

Л 24

ДЕРЖАВНА АДМІНІСТРАЦІЯ ЗАЛІЗНИЦЬ УКРАЇНИ  
ДНІПРОПЕТРОВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ

На правах рукопису

ЛАПІНА ЛЮДМИЛА ГРИГОРІВНА

625.1.03

ІДЕНТИФІКАЦІЯ ПАРАМЕТРІВ ВЕРТИКАЛЬНИХ ЗБУРЕНЬ, ЯКІ  
ДІЮТЬ НА РЕЙКОВІ ЕКІПАЖІ З БОКУ КОЛІЇ

05.22.07 - Рухомий склад залізниць та тяга поїздів

Автореферат  
дисертації на здобуття вченого ступеня кандидата технічних наук

Дніпропетровськ 1997

Робота виконана в Інституті технічної механіки Національної академії наук України

Науковий керівник

- доктор технічних наук  
С.Ф.Редько

Офіційні опоненти

- доктор технічних наук  
професор  
В.Д.Данович,  
кандидат технічних наук  
доцент  
В.В.Кулябко

Провідна організація

- Інститут транспортних систем і  
технологій НАН України  
(м. Дніпропетровськ)

Захист відбудеться "29" квітня 1997 р. о 14 год. в ауд. 224 на  
засіданні спеціалізованої ради Д 03.04.02 в Дніпропетровському  
державному технічному університеті залізничного транспорту за адресою  
320010, м. Дніпропетровськ, 10, вул. Академіка Лазаряна, 2, ауд. \_\_\_\_

бібліотеці університету.

сб 1997 р.

земплярах, завірені печаткою,  
університету Д 03.04.02.



Л.В.Петрович

НТБ  
ДНУЗТ

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Розвиток залізничного транспорту неможливий без модернізації існуючих та створення нових видів транспортних засобів, збільшення міцності і надійності конструкцій, зниження їх вартості за рахунок підвищення якості та зменшення термінів проектно-конструкторських робіт. У зв'язку з цим є необхідним подальше поглиблене вивчення процесів, які виникають при експлуатації рейкових екіпажів, і проведення відповідних наукових досліджень. Важливого значення набуває вдосконалення способів опису реальних динамічних навантажень у широкому діапазоні частот, а також побудова адекватних математичних моделей коливань рейкових екіпажів та створення ефективних алгоритмів розв'язання поставлених задач.

Аналіз процесів, які відбуваються під час руху рейкового екіпажу, показав, що останній зазнає дії різноманітних збурень, головним чином з боку колії. Ці збурення залежать від багатьох, в більшості своїй випадкових, факторів. Незважаючи на значну кількість публікацій, присвячених цій проблемі, різноманітність збурень і складний характер їх залежності від багатьох факторів не призводять вважати дану задачу розв'язаною. Правильне урахування цих збурень призведе до зближення результатів теоретичного прогнозу з реальними процесами в системі і тому являє собою важливу теоретичну та практичну задачу.

### Метою роботи є:

оцінка параметрів випадкових вертикальних збурень, які діють на рейкові екіпажі з боку залізничної колії в широкому діапазоні частот, та самої колії за різних умов експлуатації рейкового екіпажу;

дослідження впливу на збурення в системі "екіпаж колія" неоднорідності характеристик і стану колії, осевого навантаження, сезонних умов, швидкості руху.

Методика досліджень. Розв'язання поставлених задач здійснювалось шляхом проведення теоретичних та експериментальних досліджень. Основні методи, які використовувались в даній роботі, - це

методи теорії коливань, математичного моделювання, ідентифікації систем, математичної статистики, а також чисельні методи. Результати розрахунків співставлялись з даними експериментальних досліджень і з висновками інших авторів. Для візуалізації отриманих результатів використовувались методи комп'ютерної графіки.

Наукова новизна. Проаналізовано вплив на вид амплітудно-частотної характеристики тракту "нерівність колії вертикальне переміщення колеса" нерівнопружності та нелінійності колії, а також взаємодії сусідніх колісних пар через підложжя. Отримано оцінки статистичних характеристик випадкової функції, що описує зміну частотного складу вертикальних збурень рейкових екіпажів внаслідок неоднорідності властивостей і стану колії. Для параметрів моделей збурень та колії одержані аналітичні вирази, які описують їх залежність від швидкості руху екіпажу, осьового навантаження, сезонних умов та будови колії.

Практична цінність роботи. Дана робота є розвитком досліджень щодо моделювання процесів збурень, які діють на рейковий екіпаж з боку залізничної колії, та визначенню їх параметрів. Використання наведеної моделі дає змогу враховувати розкид статистичних характеристик цих збурень, який виникає внаслідок неоднорідності властивостей рейкового підложжя та мінливості збурюючих факторів. Алгоритм, що пропонується, призводить одночасно провадити ідентифікацію параметрів вертикальних збурень і моделі колії за експериментальними даними про прискорення буксових вузлів екіпажів у широкому діапазоні частот (від 0 до 100 Гц). Отримані аналітичні залежності параметрів моделей збурень та колії від низки зовнішніх факторів були використані при теоретичному дослідженні динаміки рейкових екіпажів.

Впровадження результатів роботи. Результати проведених в даній роботі досліджень увійшли складовими частинами в проєкт керівних технічних матеріалів (ПРТМ-86) "Методика рішення задач случайных

колебаний вагонов на ЭВМ и расчет динамических нагрузок, действующих на элементы конструкции вагона", а також стали основою для розробки розділу нової редакції галузевого стандарту ОСТ 24.050.4Т-80.

Апробація роботи. Основні положення роботи доповідались та обговорювались на Всесоюзних (1984, 1988) та Міжнародній (1996) конференціях "Проблемы механики железнодорожного транспорта" (Дніпропетровськ), IV Всесоюзній конференції "Автоматизация поискового конструирования и подготовка инженерных кадров" (Волгоград, 1987), регіональній конференції "Измерение характеристик случайных сигналов с применением микроаппаратных средств" (Новосибірськ, 1988), науково-технічній конференції молодих вчених ІТМ АН УРСР (1986), наукових семінарах відділу статистичної динаміки транспортних засобів ІТМ НАН України (1983-1996).

Публікації. За матеріалами дисертації опубліковано 9 друкованих робіт.

Структура та обсяг роботи. Робота викладена на 148 сторінках машинописного тексту, в тому числі малюнки та таблиці на 48 сторінках, і складається з вступу, п'яти глав, заключення, списку використаних літературних джерел з 131 найменування та додатку на 7 сторінках.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми та приведено коротку анотацію роботи.

У першій главі проведено короткий огляд робіт, присвячених дослідженням взаємодії рейкових екіпажів та колії, а також опису і визначенню збурень, що діють з боку колії на екіпажі, що рухаються; викладено сучасний стан питання; обґрунтовано вибір напрямку досліджень та сформульовано основні задачі роботи.

В огляді відмічено, що теоретичні основи методів дослідження взаємодії рухомого складу та колії базуються на загальних методах

розв'язання задач динаміки механічних систем, розвиток яких стосовно залізничного транспорту розпочато в роботах таких відомих вчених як А.М.Годицький-Цвірко, В.А.Лазарян, Г.Мар'є, М.П.Петров, С.П.Тимошенко. Вдосконалення залізничного транспорту, зокрема вирішення проблеми підвищення швидкості руху, зумовило появу великої кількості досліджень, присвячених вивченню динамічних якостей екіпажу та процесів його взаємодії з рейковим підложжям. Цим питанням присвячені роботи вчених ВНДІЗТу, МІІТу, ВНДІВу, ЦКБТМ, ХІІТу, ВМІ, ЛІІЗТу та ін. Значного розвитку теорії і практики експерименту в галузі рухомого складу та колії досягнуто завдяки роботам академіка В.А.Лазаряна і створеної ним школи вчених-механіків, які працюють у ДІІТі та ІТМ НАН України.

Одним з основних факторів, що визначають характер взаємодії рухомого складу та колії, є збурення від рейкової колії. Їх особливості та мінливість на різних ділянках залізниць доводиться враховувати при виконанні розрахунків динамічної навантаженості рухомого складу, розглядаючи спільні коливання системи "екіпаж - колія". Ці коливання спричиняються багатьма факторами, більшість з яких має випадковий характер. Саме це визначає складності побудови математичної моделі збурення. Досить ефективним при розв'язанні цієї задачі виявилось використання методів статистичної динаміки.

При урахуванні випадкового характеру зовнішніх збурень дослідниками розглядалися різноманітні збуджуючі фактори, причому більшість авторів справедливо вважає, що як збурення необхідно використовувати не геометричні, а динамічні нерівності, що утворюються в процесі руху екіпажу по колії, яка деформується. Експериментальні дослідження коливань у широкому діапазоні частот (до 100 Гц) показали, що у записах прискорень присутні складові з частотами, які дорівнюють частотам власних коливань колісної пари на колії. Тому при побудові математичної моделі збурень для дослідження коливань екіпажу в цьому частотному діапазоні треба брати до уваги

вплив параметрів колії та оцінювати їх значення поряд з параметрами збурень.

Збурення, які діють на рейковий екіпаж з боку колії, можна задавати одним з двох способів. Перший спосіб складається у використанні вибіркових реалізацій випадкового процесу. Він вимагає великого обсягу пам'яті ЕОМ і не може охопити усього різноманіття процесу збурення. Другий спосіб передбачає побудову аналітичних виразів основних статистичних характеристик випадкових процесів збурень за експериментальними даними. Він значно більш зручний у використанні, але, хоча в літературі мається досить багато прикладів апроксимації експериментальних даних, потребує подальшого вдосконалення та уточнення. Крім того, аналітичні вирази, що пропонуються, використовуються, як правило, для дослідження низькочастотних (до 10 Гц) коливань рейкових екіпажів. Часто цього буває достатньо для вивчення коливань пасажирських та вантажних вагонів. Але при проектуванні спеціалізованих транспортних засобів, призначених для перевезення вантажів, чутливих до високочастотних вібрацій, стає необхідним теоретичний аналіз динаміки системи "залізнична колія транспортний засіб вантаж" у більш широкому діапазоні частот, який охоплює область резонансних коливань колісної пари на колії. Розв'язання даної задачі потребує опису збурень у діапазоні від 0 до 100 Гц і більше. При цьому повинні бути одночасно оцінені параметри математичних моделей збурень та колії.

Щодо способів розв'язання задач математичного моделювання коливань та збурень у системі "екіпаж колія", то найбільш перспективним тут здається напрямок, що намітився в останній час і базується на використанні методів ідентифікації процедури побудови оптимальної в певному розумінні математичної моделі об'єкту за експериментальними записами вхідних та вихідних процесів. Математичними моделями механічних систем, що досліджуються, звичайно бувають рівняння, які описують їх рух, аналітичні вирази їх

частотних характеристик (ЧХ), передаточних або імпульсних перехідних функцій.

При розв'язанні задачі ідентифікації збурень в системі "транспортний засіб колія" звичайно використовуються дані, що отримуються в процесі експериментів:

1) реалізації перемішень, швидкостей чи прискорень деяких точок досліджуваної конструкції або зусиль, які виникають в окремих її елементах;

2) значення частотних характеристик досліджуваної системи.

Проведений аналіз робіт, присвячених питанням побудови математичних моделей збурень, які діють на рухомий склад залізниць з боку колії, та ідентифікації параметрів розрахункових схем рейкових екіпажів, дозволив виділити низку задач, розв'язанню яких слід приділити особливу увагу. До таких недостатньо вивчених питань належать побудова математичної моделі вертикальних збурень рейкових екіпажів у діапазоні частот від 0 до 100 Гц, дослідження впливу на рівень збурень у системі "екіпаж колія" неоднорідності характеристик залізничної колії, осьового навантаження, сезонних умов і деяких інших факторів. Особливий інтерес становить визначення закону розподілення оцінок статистичних характеристик збурень, який має місце за умов експлуатації, тобто при русі поїздів по шляху різного типу та стану. Ці дані необхідні для більш надійного математичного моделювання вібронавантаженості окремих вузлів транспортного засобу та вантажу, що ним перевозиться.

У другій главі наведено математичну модель вертикальних збурень у системі "екіпаж колія", яка враховує розкид статистичних характеристик цих збурень на різних ділянках шляху, та описано процедуру визначення за експериментальними даними оцінок параметрів не тільки самих збурень, але й залізничної колії.

При побудові математичних моделей збурень, які діють на екіпажі з боку залізничної колії, практично є змога явно врахувати вплив лише



частини збурюючих факторів (швидкості руху, навантаження на вісь, типу і стану колії, сезонних умов). Вплив решти факторів оцінюється інтегрально - шляхом визначення розкиду статистичних характеристик випадкових процесів, що приймаються як збурення. У вертикальному збуренні  $\eta(t)$ , яке діє на рейковий екіпаж з боку колії, виділено низку складових  $\eta_i(t)$ , а повне збурення  $\eta(t)$  являє собою їх суму. Вважаючи окремі складові процесу збурення некорельованими, його спектральну густину  $S_\eta(\omega)$  записуємо у вигляді суми спектральних густин окремих доданків  $S_{\eta_i}$ .

При постійній швидкості руху екіпажу по однорідній дільниці шляху дисперсії прискорень, швидкостей або переміщень окремих його точок лишаються практично незмінними. Мало змінюється при цьому й частотний склад цих процесів, тобто їх спектральна густина. Однак при переході від однієї дільниці шляху до іншої згадані вище статистичні характеристики коливань змінюються досить суттєво. Тому становить інтерес побудова моделі збурень, яка дозволяє надійно оцінювати розкид статистичних характеристик даного процесу. Такими характеристиками, що однозначно визначають випадковий процес збурення у системі "рейковий екіпаж - колія", є спектральна густина та закон розподілення його миттєвих значень.

Для опису розкиду оцінок спектральних густин збурень, який виникає внаслідок мінливості збурюючих факторів під час руху екіпажу з заданою постійною швидкістю по різних дільницям залізниць, використано такий вираз:

$$\tilde{S}_\eta(\omega) = (\xi_0 + \xi(\omega)) \bar{S}_\eta(\omega) \quad (1)$$

де  $\tilde{S}_\eta(\omega)$  - вибіркова (поточна) оцінка спектральної густини процесу збурення  $\eta(t)$  при заданій швидкості руху;  $\xi_0$  - випадкова величина, яка визначає розкид дисперсій окремих реалізацій процесу

$\eta(t)$ ;  $\xi(\omega)$  - центрована випадкова функція частоти  $\omega$ , яка визначає зміну форми (виду) спектральної густини процесу  $\eta(t)$  на різних дільницях шляху;  $\bar{S}_\eta(\omega)$  - обґрунтована оцінка спектральної густини, що визначається в результаті осереднення всієї множини вибірових оцінок, обчислених при заданій швидкості руху екіпажу  $V$

Для опису випадкової величини  $\xi_0$  використане її статистичне розподілення. Реалізації випадкової функції  $\xi(\omega)$  були обчислені за експериментальними даними таким чином:

$$\xi^{(j)}(\omega) = (\tilde{S}_\eta^{(j)} - \bar{S}_\eta(\omega)) / \bar{S}_\eta(\omega) \quad (2)$$

і потім центровані. Характер змінення функції  $\xi(\omega)$  описаний спектральною густиною та законом розподілення її ординат. У тих випадках, коли форма спектральної густини  $\tilde{S}_\eta(\omega)$  на різних дільницях шляху змінюється мало, складовою  $\xi(\omega)$  у формулі (1) можна зневажити.

Обґрунтовану оцінку спектральної густини  $\bar{S}_\eta(\omega)$  змодельовано у вигляді

$$\bar{S}_\eta(\omega) = c_0 \omega^{-4} + c_2 \omega^{-2}, \quad (3)$$

де  $c_0$  та  $c_2$  - інтенсивності білого шуму по прискоренню та швидкості відповідно. Ці параметри розрізняються для різних екіпажів та умов експлуатації і повинні бути визначені методами ідентифікації.

В разі побудови математичних моделей збурень у широкому діапазоні частот найбільш інформативними процесами є вертикальні прискорення буксових вузлів, тому найчастіше вимірюють саме їх.

При дослідженні вертикальних коливань рейкових екіпажів звичайно використовують плоскі розрахункові схеми, припускаючи, що: нерівності по обом рейковим ниткам однакові, взаємним впливом сусідніх колісних пар через підложжя можна зневажити, контакт колеса з рейкою не порушується, а вертикальні траєкторії буксових вузлів

повторюють одна одну з транспортним запізнюванням. Рейкове підложжя моделюється одномасовою системою з постійними значеннями приведеної маси  $m_n$ , жорсткості  $k_n$  та коефіцієнту демпфірування  $\beta_n$  або балкою, що лежить на пружному підложжі. При такому підході прогини колії, викликані її нерівнопружністю, враховуються еквівалентною нерівністю  $\eta$ . У роботі розглянуті також окремі випадки, коли зазначені припущення не вводяться.

При заданому аналітичному виразі спектральної густини збурення задача обчислення значень параметрів збурень та колії зведена до мінімізації функції

$$I = I(\hat{S}_v(\omega) - S_v(\omega, \alpha_o, \alpha_n)), \quad (4)$$

де  $\hat{S}_v(\omega)$  - оцінка спектральної густини вимірюваного вертикального прискорення буксового вузла;  $S_v(\omega, \alpha_o, \alpha_n)$  - відповідна оцінка для моделі;  $\alpha_o, \alpha_n$  - вектори параметрів збурень та колії;  $\ddot{v}$  - вертикальне прискорення буксового вузла.

Описаний спосіб дає змогу провадити оцінку параметрів моделі вертикальних збурень, які діють на рейковий екіпаж з боку колії, за експериментальними записами прискорень (швидкостей, переміщень) буксового вузла та апіорним даним про параметри математичної моделі екіпажу. Одночасно з цим оцінюються параметри моделі колії. За результатами розв'язання даної задачі для різноманітних умов експлуатації (різних ділянок залізниць, типів екіпажів, сезонних умов) у наступних главах оцінено вплив зазначених факторів на характер збурень і дані рекомендації для вибору значень цих параметрів.

Третя глава присвячена дослідженню амплітудно-частотних характеристик (АЧХ) тракту "нерівність колії - вертикальне переміщення колеса". При цьому проаналізовано вплив на АЧХ нерівнопружності, нелінійності та розподільних властивостей підложжя.

Однією з причин коливань, що супроводжують рух залізничного екіпажу, є нерівнопружність рейкової колії за її довжиною. Дослідження АЧХ тракту "нерівність колії - переміщення колеса" з урахуванням нерівнопружності підложжя проведені на прикладі механічної системи, яка моделює вертикальні коливання колісної пари при її рухові по інерційній пружнов'язкій колії з нерівностями. АЧХ тракту "нерівність колії - колесо" розглядаються за різних способів задавання збурень. Для гармонічного збурення отримано аналітичне розв'язання рівняння руху методом послідовних наближень і приведені значення амплитуд окремих складових на четвертій ітерації. В зв'язку із громіздкістю подальших обчислювань аналіз частотних складових проведено шляхом спектрального аналізу чисельного розв'язання диференційного рівняння коливань колії.

Побудовано та проаналізовано графіки АЧХ тракту "нерівність колії - вертикальне переміщення колеса" при полігармонічному та випадковому збуреннях. Ефективним при цьому виявилось використання способу перетворюючого оператора. В усіх розглянутих випадках найбільша різниця АЧХ систем з перемінними параметрами і постійними, що дорівнюють їх середнім значенням, мала місце в резонансній області, зумовленій власною частотою коливань колісної пари на колії. Проте відмічено, що в деяких випадках можна підібрати таку систему з постійними параметрами, реакції якої будуть досить близькими до реакцій системи з перемінними параметрами в усьому частотному діапазоні, що нас цікавить.

Досліджено АЧХ тракту "нерівність колії - вертикальне переміщення колеса" за двох способів урахування розподільних властивостей підложжя. У першому випадку між колісними парами одного візка пасажирського вагону введено додатковий пружнодисипативний зв'язок. Взаємним впливом через підложжя колісних пар, що відносяться до різних візків, при цьому зневажаємо. Розрахункову схему вагону та колії у цьому випадку зображено на рис. 1.

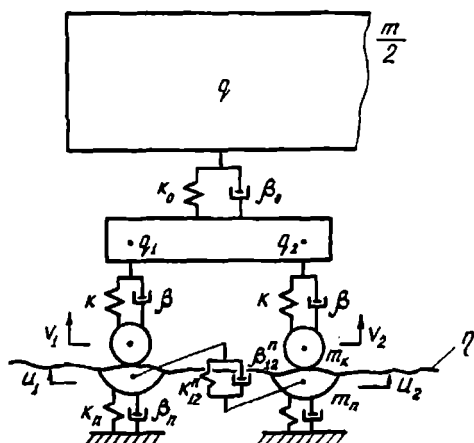


Рисунок 1 - Розрахункова схема пасажирського вагону та колії з додатковим пружнодисипативним зв'язком

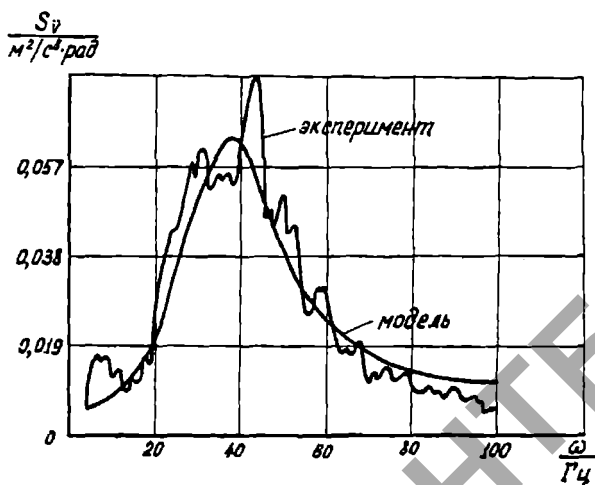


Рисунок 2 - Теоретична та експериментальна оцінки спектральної густини вертикального прискорення буксового вузла пасажирського вагону

Було побудовано та проаналізовано графіки АЧХ описаної системи за різних значень параметрів цього додаткового зв'язку і швидкості руху екіпажу. За допомогою алгоритму ідентифікації, що описаний у гл.2, визначені значення жорсткості  $k_n$  та коефіцієнту демпфірування колії  $\beta_n$ , а також додаткового зв'язку, що розглядається,  $k_{12}^n$  та  $\beta_{12}^n$ .

Показано, що, хоча значення  $k_{12}^n$  та  $\beta_{12}^n$  не перевищують 6% від відповідних значень параметрів моделі колії, введення додаткового зв'язку між колісними парами призводить до зближення графіків спектральних густин збурень, які одержані при використанні моделі, з експериментальними, особливо при частотах понад 50 Гц. Це дозволило зробити висновок, що введення додаткового пружнодисипативного зв'язку між колісними парами доцільно тоді, коли необхідно більш точно дослідити коливання екіпажу у високочастотній області.

У другому випадку розрахункова модель підрейкового підложжя взята у вигляді модифікованої вінклеровської моделі, що відображає його реальні інерційні властивості. При цьому колія моделювалась балкою нескінченної довжини, яка лежить на пружному підложжі з приєднаною масою. Наведено алгоритм ідентифікації параметрів моделей збурень та колії для такого типу розрахункової схеми. Одержано аналітичні розв'язання для елементів матриці ЧХ, необхідні для визначення невідомих параметрів: жорсткості балки при згині, маси, жорсткості та коефіцієнту демпфірування колії.

Досліджено АЧХ підрейкового підложжя у припущенні, що його жорсткість є нелінійною функцією прогину колії. Проаналізовано вплив статичного прогину на вид АЧХ та показано, що при дослідженні коливань колеса з використанням пружної нелінійної моделі підложжя значенням осевого навантаження в резонансній області можна зневажити. Одержано аналітичне розв'язання задачі побудови АЧХ при відсутності демпфірування (тобто при  $\beta_n = 0$ ) та чисельне при  $\beta_n \neq 0$ . Побудовані зони притягання резонансних та нерезонансних коливань,

які дозволяють обрати необхідні значення початкових умов при експериментальних дослідженнях АЧХ підрейкового підлюжжя в області багатозначності амплітуд сталих коливань.

У четвертій главі наводяться результати ідентифікації статистичних характеристик та параметрів математичної моделі вертикальних збурень, що діють на рейкові екіпажі з боку колії під час руху по дільницях шляху великої довжини та різного стану. Одночасно з параметрами моделі збурень визначались й параметри лінійної моделі колії. Оцінено вплив на ці параметри сезонних умов, осьового навантаження та будови колії.

Обчислено оцінки статистичних характеристик випадкової функції  $\xi(\varpi)$ , що описує зміну частотного складу вертикальних збурень рейкових екіпажів внаслідок неоднорідності властивостей та стану колії. З використанням алгоритму Райса-Пірсона побудовано математичну модель для обчислення поточних реалізацій цієї функції та одержано аналітичні вирази для визначення параметрів зазначеної моделі.

Для розв'язання задачі ідентифікації параметрів збурень та колії використано лінійну безінерційну модель колії з постійними для даної швидкості руху екіпажу значеннями жорсткості  $k_n$  та коефіцієнту демпфірування  $\beta_n$ . Ці значення визначаються одночасно з параметрами моделі колії за допомогою алгоритмів, що описані в гл.2. У процесі розв'язання задачі ідентифікації у кожному випадку з використанням побудованої математичної моделі обчислювались оцінки спектральної густини вертикальних прискорень буксових вузлів та порівнювались з експериментальними даними. Приклад такого порівняння наведено на рис.2.

Для визначення впливу сезонних умов на рівень збурень у системі "екіпаж колія" порівнювались оцінки параметрів, отриманих за результатами ходових динамічних випробувань однотипних рейкових екіпажів, які проводились літом, в середині зими (за температури  $t =$

$-10^{\circ}\text{C}$   $-45^{\circ}\text{C}$  на колії, що сильно промерзла; такі умови назвемо "суворою зимою") та в кінці зими (за температури  $t = -3^{\circ}\text{C} \dots +3^{\circ}\text{C}$  на колії, що не відтала; будемо казати, що це "м'яка зима"). Порівнюючи одержані при цьому оцінки параметрів, слід зазначити, що значення жорсткості колії збільшується в зимових умовах порівняно з літніми: у 1,1 рази для м'якої зими та у 3 рази для суворой. Значення коефіцієнту демпфірування зимою також збільшується: у 1,6 рази для м'якої зими та у 2,5 рази для суворой. Відмічено також збільшення значень параметрів моделі збурень  $c_0$  та  $c_2$  з виразу (3) в зимових умовах порівняно з літніми.

Оцінено вплив верхньої будови колії на значення параметрів моделей збурень та колії. При цьому можливі типи колії були умовно розбиті на дві групи: стикова колія з дерев'яними шпалами та безстикова колія із залізобетонними шпалами. Аналіз отриманих результатів показав збільшення рівня збурень на дільницях колії з дерев'яними шпалами порівняно із залізобетонними та збільшення жорсткості і коефіцієнту демпфірування на дільницях із залізобетонними порівняно з дерев'яними (у 1,4-1,7 рази відповідно).

Порівняння оцінок параметрів моделей збурень та колії для різних типів вагонів дозволило зробити висновок про те, що їх значення істотно залежать від осьового навантаження, причому ця залежність є лінійною. Одержані аналітичні вирази, що описують цю залежність.

У п'ятій главі приведено результати оцінки вібронавантаженості рейкових екіпажів з урахуванням розкиду статистичних характеристик збурень середніх та максимальних значень дисперсій (спектральних густин) реакцій системи, а також статистичного розподілення їх значень в умовах експлуатації. На прикладі дослідження коливань восьмивісного вантажного вагону з осьовим навантаженням  $P = 210\text{ кН}$  визначені статистичні характеристики вертикальних прискорень буксових вузлів, п'ятників двохвісних візків, п'ятників кузова вагону та проведено їх порівняння з відповідними експериментальними даними. При цьому



оцінені дисперсії та спектральні густини вертикальних прискорень, а також закон розподілення значень їх дисперсій, що змінюються внаслідок неоднорідності збурень. Одержані результати задовільно погоджуються з даними експерименту.

У додатку наведено текст програми моделювання спектральних густин вертикальних збурень, що діють на рейкові екіпажі з боку колії, складеної з використанням алгоритмів, які описані в цій роботі.

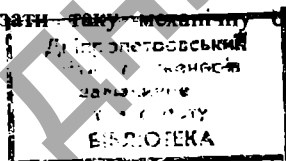
## ЗАКЛЮЧЕННЯ

Проведені дослідження дали такі основні результати:

1. З використанням експериментальних даних про вертикальні прискорення буксових вузлів, що одержані при ходових динамічних випробуваннях рейкових екіпажів на різних ділянках залізниць, визначені статистичні характеристики вертикальних збурень та параметри лінійної безінерційної моделі колії. Оцінено статистичні характеристики випадкової функції, яка описує змінення частотного складу вертикальних збурень рейкових екіпажів внаслідок неоднорідності властивостей та стану колії. Побудовано математичну модель для обчислення поточних реалізацій цієї функції з використанням алгоритму Райса-Пірсона і отримано аналітичні вирази для визначення параметрів цієї моделі.

2. Оцінено значення параметрів моделей збурень та колії для різних сезонних умов, осьових навантажень, швидкостей руху екіпажу, типів підрейкового підложжя. Одержано аналітичні вирази, які описують вплив цих факторів на параметри збурень та колії і проведено їх порівняння з аналогічними результатами інших авторів.

3. Побудовано АЧХ тракту "нерівність колії - вертикальне переміщення колеса" при гармонічному, полігармонічному та випадковому збуреннях для перемінної по довжині жорсткості колії і проаналізовано вплив нерівнопружності колії на вигляд АЧХ. Показано, що у деяких випадках можна вказати таку механічну систему з



постійними параметрами, реакції якої на збурення будуть досить близькими до реакцій системи з перемінними параметрами.

4. Розроблено алгоритми визначення АЧХ тракту "нерівність колії вертикальне переміщення колеса" для двох моделей колії, які дозволяють враховувати взаємний вплив сусідніх колісних пар через підложжя. Розв'язано задачу ідентифікації параметрів пружнодисипативного зв'язку між колісними парами через підложжя. Проведено порівняння параметрів моделі колії, визначених з урахуванням та без урахування такого зв'язку. Показано, що введення додаткового пружнодисипативного зв'язку між колісними парами доцільно у тих випадках, коли необхідно детальне дослідження спектрального складу коливань при частотах понад 50 Гц.

5. Одержано АЧХ для прогинів колії при використанні нелінійної моделі підрейкового підложжя. Проаналізовано вплив статичного прогину на вигляд АЧХ і показано, що у деяких випадках при дослідженні вертикальних коливань колеса на пружному нелінійному підложжі впливом осьового навантаження можна зневажити. Задача побудови АЧХ при відсутності демпфірування розв'язана аналітично.

6. Проведено дослідження вібронавантаженості восьмивісного вантажного вагону з урахуванням розкиду статистичних характеристик збурень і отримано оцінки інтервалів зміни спектральних густин реакцій системи та закону розподілу їх середньо-квадратичних відхилень в умовах експлуатації. Використаний підхід дає змогу істотно зменшити обсяг обчислень порівняно з методом статистичних випробувань. Показано, що одержані при цьому результати задовільно погоджуються з експериментальними даними.

Основний зміст дисертації опубліковано у таких роботах автора:

1. К вопросу о колебаниях колеса при движении по неравноупругому пути с неровностями // Проблемы динамики и прочности ж.-д.

- подвижного состава. Днепропетровск: ДИИТ. 1984. С. 97-102. (Співавтор Редько С.Ф.).
2. Исследование частотных характеристик тракта "неровность пути колесо" с переменными параметрами // Проблемы механики ж.-д. транспорта. Тезисы докладов Всесоюзной конференции. Днепропетровск: ДИИТ, 1984. (Співавтор Редько С.Ф.).
3. Идентификация моделей возмущений и колебаний системы "экипаж - путь" // Автоматизация поискового конструирования и подготовка инженерных кадров. Тезисы докладов IV Всесоюзной конференции. Волгоград, 1987. (Співавтори Ушкалов В.Ф., Редько С.Ф., Бояринцева Л.П.).
4. Применение вероятностных методов для описания возмущений и колебаний системы "экипаж путь" // Измерение характеристик случайных сигналов с применением микромашинных средств. Тезисы докладов региональной конференции. - Новосибирск, 1988. (Співавтори Ушкалов В.Ф., Редько С.Ф., Бояринцева Л.П.).
5. Об оценке вибронагруженности вагонов с учетом разброса статистических характеристик возмущений // Проблемы механики ж.-д. транспорта. Тезисы докладов Всесоюзной конференции. Днепропетровск: ДИИТ, 1988. (Співавтори Ушкалов В.Ф., Редько С.Ф.).
6. Об идентификации вертикальных возмущений рельсовых экипажей с учетом взаимного влияния соседних колесных пар // Колебания и динамические качества ж.-д. подвижного состава. Днепропетровск: Изд. ДИИТ. - 1989. - С. 43-48. (Співавтор Редько С.Ф.).
7. Численное исследование частотных характеристик рельсового основания с учетом его нелинейности // Колебания сложных механических систем. Киев: Наук. думка, 1990. - С. 44-48. (Співавтор Редько С.Ф.).
8. Оценка вибронагруженности вагонов с учетом разброса статистических характеристик возмущений // Вестн. ВНИИЖТ. - 1990. - №2. - С. 30-33. (Співавтори Ушкалов В.Ф., Редько С.Ф.).

9. Идентификация параметров модели пути с учетом распределительных свойств основания // Проблемы механики ж.-д. транспорта. Тезисы докладов IX Международной конференции. Днепропетровск: ДИИТ, 1996. - С.125 (Співавтор Редько С.Ф.).

### **АННОТАЦИЯ**

Лапина Л.Г. Идентификация параметров вертикальных возмущений, действующих на рельсовые экипажи со стороны пути. Рукопись. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.22.07 подвижной состав железных дорог и тяга поездов. Днепропетровский государственный технический университет железнодорожного транспорта, Днепропетровск, 1997.

Защищается работа, посвященная определению параметров случайных вертикальных возмущений, действующих на рельсовый экипаж со стороны железнодорожного пути в широком диапазоне частот, и самого пути в различных условиях эксплуатации. С использованием предложенных математических моделей и алгоритмов идентификации исследовано влияние на возмущения в системе "экипаж - путь" неоднородности характеристик и состояния пути, осевой нагрузки, сезонных условий, скорости движения. Полученные аналитические зависимости параметров моделей возмущений от указанных внешних факторов использованы при теоретическом исследовании динамики рельсовых экипажей.

Ключевые слова: ідентифікація параметрів, вертикальні збурення, рейкові екіпажі, колія, статистичні характеристики, збурюючі фактори.

### **ABSTRACT**

Lapina L.G. Identification of parameters of track-induced vertical disturbances acting on rail vehicles. Manuscript. Thesis for degree of candidate of technical sciences on 05.22.07 speciality Railway rolling stock

and train traction. - Dniepropetrovsk State Technical University of Railway Transport, Dniepropetrovsk, 1997.

Thesis on determination of parameters of random vertical track-induced disturbances acting in a wide frequency range on rail vehicle as well as the parameters of the track itself in various operational conditions is defended. The effect of the characteristics nonuniformity and state of the track, axle load, season conditions and motion speed on the disturbances in "vehicle-track" system was studied using the proposed mathematical models and algorithms of simultaneous identification. The obtained analytical dependences of the parameters of disturbances and track models on a number of external factors were used to study theoretically the rail vehicles dynamics.

Лапіна Людмила Григорівна

**ІДЕНТИФІКАЦІЯ ПАРАМЕТРІВ ВЕРТИКАЛЬНИХ ЗБУРЕНЬ, ЯКІ  
ДІЮТЬ НА РЕЙКОВІ ЕКІПАЖІ З БОКУ КОЛІЇ**  
05.22.07 - Рухомий склад залізниць та тяга поїздів

Підписано до друку 9.03.97. Формат 60х84 1/16. Папір для  
розмножувальних апаратів. Друк офсетний. Ум. друк. арк. 1,1. Обл.-вид.  
арк. 1,2 Зам. 1/. Тираж 100 примірників. Безкоштовно.

ГНПП "Системные технологии"  
320635, Днепропетровск, пр.Гегарина, 4