

**ПРОГНОЗУВАННЯ ВТОМНИХ ПОШКОДЖЕНЬ
ВІЗКІВ ВАГОНІВ ЕЛЕКТРОПОЇЗДІВ**

В.О. Жовдак, О.Б. Білоцерківський, Л.Ф. Тарасова, М.М. Смірнов

**THE PREDICTION OF FATIGUE DAMAGES
IN CAR TRUCKS OF ELECTRIC TRAINS**

V.A. Zhovdak, A.B. Belocerkovsky, L.F. Tarasova, M.M. Smirnov

НТУ „ХПР”, Україна

Abstract Theoretical approaches, mathematical models and the software for the decision of the following problems are developed: statistical dynamics and reliability prediction of bogie frames. Prognostication of reliability is conducted on the basis of solution of statistical dynamics problem. The method of reliability prediction of bogie frames on a prototype is developed.

Актуальність роботи та аналіз досліджень. Найважливішим завданням залізничного транспорту є масове перевезення пасажирів за умови забезпечення безпеки руху. Проте, в останні роки робота залізничного транспорту відбувалася у складних умовах: недостатнє фінансування галузі призвело до значного зменшення постачання нового рухомого складу та суттєвого старіння вагонного парку. Як результат, більшість вагонів повідкового типу вичерпали свій призначений ресурс і продовжують експлуатуватися більш ніж 25 років. Власне виробництво рухомого складу потребує великих затрат, пов'язаних із необхідністю експериментального доведення конструкцій при проектуванні. Наведені обставини вказують на актуальність робіт, пов'язаних з розробкою розрахунково-експериментальних методів для прогнозування безвідмовності рам візків вагонів електропоїздів з урахуванням випадковості властивостей міцності матеріалу конструкції, технології її виготовлення, а також випадковості навантаження в конкретних умовах експлуатації.

В роботах [1, 2, 10] наведено вирішення задач прогнозування безвідмовності рам візків вагонів повідкового типу, де враховувався випадковий розкид характеристик опору втомі й навантаження. Розрахунок наробітку до відмови для шпінтонних візків представлений в роботі [3], в якій застосовувався метод скінченних елементів для одержання статичних напружень від ваги вагона, а динамічні напруження визначалися з роботи [2]. При цьому використовувалися детерміновані значення межі витривалості.

Недоліком робіт [1-3] є те, що для одержання статичних і динамічних напружень, необхідних для прогнозування безвідмовності рам візків, були використані або експериментальні дослідження, які є трудомісткими, або спрощені розрахункові моделі, що не враховують всіх особливостей геометрії конструкцій.

1. Постановка задачі. Об'єктом дослідження є рами візків вагонів типу 81-717, що широко використовуються в метрополітенах України та країн СНД [4, 5]. Розглядається задача розрахунку випадкових коливань та прогнозування безвідмовності візків типу 81-717 по прототипу (ЄЖ-3). Оскільки рами візків типу 81-717 мають подібну технологію виготовлення і експлуатуються за схожих умов навантаження, що і рами візків типу ЄЖ-3, то можна прогнозувати безвідмовність рам візків типу 81-717 за даними про відмови прототипу.

Розроблено підхід прогнозування безвідмовності рам візків вагонів електропоїздів по прототипу, що включає наступні етапи:

1. Статистична обробка експериментальних даних по напрацюваннях до відмови прототипу з метою виявлення можливих моделей відмов і місць їх виникнення.

2. Ідентифікація характеристик навантаження та опору матеріалу конструкції прототипу можливим моделям відмов.

3. Розрахункове прогнозування характеристик безвідмовності прототипу з метою перевірки достовірності моделей, що використовуються.

4. Розрахункове визначення параметрів НДС нового об'єкту за експлуатаційних умов навантаження.

5. Розрахункове прогнозування безвідмовності нових об'єктів при дотриманні умов подібності навантаження об'єкту і характеристик опору матеріалу конструкції заданим моделям відмов.

Поставлена задача вирішувалася з використанням чисельних досліджень характеристик безвідмовності рам візків вагонів електропоїздів на основі тривимірних скінченно-елементних моделей. При цьому враховувався випадковий характер навантаження та випадковий розкид межі витривалості.

2. Аналіз напружено-деформованого стану рам візків вагонів при динамічному навантаженні. Рівняння вимушених коливань скінченно-елементної моделі конструкції рами візку при квазістаціонарному випадковому зовнішньому навантаженні, викликаною нерівностями шляху, має вигляд [1, 10]:

$$[M]\{\ddot{q}\} + [C]\{\dot{q}\} + [K]\{q\} = -([M][A] + [M_1])\{\ddot{\eta}\} - ([C][A] + [C_1])\{\dot{\eta}\}, \quad (1)$$

де $[M]$, $[C]$, $[K]$ - глобальні матриці мас, демпфірування, жорсткості, $[A]$ - матриця псевдостатичних коефіцієнтів впливу, що визначається співвідношенням $[A] = -[K]^{-1}[K_1]$, $[M_1]$, $[C_1]$ і $[K_1]$ - підматриці, що дозволяють виразити зусилля, діючі на систему, через відомі прискорення, швидкості і переміщення кінематично порушуваних відміток конструкції, $\{q\}$ - вектор узагальнених вузлових переміщень SE моделі, $\{\dot{\eta}\}$, $\{\ddot{\eta}\}$ - вектори швидкостей і прискорень буксових вузлів рами візка, викликаних нерівностями шляху.

Вираз для спектральної щільності вузлових переміщень SE моделі рами візку вагону з урахуванням запізнювання кінематичного випадкового зовнішнього навантаження на колісні пари рами візку має вигляд [1, 10]:

$$S_{q_j}(\omega) = \sum_{l=1}^n \sum_{k=1}^n \phi_{jl} \phi_{jk} \left[\sum_{\lambda=1}^r \sum_{\mu=1}^r G_{\lambda l} G_{\mu k} H_l^*(i\omega) H_k(i\omega) S_{\eta_j}(\omega) \exp(-i\omega \tau_{\lambda\mu}) \right], \quad (j = \overline{1, n}), \quad (2)$$

де $S_{\eta_j}(\omega)$ - спектральна щільність віброприскорень буксових вузлів рами візку, $G_{\lambda l}$ - амплітуди узагальнених сил, ϕ_{jl} - елементи вектора власних форм, $H_l(i\omega)$ - амплітудно-частотна характеристика, r - число входів, $\tau_{\lambda\mu}$ - час запізнювання навантаження між λ -м та μ -м входами ($\tau_{\lambda\mu} = l_{\lambda\mu}/V$, де $l_{\lambda\mu}$ - відстань між входами, V - швидкість вагону).

Дисперсія вузлових переміщень SE моделі визначається співвідношенням:

$$\sigma_{q_j}^2 = \int_0^{\infty} S_{q_j}(\omega) d\omega. \quad (3)$$

Для розрахунку випадкових вимушених коливань рам візків вагонів повідкового типу з урахуванням запізнювання зовнішнього навантаження використовувався програмний комплекс COSMOS/M. Результати чисельних досліджень випадкових вимушених коливань рам візків у вигляді графіків логарифмів спектральної щільності вертикальних переміщень для точки кріплення електродвигуна до кронштейну підвіски

ТЕД показані на рис. 1. Дослідження показують, що підйом рівнів спектральної щільності для кронштейну підвіски ТЕД спостерігається поблизу власних частот коливань: $p_1=1,23$ Гц і $p_3=5,03$ Гц (рис. 1). На рисунку видно порізаність графіків та наявність нульових точок, що обумовлене різницею фаз при подачі навантаження на першу і другу колісні пари візка. Також одержано, що із збільшенням швидкості руху візка збільшуються значення спектральної щільності поблизу власних частот p_1 та p_3 , згладжується порізаність графіків та збільшується відстань між нульовими точками.

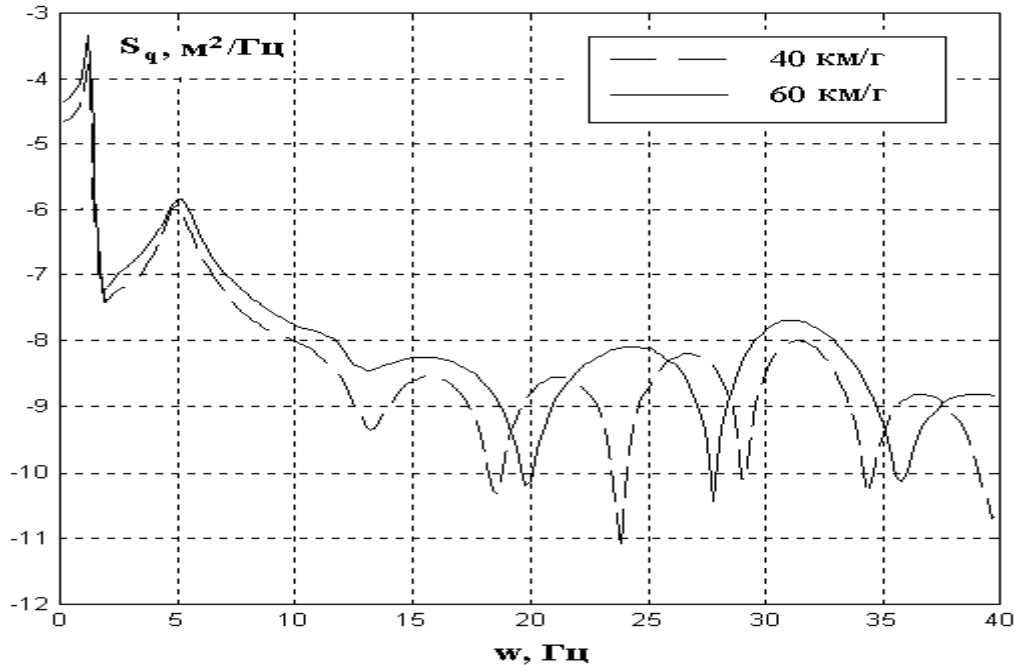


Рис. 1. Спектральна щільність вертикальних переміщень точки кріплення електродвигуна до кронштейну підвіски ТЕД при швидкостях: 40 км/г, 60 км/г.

3. Прогнозування безвідмовності рам візків вагонів електропоїздів.

3.1. Вирішення прямої задачі надійності. Пряма задача надійності рам візків полягає у визначенні ймовірнісних характеристик безвідмовності (щільностей імовірності пробігів до появи втомних тріщин) по відомих імовірнісних характеристиках навантаження і опору втомі конструкції.

Для прогнозування характеристик надійності розглянемо вираз для пробігу візка вагону до появи втомної тріщини при детермінованому блоковому навантаженні і детермінованому значенні межі витривалості [1-3]:

$$L = L_0 \left(\frac{\sigma_{-1D}}{\sigma_a} \right)^m, \quad (4)$$

де $L_0 = \frac{N_0 V_c}{3600 f_e}$ (N_0, m - параметри кривої втоми, V_c - середня швидкість, яка дорівнює 50 км/г, f_e - ефективна частота), σ_{-1D} - межа витривалості конструкції з урахуванням асиметрії циклу за способом Серенсена-Киносашвілі, $\sigma_a = \sqrt[3]{\sum_i \frac{P_i V_c}{V_i} \sigma_{ai}^m}$ (σ_a - приведена амплітуда напружень, σ_{ai} - амплітуда напружень при i -му режимі навантаження ($\sigma_{ai} \leq \sigma_{-1D}$), P_i - імовірність появи швидкості руху V_i в експлуатації).

Співвідношення (4) з урахуванням безрозмірних змінних $s = L/L_0$ і $r = \sigma_{-1D}/\sigma_a$ можна представити у вигляді:

$$s = r^m, \quad (r \leq 1). \quad (5)$$

Щільність імовірності безрозмірних пробігів s на основі використання функціонального перетворення випадкових величин (5) має вигляд:

$$f(s) = \frac{1}{m} f\left(r = s^{1/m}\right) s^{\frac{1-m}{m}}. \quad (6)$$

Для вирішення задачі застосовувався метод умовних щільностей імовірності [7]. При визначенні щільності ймовірності $f(\sigma_a)$ використовувався метод статистичного моделювання амплітуд напружень σ_{ai} [7, 8, 9, 10]. Проведені чисельні дослідження показали, що умовна щільність імовірності приведених амплітуд напружень $f(\sigma_a/\sigma_{-1D})$ для фіксованого σ_{-1D} підкоряється нормальному закону. Тому вираз для безумовної щільності ймовірності змінної r має вигляд:

$$f(r) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_a} \int_a^b \exp\left[-\frac{((\sigma_{-1D}/r) - m)^2}{2\sigma^2}\right] \frac{\sigma_{-1D}}{r^2} f(\sigma_{-1D}) d\sigma_{-1D}, \quad (7)$$

де $f(\sigma_{-1D})$ - щільність імовірності межі витривалості, a, b - межі інтегрування, що визначаються наступним образом:

$$\begin{cases} a = \sigma_{-1H}, & b = \sigma_{aB} \cdot r \quad \text{при} \quad r_{\min} \leq r \leq r'; \\ a = \sigma_{aH}, & b = r\sigma_{-1B} \quad \text{при} \quad r' \leq r \leq 1, \end{cases} \quad (8)$$

де $\sigma_{-1H}, \sigma_{aH}, \sigma_{-1B}, \sigma_{aB}$ - мінімальні та максимальні значення межі витривалості і приведеної амплітуди напружень, $r_{\min} = \sigma_{-1H} / \sigma_{aB}$, $r' = \sigma_{-1B} / \sigma_{aB}$.

Для межі витривалості використовувалася суперпозиція двох нормальних законів з наступними параметрами: математичні сподівання $m_{\sigma_{-1D}} = 18$ МПа, 30 МПа, СКВ $\sigma_{\sigma_{-1D}} = 2,28$ МПа. Розрахункова та експериментальна щільності ймовірності $f(s)$ для рам візків типу ЄЖ-3 представлені на рис. 2. Результати показують, що розрахункова щільність імовірності $f(s)$ добре узгоджується з експериментальною щільністю ймовірності.

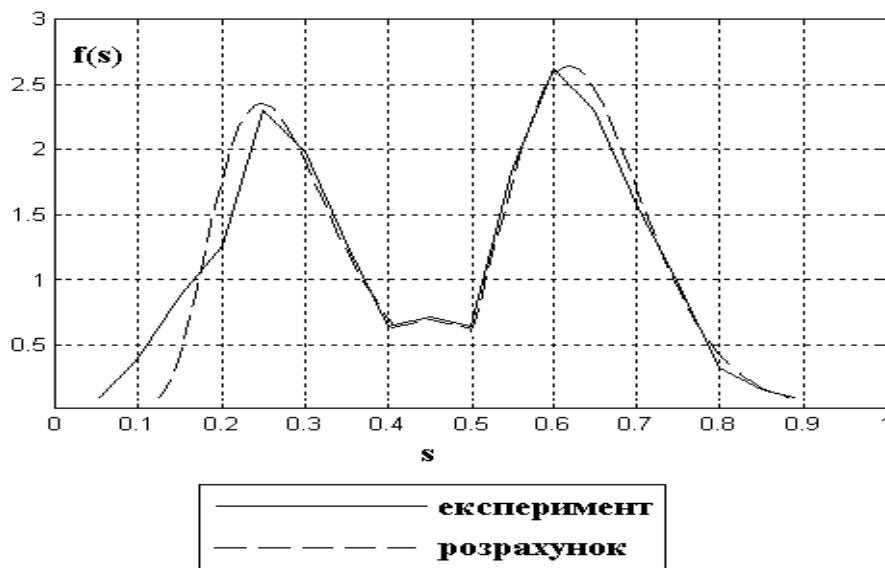


Рис. 2. Щільність імовірності $f(s)$.

3.2. Вирішення оберненої задачі надійності. Обернена задача надійності рам візків полягає у визначенні ймовірнісних характеристик навантаження по відомих ймовірнісних характеристиках безвідмовності і опору втомі конструкції.

Щільність ймовірності змінної r згідно формул функціонального перетворення випадкових величин (5) має вигляд:

$$f(r) = f(s = r^m) m r^{m-1} = \frac{m \cdot r^{m-1}}{\sqrt{2\pi}\sigma_s} \exp\left[-\frac{(r^m - m_s)^2}{2\sigma_s^2}\right], \quad r \leq 1. \quad (9)$$

Тоді безумовна щільність ймовірності приведених амплітуд напружень прийме вигляд:

$$f(\sigma_a) = \frac{m}{\sqrt{2\pi}\sigma_s} \int_c^d \exp\left[-\frac{((\sigma_{-1D}/\sigma_a)^m - m_s)^2}{2\sigma_s^2}\right] \left(\frac{\sigma_{-1D}}{\sigma_a}\right)^{m-1} \cdot \frac{\sigma_{-1D}}{\sigma_a^2} f(\sigma_{-1D}) d\sigma_{-1D}, \quad (10)$$

де c, d - межі інтегрування, що визначаються наступним образом:

$$\begin{cases} c = \sigma_{-1H}, & d = \sigma_a & \text{при } \sigma_a \leq \sigma_{-1B}; \\ c = \sigma_{-1H}, & d = \sigma_{-1B} & \text{при } \sigma_a > \sigma_{-1B}. \end{cases} \quad (11)$$

Результати розрахунку щільності ймовірності приведених амплітуд напружень і її апроксимація у вигляді нормального закону представлені на рис. 3.

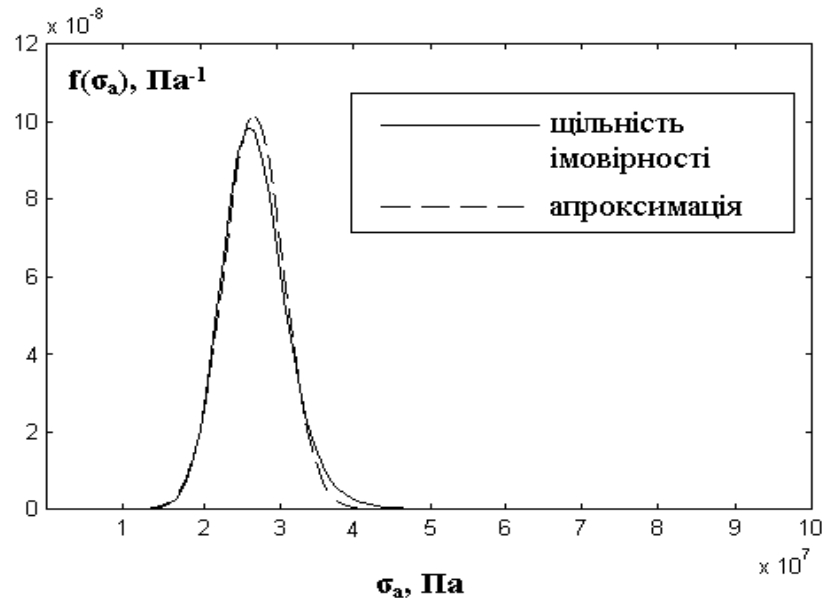


Рис. 3. Щільність ймовірності приведених амплітуд напружень та її апроксимація.

Для апроксимації щільності ймовірності межі витривалості разом з нормальним законом використовується і закон Вейбулла [1, 2]

$$f(\sigma_{-1D}) = \frac{\nu}{q} \left(\frac{\sigma_{-1D} - \sigma_M}{q}\right)^{\nu-1} \exp\left[-\left(\frac{\sigma_{-1D} - \sigma_M}{q}\right)^\nu\right], \quad (12)$$

де q - параметр масштабу розподілу; ν - параметр форми; σ_M - мінімальне можливе значення випадкової величини – параметр положення.

Вирішувалась обернена задача безвідмовності рам візків при умові, що щільність ймовірності межі витривалості апроксимується законом Вейбулла. Параметр форми

приймався рівним $v=2,5$ виходячи з рекомендацій, даних в роботах [1, 2]. Параметри масштабу та положення вибиралися з умови рівності діапазонів зміни щільності ймовірності меж витривалості, що моделюються нормальним законом і законом Вейбулла. Розрахунок проведено при ймовірнісних характеристиках безвідмовності рам візків, відповідних суперпозиції двох нормальних законів з наступними параметрами: $m_s = 0,25$, $\sigma_s = 0,07$; $m_s = 0,6$, $\sigma_s = 0,1$. Щільність ймовірності приведених амплітуд напружень та апроксимуючу її функцію показано на рис. 4. Як видно з рис. 4, розрахункова щільність ймовірності приведених амплітуд напружень добре узгоджується з теоретичним законом Релея, якщо щільність ймовірності меж витривалості підкоряється закону Вейбулла.

Для прогнозування безвідмовності рам візків типу 81-717 за даними про відмови прототипу - ЄЖ-3 використовується підхід, наведений в пункті 1. Обмежені статистичні дані про відмови рам візків типу 81-717 свідчать, що гарантована оцінка для пробігу до появи перших втомних тріщин візків типу 81-717, одержана з умов експлуатації вагонів метрополітену м. Харкова, складає $L = 1,9$ млн. км ($s = 0,4$) і є нижньою межею щільності ймовірності пробігів. Тому приймається, що щільність ймовірності пробігів $f(s)$ цих візків буде унімодальною (рис. 5). Вирішення прямої та оберненої задач безвідмовності рам візків типу 81-717 проводилося згідно з розробленими методами. Для меж витривалості використовувалися наступні параметри нормального закону: математичне сподівання $m_{\sigma-1D} = 30$ МПа, СКВ $\sigma_{\sigma-1D} = 2,28$ МПа. Результати розрахунків щільності ймовірності амплітуд напружень для зворотної задачі безвідмовності показано на рис. 6. Із рис. 6 видно, що розрахункова щільність ймовірності приведених амплітуд напружень добре апроксимується нормальним законом для прийнятої щільності ймовірності меж витривалості.

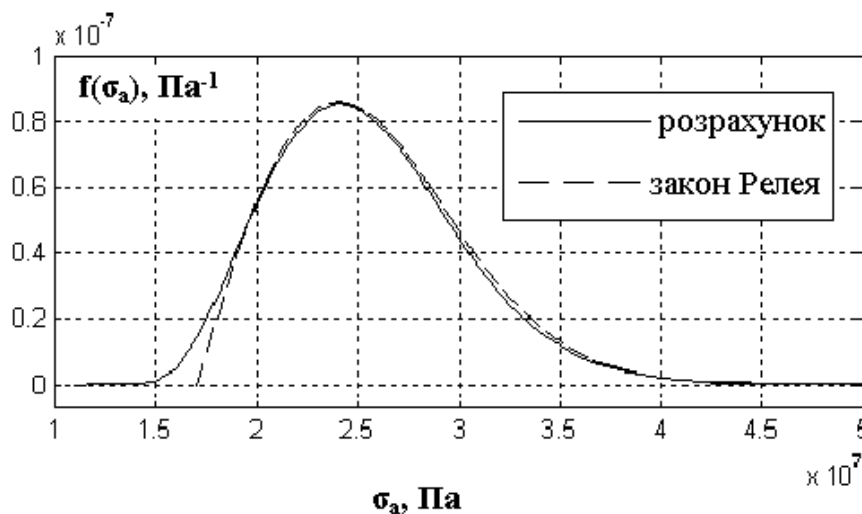


Рис. 4. Розрахункова та теоретична щільності ймовірності приведених амплітуд напружень.

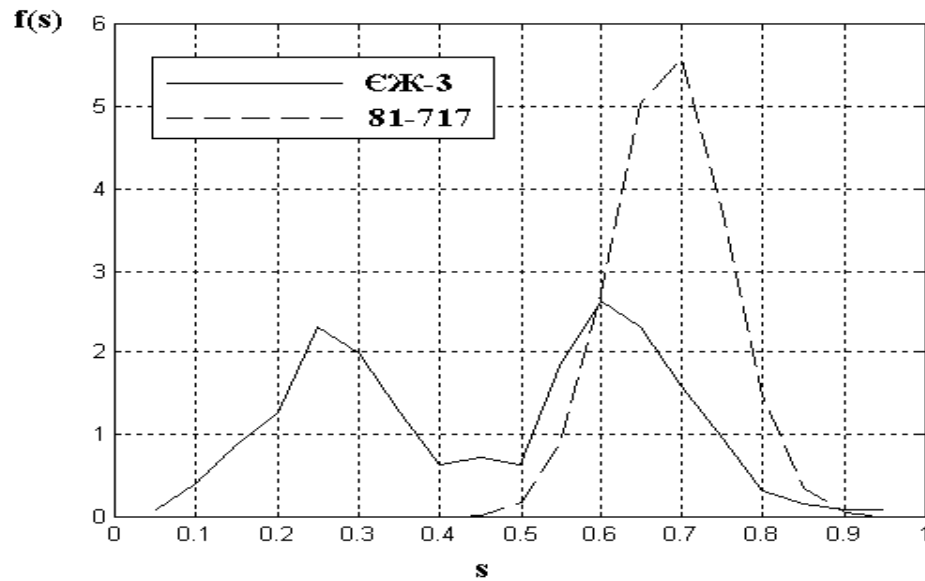


Рис. 5. Щільності ймовірності $f(s)$ для рам візків серій ЄЖ-3 і 81-717.

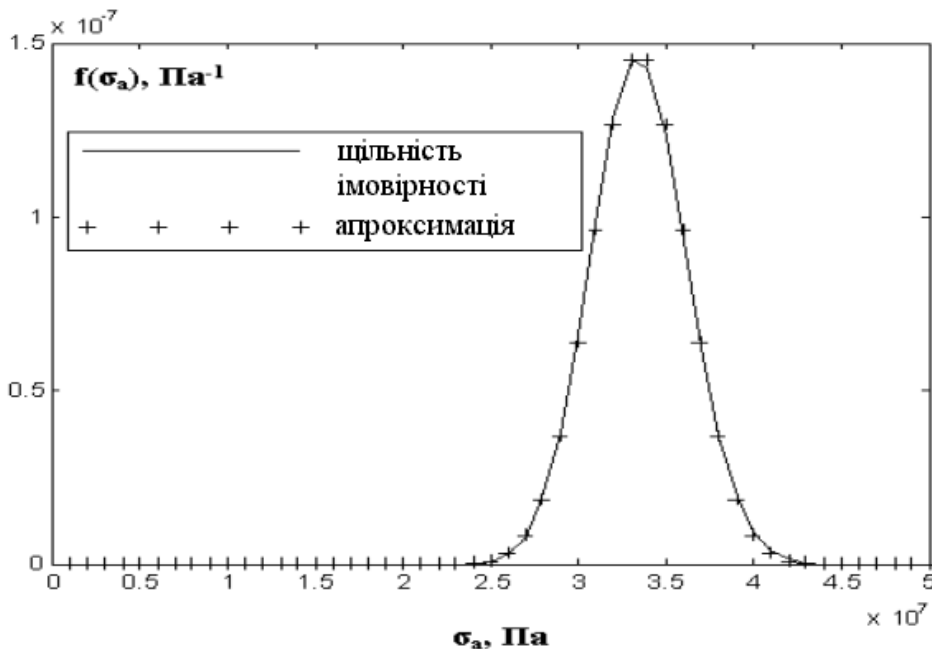


Рис. 6. Щільність імовірності приведених амплітуд напружень для рам візків типу 81-717.

Висновки

1. Створено тривимірні скінченно-елементні моделі рам візків вагонів, які враховують конструктивні особливості, технічні та експлуатаційні особливості єдиної динамічної системи «візок-шлях».

2. Розроблено методи вирішення задач випадкових вимушених коливань рам візків вагонів при квазістаціонарному випадковому навантаженні, викликаному нерівностями шляху, з урахуванням запізнювання кінематичного випадкового навантаження на колісні пари рам візків.

3. Розроблено методи вирішення прямих і зворотних задач безвідмовності рам візків вагонів електропоїздів і проведені чисельні дослідження характеристик безвідмовності.

4. Виконано зіставлення розрахункової та експериментальної щільності ймовірності пробігів рам візків до появи втомних тріщин, яка показала достовірність розробленої методики.

5. Проведено розрахунок характеристик безвідмовності рам візків за даними про відмови прототипу.

Література

1. Механическая часть тягового подвижного состава: Учебник для вузов ж.-д. трансп. / И.В. Бирюков, А.Н. Савоськин, Г.П. Бурчак и др. – М.: Транспорт, 1992. – 440 с.
2. Прочность и безотказность подвижного состава железных дорог / А.Н. Савоськин, Г.П. Бурчак, А.П. Матвеевичев и др. – М.: Машиностроение, 1990. – 288 с.
3. Егоренков А.В. Обоснование технических решений по повышению усталостной долговечности рам шпинтонного типа тележек вагонов метро: Автореф. дис...канд. техн. наук: 05.22.07 / БГТУ. – М., 2002. – 21 с.
4. Добровольская Э.М. Вагоны метрополитена типа Е. Устройство и обслуживание. – М.: Транспорт, 1989. – 302 с.
5. Раков В.А. Локомотивы отечественных железных дорог (1956-1975 гг.). – М.: Транспорт, 1999. – 443 с.
6. Жовдак В.А., Смирнов М.М., Ломакин А.Н. и др. Прогнозирование остаточного ресурса элементов конструкций вагонов метрополитена // Тр. Междунар. конф. "Оценка и обоснование продления ресурса элементов конструкций". – Киев, 2000. – Т. 1. – С. 883-888.
7. Болотин В.В. Прогнозирование ресурса машин и конструкций. – М.: Машиностроение, 1984. – 312 с.
8. Жовдак В.А, Мищенко И.В. Прогнозирование надежности элементов конструкций с учетом технологических и эксплуатационных факторов: Монография. – Харьков: ХГПУ, 1999. – 120 с.
9. Левин Б.Р. Теоретические основы статистической радиотехники. – М.: Сов. радио, 1974. – 552 с.
10. Белоцерковский А.Б., Жовдак В.А. Прогнозирование надежности рам тележек вагонов электропоездов // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". – Харків: НТУ "ХПІ", 2005. - №47. – С. 61-70.