів, деталей та вузлів, так і вагона у цілому. Разом з тим, якщо до матеріалів елементів, деталей та вузлів вагона застосувати поняття тільки фізичної надійності, то до конструкцій різних вагонів, поряд з фізичною надійністю, можуть бути застосовані поняття конструктивної і технологічної надійності.

У технічній літературі і нормативній документації, в принципі, не містяться такі поняття як конструктивна та технологічна надійність. Але введення таких термінів постійно диктується виробничою необхідністю, особливо на стадії проектування та виготовлення вагонів. Крім того, слід зазначити про існування експлуатаційної надійності вагонів, яка має безпосередній зв'язок з фізичною надійністю, у тому числі і з конструктивною, і з технологічною. Під час проектування вагонів, відповідно до норм [12], в конструкторську надійність закладається ймовірність безвідмовної роботи з певним (необхідним) значенням, тобто на цьому етапі використовується математичний апарат теорії надійності без урахування можливих (в процесі виготовлення і експлуатації) змін фізико-механічних та фізико-хімічних властивостей окремих елементів, деталей тощо.

Під час виготовлення вагонів (в початковий момент часу) з різних матеріалів виготовляються деталі та вузли, яким властива певна (спроєкована) конструкція, і яка в подальшому буде працювати в певному вагоні. Надійність, а в кінцевому підсумку і безвідмовність цієї деталі, буде визначатися не тільки вихідними властивостями матеріалу, а й тим, яким чином конструкція елементів і деталей буде впливати на втрату фізико-механічних та фізико-хімічних властивостей в процесі взаємодії цих елементів під час експлуатації вагонів. Наприклад, якщо спроєкувати елемент чи деталь вагона так, що у них будуть присутні концентратори напружень (гострі кути, нерационально розташовані отвори тощо), то внаслідок статичних і динамічних навантажень під час експлуатації в зонах концентрації напружень будуть утворюватись тріщини з наступним руйнуванням конструкції окремого вузла чи вагона в цілому. Якщо спроєкувати конструкцію зазначених елементів чи деталей з галтелями, то згадані процеси руйнування не відбудуться, тобто загальна надійність конструкції вагона буде дещо вища.

Також особливістю конструктивної надійності вагонів є зберігання вихідної (спроєкованої) конструкції елементів чи деталей під час експлуатації в первісному вигляді. Наприклад, якщо під час експлуатації різномісних вагонів, конструкція елементів, деталей чи вузлів не зазнає істотних змін, то забезпечення працездатності і безвідмовності такої конструкції буде гарантоване.

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

У випадку експлуатації вагонів, якщо в процесі роботи у конструкції сталося довільне зміщення одних її елементів по відношенню до інших за межі допустимого, або сталася втрата окремих елементів (через тривалу вібрацію відбулося розкручування гайок, випадання болтів або окремих елементів, деталей, стався їх перекіс тощо), то така конструкція в кінцевому підсумку виявиться неприцездатною і ненадійною. Отже, недотримання зберігання початкового (вихідного) взаємного орієнтування елементів чи деталей конструкції або зміна її комплектності можуть бути причиною відмови, тобто така відмова буде ознакою низького рівня конструктивної надійності вагона, а в деяких випадках і технологічної надійності.

Першочергове значення надійності пов'язано з тим, що її рівень значною мірою визначає розвиток автоматизації виробничих процесів, інтенсифікації робочих процесів, економії матеріалів і енергії.

Актуальність надійності зростає у зв'язку зі складністю сучасних машин і важливістю функцій, які вони виконують [4, 7, 10]. Сучасні технічні засоби складаються з безлічі взаємодіючих механізмів, апаратів і приладів. Відмова хоча б одного елемента складної системи призводить до порушення роботи всієї системи.

Однією з проблем сучасної теорії надійності, заснованої на класичних імовірнісних методах, є неможливість адекватного точного передбачення моменту виникнення відмови як випадкової події, оскільки моменту відмови об'єкта (особливо тривалого використання), зазвичай, передують складні внутрішні зміни. Ці зміни, в вантажних вагонах, можуть по-різному проявлятися в залежності від місця та характеру відмови.

Останні дослідження надійності, що виконувались для різних виробів, машин і агрегатів [7, 8, 10–12] показують, що для розрахунку показників безвідмовності, довговічності і збереженості вагонів можна застосувати ймовірнісно-фізичний метод, що враховує неминучі під час експлуатації вагонів витрати ресурсу.

Методика встановлення кількісних показників надійності ґрунтується на вивченні фізико-механічних та фізико-хімічних властивостей і параметрів різних типів технічних засобів, на основі яких можна виявити закономірність процесів старіння елементів чи деталей з часом чи напруженням (при витраті ресурсу), а також про-

вести визначення аналітичних залежностей зазначених процесів з показниками надійності вагонів. При вивченні процесів старіння вагонів, тобто деградаційних процесів, можна застосувати математичні методи дослідження внутрішніх змін фізико-механічних та фізико-хімічних властивостей з залученням теорії випадкових процесів та з використанням стохастичних рівнянь, а також фізичне моделювання використання ресурсу елементів, деталей та вузлів вагона з проведенням випробувань на безвідмовність.

Використання деградаційних моделей на основі випадкових процесів і стохастичних кінетичних рівнянь дозволяє знайти залежності ймовірності безвідмовної роботи (чи відмови) і фізико-механічних та фізико-хімічних властивостей (або конкретного параметра), що призвели до відмови вагона. Отримані результати розв'язань стохастичних рівнянь, що описують внутрішні властивості елементів чи деталей різних технічних засобів, неодноразово підтверджені тривалими випробуваннями розроблених фізичних моделей, що дозволяють із залученням статистичного апарату зробити достовірні адекватні висновки [1, 2, 9]. Це, в свою чергу, дозволяє виконати розрахунки фізичної надійності різномісних вагонів в процесі старіння і використання ресурсу з урахуванням процесів деградації в матеріалах їх елементів та деталей, у випадку коли у вигляді функції напруження виступає інтенсивність відмов. Зазначений підхід забезпечує розв'язання багатьох практичних задач, існуючих в сучасній теорії надійності.

Як відомо [7, 12], на стан надійності вагонів під час їх виготовлення і підтримки цієї надійності на достатньому рівні в період експлуатації, великий вплив здійснюють процеси старіння, втоми і руйнування металів і сплавів. Успішне вирішення цих завдань лежить, по-перше, в розробці нової технології, методології, фізичної теорії старіння, втоми і руйнування матеріалів замість морально застарілої; по-друге, в узагальненні розрізнених експериментальних даних за механізмом старіння і втоми з метою створення загальної фізичної теорії «старіння-втоми-руйнування» різного роду матеріалів від початку їх виготовлення до повного руйнування. А потім пошуки і розробка нових технологій виготовлення деталей, що знижують рівень старіння і втоми матеріалів на стадії їх обробки.

Результати

Розглянемо положення ймовірно-фізичного підходу до задач теорії надійності. Технічний стан вагонів залежить від значень їх внутрішніх параметрів D_i , які у процесі експлуатації не будуть залишатись незмінними. З накопиченням напрацювання і затратою ресурсу зазначені параметри, що і будуть визначати технічний стан вагонів, змінюються (знижуються з позиції надійності), тим самим прагнучи до відповідних граничних значень:

$$D_i(t) \rightarrow D_{spi}.$$

Початковий технічний стан вагона за деякою інформацією про внутрішні параметри буде визначатись таким вектором:

$$D_o = (D_{o1}, D_{o2}, \dots, D_{oi}), \quad (1)$$

де D_{oi} – значення визначального параметра, що отриманий для i -го елемента в початковий момент спостереження за технічним станом вагона.

Відповідно граничному стану, а отже, і граничному періоду напрацювання T_{sp} вагона, за деякою інформацією буде відповідати такий вектор:

$$D_{sp} = (D_{sp1}, D_{sp2}, \dots, D_{spi}). \quad (2)$$

Компоненти векторів отриманої інформації (1) і (2) відрізняються між собою. Цей факт можна охарактеризувати параметром зміни технічного стану α для i -го періоду напрацювання (пробігу) вагона. За своїм змістом ця величина випадкова і характеризує зміну визначального параметра на одиницю напрацювання (пробігу), що можна визначити як одиницю виміру параметра технічного стану поділену на одиницю напрацювання вагона.

Аналогічно до (1) і (2), параметр технічного стану структурних елементів вагона для певних моментів напрацювання також можна подати у вигляді векторів:

$$\alpha_1 = (\alpha_{11}, \alpha_{12}, \dots, \alpha_{1i});$$

$$\alpha_{sp} = (\alpha_{sp1}, \alpha_{sp2}, \dots, \alpha_{spi}),$$

де α_1, α_{sp} – параметри зміни технічного стану структурного елемента вагона за перший і граничний періоди напрацювання (пробігу) відповідно.

В момент досягнення визначальним параметром складових структурних елементів вагона гра-

ничного значення відбудеться його відмова. Умову відмови вагона можна записати так:

$$\lim_{D_i(t) \rightarrow D_{spi}(t)} \left(\frac{D_i(t)}{D_{spi}} \right) = 1. \quad (3)$$

Якщо уявити, що ми можемо «спостерігати» деградації і «фіксувати» моменти досягнення визначальними параметрами D_i , своїх граничних значень D_{spi} , то в інтервалі часу від t_{\min} до t_{\max} одержимо масив напрацювань (пробігів) $\{t_i\}$. Обробивши масив $\{t_i\}$ відомим методом, тобто поділивши інтервал $t_{\min} \dots t_{\max}$ на l інтервалів довжиною Δt і підрахувавши кількість відмов $n(\Delta t)$ на кожному інтервалі, одержимо щільність розподілення відмов у зазначеному інтервалі напрацювань (пробігів). При математичному моделюванні процесів деградації «спостереження» і «фіксації» здійснюють на основі розв'язання (3) при заданих початкових і граничних умовах.

Одержана умовна щільність $\omega(t, D)$ ймовірності реалізації тієї чи іншої траєкторії має простий зв'язок з щільністю розподілення напрацювання (пробігу) вагона до відмови:

$$f(t) = - \int_{-\infty}^1 \frac{\partial \omega(D_o(t_o), D(t))}{\partial t} dD. \quad (4)$$

Деградація властивостей структурних елементів вагона може мати як монотонний, так і немонотонний характер. Розв'язання рівняння щільності ймовірності (4) для монотонного і немонотонного процесів деградації структурних елементів вагона повинен відрізнятись лише різними граничними умовами.

Зміна визначальних параметрів елементів вагона під час експлуатації описується стохастичним марковським процесом, коли перехід фізичних параметрів від одного значення до іншого (з одного стану в інший) має ймовірнісний характер, тобто є марковським процесом дифузійного типу. При цьому умовну щільність ймовірності переходу з одного стану в інший $\omega(t, D)$ можна визначити за допомогою рівняння у частинних похідних, яке подібне до рівняння дифузії в теорії переносу речовин у фізиці твердого тіла:

$$\frac{\partial \omega(t, D)}{\partial t} + a \frac{\partial \omega(t, D)}{\partial D} - b^2 \frac{\partial \omega(t, D)}{2 \partial D^2} = 0,$$

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

де t – напрацювання (пробіг) вагона;

a – середня швидкість зміни визначального параметра структурного елемента (по-іншому – коефіцієнт зносу);

$D = D(t)$ – визначальний параметр структурного елемента, що визначає його технічний стан;

b – коефіцієнт потоку ймовірностей технічного стану структурного елемента, причому b^2 є середньою швидкістю зміни дисперсії визначального параметра структурного елемента.

Тоді вираз для закону розподілу тривалості експлуатації вагона до відмови, тобто математична модель відмов, враховуючи, що зміну технічного стану вагона в цілому можна описати експоненціальною закономірністю, буде мати вигляд:

$$f(t) = \frac{1}{bt\sqrt{2\pi t}} \exp\left[-\frac{(1-at)^2}{2b^2t}\right]. \quad (5)$$

Рівняння (5) буде являти собою математичну модель зміни технічного стану вагона за визначальними параметрами структурних елементів або DN-модель (DN-розподіл) [2].

Зазначений розподіл в науковій літературі [2, 4, 10] одержав назву як DN-розподіл або дифузійний немонотонний розподіл, через те, що він впливає з розв'язанням рівняння потоку (дифузії) ймовірностей.

Крім того, коефіцієнт дифузії ймовірностей технічного стану вагона b буде дорівнювати:

$$b = \frac{\sigma_a}{\sqrt{a}} = \frac{\sigma_a \sqrt{a}}{\sqrt{a} \sqrt{a}} = \frac{\sigma_a}{a} \sqrt{a}.$$

Відношення σ_a/a виступає у вигляді коефіцієнта варіації V_3 процесу зміни технічного стану вагона. В DN-моделі відмов коефіцієнт варіації напрацювання (пробігу) до відмови V будь-якого елемента, деталі чи вузла вагона збігається з коефіцієнтом варіації швидкості зміни, що відбуваються у внутрішніх процесах зміни технічного стану вагона V_3 .

Для коефіцієнта потоку ймовірностей технічного стану вагона b можна записати таке співвідношення:

$$b = V\sqrt{a}.$$

Досвід виконання теоретичних оцінок за зазначеною математичною моделлю свідчить, що

зручніше користуватися не середньою швидкістю зміни технічного стану a , а оберненою до неї величиною:

$$\mu = \frac{1}{a}.$$

Тоді, з урахуванням наведених співвідношень, щільність розподілу (5) набуде вигляду:

$$f(t) = \frac{\sqrt{\mu}}{V_t t \sqrt{2\pi t}} \exp\left[-\frac{(\mu-t)^2}{2V_t^2 \mu t}\right], \quad (6)$$

де μ – масштабний параметр розподілу;

V – коефіцієнт варіації напрацювання (пробігу) до відмови – параметр форми розподілу.

З'ясуємо з позицій теорії надійності зміст параметра масштабного параметру розподілу μ . Для цього покажемо, що він є не що інше, як середнє значення напрацювання (пробігу) вагона t , тобто математичне сподівання напрацювання до відмови.

Відповідно до робіт [2, 10] – математичне сподівання випадкової величини t є першим початковим статистичним моментом. Оскільки напрацювання (пробіг) вагона t є безперервною випадковою величиною в області визначення $(0, \infty)$, то вираз для математичного сподівання напрацювання (пробігу) вагона до відмови T_o набуде такого вигляду:

$$T_o = \int_0^{\infty} t f(t) dt. \quad (7)$$

Підставимо вираз (6) у останній вираз (7) і, в результаті після спрощень, отримаємо напрацювання (пробіг) вагона до відмови в такому вигляді:

$$T_o = \frac{\sqrt{\mu}}{V_t \sqrt{2\pi}} \exp(V_t^{-2}) 2\sqrt{\mu} \cdot V_t \sqrt{\frac{\pi}{2}} \exp(-V_t^{-2}) = \mu.$$

Таким чином, у DN-моделі масштабний параметр розподілу відмов μ має фізичний зміст середнього напрацювання (пробігу) вагона до відмови.

Використовуючи результати робіт [2, 4, 10], можна визначити статистичні параметри DN-моделі:

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

- дисперсію напрацювання (пробігу) вагона t до відмови:

$$\sigma_t^2 = \int_0^{\infty} (t - \mu)^2 f(t) dt,$$

- статистичні моменти відмов:

$$M_t = \mu; \quad \sigma_t^2 = \mu^2 V_t^2; \quad A_s = 3V_t; \\ E_x = 15V_t^2.$$

На основі побудованої моделі наведемо приклад DN-розподілу для статистичних даних щодо відмов вантажних вагонів (рис. 1).

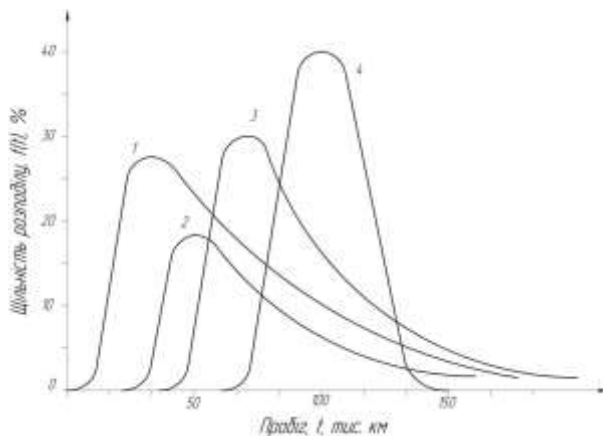


Рис. 1. DN-розподіл відмов структурних елементів вантажних вагонів при $\mu = \text{const}$ і $\mu = 100$ тис. км: 1 – конструкція кузовів; 2 – візки та ресорне підвищення; 3 – гальмівне обладнання; 4 – колісні пари

Аналізуючи основні характеристики DN-розподілу, слід зазначити:

– асиметрія A_s і ексцес E_x отриманого розподілу позитивні, а математичне сподівання M_t зміщене праворуч відносно медіани, тобто щільність DN-розподілу є асиметричною одномодальною кривою з більш витягнутою правою віткою (усі наведені криві 1–4 на рис. 1);

– при фіксованому масштабному параметрі розподілу (математичному сподіванні напрацювання (пробігу) вагона до відмови $\mu = 100$ тис. км пробігу) зі зменшенням параметра форми V_t максимум щільності розподілу $f(t)$ зміщується праворуч за стрілкою годинника з одночасним зменшенням амплітуди розподілу (криві 1, 2 рис. 1) і наступним її збільшенням (криві 3, 4 рис. 1), при-

чому всі центральні статистичні моменти розподілу (дисперсія, асиметрія та ексцес) зменшуються;

– при фіксованому параметрі форми (коефіцієнті варіації V_t) зі збільшенням масштабного параметра розподілу μ , тобто зі зсувом розподілу вправо за стрілкою годинника, він деформується таким чином, що дисперсія збільшується, а коефіцієнти асиметрії й ексцесу залишаються сталими. Приклад зазначеного випадку при $V_t = \text{const}$ наведено на рис. 2.

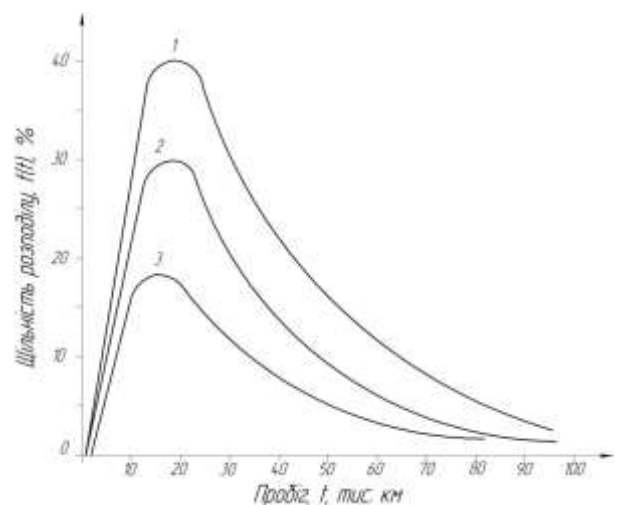


Рис. 2. DN-розподіл відмов структурних елементів вантажних вагонів при $V_t = \text{const}$ і $V_t = 1$: 1 – колісні пари; 2 – гальмівне обладнання; 3 – візки та ресорне підвищення

Наукова новизна та практична значимість

У роботі набула подальшого розвитку методологія побудови надійності з використанням ймовірно-фізичної моделі з DN-розподілом. Конкретна фізична інтерпретація констант DN-розподілу відмов дає можливість оцінити їх за результатами дослідження окремих параметрів, що характеризують технічний стан вагона.

На основі ймовірно-фізичного підходу розроблено алгоритм та послідовність описання та визначення надійності вагонів для прогнозування окремих кількісних показників надійності досліджуваних елементів, деталей та вузлів і вагона в цілому.

Результати роботи дозволяють практично розрахувати кількісні показники надійності вагонів

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

чи їх окремих елементів для подальшого прогнозування загальної надійності під час експлуатації.

Висновки

Метод розрахунку на основі DN-розподілу як ймовірно-фізичної моделі принципово відрізняється від усіх відомих строгих ймовірнісних методів тим, що він розглядає неперервну (континуальну) множину станів елементів, деталей і систем вагона з неперервним часом. Це, безсумнівно, є якіснішим уявленням поведінки елементів вагона, що витрачають свій ресурс з часом – зі збільшенням напрацювання. Конкретна фізична інтерпретація констант ймовірно-фізичних моделей розподілення відмов дає можливість оцінити їх за результатами дослідження визначених параметрів, що характеризують технічний стан вагона. Якщо можна знайти параметр, що інформує про витрату ресурсу елементу вагона, то оцінивши швидкість його зміни і знаючи його граничне значення на основі побудованої моделі надійності вантажного вагона із залученням ймовірно-фізичного підходу, можна прогнозувати всі необхідні кількісні показники надійності досліджуваних елементів, деталей та вузлів і вагона в цілому.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Бочаров, П. П. Теория вероятностей. Математическая статистика / П. П. Бочаров, А. В. Печинкин. – Москва : Физматлит, 2005. – 296 с.
2. Булинский, А. В. Теория случайных процессов / А. В. Булинский, А. Н. Ширяев. – Москва : Физматлит, 2005. – 408 с.
3. Грибов, В. М. Основы теории надежности авиационной техники : конспект лекций / В. М. Грибов, В. В. Козарук. – Киев : КМУГА, 1994. – 268 с.
4. Далецкий, С. В. Проектирование систем технического обслуживания и ремонта ВС ГА / С. В. Далецкий. – Москва : МАИ, 2001. – 245 с.
5. Мурадян, Л. А. Відмови та безвідмовність вагонів як складові експлуатаційної надійності // Вісн. НТУ «ХП». Серія: Механіко-технолог. системи та комплекси. – Харків, 2015. – Т. 52 (1161). – С. 127–130.
6. Мямлін, С. В. Застосування основних законів розподілу випадкових величин для визначення показників надійності вагонів / С. В. Мямлін, Л. А. Мурадян // Зб. наук. пр. ДЕУТ. Серія: «Трансп. системи і технології». – Київ, 2015. – Вип. 26–27. – С. 172–180.
7. Мямлін, С. В. Проблема визначення терміну «надійність». Методологія побудови та вивчення надійності вантажних вагонів / С. В. Мямлін, Л. А. Мурадян, Д. М. Барановський // Наука та прогрес транспорту. – 2015. – № 6 (60). – С. 110–117. doi: 10.15802/stp-2015/57034.
8. Мямлін, С. В. Розробка конструкцій та машинобудівних технологій створення вантажних вагонів нового покоління // С. В. Мямлін // Вагонний парк. – 2014. – № 10. – С. 4–9.
9. Павлов, И. В. Статистические методы оценки характеристик надежности и эффективности сложных систем по результатам испытаний / И. В. Павлов. – Москва : Сов. радио, 1978. – 36 с.
10. Техническая эксплуатация авиационного оборудования : учебник / под ред. В. Г. Воробьева. – Москва : Транспорт, 1990. – 296 с.
11. Трошенко, В. Т. Роль науки в обеспечении надежности машин и сооружений / В. Т. Трошенко // Надежность и долговечность машин и сооружений. – 1985. – № 7. – С. 3–5.
12. Устич, П. А. Надежность рельсового нетягового подвижного состава / П. А. Устич, В. А. Карпычев, М. Н. Овечников. – Москва : Вариант, 1999. – 412 с.
13. Хрусталева, В. В. Необходим инженерный анализ надежности сложных систем / В. В. Хрусталева // Стандарты и качество. – 1989. – № 3. – С. 17–19.
14. Determination of the dynamic characteristics of freight wagons with various bogie / S. Myamlin, L. P. Lingaitis, S. Dailydka [et al.] // Transport. – 2015. – Vol. 30. – Iss. 1. – P. 88–92. doi: 10.3846/16484142.2015.1020565.
15. Myamlin, S. V. Investigation of dynamic characteristics of gondola cars on perspective bogies / S. V. Myamlin, V. M. Bubnov, Ye. O. Pysmennyi // Наука та прогрес транспорту. – 2014. – № 5 (53). – С. 126–137. doi: 10.15802/stp2014/30789.
16. Myamlin, S. V. The modeling of economic efficiency of products carriage-building plant in conditions of dynamic pricing / S. V. Myamlin, D. M. Baranovskiy // Проблеми економіки транспорту : зб. наук. пр. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2014. – Вип. 7. – С. 61–66.

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

Л. А. МУРАДЯН^{1*}

^{1*}Каф. «Вагоны и вагонное хозяйство», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днипро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 373 15 19, эл. почта leon59@bk.ru, ORCID 0000-0003-1781-4580

ВЕРОЯТНОСТНО-ФИЗИЧЕСКИЙ ПОДХОД ДЛЯ ОПИСАНИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ ВАГОНОВ

Цель. В работе предполагается на основе вероятностно-физического подхода разработать алгоритм и последовательность описания и определения надежности вагонов для прогнозирования отдельных количественных показателей исследуемых элементов, деталей и узлов или вагона в целом. **Методика.** Для расчета показателей безотказности, долговечности и сохранности вагонов применен вероятностно-физический метод, учитывающий неизбежные при эксплуатации вагонов расходы ресурса. Методика установления количественных показателей надежности основывается на изучении физико-механических и физико-химических свойств и параметров различных элементов, с выявлением закономерностей процессов старения элементов или деталей (со временем или наработкой) для определения аналитических зависимостей указанных процессов от показателей надежности вагонов. **Результаты.** На основе вероятностно-физического подхода разработана модель для описания и определения надежности вагонов. При этом метод расчета на основе вероятностно-физической модели принципиально отличается от всех известных строгих вероятностных методов тем, что он рассматривает непрерывное множество состояний элементов, деталей и систем вагона в течение непрерывного времени. При существовании (или возможности нахождения) информационного параметра о расходе ресурса элемента вагона с оценкой скорости его изменения и, зная его предельное значение, на основе построенной модели надежности вагона с привлечением вероятностно-физического подхода можно прогнозировать все необходимые количественные показатели надежности исследуемых элементов, деталей и узлов или вагона в целом. **Научная новизна.** В работе получила дальнейшее развитие методология построения надежности вагонов с использованием вероятностно-физической модели с DN-распределением. Конкретная физическая интерпретация констант DN-распределения отказов дает возможность оценить их по результатам исследования отдельных параметров, характеризующих техническое состояние вагона. На основе вероятностно-физического подхода разработан алгоритм и последовательность описания и определения надежности вагонов для прогнозирования отдельных количественных показателей исследуемых элементов, деталей, узлов и вагона в целом. **Практическая значимость.** Результаты работы позволяют практически рассчитать количественные показатели надежности вагонов или их отдельных элементов для дальнейшего прогнозирования общей надежности при эксплуатации.

Ключевые слова: вероятностно-физический подход; надежность; техническое состояние вагонов; модель отказов; наработка

L. A. MURADIAN^{1*}

^{1*}Dep. «Cars and Rolling Stock», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 19, e-mail leon59@bk.ru, ORCID 0000-0003-1781-4580

PROBABILISTIC-PHYSICAL APPROACH TO DESCRIBE AND DETERMINE THE RELIABILITY OF CARS

Purpose. The article aims to develop an algorithm and a sequence of description and determination of car reliability to predict certain quantitative indicators of the studied elements, parts and units, or a car as a whole on the basis of probabilistic-physical approach. **Methodology.** For the calculation of the indicators of reliability, durability and safety of cars the probabilistic-physical method was used, which takes into account the resources consumption inevitable in the operation of cars. The methodology of quantifying the reliability is based on the study of the physi-

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

cal-mechanical and physical-chemical properties and parameters of various elements, with the identification of principles of the aging processes of the elements or parts (with operating time) to determine the analytical dependencies of these processes from the indicators of cars reliability. **Findings.** On the basis of probabilistic-physical approach it was developed a model to describe and determine the reliability of the cars. At this the method of calculation based on probabilistic-physical model is fundamentally different from all known rigorous probabilistic methods by the fact that it considers a continuous set of states of the elements, parts and systems of the car during continuous time. If there exists or (if it possible to find) the information parameter about the resource consumption of the car element with evaluation of its change speed, and knowing its limit, based on the built car reliability model with the involvement of probabilistic-physical approach, one can predict all the necessary quantitative indicators of reliability of the studied elements, parts and units or a car as a whole. **Originality.** The methodology of the reliability construction with the use of probabilistic-physical model with DN-distribution was further developed in the article. The specific physical interpretation of the constants of DN-distribution of failures makes it possible to evaluate them according to the results of the study of certain parameters characterizing the technical condition of the car. On the basis of probabilistic-physical approach the algorithm and the sequence of description and determination of cars reliability to predict certain quantitative reliability indicators of the studied elements, parts and units, or a car as a whole were developed. **Practical value.** The results make it possible to calculate in practice the quantitative indicators of reliability of cars or their individual elements for further prediction of the overall reliability during operation.

Keywords: probabilistic-physical approach; reliability; technical condition of cars; failure model; development

REFERENCES

1. Bocharov P.P., Pechinkin A.V. *Teoriya veroyatnostey. Matematicheskaya statistika* [Theory of probability. Mathematical statistics]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2005. 296 p.
2. Bulinskiy A.V., Shirayev A.N. *Teoriya sluchaynykh protsessov* [Theory of stochastic processes]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2005. 408 p.
3. Gribov V.M., Kozaruk V.V. *Osnovy teorii nadezhnosti aviatsionnoy tekhniki* [Fundamentals of reliability theory of aviation engineering]. Kyiv, KIUCA Publ., 1994. 268 p.
4. Daletskiy S.V. *Proyektirovaniye sistem tekhnicheskogo obsluzhivaniya i remonta VS GA* [Designing of systems of maintenance and repair of civil aircrafts]. Moscow, MAI Publ., 2001. 245 p.
5. Muradian L.A. Vidmovy ta bezvidmovnist vahoniv yak skladovi ekspluatatsiinoi nadiinosti [Failures and reliability of cars as components of operational reliability]. *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «Kharkivskiy politekhnichnyi instytut». Seriya: Mekhaniko-tekhnolohichni systemy ta komplekxy* [Bulletin of National Technical University «Kharkiv Polytechnical Institute». Series: Mechanical-technological systems and complexes], 2015, issue 52 (1161), pp. 127-130.
6. Miamlin S.V., Muradian L.A. Zastosuvannya osnovnykh zakoniv rozpodilu vpadkovykh velychyn dlia vyznachennia pokaznykh nadiinosti vahoniv [The application of the basic laws of distribution of random variables to determine the reliability indicators of cars]. *Zbirnyk naukovykh prats Derzhavnoho ekonomiko-tekhnolohichnoho universytetu transportu. Seriya: «Transportni systemy i tekhnolohii»* [Proc. of State Economic-Technological University of Transport. Series: «Transport Systems and Technologies»], 2015, issue 26-27, pp. 172-180.
7. Miamlin S.V., Muradian L.A., Baranovskyi D.M. Problema vyznachennia terminu «nadiinist». Metodolohiia pobudovy ta vyvchennia nadiinosti vantazhnykh vahoniv [Problem of the definition the «reliability» term. Methodology of construction and study the reliability of freight cars]. *Nauka ta prohres transportu – Science and Transport Progress*, 2015, no. 6 (60), pp. 110-117. doi: 10.15802/stp2015/57034.
8. Miamlin S.V. Rozrobka konstruktzii ta mashynobudivnykh tekhnolohii stvorennia vantazhnykh vahoniv novoho pokolinnia [Development of structures and engineering technologies of creating the new generation freight cars]. *Vahonnyi park – Car Fleet*, 2014, no.10, pp. 4-9.
9. Pavlov I.V. *Statisticheskiye metody otsenki kharakteristik nadezhnosti i effektivnosti slozhnykh sistem po rezul'tatam ispytaniy* [Statistical methods for evaluating the reliability and efficiency of complex systems according to the test results]. Moscow, Sovetskoye radio Publ., 1978. 36 p.
10. Vorobyev V.G. *Tekhnicheskaya ekspluatatsiya aviatsionnogo oborudovaniya* [Technical maintenance of aviation equipment]. Moscow, Transport Publ., 1990. 296 p.

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

11. Troshchenko V.T. Rol nauki v obespechenii nadezhnosti mashin i sooruzheniy [The role of science in ensuring the reliability of the machines and installations]. *Nadezhnost i dolgovechnost mashin i sooruzheniy – The Reliability and Durability of Machines and Structures*, 1985, no. 7, pp. 3-5.
12. Ustich P.A., Karpychev V.A., Ovechnikov M.N. *Nadezhnost relsovogo netyagovogo podvizhnogo sostava* [Reliability of the rail non-tractive rolling stock]. Moscow, IG Variant Publ., 1999. 412 p.
13. Khrustalev V.V. Neobkhodim inzhenernyy analiz nadezhnosti slozhnykh system [Engineering analysis of reliability of complex systems]. *Standarty i kachestvo – Standards and Quality*, 1989, no. 3, pp. 17-19.
14. Myamlin S., Lingaitis L.P., Dailydka S., Vaičiūnas G., Bogdevičius M., Bureika G. Determination of the dynamic characteristics of freight wagons with various bogie. *Transport*, 2015, vol. 30, issue 1, pp. 88-92. doi: 10.3846/16484142.2015.1020565.
15. Myamlin S.V., Bubnov V.M., Pysmennyi Ye.O. Investigation of dynamic characteristics of gondola cars on perspective bogies. *Nauka ta prohres transportu – Science and Transport Progress*, 2014, no. 5 (53), pp. 126-137. doi: 10.15802/stp2014/30789.
16. Myamlin S.V., Baranovskiy D.M. The modeling of economic efficiency of products carriage-building plant in conditions of dynamic pricing. *Zbirnyk naukovykh prats Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana «Problemy ekonomiky transportu»* [Proc. of Dnipropetrovsk National University named after Academician V. Lazaryan «Problems of Transport Economics»], 2014, no. 7, pp. 61-66.

Стаття рекомендована до друку д.т.н., проф. С. В. Мямліним (Україна); д.т.н., проф. І. Е. Мартиновим (Україна)

Надійшла до редколегії: 04.07.2016

Прийнята до друку: 30.09.2016