

\bookfoldsheets20
УКРАЇНСЬКА ДЕРЖАВНА АКАДЕМІЯ
ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ

Сапронова Світлана Юрїївна

УДК 629.4.014: 625.1.03

**РОЗРАХУНОК ХАРАКТЕРИСТИК ПОПЕРЕЧНИХ
КОЛИВАНЬ ЗАЛІЗНИЧНИХ ЕКІПАЖІВ З УРАХУВАННЯМ
ДВОТОЧКОВОГО КОНТАКТУВАННЯ
КОЛІС ІЗ РЕЙКАМИ**

Спеціальність 05.22.07 – Рухомий склад залізниць та тяга поїздів

Автореферат

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано на кафедрі “Залізничний транспорт” Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля, Міністерство освіти і науки України.

Науковий керівник - доктор технічних наук, професор
ГОЛУБЕНКО Олександр Леонідович,
Східноукраїнський національний університет
імені Володимира Даля, завідувач кафедри
“Залізничний транспорт”, ректор університету.

Офіційні опоненти: - доктор технічних наук, професор
КОРОТЕНКО Михайло Леонідович,
Дніпропетровський національний технічний
університет залізничного транспорту, кафедра
“Теоретична механіка”, професор;

- кандидат технічних наук, доцент
КРАМАР Микола Максимович,
Східноукраїнський національний університет
імені Володимира Даля, декан факультету
математики та інформатики.

Провідна установа - Київський університет економіки і технологій
транспорту, кафедра “Рухомий склад залізниць”,
Міністерство транспорту України.

Захист відбудеться 29 травня 2003р. об 11-00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д64.820.04 Української державної академії залізничного транспорту за адресою: 61050, м. Харків, пл. Фейєрбаха, 7.

З дисертацією можна ознайомитися у науковій бібліотеці Української державної академії залізничного транспорту за адресою: 61050, м. Харків, пл. Фейєрбаха, 7.

Автореферат розісланий 24 квітня 2003р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

Бабанін О.Б.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Вступ. Залізничний транспорт за об'ємами вантажних та пасажирських перевезень займає провідне місце у транспортній системі України. Холдинговою компанією “Луганськтепловоз” – провідним підприємством країни з проектування та виробництва рухомого складу залізниць – розроблено декілька варіантів дизель- та електро-поїздів (ДПЛ1, ДПЛ2, ДЕЛ01) для міжобласного сполучення із швидкостями до 100-120 км/г. Поставлено завдання створення швидкісного поїзду для руху до 150 км/г. Однією з серйозних наукових проблем при розв'язанні цієї задачі є проблема забезпечення задовільних динамічних показників екіпажів. Дослідження поперечних коливань рухомого складу пов'язане із науковою проблемою моделювання фрикційної взаємодії коліс із рейками. Для підвищення вірогідності розрахункових даних є доцільним удосконалення існуючих методик розрахунку характеристик поперечних коливань екіпажів та розробка методики моделювання фрикційної взаємодії екіпажу і пугі при гребеновому набіганні коліс на рейки.

Актуальність теми. Проектування нових типів рухомого складу, як звісно, пов'язане з великими об'ємами теоретичних і експериментальних досліджень та дослідно-конструкторських робіт. Враховуючи значну вартість експериментальних досліджень, зростання у зв'язку з цим витрат, пов'язаних із можливими помилками при виготовленні дослідних зразків, а також відсутність швидкісного експериментального полігону, особливу роль набувають попередні розрахунки характеристик горизонтальної поперечної динаміки рейкових екіпажів. Розробка адекватної математичної моделі фрикційної взаємодії коліс із рейками з урахуванням особливостей кінематики і динаміки двоточкового контактування значно б підвищила вірогідність розрахунків при теоретичних дослідженнях горизонтальної динаміки і зменшила б об'єми експериментальних досліджень та витрати на створення дослідних екземплярів і їх випробування. У зв'язку з цим тема роботи є актуальною.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Результати роботи використані на ХК "Луганськтепловоз", відповідно до державної програми розвитку залізничного транспорту України “Розвиток рейкового рухомого складу соціального призначення для залізничного транспорту та міського господарства” (рег.№02-02-104/01-99). Основні положення дисертації увійшли в НДР: "Розробка фізико-технічних основ вискоефективних систем і технологій транспорту" (№держ.рег. 0196U021047); "Наукові основи, концепція і теорія створення перспективних конструкцій транспорту з поліпшеними енергетичними і екологічними характеристиками" (№держ. рег.0196U021048).

Мета і задачі дослідження. Метою дисертаційної роботи є удосконалення методики розрахунку показників горизонтальних поперечних коливань

рейкових екіпажів на основі урахування особливостей двоточнової контактної фрикційної взаємодії коліс із рейками. Роботу виконано стосовно дизель-поїздів, що розробляються ХК “Луганськтепловоз”. Для досягнення поставленої мети визначені такі завдання досліджень:

- дослідження геометричних характеристик взаємодії колісних пар і рейкового путі для різних профілів поверхонь котіння;
- розробка математичної моделі зчеплення колеса із рейкою з урахуванням двоточкового контактування;
- порівняння можливостей високошвидкісного руху поїздів ДПЛ1, ДПЛ2 та ДЕЛ01;
- розрахунок характеристик горизонтальної динаміки для дослідного поїзда ДЕЛ01;
- обґрунтування шляхів поліпшення характеристик горизонтальної поперечної динаміки дизель-поїздів.

Об’єкт досліджень – поперечні коливання рейкових екіпажів при русі у прямих ділянках путі.

Предмет досліджень – розрахункові методики моделювання фрикційної динамічної взаємодії екіпажу і путі з урахуванням особливостей двоточкового контактування коліс і рейок.

Методи досліджень. Розв’язання наукової задачі виконано з використанням: теорії механізмів і машин, теоретичної динаміки механічних систем, теорії тертя, математичного моделювання, теорії систем звичайних диференціальних рівнянь, аналітичної геометрії, чисельних методів інтегрування, методів планування експерименту тощо.

Наукова новизна одержаних результатів:

- дістала подальший розвиток методика розрахунку показників горизонтальних поперечних коливань екіпажів з урахуванням кінематики та динаміки двоточкового контактування коліс із рейками;
- отримано нові залежності між параметрами руху екіпажів та параметрами контактування коліс із рейками, що враховують геометрію поверхонь котіння коліс і рейок та поперечну пружність рейкового путі;
- розроблено нову математичну модель розподілу динамічних та кінематичних параметрів двоточкового контактування між контактами, що базується на використанні у якості позиційного аргументу поперечних деформаційних зміщень рейкових ниток;
- одержано нові залежності між моментами впливу дотичних контактних сил зчеплення та тертя, що діють на колісні пари, і координатами центрів контактних плям.

Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій забезпечується: використанням апробованих методик складання

диференціальних рівнянь руху; зовнішніх функцій, що описують нелінійні зв'язки між елементами екіпажу, зокрема, характеристики повздовжнього і поперечного зчеплення коліс і рейок; стійкістю рішень систем диференціальних рівнянь за рахунок зменшення неоднорідності частот незалежних перемінних; задовільною збіжністю розрахункових результатів та експериментальних даних.

Наукове значення роботи полягає у подальшому розвитку та підвищенні вірогідності теоретичних методів дослідження характеристик горизонтальної динаміки рейкових екіпажів.

Практичне значення одержаних результатів дисертації складають:

- методика моделювання поперечних горизонтальних коливань та розрахунку їх характеристик, що дає можливість проводити попередні оцінки можливостей експлуатації екіпажів на певних швидкостях руху та порівнювати ефективність конструктивних рішень і вибору параметрів елементів екіпажної частини нового рухомого складу;

- методика математичного моделювання двоточкового контакту колеса із рейкою, що дозволяє проводити дослідження впливу форми профілів поверхонь котіння коліс та параметрів рейкового путі на рівень направляючих, бокових та рамних сил, як характеристик горизонтальної динаміки екіпажів;

- розрахункові характеристики горизонтальної динаміки дизель-поїзда ДЕЛ01, що дають можливість прогнозування рівня контактних сил при швидкостях руху до 50 м/с;

- характеристики впливу параметрів зв'язків кузова із візками та рам візків із колісними парами на показники горизонтальної динаміки дизель-поїздів, що дають можливість раціонального вибору вказаних параметрів.

Методику розрахунку характеристик поперечної горизонтальної динаміки та розрахункові динамічні характеристики дизель-поїздів ДПЛ1, ДПЛ2, ДЕЛ01 було використано у процесі розробки ходових частин дослідних екіпажів. Одержані наукові результати використовуються у навчальному процесі у розділах лекційних курсів, лабораторних роботах, курсовому та дипломному проектуванні, науково-дослідних роботах студентів.

Особовий внесок здобувача.

Всі положення і результати, які винесено до захисту, було отримано автором самостійно. Дві роботи здобувача [2, 3] опубліковано без співавторів.

Конкретний персональний внесок здобувача у працях, які опубліковано у співавторстві, полягає у наступному:

- складання розрахункової схеми, вивід математичних залежностей для кінематики і динаміки контактування коліс із рейками [1];

- вивід рівнянь для апроксимації профілів поверхонь котіння коліс і рейок, розробка методики розрахунку розподілу контактних сил між контактами

[4];

- розробка методики розрахунку розподілу параметрів контактування, яка основана на використанні поперечної деформації рейкових ниток, як позиційного аргументу [6];
- розробка алгоритму і програми розрахунку координат центрів контактів при двоточковому контактуванні [7];
- вивід математичних залежностей силової взаємодії у контактах коліс із рейками [8, 9];
- розробка способу вимірювання параметрів зчеплення, методики та програми досліджень [5, 10].

Апробація результатів роботи. Основні положення дисертації увійшли у доповіді автора на науково-технічних конференціях, симпозиумах і конгресах: "Забезпечення надійності вузлів тертя машин" (Ворошиловград-1988р.); "Проблеми механіки залізничного транспорту - Дніпропетровськ-1988р.); "Засоби діагностики технічних систем залізничного транспорту" (Омськ-1989р.); "Проблеми розвитку локомотивобудування" (Луганськ-1990р.; Крим-1993, 1995, 2000рр.); Науково-технічні конференції СНУ ім.В.Даля (Луганськ-1993-2003рр.). Завершена робота доповідалась на Між-кафедральному науковому семінарі "Рухомий склад залізниць та тяга поїздів" СНУ ім.В.Даля (Луганськ-2003р.) та розширеному засіданні кафедри "Управління технічною експлуатацією рухомого складу" за участю членів спеціалізованої вченої ради Д64.820.04 УкрДАЗТ (Харків-2003р.).

Публікації. По темі дисертації опубліковано у 11 наукових робіт, з яких: 1 брошура, 8 статей у наукових фахових виданнях (2 з них опубліковано без співавторів) та 2 доповіді на науково-технічних конференціях.

Структура і обсяг дисертації. Дисертація включає вступ, чотири розділи, висновки і складається із 138 сторінок тексту, 67 рисунків, 19 таблиць, списку використаних джерел з 158 найменувань і 23 сторінок додатків.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У ВСТУПІ показано актуальність тематики, обґрунтовано вибір об'єкту та предмету досліджень, подано загальну характеристику роботи.

РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ДОСЛІДЖЕНЬ В ОБЛАСТІ ВЗАЄМОДІЇ КОЛІС РУХОМОГО СКЛАДУ ІЗ РЕЙКАМИ. У відповідності до Державної програми розвитку рейкового рухомого складу соціального призначення ХК "Луганськтепловоз" створюється мотор-вагонний рухомий склад для між-обласного сполучення із швидкістю руху до 150 км/г. У рамках цієї задачі виділяється проблема, пов'язана з оцінкою впливу конструктивних рішень і параметрів зв'язків елементів екіпажів на безпеку і усталеність руху, комфорт, силовий вплив на путь, а також знос коліс і рейок. Для теоретичних досліджень

горизонтальних коливань екіпажів, тяглових властивостей локомотивів точне описання сил контактної взаємодії є дуже важливим.

Важливішими дослідженнями, що складають основу динаміки рейкового рухомого складу, як розділу механіки, є труди вчених: С.М.Андрієвського, Є.П.Блохіна, В.М.Богданова, Г.І.Богомаза, Г.П.Бурчака, М.В.Винокурова, С.В.Вершинського, Н.І.Григор'єва, О.Л.Голубенка, С.М.Голубятникова, Л.О.Грачової, В.Д.Дановича, Л.О.Длугача, Л.К.Добриніна, Ю.В.Дьоміна, А.С.Євстратова, Н.М.Єршової, В.Н.Іванова, І.П.Ісаєва, В.С.Іккола, І.К.Колесника, Н.О.Ковальова, М.Л.Коротенка, В.С.Коссова, М.Б.Кельріха, А.М.Крилова, Н.Н.Кудрявцева, С.С.Крепкогорського, А.І.Кокорева, О.М.Коняєва, Д.В.Львова, Л.А.Манашкіна, В.Г.Маслієва, Б.Д.Никифорова, Ю.І.Осеніна, А.П.Павленка, В.А.Пузанова, В.О.Певзнера, Н.П.Петрова, Н.О.Радченка, С.Ф.Редька, Л.М.Резникова, А.Н.Савоськіна, С.П.Тимошенка, В.П.Ткаченка, Е.Ю.Трубецького, В.Ф.Ушкалова, М.А.Фришмана, Х.Хеймана, В.Д.Хусидова, І.І.Челнокова, В.А.Шеваліна та інші.

Враховуючі особливості процесів зчеплення при двоточковому контактуванні, складність їх описання і недостатність досліджень, представляє інтерес розробка математичної моделі двоточкового контакту з урахуванням геометричних параметрів контактування, кінематики і динаміки двоточкового контакту і розподілу параметрів між контактами.

Аналіз попередніх досліджень та стан проблеми, що досліджується, дозволили сформулювати мету і задачі дисертації.

РОЗДІЛ 2. ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ДВОТОЧКОВОГО КОНТАКТУВАННЯ КОЛІС ІЗ РЕЙКАМИ. У розділі розглядаються умови існування і види контактів коліс із рейками: одноточкового по поверхням котіння; двоточкового та одноточкового гребеневого.

При аналізі та дослідженні геометрії поверхонь котіння коліс було розглянуто ряд профілів. У вигляді прикладу приведено апроксимуючі функції для профілів: “Хейман-Лоттер”; стандартний локомотивний – ДОСТ 9036 – 76; дослідний ДметІ; профіль депо Бельці; ВНДТІ. Для рейки розглядався профіль Р65. Задача про координати центрів контактних плям розв'язувалася у просторовій постановці з урахуванням відносних переміщень коліс і рейок: поперечного - Δu та кутового (кут набігання) - ψ . Завданням розрахунку параметрів контакту колеса з рейкою було отримання залежностей від Δu та ψ наступних величин: поперечних координат центрів контактів - u_{TKI}, u_{TKII} ; зміщення центру другого (II) контакту вздовж вісі $X - x_{TK}$; радіусів поверхонь котіння колеса - R_I, R_{II} та ухилів профілів - γ_I, γ_{II} у точках контактів (рис.1). Проведено дослідження форми та розмірів контактних плям при двоточковому контактуванні в залежності від розподілу вертикальних навантажень між контактами. Показано, що картина розподілу швидкостей ковзання при

контактуванні колеса з рейкою суттєво змінюється при розгляді його, як двоточкового.

Введено поняття еквівалентного радіусу колеса $R_{\text{э}}$, як теоретичного радіусу котіння без ковзання. Швидкості ковзання у I і II контактах визначаються за формулами:

$$V_I = \omega_k \cdot (R_{\text{э}} - R_I) = \omega_k \cdot \left(\frac{V_0}{\omega_k} - R_I \right) = V_0 - \omega_k R_I; \quad (1)$$

$$V_{II} = \omega_k \cdot (R_{II} - R_{\text{э}}) = \omega_k \cdot \left(R_{II} - \frac{V_0}{\omega_k} \right) = \omega_k R_{II} - V_0. \quad (2)$$

Рис.1. Залежності параметрів контактування від відносних зміщень Δu і ψ (колесо - ДОСТ 9036-76; рейка - Р65)

Ia – зона одноточкового контакту по поверхні котіння; II – зона двоточкового контакту; Ib – зона одноточкового гребеневого контакту.

а)

б)

Рис.2. Плани швидкостей ковзання для одноточкового (а) та двоточкового (б) контактування

На рис.2 показано плани швидкостей ковзання для випадків одноточкового та двоточкового контактування. K_0 - миттєвий центр обертання колеса; K_I, K_{II} - центри I і II контактів; \bar{V}_O - абсолютна швидкість центру колеса; $\bar{V}_{Ox}, \bar{V}_{Oy}$ - проєкції швидкості \bar{V}_O ; \bar{V}_I, \bar{V}_{II} - абсолютні швидкості ковзань колеса відносно рейки у I і II контактах (швидкості точок K_I, K_{II}); $\bar{V}_{Ix}^*, \bar{V}_{Iy}^*$ - проєкції швидкості \bar{V}_I на вісі системи координат колеса; $\bar{V}_{IIx}, \bar{V}_{IIy}, \bar{V}_{IIz}$ - проєкції швидкості \bar{V}_{II} на вісі абсолютної системи координат; $\bar{V}_{K_{II}K_0}^*, \bar{V}_{K_{II}K_0x}^*, \bar{V}_{K_{II}K_0z}^*$ - швидкість точки K_{II} відносно миттєвого центру обертання K_0 та її повздовжня і вертикальна складові у системі координат колеса; ψ - кут набігання колеса на рейку; θ - кут у вертикальній площині між векторами \bar{V}_{II} (абсолютна швидкість точки K_{II}) і \bar{V}_{IIx}^* (проєкція вектора повздовжньої складової абсолютної швидкості \bar{V}_{IIx} на вісь OX_k ; ϑ - кут між векторами відносної швидкості $\bar{V}_{K_{II}K_0}^*$ та її горизонтальної складової - $\bar{V}_{K_{II}K_0x}^*$.

Для побудови математичної моделі контактування було отримано вирази для контактних сил у залежності від позиційних та кінематичних параметрів руху екіпажу. Контактні сили діляться на дві групи: контактні сили опирання та фрикційні контактні сили.

Значення нормальних навантажень (N_I, N_{II}) та їх поперечних складових (U_I, U_{II}) у кожному з контактів залежать від розподілу вертикальних реакцій P_I, P_{II} між контактами.

$$N_I = P_I \sqrt{1 + \gamma_I^2}; \quad N_{II} = P_{II} \sqrt{1 + \gamma_{II}^2}; \quad (3)$$

$$U_I = P_I \cdot \gamma_I; \quad U_{II} = P_{II} \cdot \gamma_{II}, \quad (4)$$

Задача про розподіл вертикальних навантажень (P_I, P_{II}) між контактами

повинна вирішуватися з урахуванням сумісних деформацій елементів системи. У якості позиційного аргументу цього перерозподілу було прийнято бокову деформацію (віджаття) рейкової нитки - Y_p . Рівняння рівноваги поперечних сил, які діють на рейку (рис.3) мають такий вигляд:

$$Ж_p \cdot Y_p = P_I \cdot \gamma_I + P_{II} \cdot \gamma_{II}, \quad (5)$$

де $Ж_p$ - приведена поперечна жорсткість рейкової нитки;

γ_I, γ_{II} - уклони профілю колеса у відповідних точках контактів.

Рівняння (5) дозволяє розрахувати перерозподіл реакцій між I і II контактами:

$$Y_p < Y_{p1} \Rightarrow P_I = P_0; \quad P_{II} = 0.$$

$$Y_{p1} < Y_p < Y_{p2} \Rightarrow \begin{aligned} P_I &= \frac{Ж_p \cdot Y_p - P_0 \cdot \gamma_{II}}{\gamma_I - \gamma_{II}}; \\ P_{II} &= \frac{Ж_p \cdot Y_p - P_0 \cdot \gamma_I}{\gamma_{II} - \gamma_I}. \end{aligned} \quad (6)$$

$$Y_p > Y_{p2} \Rightarrow P_{II} = P_0; \quad P_I = 0,$$

де Y_{p1}, Y_{p2} - віджаття рейки при переході від одноточкового контакту по поверхні котіння до двоточкового та від двоточкового до одноточкового гребеневого.

До фрикційних контактних сил віднесено сили зчеплення та тертя у контактах: $\bar{S}_I, \bar{S}_{Ix}, \bar{S}_{Iy}$ - сила зчеплення у I контакт і її повздовжня і поперечна складові; $\bar{S}_{Ix}^*, \bar{S}_{Iy}^*$ - повздовжня и поперечна складові сили зчеплення в I контакт і у системі координат колісної пари $O_k X_k Y_k Z_k$; $\bar{S}_{II}, \bar{S}_{IIx}, \bar{S}_{IIy}, \bar{S}_{IIz}$ - сили тертя у II контакт і її повздовжня, поперечна та вертикальна складові у абсолютній системі координат.

Фрикційні контактні сили у I і II контактах відрізняються за своєю природою. У I контакт і пересування колеса відносно рейки у повздовжньому напрямку має характер тертя котіння з проковзуванням (тертя зчеплення), тому:

$$S_{Ix}^* = N_I \cdot \psi_0 \cdot k_x. \quad (7)$$

Пересування колеса відносно рейки у поперечному напрямку у I контакт і близько до чистого ковзання. Сила зчеплення у поперечному напрямку описується характеристикою зчеплення:

$$S_{Iy}^* = N_I \cdot f_0 \cdot k_y. \quad (8)$$

Абсолютна сила зчеплення у I контакт і визначається як результуюча

повздожньої та поперечної складової:

$$\bar{S}_I = \bar{S}_{Ix}^* + \bar{S}_{Iy}^* . \quad (9)$$

Тертя у II контактї є тертям ковзання. Сила тертя описується законом:

$$S_{II} = N_{II} \cdot f_0 \cdot \mu . \quad (10)$$

де f_0 , f_0 – фізичний коефіцієнт зчеплення (тертя котіння) і коефіцієнт сухого тертя спокою; k_x, k_y – коефіцієнти використання зчеплення у повздожньому і поперечному напрямках; μ – коефіцієнт використання тертя.

На рис.4 показаний план фрикційних контактних сил для I і II контактів. Сила тертя у II контактї може бути розкладена на складові:

$$\bar{S} = \bar{S}_{Ix} + \bar{S}_{Iy} + \bar{S}_{IIx} + \bar{S}_{IIy} + \bar{S}_{IIz} . \quad (11)$$

де з рис.4:

$$\left\{ \begin{array}{l} S_{IIx} = S_{II} \cdot \cos\theta \cdot \cos\psi; \\ S_{IIy} = S_{II} \cdot \cos\theta \cdot \sin\psi; \\ S_{IIz} = S_{II} \cdot \sin\theta. \end{array} \right. \quad (12)$$

Рис.4. План фрикційних сил контактування колеса із рейкою

Значення повздожньої (S_x) и поперечної (S_y) складових фрикційних контактних сил, відповідно дорівнюють:

$$S_x = S_{Ix} + S_{IIx}; \quad S_y = S_{Iy} + S_{IIy} . \quad (13)$$

До позиційних та кінематичних параметрів руху екіпажу відносяться незалежні змінні, як узагальнені координати системи рівнянь руху.

Запропонована методика розрахунку розподілу параметрів контактування при двоточковому контактї колеса із рейкою дозволяє за рахунок використання віджаття рейки як позиційного аргументу підвисити однорідність змінних у системах рівнянь руху відносно порядку їх власних частот.

РОЗДІЛ 3. МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ВЗАЄМОДІЇ ЕКІПАЖІВ І ПУТІ ПРИ РУСІ В ПРЯМИХ. Розділ присвячений розробці математичних моделей руху дизель-поїздів ДПЛ1, ДПЛ2 и ДЭЛ01 у прямих ділянках путі з урахуванням двоточкового контактування коліс з рейками. Задачею моделювання є: розробка методики розрахунку характеристик горизонтальних поперечних коливань екіпажів; порівняння результатів розрахунку показників горизонтальної динаміки з експериментальними результатами; порівняння динамічних якостей розглянутих екіпажів при русі із швидкостями до 50 м/с;

отримання залежностей рівня поперечних динамічних сил від параметрів зв'язків елементів екіпажів та вибір їх раціональних значень для покращення показників горизонтальної динаміки.

Для головного вагона дизель-поїзда (тягової одиниці) ДПЛ1 прийнята схема секції тепловоза М62, яка включає 21 тверде тіло: кузов, 2 рами візків, 6 колісних пар та 12 дільниць рейок, контактуючих із колісними парами. Система має 34 ступені свободи. Для розрахункової схеми головного вагона дизель-поїзда ДПЛ2 прийнята схема секції тепловоза 2ТЕ116, яка складається із 21 елементу: кузов, 2 рами візків, 6 колісних пар та 12 дільниць рейок, контактуючих із колісними парами. Система має 36 ступенів свободи. Розрахункова схема для головного та причіпного вагонів дизель-поїзда ДЕЛ01 має 15 твердих тіл: кузов, 2 рами візків, 4 колісні пари і 8 дільниць рейок, контактуючих із колісними парами. Система має 26 ступенів свободи.

На основі рівнянь кінестатики Лагранжа складені системи диференціальних рівнянь руху розглянутих екіпажів. У рівняннях урахувалися характеристики нелінійних зв'язків буксового та кузовного підвищування: фрикційні контактні дотичні сили зчеплення і тертя; поперечні складові контактних сил опирання; крутильні моменти тяглових двигунів (при дослідженнях режиму тяги) або гальмові моменти (при дослідженнях гальмування); реакції зв'язку кузова з візками; повздовжні та поперечні реакції зв'язків колісних пар з рамами візків. Математичні описання зовнішніх сил і моментів увійшли у вирази узагальнених сил, що діють у напрямках відповідних координат.

На рис.5 показано схему поперечних складових сил зчеплення (I контакт), тертя (II контакт) та опирання:

$$Q(y_{(km)}) = \sum_{j=1}^2 \sum_{i=1}^{\Pi} (S_{(ijkm)y} + U_{(ijkm)}); \quad (14)$$

Рис.5. Схема узагальнених сил за координатами $y_{(km)}$

Узагальнені сили у напрямку кутових переміщень колісних пар у площині ОХУ - $\psi_{(km)}$ (рис.6) являють собою суму моментів:

$$Q(\psi_{(km)}) = \sum_{i=1}^{\Pi} (A_{(i1km)} S_{(i1km)x} - A_{(i2km)} S_{(i2km)x}). \quad (15)$$

Узагальнені сили у напрямку кутових обертів колісних пар навколо вісі $O_{k(km)} Y_{k(km)}$ - $\varphi_{(km)}$ (рис.7), представляють суму моментів:

$$Q(\varphi_{(km)}) = M_{(km)} - \sum_{i=1}^{\Pi} \sum_{j=1}^2 R_{(ijkm)} S_{(ijkm)x}^* \quad (16)$$

Рис.6. Схема узагальнених сил за координатами $\psi_{(km)}$

Рис.7. Схема узагальнених сил за координатами $\varphi_{(km)}$

Узагальнені сили за напрямками їх поперечних переміщень колісних пар - $Y_{p(jkm)}$:

$$Q(Y_{p(jkm)}) = \sum_{i=1}^{\Pi} (S_{(ijkm)y} + U_{(ijkm)}) \quad (17)$$

В якості критерію адекватності моделювання вибрані основні показники горизонтальної динаміки: рівень бокових, направляючих та рамних сил. Результати розрахунків порівнювалися з експериментальними даними динамічних випробувань дизель-поїзда ДЕЛ01, які були проведені ХК “Луганськтепловоз”. Як додаткові змінні використовувались: переміщення, швидкості, прискорення, частота та довжина хвилі виляння, пов’язані з обмеженнями обумовленими рейковою колією, які легше перевірити на проміжних етапах розрахунків.

Для підвищення адекватності моделювання у математичну модель введено описи зовнішніх функцій: експериментальних характеристик зчеплення, параметрів контактування з точним описанням геометрії робочих поверхонь коліс і рейок, координат точок контактів та ефективних ухилів профілів.

Розрахункові характеристики поділяються на кінематичні (амплітуди, частоти та довжини хвиль виляння колісних пар і візків) і динамічні (бокові і направляючі сили у контактах коліс з рейками та рамні сили).

Дослідження у часовій області, для яких побудована математична модель, дозволяють отримати залежності різних параметрів від часу: незалежних змінних, проміжних величин і критеріїв та провести їх аналіз числовим методом на екстремуми, частоту та інші.

РОЗДІЛ 4. ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ПАРАМЕТРІВ ХОДОВИХ ЧАСТИН ДИЗЕЛЬ-ПОЇЗДІВ НА ПОКАЗНИКИ ГОРИЗОНТАЛЬНОЇ ДИНАМІКИ У ПРЯМИХ ДІЛЯНКАХ ПУТІ. Інтегрування систем рівнянь для екіпажів, що досліджувались, виконувалось чисельним методом Хеммінга. Для розв’язання було використано компілятор з автоматичним коректуванням кроку інтегрування за заданою точністю.

При виборі початкових умов у вигляді обурення вводилися поперечні відхилення колісних пар, що набігають, а також горизонтальні нерівності рейкового путі. Моделювався рух з постійними швидкостями у діапазоні 10-50

м/с тривалістю 6 с, чого, як показали розрахунки, достатньо для переходу екіпажу в стійкий режим руху. При розв'язанні систем рівнянь прийняті критерії порівняльної оцінки динамічних якостей екіпажів: направляючі та бокові сили у контактах, рамні сили, віджаття рейок та критичні швидкості руху. Ураховуючи необхідність перевірки вірогідності моделей за результатами ходових випробувань, додатково розраховувались відносні поперечні та кутові переміщення візків і кузова та поперечні прискорення кузова. Було прийнято, що екіпаж є стійким, якщо після надання йому поперечного збурення можливий рух без дотику гребенів коліс до головок рейок.

Було отримано теоретичні залежності впливу параметрів опорно-повертаючого пристрою на динамічні показники екіпажу ДПЛІ. На рис.8 показано залежності довжини хвилі виляння екіпажу ДПЛІ від швидкості руху і повертаючого (M_{vo}) та демпфіруючого (M_{tr}) моментів повертаючого пристрою. На рис.9 показано залежність максимальних значень рамних сил (H_{max}) від швидкості руху (V) та параметрів опорно-повертаючого моменту. Як показують розрахунки, вплив параметрів повертаючого пристрою на показники горизонтальної поперечної динаміки екіпажу мають такі особливості. Підвищення повертаючого моменту M_{vo} у діапазоні 0-30 кН·м підвищує критичну швидкість руху, приблизно у 2,5 рази: з 17-20 м/с до 47-51 м/с. Збільшення M_{vo} від 0 до 30 кН·м приводить до зниження рівня направляючих (Y_{max}), бокових (Y'_{max}) та рамних сил (H_{max}) у зоні втрати усталення на 12-22%. Менш значний вплив на вказані параметри демпфіруючого моменту M_{tr} . При його збільшенні від 0 до 15 кН·м вказані сили знижуються на 5-16%. Збільшення демпфіруючого моменту у межах 0-15 кН·м, підвищує рівень критичної швидкості руху на 9-12%.

Рис.8. Залежності довжини хвилі виляння ($L(m)$) екіпажу ДПЛІ від швидкості руху і повертаючого (M_{vo}) та демпфіруючого (M_{tr}) моментів повертаючого пристрою: L1- при $M_{vo}=0$, $M_{tr}=0$; L2 - при $M_{vo}=10$ кН·м, $M_{tr}=0$; L3 - при $M_{vo}=10$ кН·м, $M_{tr}=7,5$ кН·м; L4 - при $M_{vo}=20$ кН·м, $M_{tr}=15$ кН·м.

Рис.9. Залежність максимумів рамних ($H_{max}(H)$) сил від швидкості руху: $H_{max1} - M_{vo}=0$; $H_{max2} - M_{vo}=10$ кН·м; $H_{max3} - M_{vo}=20$ кН·м; $H_{max4} - M_{vo}=30$ кН·м; $M_{tr}=0$.

На рис.10 представлено розрахункові мінімальні значення повертаючого і демпфіруючого моментів опорно-повертаючого пристрою, необхідних для досягнення певних рівнів критичної швидкості. Значення $M_{vo}=17,95$ кН·м та

$M_{tr}=13,8$ кН·м для серійної конструкції екіпажу ДПЛ1, можуть забезпечити усталений рух екіпажу до 41 м/с. Показано, що ефект повертаючого пристрою полягає, насамперед, у можливості підвищення критичної швидкості руху. Для зниження максимальних динамічних сил при втраті усталення повертаючий пристрій неефективний.

При дослідженні пружних зв'язків візків екіпажу ДПЛ2 аналізувались наступні параметри: повертаючий момент опорно-повертаючого пристрою (M_{vo}); жорсткість повздовжнього зв'язку колісних пар із рамою візка ($J_{\delta x}$); жорсткість поперечного зв'язку колісних пар із рамою візка ($J_{\delta y}$).

Рис.10. Мінімальні значення повертаючого (M_{vo} (кН·м)) и демпфіруючого (M_{tr}) моментів опорно-повертаючого пристрою для досягнення певних критичних швидкостей руху (V_{kr}): $M_{vo1} - M_{tr} = 0$; $M_{vo2} - M_{tr} = 7,5$ кН·м; $M_{vo3} - M_{tr} = 15$ кН·м

а)

б)

Рис.11. Максимальні відносні переміщення візків і кузова:

а) – поперечні ($y_{tmax}(m)$); б) – кутові ($p_{stmax}(рад)$); 1 – $G_{ex}=8$ МН/м; 2 – $G_{ex}=12$ МН/м; 3 – $G_{ex}=16$ МН/м; 4 – $G_{ex}=20$ МН/м.
($M_{vo}=17,6$ кН·м; $G_{ey}=4$ МН/м)

На рис.11 показано залежності максимумів поперечних (y_{tmax}) і кутових (p_{stmax}) відносних переміщень візків і кузова від повздовжньої жорсткості буксових поводків (G_{ex}) при $G_{ey}=4$ МН/м.

а)

б)

в)

Рис.12. Розрахункові та експериментальні залежності максимумів динамічних параметрів моторного навантаженого вагону ДЕЛ01 від швидкості руху: а) рамні сили; б) відносні поперечні переміщення першого візка і кузова; в) кутові переміщення візків відносно кузова.

Для перевірки вірогідності математичного моделювання було використано результати попередніх прийомочних ходових випробувань дизель-поїзда ДЕЛ01, проведених у 2002 р. випробувальним центром “Транссерт” Холдингової компанії “Луганськтепловоз”. На рис.12 представлено

експериментальні та розрахункові залежності динамічних параметрів ДЭЛО1 від швидкості руху. Розбіжність значень розрахункових та експериментальних параметрів на більшості режимів руху не перевищує 20-25%, що дає підставу вважати математичну модель адекватною, а результати, отримані на усіх режимах руху – вірогідними.

ВИСНОВКИ

Представлена автором робота відноситься до одного із пріоритетних напрямків розвитку транспорту – створення швидкісного залізничного пасажирського рухомого складу для міжобласного сполучення. Відповідно до мети роботи були виконані теоретичні дослідження кінематики і динаміки фрикційної взаємодії коліс і рейок. Основні наукові результати, висновки і рекомендації роботи сформульовані у наступному вигляді.

1. Запропоновано методику розрахунку геометричних характеристик контактування колісних пар і путі, як зовнішніх залежностей параметрів двоточкового контакту колеса і рейки від їх відносних координат.

2. Вдосконалено методику розрахунку показників горизонтальної поперечної динаміки екіпажів з урахуванням кінематики та динаміки двоточкового контактування коліс із рейками.

3. Вдосконалено математичну модель двоточкового контакту, за рахунок більш детального описання взаємодії колісних пар і путі, а саме:

4. запропоновано віджаття рейкової нитки використовувати, як позиційний аргумент при розрахунку розподілу параметрів контактування між контактами;

5. запропоновано при визначенні моментів виляння, що діють на колісні пари, ураховувати координати центрів контактів.

6. Запропонована математична модель дозволяє зменшити діапазон частот змінних систем рівнянь і забезпечити, завдяки цьому стійкість їх рішень.

7. Показано, що теоретичні дослідження динамічних властивостей екіпажів за межами стійкого руху повинні проводитися з обов'язковим врахуванням властивостей двоточкового контактування.

8. Задовільна збіжність теоретичних розрахункових характеристик горизонтальної динаміки і результатів випробувань дизель-поїзда ДЕЛО1 дає підставу вважати розроблену математичну модель фрикційної взаємодії колісних пар і путі адекватною і робить можливим її застосування для порівняльної оцінки рівня горизонтальних поперечних динамічних сил при русі екіпажу як у режимі вибігу, так і у режимах тяги чи гальмування.

9. Отримано залежності динамічних показників екіпажу ДПЛ1 та ДПЛ2 від параметрів опорно-повертаючого пристрою. Як показують розрахунки, збільшення повертаючого моменту у діапазоні 0-30 кН·м підвищує критичну швидкість руху приблизно у 2,5 рази: від 17-20 м/с до 47-51 м/с та приводить до зниження рівня направляючих, бокових та рамних сил у зоні втрати стійкості руху на 12-22%. При підвищенні демпфіруючого моменту від 0 до 15 кН·м

вказані сили знижуються на 5-16%, а критична швидкість руху зростає на 9-12%.

10. Залежність критичної швидкості руху від повздожньої жорсткості буксових зв'язків екіпажу ДПЛ2 має виражений максимум при жорсткості 6,2-6,6 МН/м.

11. Рівень рамних сил екіпажу ДЕЛ01 при втраті усталеності руху на 10-15% нижче, ніж для екіпажів ДПЛ1 і ДПЛ2.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ

1. Голубенко А.Л., Ткаченко В.П., Сапронова С.Ю. Кинематика двухточечного контактирования колеса с рельсом/ *Залізничний транспорт України/ Науково-практичний журнал*. - Київ, 1999.- №4.- С.13-14.
2. Сапронова С.Ю. Математическое описание контактных сил в системе “экипаж-путь” при исследовании горизонтальной динамики рельсовых экипажей// *Вісник Східноукр. нац. ун-ту. ім.В.Даля – Луганськ*, 2002.- № 12(58).– С.76-85.
3. Сапронова С.Ю. Распределение силовых и геометрических параметров при двухточечном контактировании колес железнодорожных экипажей с рельсами// *Вісник Східноукр. держ. ун-ту.* - Луганськ: СУДУ.- 1997.- №2(6).- С.205-207.
4. Сапронова С.Ю., Голубенко А.Л., Ткаченко В.П. Исследование геометрических параметров двухточечного контактирования колеса с рельсом// *Вісник Східноукр. нац. ун-ту. ім.В.Даля – Луганськ*, 2002.- № 6(52).- С.145-150.
5. Сапронова С.Ю., Мамушев А.М. Исследование фрикционных свойств контакта колеса с рельсом// *Системы и узлы перспективных тепловозов: Зб.наук.праць*, Київ, 1990.-С.27-29.
6. Сапронова С.Ю., Ткаченко В.П. Пространственная модель двухточечного контакта колеса с рельсом// *Вісник Східноукр. держ. ун-ту. – Луганськ*, 2000.- № 7(29).- С. 89-92.
7. Ткаченко В.П., Сапронова С.Ю. Геометрические параметры взаимодействия колесных пар рельсового подвижного состава и пути// *Вісник Східноукр. держ. ун-ту.*- Луганськ: СУДУ.- 1997.- № 6(10).- С.163-175.
8. Ткаченко В.П., Сапронова С.Ю. Путевое фрикционное сопротивление движению рельсовых экипажей/ *Брошура*. - Луганськ: СУДУ, 1999.- 25с.
9. Ткаченко В.П., Сапронова С.Ю. Сопротивление качению колеса по рельсу при наличии в контакте кварцевого песка // *Транспорт: зб.наук.праць Східноукр. держ. ун-ту.*- Луганськ, 1998.- С.59-66.
10. Голубенко А.Л., Ткаченко В.П., Сапронова С.Ю. Лабораторные исследования процесса сцепления колеса локомотива с рельсом/ *Проблемы развития локомотивостроения.*- Луганськ, 1990.- С.94.- (Тез. докл. Всесоюзн. конф.).
11. Tkachenko V., Sapronova S. Dynamic resistance to a movement of railway vehicles/ *Vibrations in physical systems// XVIIIth symposium-Poznan.*- 1998.- P.118.

АНОТАЦІЯ

Сапронова С.Ю. Розрахунок характеристик поперечних коливань залізничних екіпажів з урахуванням двоточкового контактування коліс із рейками - Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.22.07 - рухомий склад залізниць та тяга поїздів. - Східноукраїнських національний університет імені Володимира Даля, Луганськ, 2003р.

Дисертація присвячена теоретичним дослідженням, пов'язаним із створенням швидкісного залізничного пасажирського рухомого складу для міжобласного сполучення. Вдосконалено математичну модель двоточкового фрикційного контакту колеса із рейкою з урахуванням перерозподілу параметрів контактування між контактами та координат контактів. Запропоновано віджаття рейкової нитки використовувати, як позиційний аргумент при розрахунку перерозподілу параметрів контактування між контактами.

Задовільна збіжність теоретичних розрахункових характеристик горизонтальної динаміки і результатів випробувань дизель-поїзда ДЕЛ01 дає підставу вважати розроблену математичну модель взаємодії колісних пар і путі адекватною і робить можливим її застосування для порівняльної оцінки рівня характеристик горизонтальної динаміки при русі екіпажу, як у режимі вибігу, так і в режимі тяги та гальмування. Виконане теоретичне порівняння можливостей високошвидкісного руху поїздів ДПЛ1, ДПЛ2 та ДЕЛ01. Обґрунтовано шляхи поліпшення характеристик горизонтальної поперечної динаміки дизель-поїздів.

Ключові слова: рейковий екіпаж, колісні пари, контакт колеса із рейкою, проковзування, кінематика і динаміка фрикційної взаємодії, математичне моделювання, числові методи.

АННОТАЦИЯ

Сапронова С.Ю. Расчет характеристик поперечных колебаний железнодорожных экипажей с учетом двухточечного контактирования колес с рельсами. - Рукопись.

Дисертація на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.22.07 – подвижной состав железных дорог и тяга поездов. - Восточноукраинский национальный университет имени Владимира Даля, Луганск, 2003г.

Дисертація посвящена теоретическим исследованиям, связанным с созданием высокоскоростного железнодорожного пассажирского подвижного состава для межобластного сообщения. Выполнен обзор исследований горизонтальных динамических качеств экипажей. Анализ математических моделей контактирования колес с рельсами позволил сделать вывод о том, что теоретические исследования горизонтальной динамики экипажей за пределами устойчивого движения должны проводиться с обязательным рассмотрением особенностей двухточечного контактирования. Выполнен анализ условий существования и видов контактов: одноточечного по поверхности катания, двухточечного и одноточечного гребневого.

В усовершенствованной математической модели двухточечного фрикционного контакта колеса с рельсом, в отличие от известных, расчет перераспределения параметров контактирования между контактами основан на использовании в качестве позиционного аргумента отжатие рельсовой нити. В выражениях для моментов контактных сил, действующих на колесные пары в горизонтальной плоскости, учтены действительные координаты первого и второго контактов.

Выполнено исследование влияния характеристик упруго-диссипативных связей на динамические показатели экипажа. Были получены зависимости параметров опорно-возвращающего устройства и их влияние на динамические показатели экипажа ДПЛ1. Как показывают расчеты, повышение возвращающего момента в диапазоне 0-30 кНм повышает критическую скорость движения, приблизительно в 2,5 раза: с 17-20 м/с до 47-51 м/с и приводит к снижению уровня направляющих, боковых и рамных сил в зоне потери устойчивости движения на 12-22%. Увеличение демфирующего момента с 0 до 15 кНм указанные силы снижаются на 5-16% и повышает уровень критической скорости движения на 9-12%.

Зависимость критической скорости движения от продольной жесткости буксовых связей экипажа ДПЛ2 имеет выраженный максимум при жесткости 6,2-6,6 МН/м.

Удовлетворительная сходимость теоретических расчетных характеристик горизонтальной динамики и результатов поездных испытаний дизель-поезда ДЭЛ01 дает основание считать разработанную математическую модель взаимодействия колесных пар и пути адекватной и делает возможным ее применение для сравнительной оценки характеристик горизонтальной динамики при движении экипажа, как в режиме выбега, так и в режиме тяги и торможения.

Выполнено теоретическое сравнение возможностей высокоскоростного движения поездов ДПЛ1, ДПЛ2 и ДЭЛ01. Приведены рекомендации по выбору характеристик и параметров связей между элементами экипажа и обоснованы пути улучшения характеристик горизонтальной поперечной динамики дизель-поездов.

Ключевые слова: рельсовый экипаж, колесные пары, контакт колеса с рельсом, проскальзывания, кинематика и динамика фрикционного взаимодействия, математическое моделирование, численные методы.

SUMMARY

Sapronova S.U. Account of the characteristics of cross fluctuations of railway vehicle in view of point-to-point of wheels-rails contact. - Manuscript.

The dissertation on competition of a scientific degree of the candidate of engineering science on a specialty 05.22.07 - rolling stocks and train traction. – of Vladimir Dal's EastUkrainian national university, Lugansk, 2003 y.

The dissertation is devoted to theoretical researches connected to creation of the high-speed railway passenger rolling-stock for the interregional message. The review of researches of horizontal dynamic qualities of vehicle is executed. The analysis of mathematical models wheels-rails contact has allowed to make a conclusion that the theoretical researches of horizontal dynamics of vehicle outside a steady movement should be carried

out with obligatory consideration of features point-to-point contact.

In the advanced mathematical model point-to-point friction wheel-rail contact, as against known, the account of redistribution of parameters between contacts is based on use as item argument deformation of a rail. In expressions for the moments of contact forces working on wheel-set in a horizontal plane, the valid coordinates of the first and second contacts are taken into account.

The satisfactory convergence of the theoretical settlement characteristics of horizontal dynamics and results train-tests a diesel-train ДЭЛ01 gives the basis to consider the developed mathematical model of interaction of wheel pairs and ways adequate and makes possible its application for comparison purposes of characteristics of horizontal dynamics with a movement of vehicle. The theoretical comparison of opportunities of a high-speed movement of trains ДПЛ1, ДПЛ2 and ДЭЛ01 is executed. The recommendations are given at the choice of the characteristics and parameters of communications between elements of vehicle and the ways of improvement of the characteristics of horizontal cross dynamics a diesel-train are reasonable.

Key words: rail vehicle, wheel pairs, wheel-rail contact, kinematical and dynamics friction of interaction, mathematical modeling, numerical methods.

Сапронова Світлана Юріївна

Розрахунок характеристик поперечних коливань
залізничних екіпажів з урахуванням двоточкового
контактування коліс із рейками

Спеціальність 05.22.07 – Рухомий склад залізниць та тяга поїздів

Автореферат

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Надруковано згідно з оригіналом автора

Відповідальний за випуск

д.т.н., проф. Бабанін О.Б.

Підписано до друку 22.04.2003

Формат 60x84 1/16. Папір для розмножувальних апаратів.

Друк офсетний. Умов. друк. арк. 0,8. Обл.-вид.арк. 1,1

Замовл. № 362 Тираж 100.

Видавництво Східноукраїнського національного університету імені Володимира
Даля.

91034, м. Луганськ, кв. Молодіжний, 20а.

