

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
"ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ"

**Білоцерківський Олександр Борисович**

УДК 539.4:629.7.02

**ВИПАДКОВІ КОЛИВАННЯ ТА ПРОГНОЗУВАННЯ БЕЗВІДМОВНОСТІ РАМ ВІЗКІВ  
ВАГОНІВ ЕЛЕКТРОПОЇЗДІВ**

Спеціальність 05.02.09. - Динаміка та міцність машин

Автореферат  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Харків - 2005

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Національному технічному університеті "Харківський політехнічний інститут" Міністерства освіти і науки України, м. Харків.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор  
**Жовдак Валерій Олександрович**,  
Національний технічний університет  
"Харківський політехнічний інститут", м. Харків,  
професор кафедри динаміки та міцності машин.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, ст. н. с.  
**Ткачук Микола Анатолійович**,  
Національний технічний університет  
"Харківський політехнічний інститут", м. Харків,  
зав. каф. теорії механізмів, машин і роботів;

кандидат технічних наук, професор  
**Хворост Володимир Андрійович**,  
Сумський державний університет, м. Суми,  
проректор з наукової роботи.

Провідна установа: Інститут проблем машинобудування  
ім. А.М. Підгорного НАН України, м. Харків.

Захист відбудеться "1" лютого **2006 р.** о 14<sup>30</sup> год. на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.050.10 у Національному технічному університеті "Харківський політехнічний інститут" за адресою: 61002 м. Харків, вул. Фрунзе, 21.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут".

Автореферат розісланий "29" грудня **2005 р.**

Вчений секретар спеціалізованої  
вченої ради Д 64.050.10

Бортовой В.В.

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Залізничний транспорт займає провідне місце серед видів транспорту по об'ємах вантажних і пасажирських перевезень України. Невід'ємною частиною рухомого складу залізничного транспорту є електропоїзди метрополітенів, що призначені для забезпечення масових перевезень пасажирів у транспортних системах великих міст. Однак, не зважаючи на ці обставини, під час експлуатації вагонів електропоїздів спостерігається велика кількість відмов, значний процент яких має механічне походження. Окремо треба виділити виникнення втомних тріщин в зварних конструктивних елементах візків вагонів. Вказані обставини приводять до того, що економічна ефективність, а також показники експлуатації вагонів знижуються, що приводить до значних витрат та можливості виникнення аварійних ситуацій.

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. Розробка таких методів та їх впровадження в практику проектування та експлуатації дозволить отримати значний економічний ефект та забезпечити безпеку рухомого складу в цілому.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційна робота виконувалась на кафедрі динаміки та міцності машин НТУ «ХП» згідно плану фундаментальної програми МОН України «Створення розрахунково-експериментальних методів діагностики та подовження ресурсу роторних машин по міцнісним та динамічним критеріям» (№ Д.Р. 0103U001496), а також згідно господарського договору між НТУ «ХП» та Східноукраїнським науково-іноваційним центром залізничного транспорту (м. Харків) на 2002-2004 рр. «Чисельний та експериментальний аналіз діагностичних ознак технічного стану візків вагонів електропоїздів» (№ Г.Д. 21202), де здобувач був виконавцем окремих розділів.

**Мета і задачі дослідження.** *Метою роботи* є розробка на основі сучасних програмних комплексів методів і програмного забезпечення для визначення параметрів напружено-деформованого стану рам візків вагонів електропоїздів при квазістаціонарному випадковому зовнішньому навантаженні, викликаному нерівностями шляху, та характеристик безвідмовності рам візків.

Поставлена мета визначає ряд основних *задач*:

- провести аналіз даних про зовнішні навантаження на рами візків вагонів електропоїздів, викликані нерівностями шляху та іншими факторами,
- розробити адекватні математичні моделі системи “візок-шлях”, які б враховували динамічний взаємозв'язок окремих конструктивних елементів цієї системи, а також вплив на

динамічну поведінку конструкції нерівностей шляху, дія яких моделюється квазістаціонарним випадковим процесом,

- розробити на базі методу скінченних елементів (МСЕ) підходи, що дозволяють вирішувати задачі: статичного аналізу напружено-деформованого стану (НДС) рам візків вагонів, власних коливань та коливань тіл з тріщинами, випадкових вимушених коливань з урахуванням запізнювання кінематичного випадкового зовнішнього навантаження на колісні пари візків вагонів електропоїздів і надійності рам візків,
- розробити методи вирішення задач прогнозування безвідмовності рам візків за даними про відмови прототипу,
- провести чисельні дослідження на основі розроблених підходів і сучасних програмних комплексів параметрів НДС і показників безвідмовності рам візків вагонів метрополітену.

*Об'єкт дослідження* – динаміка і безвідмовність рам візків вагонів електропоїздів.

*Предмет дослідження* – детерміновані та ймовірнісні характеристики НДС і показники безвідмовності рам візків вагонів при заданих ймовірнісних характеристиках зовнішнього впливу.

*Методи дослідження* складають комплекс чисельних методів аналізу пружно-деформованих тіл на базі МСЕ, ймовірнісні методи, а також методи теорії випадкових функцій, теорії пружності, теорії коливань і теорії надійності.

**Наукова новизна одержаних результатів.** Дістали подальшого розвитку підходи вирішення задач коливань і надійності для рам візків вагонів електропоїздів при зовнішньому впливі, викликаному нерівностями шляху і іншими чинниками.

Вдосконалені математичні моделі і одержали подальший розвиток розрахункові схеми, що адекватно описують конструктивні, технічні і експлуатаційні особливості єдиної динамічної системи “візок-шлях”.

Вперше розроблено методи вирішення задач випадкових вимушених коливань рам візків на основі МСЕ з урахуванням запізнювання кінематичного випадкового зовнішнього навантаження на колісні пари візків вагонів електропоїздів.

Дістали подальшого розвитку методи вирішення задач прогнозування безвідмовності рам візків вагонів електропоїздів при одночасному врахуванні випадковості зовнішнього навантаження і характеристик опору втомі конструкції.

Вперше розроблено методи прогнозування безвідмовності рам візків за даними про відмови прототипу.

**Практичне значення одержаних результатів.** Створені в роботі підходи, алгоритми і програмне забезпечення дозволили виконати ряд розрахунків по визначенню навантаження і безвідмовності рам візків типу 81-717, що експлуатуються в ДП «Харківський метрополітен». Проведено обробку даних експерименту з визначення спектральної щільності зовнішнього

навантаження, викликаного нерівностями шляху, на окремих перегонах Харківського метрополітену та експерименти з ідентифікації власних частот і форм коливань рам візків серії 81-717. Основні результати прикладних досліджень у вигляді математичних моделей, рекомендацій, методів та результатів розрахунків впроваджено у практику експлуатації рам візків вагонів на ДП «Харківський метрополітен».

**Особистий внесок здобувача.** Всі положення дисертації, винесені на захист, здобувачем розроблені самостійно. А саме: аналіз даних по зовнішніх навантаженнях, викликаних нерівностями шляху, розробка математичних моделей, розробка методів вирішення задач випадкових вимушених коливань з урахуванням запізнювання кінематичного випадкового зовнішнього навантаження на колісні пари візків вагонів електропоїздів, прогнозування безвідмовності рам візків вагонів, проведення всіх чисельних досліджень і аналіз їх результатів.

**Апробація результатів дисертації.** Основні результати і положення роботи доповідалися на міжнародних науково-технічних конференціях: “Фізичні та комп’ютерні технології у народному господарстві” (м. Харків, 2000, 2001, 2003 р.), “Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я” (м. Харків, 2004 р.). У повному обсязі робота доповідалася на розширеному науковому семінарі кафедри динаміки та міцності машин НТУ “ХП”.

**Публікації.** По темі дисертації опубліковано 11 друкованих праць у спеціалізованих виданнях, серед яких 6 статей у фахових виданнях ВАК України, 4 статті та 1 теза доповіді в працях міжнародних науково-технічних конференцій.

**Структура й обсяг дисертації.** Дисертаційна робота складається зі вступу, 6 розділів, висновків, 1 додатку. Повний обсяг дисертації складає 170 сторінок, 94 ілюстрації по тексту, 20 таблиць по тексту, 122 найменування використаних літературних джерел на 13 сторінках. Обсяг основного тексту дисертації складає 150 сторінок.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовується актуальність та важливість вибраного напрямку досліджень, практична та наукова цінність одержаних результатів розрахунків параметрів НДС та показників надійності, формулюється мета та задачі роботи.

**Перший розділ** містить опис рам візків вагонів електропоїздів повідкового та шпінтонного типів, умови їх експлуатації і технічні характеристики. Далі наведено огляд зовнішніх навантажень, викликаних нерівностями шляху, і підходів до розв’язання задач вільних і вимушених коливань рам візків вагонів, що структуровані по методах побудови математичних моделей. Відзначено, що ефективнішими для оцінки НДС рам візків вагонів є сіткові методи, такі як метод скінченних різниць та МСЕ, оскільки вони дозволяють враховувати основні конструктивні особливості рам візків. Зроблено

висновок, що математичне дослідження випадкових вимушених коливань та безвідмовності рам візків вагонів електропоїздів з використанням МСЕ і врахуванням запізнювання кінематичного випадкового зовнішнього навантаження на колісні пари візків вагонів на базі просторових моделей рам візків ще не здійснювалося, має практичне значення, є актуальною задачею і потребує розвитку як у напрямку одночасного врахування випадковості параметрів навантаження та опору втомі конструкцій, так і у напрямку просторового моделювання конструкцій.

У другому розділі дисертації представлені результати побудови математичних моделей рам візків вагонів типу 81-717/717.5. Розробка моделей проводилась на базі МСЕ з використанням стрижневих, оболонкових та об'ємних скінченних елементів (СЕ). На основі аналізу результатів чисельних досліджень рам візків здійснений вибір раціональних СЕ моделей. Також зроблено огляд існуючих моделей шляху. Була обрана достатньо докладна розрахункова схема візку і дискретна модель шляху. СЕ модель системи "візок - шлях" показана на рис. 1.

Рис. 1. СЕ модель системи "візок-шлях".

У третьому розділі дисертації наведено результати аналізу НДС рам візків вагонів повідкового і шпінтонного типів при статичному навантаженні. Дослідження показують, що найбільші еквівалентні напруження спостерігаються в районі з'єднання подовжньої і поперечної балок (рис. 2), і не перевищують допустимі напруження. Значні напруження спостерігаються також поблизу кронштейнів буксових повідців та кронштейнів підвіски тягових електродвигунів (ТЕД). Також представлено результати порівняльного аналізу напруженого стану для повідкового і шпінтонного візків на середині верхньої полиці подовжньої балки, які показують, що в цій зоні більш навантаженим (на 10,66 %) є шпінтонний візок.

Рис. 2. Еквівалентні напруження в рамах візків вагонів 81-717 при статичному навантаженні.

У четвертому розділі дисертації представлено результати чисельних досліджень власних коливань рам візків вагонів повідкового та шпінтонного типів. Досліджено коливання колісних пар та елементів шляху. Також проведено аналіз впливу ваги пасажирів на власні коливання вагонів.

Наведено результати експериментальних досліджень власних коливань рам візків серії 81-717. Визначення резонансних частот візка здійснювалася з використанням п'єзоелектричних вібродатчиків прискорення. Резонансні частоти визначалися при збудженні коливань від вібратора роздільно у вертикальному (рис. 3), подовжньому і поперечному напрямках. Проведено порівняння розрахункових і експериментальних значень власних частот рам візків типу 81-717 (табл. 1). Рама візка типу 81-717 та її перші три форми власних коливань показані на рис. 4.

Рис. 3. Вертикальна схема закріплення вібратора (Д1, Д2, Д3 – вібродатчики).

Таблиця 1

**Розрахункові і експериментальні значення власних частот**

№ частоти	Значення частоти, Гц		Відмінність, %
	розрахунок	експеримент	
1	1,74	1,75	0,57
2	2,06	-	-
3	5,18	5	3,6
4	5,25	5	4,7
5	30,54	30	1,8
6	49,1	50	1,8
7	103,78	103	0,76
8	142,75	143	0,17

Рис. 4. Рама візка типу 81-717 (а) та її перші три форми коливань (б, в, г).

Проведено чисельні дослідження власних коливань рами візка типу 81-717 за наявності тріщини в зварному шві кріплення кронштейна буксових повідців до подовжньої балки. Наголошено, що найбільший вплив тріщина робить на власну частоту  $\omega_3$  (табл. 2), пов'язану з вертикальними коливаннями рами візка, оскільки на цій частоті відбувається найбільше розкриття тріщини. Отримані результати можуть використовуватися для обґрунтованого вибору діагностичних ознак тріщин в даних конструкціях при вирішенні задач технічної діагностики.

Таблиця 2

**Власні частоти рами візку**

№ частоти	Значення частоти, Гц		Відмінність, %
	без тріщини	тріщина (60 мм)	
3	5,18	3,83	26
7	103,78	103,29	0,47
8	142,75	142,51	0,17

У п'ятому розділі дисертації розв'язана задача випадкових вимушених коливань рам візків вагонів.

На основі представлених Харківським метрополітемом реалізацій віброприскорень буксових вузлів рам візків вагонів (рис. 5 а) проведено їх обробку з використанням дискретного перетворення Фур'є. Експериментальні дослідження зовнішнього навантаження показують, що для спектру сигналу характерні підйоми рівнів спектральної щільності на частотах, близьких до 30 Гц, що обумовлене коливаннями колісних пар та елементів шляху (рис. 5 б).

а) б)

Рис. 5. Реалізація віброприскорення (а) та спектр сигналу (б) на швидкості 60 км/г.

Для проведення розрахунків випадкових вимушених коливань рам візків використовуються моделі зовнішнього навантаження у вигляді аналітичних виразів спектральної щільності на певних швидкісних діапазонах (табл. 3).

Таблиця 3

**Спектральна щільність вертикальних прискорень**

Швидкість, км/г	Інтенсивність, (м/с <sup>2</sup> ) <sup>2</sup> /Гц		
	0-25 Гц	25-35 Гц	35-90 Гц
47	0,27	1,08	0,27
60	0,36	1,35	0,36
72	0,45	1,55	0,45

Вирішується задача випадкових вимушених коливань рам візків на основі МСЕ. Матричне рівняння руху має вигляд

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

де  $[M], [C], [K]$  - глобальні матриці мас, демпфірування, жорсткості,  $[A]$  - матриця псевдостатичних коефіцієнтів впливу, визначувана 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 СЕ моделі,  $\{\dot{\eta}\}$ ,  $\{\ddot{\eta}\}$  - вектори швидкостей і прискорень буксових вузлів рами візка, викликаних нерівностями шляху.

Одержано вираз для спектральної щільності вузлових переміщень СЕ моделі рами візку вагону з урахуванням запізнювання кінематичного випадкового зовнішнього навантаження на колісні пари рами візку



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

де  $S_{\ddot{\eta}}(\omega)$  - спектральна щільність віброприскорень буксових вузлів рами візку (табл. 3),  $G_{\lambda l}$  - амплітуди узагальнених сил,  $\phi_{jl}$  - елементи вектора власних форм,  $H_l(i\omega)$  - амплітудно-частотна характеристика,  $r$  - число входів,  $\tau_{\lambda\mu}$  - час запізнювання навантаження між  $\lambda$ -м та  $\mu$ -м входами ( $\tau_{\lambda\mu} = l_{\lambda\mu} / V$ , де  $l_{\lambda\mu}$  - відстань між входами,  $V$  - швидкість вагону). Також представлено основні співвідношення для спектральних щільностей і дисперсій еквівалентних напружень.

Виконано ряд тестових розрахунків, які показали ефективність розробленої методики вирішення задач випадкових вимушених коливань з урахуванням запізнювання зовнішнього навантаження і можливість її використання для дослідження випадкових вимушених коливань рам візків. Наведено результати чисельних досліджень випадкових вимушених коливань рам візків вагонів повідкового типу з урахуванням запізнювання зовнішнього навантаження у вигляді графіків логарифмів спектральної щільності вертикальних переміщень для точки кріплення електродвигуна до кронштейну підвіски ТЕД (рис. 6).

Рис. 6. Спектральна щільність вертикальних переміщень точки кріплення електродвигуна до кронштейну підвіски ТЕД при швидкостях 40 та 60 км/г.

Дослідження показують, що підйом рівнів спектральної щільності для кронштейну підвіски ТЕД спостерігається поблизу власних частот коливань:  $\rho_1=1,23$  Гц і  $\rho_3=5,03$  Гц (рис. 6). 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  $\rho_1$  та  $\rho_3$ , згладжується порізаність графіків та збільшується відстань між нульовими точками. Отримано залежності середньоквадратичних відхилень (СКВ) еквівалентних напружень і ефективних частот від швидкостей руху електропоїзда в районах кріплення кронштейна буксових повідців, що будуть використані при вирішенні задачі прогнозування безвідмовності рам візків.

Представлено результати розрахунків для рам візків шпінтонного типу. Показано, що більш навантаженими (на 12 %) по максимальних еквівалентних напруженнях, які виникають на середині верхньої полиці подовжньої балки, є візки шпінтонного типу в порівнянні з візками повідкового типу.

**У шостому розділі** розглядається методика розрахунку безвідмовності рам візків вагонів електропоїздів.

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

Вираз для пробігу рами візка до появи втомної тріщини має вигляд:

$$L = L_0 \left( \frac{\sigma_{-1D}}{\sigma_a} \right)^m, \quad (3)$$

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),  $\sigma_{-1D}$  - межа витривалості конструкції з урахуванням асиметрії циклу за способом Серенсена-Киносашвілі,  $\sigma_a = \sqrt[m]{\sum_i \frac{P_i V_c}{V_i} \sigma_{ai}^m}$  ( $\sigma_a$  - приведена амплітуда напружень,  $\sigma_{ai}$  - амплітуда напружень при  $i$ -му режимі навантаження ( $\sigma_{ai} \leq \sigma_{-1D}$ ),  $P_i$  - ймовірність появи швидкості руху  $V_i$  в експлуатації).

Співвідношення (3) з урахуванням безрозмірних змінних  $s = L/L_0$  і  $r = \sigma_{-1D}/\sigma_a$  можна представити у вигляді:

$$s = r^m, \quad (r \leq 1). \quad (4)$$

Щільність розподілу безрозмірних пробігів  $s$  на основі використання функціонального перетворення випадкових величин (4) має вигляд:

$$f(s) = \frac{1}{m} f(r = s^{1/m}) s^{\frac{1-m}{m}}. \quad (5)$$

При визначенні щільності розподілу  $f(\sigma_a)$  використовувався метод статистичного моделювання амплітуд напружень  $\sigma_{ai}$ . Проведені чисельні дослідження показали, що умовна щільність розподілу приведених амплітуд напружень  $f(\sigma_a/\sigma_{-1D})$  для фіксованого  $\sigma_{-1D}$  підкоряється нормальному закону. Тому вираз для безумовної щільності розподілу змінної  $r$  має вигляд:

$$f(r) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_a} \int_a^b \exp \left[ -\frac{((\sigma_{-1D}/r) - m)^2}{2\sigma^2} \right] \frac{\sigma_{-1D}}{r^2} f(\sigma_{-1D}) d\sigma_{-1D}, \quad (5)$$

де  $f(\sigma_{-1D})$  - щільність розподілу межі витривалості,  $a, b$  - межі інтегрування, що визначаються з порівняння максимальних та мінімальних значень межі витривалості та приведеної амплітуди напружень.

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 розподілів  $f(s)$  для рам візків типу ЄЖ-3 представлені на рис. 7. Результати показують, що розрахункова щільність розподілу  $f(s)$  добре узгоджується з експериментальною щільністю розподілу.

Рис. 7. Щільність розподілу  $f(s)$ .

Вирішена обернена задача надійності рам візків, що полягає у визначенні ймовірнісних характеристик навантаження по відомих ймовірнісних характеристиках безвідмовності і опору втомі конструкції.

Щільність розподілу змінної  $r$  згідно формул функціонального перетворення випадкових величин (4) має вигляд:

$$f(r) = f(s = r^m) m r^{m-1} = \frac{m \cdot r^{m-1}}{\sqrt{2\pi}\sigma_s} \exp\left[-\frac{(r^m - m_s)^2}{2\sigma_s^2}\right], \quad r \leq 1. \quad (7)$$

Тоді безумовна щільність розподілу приведених амплітуд напружень прийме вигляд:

$$f(\sigma_a) = \frac{m}{\sqrt{2\pi}\sigma_s} \int_c^d \exp\left[-\frac{((\sigma_{-1D}/\sigma_a)^m - m_s)^2}{2\sigma_s^2}\right] \left(\frac{\sigma_{-1D}}{\sigma_a}\right)^{m-1} \cdot \frac{\sigma_{-1D}}{\sigma_a^2} f(\sigma_{-1D}) d\sigma_{-1D}, \quad (8)$$

де  $c, d$  - межі інтегрування, що визначаються з порівняння максимальних та мінімальних значень межі витривалості та приведеної амплітуди напружень.

Результати розрахунку щільності розподілу приведених амплітуд напружень і її апроксимація у вигляді нормального закону представлені на рис.8.

Рис. 8. Щільність розподілу приведених амплітуд напружень та її апроксимація.

Результати показують, що розрахункова щільність розподілу приведених амплітуд напружень для рам візків типу ЄЖ-3 добре апроксимується нормальним законом для прийнятої щільності розподілу межі витривалості.

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.

Рама візків типу 81-717 є повідковими, так само як і рами візків типу ЄЖ-3, тому вони мають таку ж конструкцію кронштейнів буксових повідців та експлуатуються за однакових умов навантаження. Даний підхід використовується для прогнозування безвідмовності рам візків типу 81-717 за даними про відмови прототипу - ЄЖ-3. 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 розподілу пробігів. Тому приймається, що щільність розподілу межі витривалості  $f(\sigma_{-1D})$  цих візків буде унімодальною. Передбачувана щільність розподілу  $f(s)$  для рам візків серії 81-717 приведена на рис. 9 пунктирною лінією.

Рис. 9. Щільності розподілу  $f(s)$  для рам візків серій ЄЖ-3 і 81-717.

Вирішення прямої задачі надійності рам візків типу 81-717 проводилося згідно з розробленими методами. Для межі витривалості використовувалися наступні параметри нормального закону: математичне сподівання  $m_{\sigma_{-1D}} = 30$  МПа, СКВ  $\sigma_{\sigma_{-1D}} = 2,28$  МПа. Результати розрахунків щільності розподілу  $f(s)$  показані на рис. 10.

Рис. 10. Розрахункова щільність розподілу  $f(s)$  для рам візків серії 81-717.

Була вирішена обернена задача надійності рам візків типу 81-717. Результати розрахунків щільності розподілу амплітуд напружень показують, що розрахункова щільність розподілу приведених амплітуд напружень для рам візків типу 81-717 добре апроксимується нормальним законом для прийнятої щільності розподілу межі витривалості.

## ВИСНОВКИ

Дисертаційна робота присвячена вирішенню науково-практичної задачі аналізу випадкових вимушених коливань рам візків вагонів при квазістаціонарному випадковому зовнішньому навантаженні, викликаному нерівностями шляху, та прогнозуванню безвідмовності рам візків. На основі розроблених підходів досліджено вплив зовнішнього навантаження на параметри напружено-деформованого стану рам візків вагонів, а також вплив імовірнісних характеристик опору втомі і навантаження рам візків на характеристики безвідмовності.

Найбільш важливі наукові і практичні результати роботи:

1. Проведено аналіз даних про зовнішні навантаження на рами візків вагонів електропоїздів, викликані нерівностями шляху та іншими факторами. Аналіз показав, що основний вплив на напружений стан рам візків вагонів електропоїздів роблять геометричні нерівності шляху. Вплив запізнювання кінематичного випадкового зовнішнього навантаження на колісні пари візків вагонів електропоїздів при розрахунку випадкових вимушених коливань з використанням МСЕ, а також розрахунок надійності рам візків вагонів по прототипу теоретично не було вивчено, тому є актуальною і важливою задачею.
2. Дістали подальшого розвитку методи вирішення задач коливань та прогнозування безвідмовності рам візків вагонів електропоїздів при одночасному врахуванні випадковості зовнішнього навантаження і характеристик опору втомі конструкції.
3. Удосконалено математичні моделі і дістали подальший розвиток розрахункові схеми, які адекватно описують конструктивні, технічні, експлуатаційні особливості єдиної динамічної системи «візок-шлях».
4. Проведено моделювання тріщин в рамах візків з використанням МСЕ і виконано чисельні дослідження власних коливань рам візків з тріщинами, які необхідні для обґрунтованого вибору діагностичних ознак в даних конструкціях при вирішенні задач технічної діагностики.
5. Розроблено методи прогнозування безвідмовності рам візків вагонів по прототипах.
6. Створені в роботі підходи, алгоритми і програмне забезпечення дозволили виконати ряд розрахунків з метою визначення характеристик напружено-деформованого стану і показників безвідмовності рам візків повідкового і шпінтонного типів. Проведено експериментальні дослідження власних коливань рам візків типу 81-717. Виконано чисельні дослідження з метою визначення характеристик безвідмовності рам візків типу 81-717 за експериментальними даними про характеристики надійності по прототипу в ДП «Харківський метрополітен».

7. Результати роботи впроваджені в практику експлуатації рам візків вагонів на ДП «Харківський метрополітен» та можуть використовуватися в проектних організаціях, на заводах і метрополітенах для прогнозування безвідмовності рам візків вагонів електропоїздів.

### СПИСОК ПРАЦЬ, ОПУБЛІКОВАНИХ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Белоцерковский А.Б., Трубаев А.И. Исследование сейсмостойкости трубопроводов // Вестник Харьковского государственного политехнического университета. – Харьков: ХГПУ, 2000. - №116.-С.25-28.

*Здобувач розробив необхідні математичні моделі, провів чисельні дослідження власних частот і переміщень трубопроводів при сейсмічному впливі, що задається акселерограмами.*

2. Белоцерковский А.Б., Жовдак В.А., Левашов В.А., Трубаев А.И. Расчет колебаний и ресурса трубопровода маслосистемы газоперекачивающего агрегата пути // Вісник Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут”. – Харків: НТУ «ХПІ», 2001. - №25.-С.25-33.

*Здобувач розробив методичку, алгоритм і програму розрахунку задачі визначення середнього часу до руйнування внаслідок нагромадження втомних пошкоджень у просторових трубопровідних системах при кінематичному впливі, що моделюється стаціонарним випадковим процесом.*

3. Ярошок Ю.О., Скрипник В.Л., Білоцерківський О.Б. Моделювання і розрахунок власних коливань рам візків вагонів метрополітену // Збірник наукових праць Української державної академії залізничного транспорту. – Харків: УкрДАЗТ, 2003. – Випуск 55. – С. 110-113.

*Здобувач розробив необхідні математичні моделі, провів чисельні дослідження власних коливань рам візків вагонів.*

4. Белоцерковский А.Б., Жовдак В.А., Черных О.В., Ярошок Ю.А. Случайные колебания рам тележек вагонов метрополитена с учетом неровности пути // Вісник Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут”. – Харків: НТУ «ХПІ», 2003. -Т.1, №12.-С.10-17.

*Здобувач розробив необхідні математичні моделі, провів чисельні дослідження стохастичних характеристик рам візків вагонів метрополітену при випадковому впливі, викликаному нерівностями шляху. Використовувалися різні моделі навантаження.*

5. Белоцерковский А.Б. Вынужденные колебания рам тележек вагонов метрополитена при случайном воздействии с учетом запаздывания // Вісник Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут”. – Харків: НТУ «ХПІ», 2004. - № 31. –

С. 20-29.

*Здобувач розробив методику, алгоритм і програму розрахунку випадкових вимушених коливань рам візків вагонів метрополітену з урахуванням запізнювання, виконав тестові розрахунки.*

6. Белоцерковский А.Б., Жовдак В.А. Статический и динамический расчет рам тележек вагонов метрополитена // Вісник Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут”. – Харків: НТУ «ХПІ», 2004.- № 20. – С. 15-22.

*Здобувач виконав чисельні дослідження параметрів напружено-деформованого стану рам візків вагонів метрополітену при статичному і динамічному впливах. Статичний вплив викликаний дією ваги вагона на візок. Динамічний вплив викликаний нерівностями шляху з урахуванням запізнювання.*

7. Белоцерковский А.Б., Трубаев А.И. Расчет вынужденных колебаний трубопроводов при сейсмическом воздействии с использованием различных программных средств // Вісник інженерної академії України. Спеціальний випуск. - Київ, 2000. – С. 423-426.

*Здобувач виконав чисельні дослідження вимушених коливань трубопровідних систем при сейсмічному впливі, який задається акселерограмами, з використанням спеціалізованої програми “Коливання трубопроводів” (НТУ “ХПІ”) і ПК COSMOS/M.*

8. Белоцерковский А.Б., Трубаев А.И. Исследование напряженно-деформированного состояния пространственных трубопроводов при кинематическом воздействии // Вісник інженерної академії України. - Київ, 2001. – № 3. - С. 79-81.

*Здобувач зробив чисельні дослідження параметрів напружено-деформованого стану просторових трубопроводів в залежності від числа врахованих власних форм коливань.*

9. Белоцерковский А.Б., Жовдак В.А., Смирнов М.М., Черных О.В., Яцько С.И. Разработка методики виброизмерений колесно-редукторных блоков вагонов метрополитена // Труды 7-й международной научно-технической конференции “Физические и компьютерные технологии в народном хозяйстве” (28-29 мая 2003 г.).- Харьков: ХНПК “ФЭД”.-2003.-С. 216-218.

*Здобувач розробив методику вивровимірювань колісно-редукторних блоків вагонів метрополітену для експериментальних досліджень параметрів зовнішнього впливу, викликаного нерівностями шляху.*

10. Белоцерковский А.Б., Жовдак В.А., Черных О.В., Яцько С.И. Исследование напряженно-деформированного состояния рам тележек вагонов метрополитена при случайном воздействии // Труды 8-й международной научно-технической конференции “Физические и компьютерные технологии в народном хозяйстве” (9-10 декабря 2003 г.).- Харьков: ХНПК “ФЭД”.-2003.-С. 255-257.

*Здобувач розробив необхідні математичні моделі, провів чисельні дослідження випадкових*

*вимушених коливань рам візків вагонів метрополітену, викликаних нерівностями шляху, з урахуванням запізнювання зовнішнього навантаження на колісних парах.*

11. Белоцерковский А.Б., Жовдак В.А., Черных О.В., Яцько С.И. Статический и динамический анализ рам тележек вагонов метрополитена // Анотації доповідей міжнародної науково-практичної конференції “Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров’я” (20-21 травня 2004 р.). – Харків. – 2004. – С. 55.

## **АНОТАЦІЇ**

*Білоцерківський О.Б. Випадкові коливання та прогнозування безвідмовності рам візків вагонів електропоїздів. – Рукопис.*

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.02.09 – динаміка та міцність машин. - Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", Харків, 2005.

Дисертація присвячена розробці на основі сучасних програмних комплексів методів і програмного забезпечення для визначення параметрів напружено-деформованого стану рам візків вагонів електропоїздів при квазістационарному випадковому зовнішньому навантаженні, викликаному нерівностями шляху, та характеристик безвідмовності рам візків. Розроблено теоретичні підходи, математичні моделі і програмне забезпечення для вирішення наступних задач: статичного аналізу напружено-деформованого стану рам візків вагонів, власних коливань та коливань тіл з тріщинами, випадкових вимушених коливань з урахуванням запізнювання кінематичного випадкового зовнішнього навантаження на колісні пари рам візків і прогнозування безвідмовності рам візків при одночасному врахуванні випадковості зовнішнього навантаження і характеристик опору втомі. Вперше розроблено методи прогнозування безвідмовності за даними про відмови прототипу. Проведено чисельні дослідження характеристик напружено-деформованого стану рам візків при статичному навантаженні, власних коливань, випадкових вимушених коливань з урахуванням запізнювання навантаження на колісні пари рам візків, параметрів безвідмовності рам візків. Результати проведених досліджень впроваджені в ДП "Харківський метрополітен" з метою прогнозування безвідмовності рам візків вагонів типу 81-717.

*Ключові слова:* рама візка, власні частоти та форми коливань, випадкові коливання, аналіз напружено-деформованого стану, надійність машин, безвідмовність, щільність розподілу відмов.

*Белоцерковский А.Б. Случайные колебания и прогнозирование безотказности рам тележек вагонов электропоездов. – Рукопись.*



Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.02.09 – динамика и прочность машин. – Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», Харьков, 2005.

Во время эксплуатации вагонов электропоездов наблюдается большое количество отказов, значительный процент которых имеет механическое происхождение. Отдельно нужно выделить возникновение усталостных трещин в сварных конструктивных элементах тележек вагонов. Указанные причины приводят к тому, что экономическая эффективность, а также показатели эксплуатации вагонов снижаются, что приводит к значительным расходам и возможности возникновения аварийных ситуаций. Приведенные обстоятельства указывают на актуальность работ, связанных с разработкой расчетно-экспериментальных методов для прогнозирования безотказности рам тележек вагонов электропоездов с учетом случайности свойств прочности материала конструкции, технологии ее изготовления, а также случайности воздействия в конкретных условиях эксплуатации.

Диссертация посвящена разработке на основе современных программных комплексов методов и программного обеспечения для определения параметров напряженно-деформированного состояния рам тележек вагонов электропоездов при квазистационарном случайном внешнем воздействии, вызванном неровностями пути, и характеристик безотказности рам тележек. Разработаны КЭ модели систем «тележка - путь», которые позволяют учитывать динамическое взаимодействие отдельных элементов. На основе этих моделей разработаны подходы и программное обеспечение для решения следующих задач: статического анализа напряженно-деформированного состояния рам тележек вагонов, собственных колебаний и колебаний тел с трещинами, случайных вынужденных колебаний с учетом запаздывания кинематического случайного внешнего воздействия на колесные пары рам тележек и прогнозирования безотказности рам тележек. Впервые разработаны методы прогнозирования безотказности рам тележек по данным об отказах прототипа.

Проведены численные исследования характеристик напряженно-деформированного состояния рам тележек при статическом воздействии, собственных колебаний и колебаний тел с трещинами, случайных вынужденных колебаний рам тележек с учетом запаздывания кинематического случайного внешнего воздействия на колесные пары рам тележек. На основе полученных характеристик статических и динамических напряжений проведены расчеты основных показателей безотказности рам тележек вагонов типа 81-717 по данным об отказах прототипа. При этом учитывался случайный разброс характеристик нагруженности, сопротивления усталости и безотказности.

Проведена обработка данных эксперимента по определению спектральной плотности внешнего воздействия, вызванного неровностями пути, на отдельных перегонах Харьковского

метрополитена и эксперименты по идентификации собственных частот и форм колебаний рам тележек серии 81-717. Основные результаты прикладных исследований в виде математических моделей, рекомендаций, методов и результатов расчетов внедрены в практику эксплуатации рам тележек вагонов на ГП «Харьковский метрополитен».

*Ключевые слова:* рама тележки, собственные частоты и формы колебаний, случайные колебания, анализ напряженно-деформированного состояния, надежность машин, безотказность, плотность распределения отказов.

*Belocerkovscky A.B. Random vibrations and reliability prediction of bogie frames of electric train coaches.* – Manuscript.

Thesis for candidate of technical sciences degree by the speciality 05.02.09 – dynamics and strength of machines. – National technical university “Kharkov polytechnic institute”, Kharkov, 2005.

The thesis is dedicated to the creation of methods and solution programs for determination parameters of the deflected mode of bogie frames of electric train coaches at the random quasistationary external influence and failure properties of bogie frames. The external loading is caused by the track irregularities. Theoretical approaches, mathematical models and the software for the decision of the following problems are developed: static analysis, natural vibration and cracked body vibration, statistical dynamics and reliability prediction of bogie frames. The delay of loading on the wheel pairs of bogie frames is taken into account. The method of reliability prediction of bogie frames on a prototype is first developed. The numerical researches connected to the decision of various problems of static analysis, natural vibration and cracked body vibration, statistical dynamics and reliability prediction are executed. The results of this work have been applied in Kharkov underground for determination loading and reliability of bogie frames.

*Key words:* bogie frame, natural frequencies and modes, random vibrations, deflected mode analysis, machines reliability, fail-safe, failure density function.

Автореферат

**ВИПАДКОВІ КОЛИВАННЯ ТА ПРОГНОЗУВАННЯ БЕЗВІДМОВНОСТІ РАМ ВІЗКІВ  
ВАГОНІВ ЕЛЕКТРОПОЇЗДІВ**

Білоцерківський Олександр Борисович

Відповідальний за випуск: к.т.н. О.І. Трубаєв