

УДК 629.46

Д-р техн. наук Барановський Д.М.

Д-р техн. наук Мямлін С.В.

Канд. техн. наук Мурадян Л.А.

ПОБУДОВА СИСТЕМИ ТЕХНІЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ ТА РЕМОНТУ ВАНТАЖНИХ ВАГОНІВ

Ключові слова: експлуатаційна надійність, вантажні вагони, система технічного обслуговування та ремонту

Вступ

Функціонування будь-якої технічної системи, в тому числі і вагонів, являє собою реалізацію ймовірнісних процесів, оскільки процес зміни стану вагону (вантажного або пасажирського) є наслідком потоків відмов і потоків відновлень.

Щоб охарактеризувати ймовірнісний процес, необхідно вказати тип процесу і його числові характеристики. Найбільш часто для опису процесів, що відбуваються в технічних системах, використовується марковський процес [1-3].

Марковський процес [1, 2] – це такий процес, у якому для кожного моменту часу ймовірність будь-якого стану вагона в майбутньому залежить тільки від стану вагона в даний момент і не залежить від того, яким чином вагон прийшов в цей стан.

Необхідною умовою для марковського процесу є експоненціальне розподілення часу роботи до відмови і часу відновлення працездатності. Найважливіша числова характеристика такого процесу – ймовірність переходу вагона в той чи інший стан за заданий проміжок часу. Знаючи це, можна визначити ймовірності кожного з можливих станів вагона.

На надійність рухомого складу (вантажні і пасажирські вагони) впливає конструкція і технологія виготовлення всіх складових, умови експлуатації та система технічного обслуговування та ремонту [4-7].

Враховуючи специфіку роботи залізничного транспорту, вантажний рухомий склад в умовах експлуатації повинен знаходитись у постійній готовності. Відповідно таку готов-

ність забезпечує існуюча система технічного обслуговування та ремонту вантажних вагонів, якій притаманний такий показник як ймовірність виконання задачі. Тобто наскільки якісно і повно виконане завдання технічного обслуговування та ремонту вантажних вагонів настільки можна говорити і про готовність рухомого складу до виконання задач з відповідним рівнем безвідмовності [6, 8-10].

Аналіз проблеми

У ДСТУ 2860-94 [11] прописано, що готовність – це властивість об'єкта, бути здатним виконувати потрібні функції, в заданих умовах у будь-який час чи протягом заданого інтервалу часу за умови забезпечення необхідними зовнішніми ресурсами. Крім того, у ДСТУ 2860-94 робляться дві примітки, перша з яких полягає у тому, що така властивість залежить від поєднання властивостей безвідмовності, ремонтпридатності та забезпечення технічного обслуговування і ремонту; друга – полягає в тому, що необхідні зовнішні ресурси, що не належать до ресурсів технічного обслуговування та ремонту, не впливають на властивість готовності об'єкта.

У роботі [7] проведено аналіз проблеми та, на основі регенеруючих, марківських та напівмарківських процесів отримано математичні вирази параметрів експлуатаційної надійності: ймовірності безвідмовної роботи, коефіцієнта готовності та ймовірності виконання задач у залежності від часової функції для визначення оптимального періоду проведення поточних, деповських та капітальних ремонтів вантажних вагонів.

Мета роботи

Побудова системи технічного обслуговування та ремонту вантажних вагонів на основі математичних виразів параметрів експлуатаційної надійності: ймовірності безвідмовної роботи, коефіцієнту готовності та ймовірності виконання задач у залежності від часової функції для визначення оптимального періоду проведення поточних, деповських та капітальних ремонтів вантажних вагонів, що отримані у роботі [7].

Результати досліджень окремих випадків індикації відмов структурних елементів вантажних вагонів для математичних виразів параметрів експлуатаційної надійності: ймовір

ності безвідмовної роботи, коефіцієнту готовності та ймовірності виконання задач у залежності від часової функції для визначення оптимального періоду проведення поточних, деповських та капітальних ремонтів вантажних вагонів, що отримані у роботі [7]. На рис. 1 приведено залежності коефіцієнта готовності вантажних вагонів від ймовірності виконання завдань при поточних та деповських ремонтах.

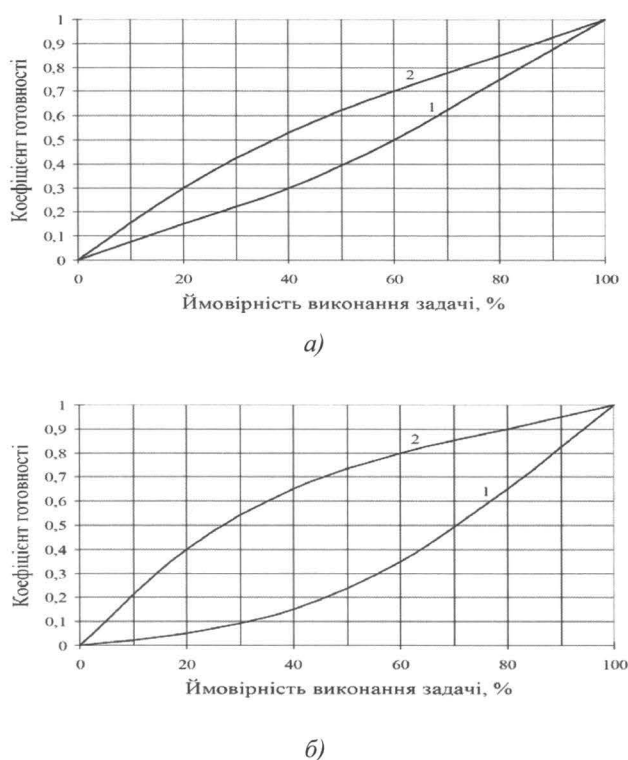


Рис. 1 - Залежність коефіцієнтів готовності вантажних вагонів від ймовірності виконання завдання при поточному (а) та деповському (б) ремонтах, у випадках: 1 – миттєвої індикації відмов; 2 – відсутності самостійного прояву відмов

На рис. 2 приведено залежність коефіцієнта готовності вантажного вагона від ймовірності безвідмовної роботи його структурних елементів, для окремих випадків індикації їх відмов.

Під час вибору оптимальних термінів виконання поточних, деповських та капітальних ремонтів вантажних вагонів необхідно враховувати повноту інформації стосовно категорії відмов його структурних критичних елементів [2, 3].

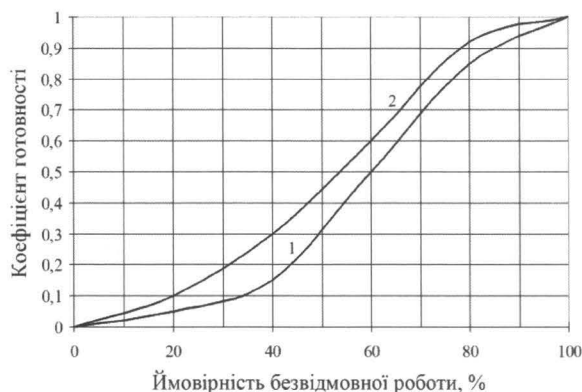


Рис. 2 - Залежність коефіцієнта готовності вантажного вагона від ймовірності безвідмовної роботи його структурних елементів у випадках: 1 – миттєвої індикації відмов; 2 – відсутності самостійного прояву відмов

У ході дослідження моделей технічного обслуговування, поточних, деповських та капітальних ремонтів вантажних вагонів, у яких значну роль відіграє структура системи, основна проблема полягає у визначенні оптимальної глибини профілактики, тобто обсягу тієї частини системи, яка підлягає оновленню (заміні) під час виконання ремонтних робіт. У багатьох випадках характеристиками структурних елементів вантажного вагона є напрацювання (пробіг) окремих елементів (ходова частина), а для математичного опису їх функціонування використовується апарат півмарковських процесів [1-2]. Основними показниками якості роботи вантажних вагонів є дробово-лінійні функціонали і тому, ремонт слід призначати детерміновано.

Розглянемо послідовну систему, що складається з N елементів. У ній можливе виконання ремонтних робіт двох видів:

- позапланових запобіжних, які повністю оновлюють систему;
- позапланових профілактичних ремонтів частини вантажного вагона, коли елемент, що відмовив, замінюється новим.

Будемо вважати, що інформація про виникнення в структурних елементах вантажного вагона відмов надходить миттєво [2].

Стратегія експлуатації вантажних вагонів полягає в наступному. У початковий момент часу експлуатації вантажного вагона призначається виконання запобіжних робіт тоді, коли напрацювання (пробіг) досягає деякого заданого значення τ .

Якщо до моменту початку запобіжних робіт відбувається відмова будь-якого структурного елемента вантажного вагона, то виконується позаплановий профілактичний ремонт (заміна елемента чи вузла, що відмовили, новими, ідентичними за своїми характеристиками колишнім).

Будемо вважати, що під час профілактичного ремонту будь-якого структурного елемента, напрацювання (пробіг) вантажного вагона не збільшується.

Задамо такі характеристики функціонування структурних елементів вантажного вагона:

- $F_i(t)$ – функція розподілу часу безвідмовної роботи i -го структурного елемента, $i = 1, 2, \dots, N$; $P_i(t) = 1 - F_i(t)$;
- T_i – середнє напрацювання (пробіг) i -го структурного елемента вантажного вагона;
- T_{zn} – середня тривалість технічного обслуговування (запобіжної профілактики);
- t_i – середня тривалість поточного (профілактичного) ремонту i -го структурного елемента вантажного вагона у разі його відмови;
- $y = (y_0 = 0, y_1, \dots, y_n)$ – окремі значення функції розподілу часу безвідмовної роботи $P(y)$, тобто $P(y_i) = \pi_i, i = 0, \dots, n$, де клас таких функцій позначений як $\Omega(n, y, \pi)$;
- x – час самостійного прояву відмови;
- z – оперативний час відновлення роботи структурного елемента вантажного вагона, що необхідно затратити для виконання поставленого завдання.

Далі приймемо, що $H_i(t)$ є функцією відновлення рекурентного потоку, що утворений послідовністю незалежних випадкових величин з функцією розподілу, перетворення Лапласа-Стілтєса для якої буде мати вигляд:

$$H_i^*(s) = \frac{F_i^*(s)}{1 - F_i^*(s)}, \quad (1)$$

де $F_i^*(s)$, $H_i^*(s)$ – перетворення Лапласа-Стілтєса функцій $F_i(t)$ і $H_i(t)$ відповідно.

Визначимо значення τ , за яких показники якості функціонування структурних елементів вантажного вагона будуть досягати екстремального значення.

При цьому вирази для основних показників якості роботи структурних елементів вантажного вагона у вигляді функціональних залежностей від τ будуть мати наступний вигляд:

$$K = \frac{\tau}{\tau + T_{zn} + \sum_{i=1}^N H_i(\tau)t_i}; \quad (2)$$

$$R(z) = \int_0^\tau \prod_{i=1}^N \frac{\left[P_i(x+z) + \int_0^x P_i(x+z-y) dH_i(y) \right] dx}{\tau + T_{zn} + \sum_{i=1}^N t_i H_i(\tau)}. \quad (3)$$

Вищенаведені рівняння для визначення оптимальних значень напрацювання (пробігу) вантажних вагонів, у разі досягнення якого необхідно проводити поточний, деповський чи капітальні ремонти, можна для кожного структурного елемента вузла чи вагона в цілому подати окремо.

За недостатності інформації про вид функцій розподілу можна використати мінімаксні стратегії [1-3], які дають гарантовані результати в цілому класі розподілів.

Розглянемо стратегію обслуговування послідовної системи, коли функції розподілу тривалості безвідмовної роботи структурних елементів вантажних вагонів $F_i(x), i = 1, 2, \dots, N$, відомі лише в окремих фіксованих точках, тобто $F_i \in \Omega_i(n_i, y_i, \pi_i) = \Omega_i$.

Через $\Omega_i(n_i, y_i, \pi_i)$ позначимо множину функцій розподілу, які в заданих точках $y_i = (y_{i1}, y_{i2}, \dots, y_{in_i})$ будуть набувати визначених заданих значень $\pi_i = (\pi_{i1}, \pi_{i2}, \dots, \pi_{in_i})$ відповідно. Вважаємо, що поточні, деповські та капітальні ремонти всієї послідовної системи вантажного вагона призначаються детерміновано й починаються, коли напрацювання (пробіг) досягає значення τ .

Відповідно до принципу мінімаксу розв'язання задачі розбивається на два етапи. На першому етапі відбувається визначення «найгірших функцій» розподілу в класах $\Omega_i, i = 1, 2, \dots, N$. При цьому введемо позначення через $F_i^{(0)}(x)$ – східчасту функцію розподілу вигляду:

$$F_i^{(0)}(x) = \begin{cases} 0 & \text{при } x \leq 0, \\ \pi_{ik} & \text{при } y_{ik} < x < y_{i,k+1}, k = 0, 1, 2, \dots, n_i - 1, \\ 1 & \text{при } x > y_{i,n_i} \end{cases} \quad (4)$$

де $y_{i,0} = \pi_{i0} = 0, i = 1, 2, \dots, N$,

при цьому: $F_i^{(0)} \in \Omega_i, i = 1, 2, \dots, N$.

Далі приймемо, що $H_i^{(0)}(t)$ є функцією відновлення рекурентного потоку, що утворений послідовністю незалежних випадкових величин з функцією розподілу $F_i^{(0)}(t)$. Відомо, що розподіли вигляду (4) є «найгіршими» в класах Ω_i стосовно основних показників якості функціонування вантажного вагона – коефіцієнта готовності та ймовірності безвідмовної роботи.

На другому етапі необхідно знайти оптимальне напруження (пробіг) вантажних вагонів до відповідного ремонту. У вказаних умовах задача визначення оптимального періоду виконання ремонтних робіт повинна зводитись до знаходження екстремумів за τ такої функції для коефіцієнта готовності:

$$\max_{0 \leq \tau \leq \infty} \frac{\tau}{\tau + T_{\text{zn}} + \sum_{i=1}^N H_i^0(\tau) t_i}. \quad (5)$$

Точки екстремумів наведеної функції будуть визначати оптимальні значення напруження (пробігу) вантажних вагонів, досягнувши які необхідно проводити (виконувати) технічне обслуговування (запобіжні профілактичні роботи), а відповідні екстремальні значення вказаних функцій – будуть вказувати на гарантовані величини показників якості функціонування структурних елементів вантажних вагонів, які забезпечуються в результаті застосування мінімаксної стратегії. Відповідно до виразу (3) та взявши до уваги залежність [7]:

$$R_i(z) = (\tau - \int_0^{\tau} \int_0^x F(x-y) d\Phi(y) dx + (M\gamma_3 - M\gamma_2)) \int_0^{\tau} F(\tau-x) d\Phi(x) + M\gamma_1 + (M\gamma_2 - M\gamma_1) F(\tau) - \int_0^{\tau} \bar{F}(x+z) dx. \quad (6)$$

Зобразимо графічно вплив ймовірності виконання завдання при проведенні технічного обслуговування та капітального ремонту вантажних вагонів на зміну їх напруження або пробігу (відносне значення) для окремих випадків індикації відмов їх структурних елементів (рис. 3).

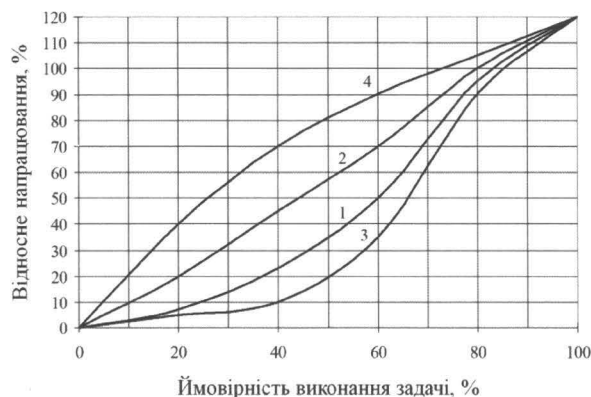


Рис. 3 – Залежність відносного напруження (пробігу) вантажних вагонів від ймовірності виконання завдань при проведенні технічного обслуговування (1, 2) та капітального ремонту (3, 4), у випадках: 1, 3 – відсутності самостійного прояву відмов; 2, 4 – миттєвої індикації відмов

Спостерігається відносне підвищення напруження (пробігу) вантажних вагонів (до 20 %) для різних випадків індикації відмов структурних елементів при забезпеченні 100 %-го значення ймовірності виконання поставленого завдання під час проведення технічного обслуговування чи капітального ремонту.

Урахувавши вираз для ймовірності безвідмовної роботи [7]:

$$P(\tau) = \frac{\int_0^{\tau} F(x) dx - \int_0^{\tau} \int_0^x F(x-y) d\Phi(y) dx}{\int_0^{\tau} \bar{F}(x) dx} + \frac{(M\gamma_3 + M\gamma_2) \int_0^{\tau} F(\tau-x) d\Phi(x) + M\gamma_1 + (M\gamma_2 - M\gamma_1) F(\tau)}{\int_0^{\tau} \bar{F}(x) dx}, \quad (7)$$

при зміні ймовірності безвідмовної роботи вантажних вагонів під час експлуатації на основі залежностей (3) і (6) покажемо теоретичну зміну їх відносного напруження (пробігу) (рис. 4) для окремих випадків індикації відмов структурних елементів.

Для забезпечення високого рівня безвідмовної роботи вантажних вагонів, тобто за якісного виконання операцій технічного обслуговування і капітальних ремонтів та за умови підтримання їх технічно справного стану на належному рівні, не допускаючи перевищення номінальних режимів роботи у процесі експлуатації, можна досягти відносного підвищення напруження до 15 %. Якщо цих умов не дотримуватись, то відбувається зниження

відносного напрацювання вантажних вагонів до 40 %.



Рис. 4 - Відносне подовження напрацювання (пробігу) вантажних вагонів при забезпеченні відповідного рівня їх ймовірності безвідмовної роботи під час експлуатації у випадку: 1 – миттєвої індикації відмов; 2 – відсутності самостійного прояву відмов

Висновки

На основі математичних виразів з використанням регенеруючих, марківських та напівмарківських процесів для параметрів експлуатаційної надійності: ймовірності безвідмовної роботи, коефіцієнту готовності та ймовірності виконання задач у залежності від часової функції для визначення оптимального періоду проведення поточних, деповських та капітальних ремонтів вантажних вагонів побудовано систему технічного обслуговування та ремонту вантажних вагонів, що істотно відрізняється від існуючої (нормативно-встановленої) системи.

Література

1. Саркисян С.А. Теория прогнозирования и принятия решений. – М.Высш.шк., 1977. – 215с.
2. Вентцель Е.С. Теория случайных процессов и ее инженерные приложения: учеб. пособие для вузов / Л. А. Овчаров, Е. С. Вентцель. – 2-е изд., стер. – Москва: Высш.шк., 2000. – 383 с.
3. Костецкий Б.И. Марковская модель износа и прогнозирования долговечности изнашиваемых деталей / Б. И. Костецкий, В. П. Стрельников, В. Г. Таций // Проблемы трения и изнашивания. – Киев: Техника, 1976. – С. 10-15.
4. Zhao, F. Influence of small stress cycles on the fatigue damage of C70E car body / F. Zhao, J. Xie // J. of Mechanical Engineering. – 2014. – Vol. 50. – Iss. 10. – P. 121–126. doi: 10.3901/jme.2014.10.121
5. Damage calculation and fatigue life prediction for freight car body / F. Zhao, J. Xie, Y. Yuan, X. Shi // Advanced Materials Research. – 2013. – Vol. 652–654. – P. 1357–1361. doi: 10.4028 / www.scientific.net/AMR.652-654.1357.
6. Myamlin S.V., Baranovskiy D.M. The modeling of economic efficiency of products carriage-building plant in conditions of dynamic pricing. Збірник нау-

кових праць Дніпропетровського національного університету ім. ак. В. Лазаряна "Проблеми економіки транспорту". – 2014. № 7. – С. 61-66.

7. Мямлін С. В. Визначення параметрів експлуатаційної надійності вантажних вагонів у системі технічного обслуговування та ремонту / С. В. Мямлін, Л. А. Мурадян, Д. М. Барановський // Залізничний транспорт України. – 2015. – № 4. – С. 12–17.

8. Мартынов А. А. Основы теории надёжности и диагностики / Мартынов А. А., Долгополов Г. А. – Новосибирск, 1999. – 107 с.

9. Далецкий С.В. Проектирование систем технического обслуживания и ремонта ВС ГА. – Москва: МАИ, 2001. – 245 с.

10. Устич П. А. Надёжность рельсового нетягового подвижного состава / П. А. Устич, В. А. Карпычев, М. Н. Овечников. – Москва: ИГ Вариант, 1999. – 412 с.

11. ДСТУ 2860-94. Надійність техніки. Терміни та визначення. – К.: Держстандарт України, 1995. – 92 с.

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ

Мямлін Сергій Віталійович,

проректор з наукової роботи Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна.
Вул. Лазаряна, 2, м. Дніпро, Україна, 49010.
Тел. +38(050) 340 27 85;
e-mail: sergeymyamlin@gmail.com.

Барановський Денис Миколайович,

старший науковий співробітник ПКТБ з проектування та модернізації рухомого складу, колії та штучних споруд Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна.
Вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010.
Тел. +38 (056) 371 51 12;
e-mail: denisbaranovskiy@mail.ru; ORCID 0000-0002-6516-2794.

Мурадян Леонтій Абрамович,

доцент кафедри «Вагони та вагонне господарство» Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна.
Вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010.
тел. +38 (056) 373 15 19;
e-mail: leon59@bk.ru; ORCID 0000-0003-1781-4580.