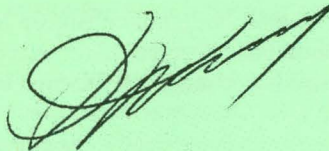


81 99

Східноукраїнський національний університет
імені Володимира Даля

Мямлін Сергій Віталійович



УДК 629.4.027.01.015

ПОЛІПШЕННЯ ДИНАМІЧНИХ ЯКОСТЕЙ РЕЙКОВИХ ЕКІПАЖІВ
ШЛЯХОМ УДОСКОНАЛЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК РЕСОРНОГО
ПІДВІШУВАННЯ

05.22.07 – Рухомий склад залізниць і тяга поїздів

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Луганськ – 2004

НТБ
ДНУЗТ



Дисертація є рукописом

Робота виконана в Дніпропетровському національному університеті залізничного транспорту імені академіка В.Лазаряна Міністерства транспорту України

Науковий консультант:

доктор технічних наук, професор Данович Віктор Данилович,
Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В.Лазаряна, професор кафедри “Коля і колійне господарство”

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, професор Богомаз Георгій Іванович,
Інститут технічної механіки НАН України, завідувач відділом

доктор технічних наук Бубнов Валерій Михайлович,
АТ «Азовмаш», генеральний конструктор по вагобудуванню

доктор технічних наук, старший науковий співробітник Радченко Микола Олексійович, Інститут транспортних систем і технологій НАН України
«Трансмаг», провідний науковий співробітник

міки і технологій транспорту

засіданні спеціалізованої
національному університеті
одіжний, 20а.

хідноукраїнського
ія Міністерства освіти і науки

НТБ
ДНУЗТ
Ю.І.Осенін

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Вступ. На залізницях України експлуатується 197000 одиниць рухомого складу, у тому числі 179120 вантажних і 9025 пасажирських вагонів, 1848 електровозів і 2947 магістральних і маневрових тепловозів. З них велика частина морально і фізично застаріла, тому що в останні десятиліття не проводилися які-небудь значні поліпшення технічних показників рухомого складу залізниць України. У першу чергу це стосується ходових частин і їхніх динамічних характеристик, які не цілком задовольняють сучасним вимогам.

Проходження через територію України декількох транспортних коридорів, організація швидкісного залізничного руху на основних магістральних напрямках, підвищення конкурентноздатності залізничних перевезень стосовно інших видів транспорту вимагає удосконалення технічних характеристик рухомого складу і, насамперед, ходових частин.

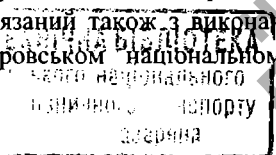
Актуальність теми дисертації. Поліпшення динамічних якостей ходових частин рейкових екіпажів дає можливість підвищити швидкість і безпеку руху, комфортабельність. І це один зі шляхів зниження наднормативних зносів коліс і рейок, особливо в криволінійних ділянках колії. Відсутність достатньої кількості коштів унеможливило швидку заміну усього парку рухомого складу залізниць. Перехід до рухомого складу нового покоління виконується поетапно, починаючи з удосконалювання окремих вузлів. Тому поліпшення динамічних якостей рейкових екіпажів за рахунок удосконалювання технічних характеристик ходових частин є однією із самих актуальних проблем залізничного транспорту.

52889

Дисертаційна робота присвячена рішенням найважливіших задач, що стоять перед залізничним транспортом – підвищенню швидкості і безпеки руху, зниженню наднормативного зносу коліс і рейок за рахунок удосконалення технічних характеристик ходових частин рейкових екіпажів.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота виконана відповідно до головних напрямків розвитку науки і техніки, Закону України про наукову і науково-технічну діяльність, відповідно до щорічних координаційних планів НДДКР «Укрзалізниця», концепції і Програми реструктуризації на залізничному транспорті України, затвердженої рішенням Колегії Міністерства транспорту України (протокол №30 від 18.08.1998 р.); Концепції реформування транспортного сектора України; галузевої Програми підвищення безпеки руху на залізницях України, затвердженої наказом Укрзалізниці №547-ц від 15.10.2001 р.; проекту Державної програми розвитку рейкового рухомого складу залізниць України в 2002-2010 р.

Обраний напрямок досліджень зв'язаний також з виконанням наступних науково-дослідних робіт у Дніпропетровському національному університеті



залізничного транспорту імені академіка В.Лазаряна (ДПТі) в галузі динаміки рухомого складу:

НДР по договорах з «Укрзалізницею» з номерами держреєстрації 0196U023134 «Розробка рекомендацій зі зниження зносу коліс і рейок за рахунок зниження сил динамічної взаємодії залізничних екіпажів і колії з урахуванням стаціонарних і нестаціонарних режимів руху»; 0197U019258 «Розробка заходів щодо зменшення сходів порожніх вагонів (цистерн, хоперів, піввагонів). Експериментальні і теоретичні дослідження»; 0198U005786 «АРМ для розрахунків режимних карт руху пасажирських поїздів на напрямку Київ-Жмеринка (електровози ЧС-4, ЧС-8)»; 0197U012983 «Розробка рекомендацій зі збільшення ресурсу електропоїздів ЕР-1 на підставі проведення експериментально-аналітичних робіт»; 0197U019255 «Розробка автоматизованої системи для проведення технічної експертизи і встановлення причин сходу рухомого складу»; 0198U005785 «Додаткові комплексні динамічні (ходові і міцнісні) і по впливу на колію при рекуперативному гальмуванні випробування вантажного магістрального електровоза ДЕ1-002»; 0195U023402 «Динамічні ходові випробування піввагонів на візках моделі 18-781»; 0199U000050 «Визначення причин сходу вантажних вагонів у поїздах і розробка рекомендацій і заходів з їхнього усунення»; 0199U000049 «Розробка рекомендацій зі збільшення терміну експлуатації дизель-поїздів Д-1, ДР-1 на основі проведення експериментальних і аналітичних робіт»; 0199U001437 «Розробка методичних рекомендацій і службових інструкцій з розслідування причин сходу рухомого складу»; 0199U001439 «Розробка технічного відношення по визначенню залишкового ресурсу рам візків електровозів ЧС-4»; 0101U006462 «Визначення динамічних показників і показників безпеки руху моторвагонного рухомого складу з профілем ДМетІ і розробка рекомендацій з доцільності його впровадження»; 0101U006464 «Порівняльні ходові динамічні випробування дослідних піввагонів на візках моделі 18-100, модернізованих за технологією компанії «А.Стакі», з різним ступенем зносу коліс (пробіг 35 і 100 тис.км)»; 0101U006465 «Дослідження ходових динамічних властивостей і безпеки руху електровоза ДЕ1 при експлуатації в умовах Львівської залізниці»; 0101U002586 «Розробка проекту державної цільової програми розвитку залізничного вантажного рухомого складу»; 0103U003011 «Проведення досліджень динамічних якостей екіпажа вагона типу 1003 і визначення напрямків підвищення конструктивних властивостей при швидкості 160 км/год»; 0103U007279 «Вибір конструктивних схем і раціональних параметрів ресорного підвищування візків перспективних конструкцій»;

- НДР за договором з «УЕлНДІ» з номером держреєстрації 0194U028475 «Комплексні динамічні (міцнісні, ходові) і по впливу на колію випробування вантажного магістрального електровоза ДЕ1»;

НДР за договором із НПО «УкрЕСТО» з номерами держреєстрації 0198U000824 «Динамічні (ходові) випробування вагона для перевезення великотонажних контейнерів і контрейлерів»; 0199U001442 «Проведення динамічних (ходових, міцнісних) і гальмових випробувань вагона для охолодженого коксу моделі 22-4070»; 0101U006463 «Ходові динамічні, міцнісні і гальмові випробування піввагона моделі 12-4106»;

НДР за договором зі СП «Ай-Бі-І-Стирол» з номером держреєстрації 0196U021003 «Розробка і узгодження з «Укрзалізницею» технічних умов на перевезення КАС (ТУ 24.00.1285-82) по маршрутах Горловка-Одеса, Черкаси-Одеса у вагонах моделі 15-1443»;

- НДР за договором зі Львівською залізницею з номером держреєстрації 0102U000551 «Програмно-апаратний комплекс «Тренажера-машиніста» електропоїзда серії EP-2»;

- НДР за договором із ДВФ «СКТЬ-ОРИЗОН» з номером держреєстрації 0100U001376 «Дослідження принципів побудови і розробка режимних карт ведення електропоїзда на ділянці Київ-Фастів».

Автор є виконавцем, відповідальним виконавцем, керівником відповідних робіт і автором звітів по всіх наведених науково-дослідних роботах.

Мета і задачі дослідження. *Мета роботи* – поліпшення динамічних якостей ходових частин рейкових екіпажів за рахунок вибору раціональних характеристик міжелементних зв'язків і ресорного підвішування.

Для досягнення цієї мети необхідно:

зробити аналіз існуючих технічних рішень ходових частин рейкових екіпажів і класифікувати їх за характерними ознаками;

- розробити математичні моделі просторових коливань рейкових екіпажів, програмне забезпечення і вибрати ефективні методи інтегрування, які б враховували можливість внесення конструктивних змін і варіацію параметрів;

- оцінити існуючі збурювання, що діють на рейкові екіпажі з боку колії і розробити методику введень збурювань у математичну модель рейкового екіпажа;

- зробити апробацію і перевірити вірогідність результатів математичного моделювання динаміки рейкових екіпажів;

- провести теоретичні дослідження з визначенню залежності динамічних показників від конструктивних схем і параметрів ходових частин і швидкості руху існуючих конструкцій рейкових екіпажів;

розробити методику вибору раціональних конструктивних схем і параметрів ходових частин рейкових екіпажів;

удосконалити методики проведення динамічних ходових випробувань рейкових екіпажів;

НТБ
ДНУЗ

провести експериментальні дослідження з уточнення обраних раціональних конструктивних схем і значень параметрів ходових частин рейкових екіпажів.

Об'єктом дослідження є динамічні коливання рейкових екіпажів.

Предмет дослідження ресорне підвішування та інші системи гасіння коливань.

Методи дослідження. У вирішенні поставлених задач використовувалися теоретичні та експериментальні методи. Теоретичні дослідження базуються на теорії диференціальних і інтегральних рівнянь, методах чисельного інтегрування. Використовувалися методи теорії імовірностей і математичної статистики при обробці результатів математичного моделювання та експериментальних досліджень вантажних і пасажирських вагонів, вагонів електропоїздів і електровозів.

Наукова новизна отриманих результатів:

- уперше розроблені об'єктно-орієнтовані математичні моделі просторових коливань рейкових екіпажів і програмне забезпечення, які дозволяють на відміну від класичних моделей без суттєвих змін моделі в цілому проводити більш детальне вивчення динамічної навантаженості рейкових екіпажів і оцінювати вплив на динамічні показники якості і показники зносу коліс різних параметрів рейкових екіпажів і колії, при цьому рейкові екіпажі розглядаються як сукупність об'єктів, з'єднаних різними зв'язками;

уперше запропоновано математичний опис умови відриву колеса від рейки з використанням рівнянь Френе, що сприяє реальному відображенню руху рейкового екіпажа по залізничній колії;

- уперше за допомогою методу векторної оптимізації отримані оптимальні значення пружньо-дисипативних і пружньо-в'язких параметрів різних ступіней ресорного підвішування візків різноманітних конструкцій з урахуванням нормованих динамічних показників якості для різних типів рейкових екіпажів; _

уперше запропоновано математичний опис алгоритму вибору раціональної конструкції ходових частин рейкового екіпажа з урахуванням їхніх конструктивних особливостей і економічних аспектів по їхній розробці та виготовленню;

- удосконалена математична модель взаємодії колеса і рейки в частині уточнення обчислення дотичних сил тертя, що діють між ними в трьох фазах контакту колісної пари з рейками в залежності від їхнього взаємного переміщення у вертикальній поперечній площині, при цьому дотичні сили тертя розташовані не в горизонтальній площині колії, а в площині, яка проходить під кутом до площини колії, що є основою для подальших більш докладних математичних моделей просторових коливань рейкових екіпажів;

удосконалені математичні моделі просторових коливань рейкових екіпажів у звичайній постановці при їхньому русі по прямолінійних і

криволінійних ділянках рейкової колії з урахуванням взаємодії з інерційною, пружньо-дисипативною залізничною колією в частині визначення сил взаємодії між колесом і рейкою;

- удосконалений математичний опис та спосіб завдання збурювань, що діють на рейковий екіпаж під час руху з боку колії, і запропонована методика генерування випадкових процесів, що моделюють вертикальні і горизонтальні нерівності рейкових ниток у математичних моделях просторових коливань рейкових екіпажів, що дозволяє представляти нерівності колії не тільки як детерміновані, а і як випадкові процеси та одержати достатню кількість реалізацій нерівностей для статистичної оцінки динамічної навантаженості рейкового екіпажа і сприяє максимальному наближенню результатів теоретичних досліджень до результатів експерименту;

удосконалено теоретичне визначення економічної ефективності поліпшення параметрів ресорного підвищування рейкових екіпажів в частині урахування витрат електроенергії на тягу поїздів у залежності від часу ходу по ділянці;

удосконалені методики проведення динамічних ходових випробувань рейкових екіпажів і обробки результатів вимірювань у частині доповнення вимірюваних параметрів, що характеризують динамічну навантаженість екіпажів.

Практичне значення отриманих результатів:

- проведені численні експериментальні дослідження різних типів рейкових екіпажів з визначенням їх динамічної навантаженості і допустимих швидкостей руху;

на підставі теоретичних досліджень обрані раціональні параметри міжелементних зв'язків і ресорного підвищування: 1) для 4-вісного вантажного вагона; 2) для 4-вісного пасажирського вагона; 3) для локомотива з двовісними візками;

знайдені шляхом теоретичних досліджень і підтверджені експериментально оптимальні параметри ресорного підвищування вище перерахованих рейкових екіпажів;

отримані результати використані вагонобудівними та електровозбудівними заводами при виборі і реалізації параметрів ходових частин на АТ «Азовмаш», ВАТ «Крюківський вагонобудівний завод», АТ «Днепрвагонмаш», НВО «ДЕВЗ»;

- на підставі отриманих результатів розроблені і впроваджені на мережі залізниць України рекомендації зі зменшення зносів пари «колесо-рейка» і підвищенню безпеки руху;

розроблена математична модель і програмний комплекс з вивчення динамічної навантаженості рейкових екіпажів використовуються в

Дніпропетровськом національному університеті залізничного транспорту імені академіка В.Лазаряна.

Рекомендації з безпечних режимів водіння вантажних поїздів упроваджені на мережі залізниць України.

Особистий внесок здобувача

Публікації [1-14, 29, 31, 49] підготовлені без співавторів. Результати робіт [15, 17, 48] належать авторам в однаковій мірі.

У роботах [16, 45, 46] автором зроблена постановка задачі, виконані розрахунки оптимальних значень параметрів ресорного підвішування для різних типів рейкових екіпажів на різних ділянках колії, зроблений аналіз отриманих результатів. У роботі [18] автором виконані підбір і аналіз технічних рішень конструкцій ходових частин локомотивів. Виконано математичне моделювання і розрахунок характеристик зв'язку кузова і візків електровоза в роботах [19, 21, 28, 32, 47]. У роботах [20, 41] виконана постановка задачі, зроблене математичне моделювання динамічної навантаженості необресорених частин вантажних вагонів і сформульовані висновки. Запропоновано опис моделювання динамічної навантаженості рейкових екіпажів за допомогою об'єктно-орієнтованого моделювання в статті [22]. Виконано математичний опис зв'язків між елементами рейкових екіпажів у статті [23], визначення плавності ходу в пасажирських вагонах з різними моделями візків у [42], показників безпеки руху в [43, 44]. У статті [24] виконаний аналіз результатів дії поздовжніх прискорень у пасажирських поїздах. Роботи [25, 36] виконані під науковим керівництвом автора. У них автору належить постановка задачі, вибір схеми розміщення датчиків на диску колеса, запропонована методика безперервності запису вертикальних сил, виконаний аналіз отриманих результатів. У роботах [26, 27] зроблений аналіз алгоритму виміру динамічних показників при натурних випробуваннях рейкових екіпажів і обробки результатів випробувань. У роботі [30] особистий внесок автора визначений довідкою про творчу участь у створенні винаходу. Виконано моделювання впливу технічного стану рейкового екіпажу на ступінь зносу коліс у роботі [33]. Запропоновано математичний опис і виконані розрахунки по визначенню впливу довжин горизонтальних і вертикальних нерівностей колії на динамічні якості піввагона в роботі [34], а також по моделюванню нерівностей рейкових ниток у залежності від їхніх кореляційних функцій у роботі [35]. У роботах [37, 38] виконані обробка та аналіз результатів експериментальних досліджень електровоза ДЕ1. У роботі [39] зроблене порівняльне моделювання динамічної навантаженості вантажних вагонів на візках різних конструкцій. У роботі [40] зроблений аналіз впливу на знос коліс просторових коливань вагону і коливань поїзда в цілому.

Апробація результатів дисертації. Основні положення і результати дисертаційної роботи доповідалися на щорічних міжнародних симпозиумах Українських інженерів-механіків (Львів, 1995, 1997); Міжнародному симпозиумі

“Безпека перевізних процесів” (Москва, 1995); міжнародних науково-технічних конференціях “Сучасні проблеми машинобудування” (Гомель, 1996, 1997); 2 Міжнародній науково-технічній конференції “Актуальні проблеми розвитку залізничного транспорту” (Москва, 1996); IX Міжнародній конференції “Проблеми механіки залізничного транспорту. Динаміка, надійність і безпека рухомого складу” (Дніпропетровськ, 1996); 2 конференції по контактній механіці і зносу системи “колесо-рейка” (Будапешт, 1996); VII, XII, XIII Міжнародних науково-технічних конференціях “Проблеми розвитку рейкового транспорту” (Крим, 1997, 2002, 2003); Міжнародній науково-практичній конференції “Проблеми взаємодії колії і рухомого складу” (Дніпропетровськ, 1998); Міжнародній конференції “Розвиток залізничного транспорту” (Іран, Тегеран, 1998); ювілейній науково-технічній конференції “Залізничний транспорт сьогодні і завтра” (Росія, Єкатеринбург, 1998); 3 Міжнародній конференції “Вплив людського фактора на безпеку руху на залізничному транспорті” (Луганськ, 1999); науково-технічних конференціях “Рухомий склад 21 століття (ідеї, вимоги, проекти)” (Росія, Санкт-Петербург, 1999, 2001, 2003); 14 Міжнародній конференції “Сучасні проблеми рейкових екіпажів” (Словачина, Жиліна, 1999); X Міжнародній конференції “Проблеми механіки залізничного транспорту” (Дніпропетровськ, 2000); 7 і 8 конференціях по динаміці екіпажів, ідентифікації й аномаліям (Угорщина, Будапешт, 2000, 2002); XIV наукової конференції “Рейкові поїзди на переломі століть” (Польща, Краків, 2000); I Міжнародній науковій конференції “Проблеми економіки транспорту в умовах реструктуризації” (Дніпропетровськ, 2001); 4 і 5 міжнародних конференціях по залізничних візках і ходових частинах (Угорщина, Будапешт, 1998, 2001); 4 конференції “Вплив людського фактора на безпеку руху на залізничному транспорті” (Львів, 2001); науково-технічних радах по розробці нових візків для вантажних і пасажирських вагонів (Кременчук, 2001, Київ, 2002); семінари по швидкісному русі на міжнародних транспортних коридорах (Одеса, 2001); II міжнародній конференції “Якість, безпека та екологія екіпажів” (Польща, Краків, 2001); Міжнародній науковій конференції “Транспорт XXI сторіччя” (Польща, Варшава, 2001); II і III Міжнародних наукових конференціях “Проблеми економіки транспорту” (Дніпропетровськ, 2002, 2003); Міжнародній науково-практичній конференції “Автоматизація виробничих процесів” (Хмельницький, 2002); науково-технічній конференції “Проблеми механіки гірничо-металургійного комплексу” (Дніпропетровськ, 2002); V Міжнародній науковій конференції Центральної і Східної Європи “Залізничні колісні пари” (Польща, Катовіце, 2002); 15 Міжнародній школі-семінарі “Перспективні системи управління на залізничному, промисловому і міському транспорті” (Алушта, 2002); Конгресі залізничного транспорту Центральної і Східної Європи (Польща, Варшава, 2002); Міжнародній науково-практичній конференції “Проблеми безпеки на транспорті” (Беларусь, Гомель, 2002); науковій

конференції “Проблеми і перспективи геотехнологій на початку III тисячоріччя” (Дніпропетровськ, 2002); 7 Міжнародній конференції “Ефективне формування національної мережі міжнародних транспортних коридорів” (Одеса, 2003).

Публікації. Результати дисертації опубліковані в 82 друкованих працях. У тому числі 1 монографія, 31 стаття в наукових виданнях, 37 тез доповідей на науково-технічних конференціях, 1 свідоцтво про авторські права, 12 патентів.

Структура і обсяг роботи. Дисертація викладена на 455 сторінках і складається з вступу, 7 розділів, висновків, списку використаних джерел з 506 найменувань, а також окремого тому додатків на 128 сторінках. Основний текст містить 401 сторінку, 275 ілюстрацій, 48 таблиць.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтована актуальність напрямку досліджень, сформульовані мета і задачі досліджень. У положеннях, що виносяться на захист, відображені її наукова новизна і практична цінність, реалізація роботи на практиці, приведені відомості про публікацію результатів досліджень.

У першому розділі виконано огляд наукової літератури в області динаміки рухомого складу, що свідчить про численні теоретичні та експериментальні дослідження, спрямовані на вивчення процесу руху рейкових екіпажів, моделювання просторових коливань, урахування різних особливостей їхньої конструкції, нелінійностей, що мають місце в реальній конструкції, розробку методики визначення сил на контактні коліс і рейок, оцінку стійкості руху, моделювання нерівностей колії і характеристик підвалин, вибір раціональних параметрів. Але, як правило, у дослідженнях оцінювалися параметри ходових частин або виходячи зі стійкості за Ляпуновим, або в лінійній постановці задачі, або без урахування реальних нерівностей колії. Це відображається на кінцевому результаті, на коректності пропонованих параметрів через допущення, що вводяться, і спрощення. У зв'язку з цим необхідне розглядання уточнених розрахункових схем, розробка більш повних математичних моделей, застосування сучасних методів програмування, уточнення математичного опису контакту колеса і рейки, комплексна оцінка параметрів.

Основи прикладних методів дослідження власних і вимушених коливань та стійкості руху рейкових екіпажів були розроблені в працях М.Ф.Веріго, С.В.Вершинського, В.Н.Данилова, С.М.Куценко, В.А.Лазаряна, В.Б.Медея, І.І.Челнокова. Внесли великий вклад у вирішення цієї проблеми І.В.Бірюков, Л.Й.Грачова, І.П.Ісаєв, А.О.Камаєв, Л.А.Кальницький, О.Я.Коган, В.М.Котуранов, М.М.Кудрявцев, О.А.Львов, А.М.Савоськін, М.М.Соколов, Т.О.Тібілов, Л.А.Шадур, Г.П.Бурчак, О.О.Долматов, В.А.Камаєв, Ю.С.Ромен, В.Д.Хусідов, Ю.М.Черкашин, В.М.Філіппов, С.Ф.Редько, С.П.Блохін,

В.Д.Данович, М.Л.Коротенко, Ю.В.Дьомін, Г.І.Богомаз, М.О.Радченко, В.Ф.Ушкалов, О.М.Коняєв, О.Л.Голубенко, Ю.П.Бороненко, П.С.Анісімов, В.П.Ткаченко, М.Б.Кельріх, В.М.Бубнов, В.О.Браташ і інші наукові співробітники різних науково-дослідних і навчальних закладів СНД: Східноукраїнського національного університету ім.В.Даля (СУНУ), Київського університету економіки і технологій транспорту (КУЕТТ), Української державної академії залізничного транспорту (УкрДАЗТ), Всеросійського науково-дослідного інституту залізничного транспорту (ВНІІЗТ), Московського державного університету шляхів сполучень (МПТ), Санкт-Петербурзького державного університету шляхів сполучень, ВНДІ вагонобудування (м. Москва) і його Тверської і Ризької філій, БІТМа, ХПІ, РІІЗТа, ОмІІТа, Уралвагонзавода та інших організацій.

Крім теоретичних досліджень з поліпшення динамічних якостей рейкових екіпажів зусилля конструкторів і винахідників спрямовані на створення нових конструкцій візків, систем гасіння коливань, зв'язків між елементами ходових частин вантажних і пасажирських вагонів, локомотивів. У результаті патентного пошуку і огляду літератури знайдено більш 500 технічних рішень. Усі їх можна умовно розділити на три групи: удосконалювання окремих вузлів конструкції візків, створення принципово нових конструкцій і застосування систем активного підвішування.

Проведений аналіз конструктивних рішень візків рейкових екіпажів, систем гасіння коливань, різних з'єднань кузова з елементами візків і елементів візків між собою дозволяє виділити основні види зв'язків у рейкових екіпажах, які можна класифікувати:

за властивостями: жорсткі; напівжорсткі; пружні; пружньо-фрикційні; пружньо-в'язучі;

за призначенням: утримуючі; неутримуючі.

Системи гасіння коливань, у свою чергу, за різними ознаками можна класифікувати таким чином:

за властивостями: пружні; пружньо-фрикційні; пружньо-в'язучі;

за впливом: активні; пасивні;

за принципом дії: кінематичні; інерційні; комбіновані.

Як правило, ходові частини рейкових екіпажів мають двоступеневе ресорне підвішування, тому характеристики ступіней підвішування, а також співвідношення між жорсткостями і в'язкостями ступіней підвішування у вертикальному, горизонтальному подовжньому, горизонтальному поперечному напрямках впливають на динамічні якості рейкового екіпажа.

Аналіз технічних рішень ходових частин рейкових екіпажів і систем гасіння коливань дозволив намітити шляхи удосконалення конструкцій і поліпшення динамічних якостей рейкових екіпажів за рахунок вибору раціональних характеристик міжелементних зв'язків і ресорного підвішування.

Автором запропоновані власні технічні рішення, спрямовані на удосконалення конструкцій ходових частин і систем гасіння коливань.

В другому розділі запропонована удосконалена математична модель взаємодії колеса і рейки. Ця модель є основою для подальших більш докладних математичних моделей, що дадуть можливість вивчити взаємодію різних типів екіпажів і колії та установити фактори, які найбільше впливають як на динамічну навантаженість і стійкість руху рейкових екіпажів, так і на знос коліс і рейок.

При дослідженні коливань рухомого складу і колії, як правило, розглядаються дотичні сили тертя між колесами і рейками, що діють у горизонтальній площині. У дійсності контактування колеса і рейки відбувається в площині, що проходить під кутом до площини колії. Отримано вирази для перемішень і сил, що знаходяться в зазначеній площині.

Контакт колісної пари з рейками має кілька фаз у залежності від взаємного переміщення колісної пари і рейок у вертикальній поперечній площині. У першій фазі контакт відбувається на поверхнях кругів катання обох коліс колісної пари. В другій фазі контакт із рейкою на одному колесі колісної пари відбувається на поверхні круга катання, а на іншому колесі і на поверхні круга катання і на поверхні гребеня.

Третя фаза контакту – одноточечний контакт на поверхні катання одного колеса і одноточечний контакт на поверхні гребеня іншого колеса, при цьому відбувається відрив поверхні катання цього колеса від рейки.

При вивченні просторових коливань рейкових екіпажів, як правило, рух екіпажа розглядається з постійним контактом, але зі змінюючимся положенням (одноточечний чи двоточечний контакт), хоча для повноти відображення реального руху представляє також інтерес визначення умови відриву колеса від рейки. Тому запропоновано математичний опис умови відриву колеса від рейки.

При побудові математичної моделі руху колеса по рейковій нитці прийняті наступні допущення:

- рейкова нитка описана у виді просторової кривої γ ;
- колесо розглядається як матеріальна точка маси m ;
- зв'язок між колесом і рейковою ниткою є неутримуючим зв'язком (тобто колесо може відриватися від рейкової нитки).

Якщо точка M розташована на рейковій нитці γ , а її радіус - вектор \mathbf{r} є деяка функція довжини s , відлічуваної уздовж рейкової нитки (рис.1).

Введемо три одиничних вектори: $\boldsymbol{\tau}$ – дотичний вектор до кривої γ у точці M ; \mathbf{n} – вектор головної нормалі; \mathbf{b} – вектор бінормалі.

Ці три вектори задовольняють системі диференціальних рівнянь Френе:

НІТЬ
ДНУЗТ

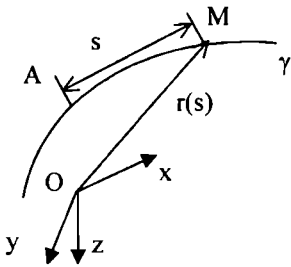


Рис. 1. Розташування рейкової нитки в просторі

плоских кривих.

Розглянуто рух колеса по кривій рейкової нитки, розташованій у вертикальній площині. Якщо крива рейкової нитки плоска, тоді крутіння $k_2(s)=0$ і рівняння Френе будуть наступними:

$$\frac{d\tau}{ds} = k_1(s)n, \quad \frac{dn}{ds} = -k_1(s)\tau.$$

Допустимо, що колесо знаходиться в точці M на кривій γ . Сили, що діють на колесо, представлені на рис.2, де:

F – горизонтальні сили;

P – вертикальні сили;

R – сили реакції рейкової нитки, причому сили реакції мають два компоненти: R_n – проекція на нормаль, R_τ – проекція на дотичний вектор τ .

Рівняння руху колеса як матеріальної точки маси m у проекції на нормаль і дотичний вектор τ будуть наступними:

$$\begin{cases} m \frac{d^2 r}{dt^2} \cdot n = R_n - F \sin \alpha - P \cos \alpha; & (1) \\ m \frac{dv}{dt} = -R_\tau + F \cos \alpha - P \sin \alpha, & (2) \end{cases}$$

де α – кут між вектором τ і горизонтальною віссю x;

v – швидкість переміщення колеса уздовж рейкової нитки.

Тепер скористаємося тим, що швидкість v дорівнює $v = \frac{ds}{dt}$ і в рівняннях

(1), (2) перейдемо від диференціювання за часом t до диференціювання за довжиною дуги рейкової нитки s.

При даному переході скористаємося тим, що

$$\frac{d\tau}{ds} = k_1(s)n; \quad \frac{dn}{ds} = -k_1(s)\tau - k_2(s)b; \quad \frac{db}{ds} = k_2(s)n,$$

де $k_1(s)$ – кривизна рейкової нитки в точці M;
 $k_2(s)$ – крутіння рейкової нитки в точці M.

Вектор τ через вектор $r(s)$ визначається як

$$\tau = \frac{dr}{ds}. \text{ Знаючи кривизну } k_1(s) \text{ і крутіння } k_2(s), \text{ за}$$

допомогою рівнянь Френе рейкова нитка γ визначається однозначно, якщо задана точка A і значення τ , n і b у точці A. Будова рейкової нитки така, що її можна розглядати як набір

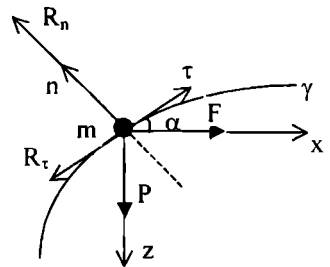


Рис. 2. Сили, що діють на колесо

$$\frac{d^2 \mathbf{r}}{dt^2} = \frac{d}{dt} \left(\frac{d\mathbf{r}}{dt} \right) = \frac{d}{dt} (v \cdot \boldsymbol{\tau}) = v \frac{d(v \cdot \boldsymbol{\tau})}{ds},$$

чи більш докладно

$$\frac{d^2 \mathbf{r}}{dt^2} = v \frac{dv}{ds} \cdot \boldsymbol{\tau} + v^2 \frac{d\boldsymbol{\tau}}{ds}.$$

Заміняючи $\frac{d\boldsymbol{\tau}}{ds}$ з рівнянь Френе отримано:

$$\frac{d^2 \mathbf{r}}{dt^2} = v \frac{dv}{ds} \cdot \boldsymbol{\tau} + v^2 k_1(s) \mathbf{n}.$$

Підставляючи в рівняння (1), одержуємо наступне рівняння:

$$m \left(v \frac{dv}{ds} \boldsymbol{\tau} + v^2 k_1(s) \mathbf{n} \right) \cdot \mathbf{n} = R_n - F \sin \alpha - P \cos \alpha.$$

Так як вектора $\boldsymbol{\tau}$ і \mathbf{n} ортогональні, то проекція рівняння руху на нормаль буде мати вид

$$m v^2 k_1(s) = R_n - F \sin \alpha - P \cos \alpha, \quad (3)$$

а проекція рівняння руху на вектор $\boldsymbol{\tau}$ збігається за формою з записом рівняння (2), тобто

$$m \frac{dv}{ds} = F \cos \alpha - P \sin \alpha - R_\tau, \quad (4)$$

До цих рівнянь необхідно додати рівняння неутримуючого зв'язку.

Очевидно, що порушення контакту колеса і рейкової нитки буде відбуватися тоді, коли сума проекції всіх сил на нормаль буде додатною.

Таким чином, вимога від'ємності даної суми проекцій сил на нормаль буде умовою контакту колеса і рейки. У прийнятих позначеннях одержуємо

$$R_n - F \sin \alpha - P \cos \alpha \leq 0 \quad (5)$$

Системи рівнянь (3), (4) і (5) необхідно розглядати як математичну модель руху колеса рейковою ниткою, розташованій у вертикальній площині. У даній моделі присутні сили реакції (R_τ , R_n), що характеризують вплив колеса на рейку при відомій кривизні колії горизонтальних, вертикальних силах, швидкості руху і геометрії рейкової нитки.

Розглянемо дану модель, коли рейкова нитка γ у системі координат задана у вигляді рівняння $z = z(x)$.

Дане рівняння можна розуміти і як нерівність рейкової нитки. У цьому

випадку $\operatorname{tg} \alpha = z'_x$, $\sin \alpha = \frac{z'_x}{\sqrt{1+z_x'^2}}$; $\cos \alpha = \frac{1}{\sqrt{1+z_x'^2}}$, а кривизна буде дорівнювати

$$k_1(s) = \frac{z''_x}{(1+z_x'^2)^{3/2}}.$$

НТБ
ДНУЗТ

Підставляючи дані співвідношення в рівняння (3-5) і враховуючи, що $ds = \sqrt{1 + z_x'^2} dx$, одержимо

$$m \frac{l}{\sqrt{1 + z_x'^2}} \frac{dv}{dx} = \frac{F}{\sqrt{1 + z_x'^2}} - \frac{P \cdot z_x'}{\sqrt{1 + z_x'^2}} - R_\tau, \quad (6)$$

$$\frac{mv^2 z_x''}{(1 + z_x'^2)^{3/2}} = R_n - \frac{Fz_x'}{\sqrt{1 + z_x'^2}} - \frac{P}{\sqrt{1 + z_x'^2}}, \quad (7)$$

$$R_n - \frac{Fz_x'}{\sqrt{1 + z_x'^2}} - \frac{P}{\sqrt{1 + z_x'^2}} \leq 0. \quad (8)$$

Якщо рівняння (6) і (7) розглядати як рівняння для траєкторії центра колеса, а v як швидкість його переміщення цією кривою, то ввівши $\eta(x)$ – криву, що описує рейкову нитку, умову (8) можна замінити на геометричну

$$z(x) - \eta(x) = \text{const},$$

і якщо

$$z(x) - \eta(x) > \text{const}, \quad (9)$$

то контакт колеса і рейки порушений.

Співвідношення (9) має більшу перевагу, чим (8), тому що виникає можливість враховувати імпульсні впливи колії на колесо в місцях стикування рейок, а самі рейкові нитки описувати функціями з класу вимірних. Звернувшись до рівнянь (6), (7), необхідно зробити наступні висновки:

- траєкторія руху центра мас колеса є безперервною функцією з кусочно-безперервними похідними, що мають розриви першого роду;

- енергія (кінетична) є вимірною функцією;

якщо $v(x)$ безперервна функція, а горизонтальні (F) і вертикальні (P) сили кінцеві, то дотична контактна сила (R_τ) кінцева;

зміна кінетичної енергії дорівнює роботі горизонтальних сил з відніманням роботи вертикальних сил і роботи дотичних контактних сил.

Останнє твердження випливає з рівняння (6) після інтегрування:

$$\frac{mv^2}{2} \Big|_{x_1}^{x_2} = \int_{z_1}^{z_2} F dx - \int_{z(x_1)}^{z(x_2)} P dz - \int_{S_1(x)}^{S_2(x)} R_\tau ds$$

Помітимо, що для гладких траєкторій центра мас, коли $|z_x'| \ll 1$, одержимо вираз:

$$mv^2 z_x'' = R_n - P - Fz'$$

що може бути використаний замість рівняння (7).

Складсно рівняння руху колісної пари з урахуванням проковзувань коліс по рейках. Це зроблено спочатку в плоскій постановці, а потім у просторовій постановці задачі, що використовується надалі. Для цього, насамперед,

розглянуті взаємні переміщення коліс і рейок, потім визначені проковзування і сили тертя між колесами і рейками за однією з теорій.

Розглянуто одноточечний контакт у просторовій постановці задачі для одиночної колісної пари. При цьому колія є інерційна, пружньо-дисипативна як у вертикальному, так і в горизонтальному поперечному напрямках.

Викладено уточнений прийом визначення приведених параметрів колії, заснований на розгляді переміщень усєї рейко-шпальної решітки. Так як зв'язок між вертикальними і горизонтальними поперечними переміщеннями основи, шпал і рейок невеликі, для спрощення будемо розглядати задачу про вигин рейко-шпальної решітки у вертикальній площині окремо від задачі вигину в горизонтальній площині і крутіння рейок. Отримано диференціальні рівняння для одиночної колісної пари.

У третьому розділі розглянуті два основних типи конструкцій візків пасажирських вагонів: безколискові і коліскові. Ці візки мають двоступеневе ресорне підвішування, що найбільше часто використовується в конструкціях ходових частин рейкових екіпажів. При складанні математичних моделей просторових коливань вантажних вагонів і локомотивів автором також проводився аналіз конструктивних особливостей ходових частин.

Однією з найважливіших задач у динаміці рейкових екіпажів є визначення раціонального співвідношення між жорсткостями двох ступіней підвішування для екіпажа з подвійним ресорним підвішуванням, а також визначення раціонального співвідношення параметрів демпфірування цих ступіней. Для розв'язання цієї задачі в даному розділі розроблена математична модель просторових коливань такого екіпажа в звичайній постановці. Для цього розглянуті зв'язки, накладені на систему, сили, що виникають у них, взаємні переміщення всіх тіл системи.

Складено диференціальні рівняння коливань системи, для інтегрування яких розроблена програма обчислень.

Аналогічні математичні моделі розроблені і для інших рейкових екіпажів, але розгляд екіпажа нової конструкції вимагає, як правило, розробки нової математичної моделі, що обмежує можливості досліджень. Запропонований метод дозволяє "збирати" модель будь-якого типу рухомого складу. Рейковий екіпаж органічно розділяється на об'єкти, у якості яких можуть бути обрані елементи його конструкції. Наприклад, для піввагона об'єктами динамічної системи можуть бути колісні пари, бокові рами візків, надресорні балки і кузов, а для вагона з подвійним ресорним підвішуванням – ті ж тіла, тільки замість бокових рам об'єктами є рами візків.

Викладено методику складання рівнянь просторових коливань об'єкта, на який діють сили з боку інших об'єктів.

На рис. 3 показаний об'єкт і сили, що діють на нього з боку двох інших об'єктів.

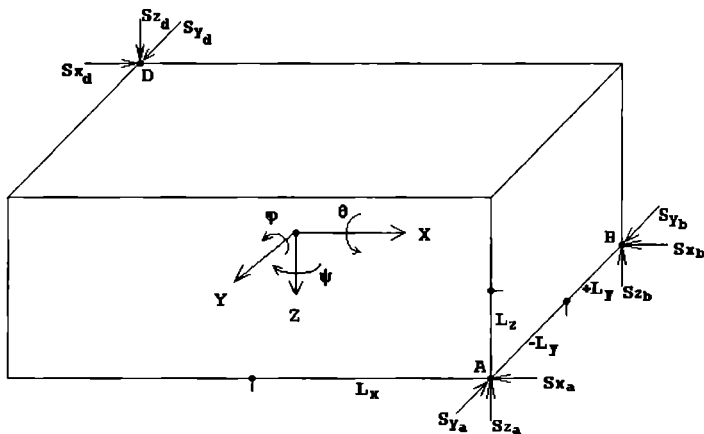


Рис. 3. Об'єкт динамічної системи

Складемо вирази для переміщень точок А і В об'єкта:

$$\begin{aligned} & \text{для точки А} \quad \begin{aligned} Z_A &= L_Z - L_X\varphi + L_Y\theta, \\ Y_A &= L_Y + L_X\psi - L_Z\theta, \\ X_A &= L_X + L_Z\varphi - L_Y\psi; \end{aligned} \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} & \text{для точки В} \quad \begin{aligned} Z_B &= L_Z - L_X\varphi - L_Y\theta, \\ Y_B &= L_Y + L_X\psi - L_Z\theta, \\ X_B &= L_X + L_Z\varphi + L_Y\psi, \end{aligned} \end{aligned} \quad (11)$$

де $Z_A, Z_B, Y_A, Y_B, X_A, X_B$ – координати точок А і В на осях Z, Y, X відповідно; φ, θ, ψ – кути повороту об'єкта навколо осей X, Y і Z відповідно.

Як видно з рівнянь (10) і (11), формули визначення переміщень у всіх площинах для точок А і В відрізняються тільки знаками перед $L_Y\theta$ і $L_Y\psi$, тому що проекції цих точок на вісь Y знаходяться по різні сторони від центра мас об'єкта.

Розглянемо методику складання рівнянь динаміки для об'єкта, зображеного на рис. 3. При цьому будемо вважати, що сили ($S_{ZA}, S_{ZB}, S_{ZD}, S_{YA}, S_{YB}, S_{YD}, S_{XA}, S_{XB}, S_{XD}$), що діють на об'єкт із боку об'єкта, що розташований “нижче” за віссю Z (“правіше” за віссю Y чи “далі” за віссю X), позитивні, а сили, що діють з боку об'єкта, що розташований “вище” за віссю Z (“лівіше” за віссю Y чи “ближче” за віссю X), від'ємні. Тоді

$$\begin{aligned} m\ddot{Z} + S_{ZA} + S_{ZB} - S_{ZD} &= W, \\ m\ddot{Y} + S_{YA} + S_{YB} - S_{YD} &= 0, \\ m\ddot{X} + S_{XA} + S_{XB} - S_{XD} &= 0. \end{aligned}$$

НТБ
ДНУЗТ

$$\begin{aligned}
J_Y \ddot{\varphi} - S_{ZA}(L_{XA} + L_{ZA}\varphi) - S_{ZB}(L_{XB} + L_{ZB}\varphi) - \\
- S_{ZD}(L_{XD} + L_{ZD}\varphi) + S_{XA}(L_{ZA} - L_{XA}\varphi) + \\
+ S_{XB}(L_{ZB} - L_{XB}\varphi) + S_{XD}(L_{ZD} - L_{XD}\varphi) = 0, \\
J_Z \ddot{\psi} + S_{YA}(L_{XA} - L_{YA}\psi) + S_{YB}(L_{XB} - L_{YB}\psi) + \\
+ S_{YD}(L_{XD} - L_{YD}\psi) - S_{XA}(L_{YA} + L_{XA}\psi) - \\
- S_{XB}(L_{YB} + L_{XB}\psi) - S_{XD}(L_{YD} + L_{XD}\psi) = 0, \\
J_X \ddot{\theta} + S_{ZA}(L_{YA} - L_{ZA}\theta) + S_{ZB}(L_{YB} - L_{ZB}\theta) + \\
+ S_{ZD}(L_{YD} - L_{ZD}\theta) - S_{YA}(L_{ZA} + L_{YA}\theta) - \\
- S_{YB}(L_{ZB} + L_{YB}\theta) - S_{YD}(L_{ZD} + L_{YD}\theta) = 0,
\end{aligned} \tag{12}$$

де m , W – відповідно маса і вага об'єкта; Z , Y , X – координати центру мас об'єкта; J_Y , J_Z , J_X – моменти інерції об'єкта щодо відповідних осей. У формулах (12) вирази типу $S_{ZA}(L_{XA} + L_{ZA}\varphi)$ являють собою моменти відповідних сил, а сума в дужках – плечі сил, що змінюються в залежності від кута повороту.

Розроблено класи для опису об'єктів і зв'язків рейкового екіпажа. Ці класи містять функції, що виконують усі необхідні операції над самими об'єктами і зв'язками, що їх з'єднують. Тобто класи, що описують об'єкти і зв'язки рейкового екіпажа як механічну систему, є тими “цеглинками”, з яких може бути побудована (“зібрана”) модель екіпажа.

Перед дослідженням взаємодії екіпажа і колії виконане дослідження стійкості руху рейкових екіпажів з різними характеристиками ресорного підвішування і конструктивними особливостями візків. Дослідження стійкості руху рейкового екіпажа виконується за першим наближенням Ляпунова, для чого виконана лінеаризація нелінійної системи диференціальних рівнянь руху.

Для оцінки динамічних якостей рейкових екіпажів і впливу їх на колію при русі прямолінійними і криволінійними ділянками колії визначені динамічні показники.

Визначено інерційні, геометричні та пружньо-дисипативні параметри розглянутих рейкових екіпажів.

У четвертому розділі розглянуто опис збурювань, що діють на рейковий екіпаж з боку колії, і запропонований спосіб їхнього моделювання.

Причинами коливань екіпажів є різні недосконалості залізничної колії та екіпажа: геометричні і динамічні нерівності рейкових ниток, мінливість властивостей залізничної колії за довжиною, конічність і нерівності поверхні кочення коліс. Інтенсивність впливу названих факторів на екіпаж і рівень коливань екіпажа як результат впливу цих факторів залежать від швидкості руху екіпажа, навантаження на вісь і т.ін. Ступінь зносу коліс і рейок, мінливість

властивостей колії за довжиною носять випадковий характер, отже, випадковий характер носять і збурювання, породжувані цими факторами. З іншого боку, стики рейкових плітей, розташовані на визначеній більш-менш постійній відстані один від одного, породжують періодичні збурюючі впливи у системі “рейковий екіпаж – колія”, хоча їхні параметри також носять випадковий характер.

Для одержання статистичних оцінок динамічних показників якості рейкового екіпажа необхідно мати статистично однорідний набір нерівностей. Одержати такий набір у ході натурних вимірювань нерівностей не завжди вдається, тому що статистичні параметри нерівностей можуть істотно змінюватися за довжиною колії. Представляється важким чи, у всякому разі, дуже трудомістким створення банку даних нерівностей для різних ділянок колії. Автором запропонований альтернативний спосіб завдання статистично однорідних реалізацій нерівностей колії. Цей спосіб полягає в наступному: виконується аналіз статистичних параметрів і просторового спектра отриманої в ході експерименту реалізації нерівностей рейкової нитки, далі з використанням цих параметрів генерується випадкова послідовність, що і є реалізацією моделі нерівностей колії. Такий підхід дозволяє без істотних витрат часу одержати достатню кількість реалізацій моделей нерівностей колії. На рис.4 представлена реалізація вертикальної нерівності рейкової нитки. Довжина реалізації, отриманої шляхом безпосереднього виміру нерівностей у вертикальній площині, складає 200 м.

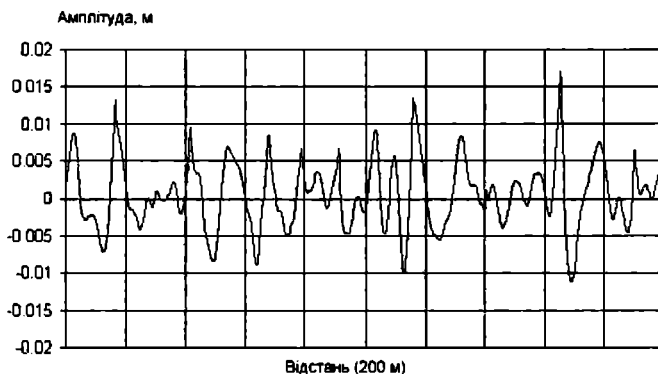


Рис. 4. Експериментально вимірювані вертикальні нерівності рейкової нитки

Розглянемо цю реалізацію як вибірку з випадкового процесу і визначимо основні характеристики (середнє значення, середнє квадратичне відхилення, ексцес і асиметрію) закону розподілу випадкового процесу. Його просторовий спектр. На рис.5 і рис. 6 представлені гістограма і просторовий спектр (суцільні

лінії). Як видно з рис.6, діапазон просторових частот нерівності складає $0,04 \div 0,2 \text{ м}^{-1}$, що відповідає інтервалу довжин нерівностей $25 \div 5 \text{ м}$.

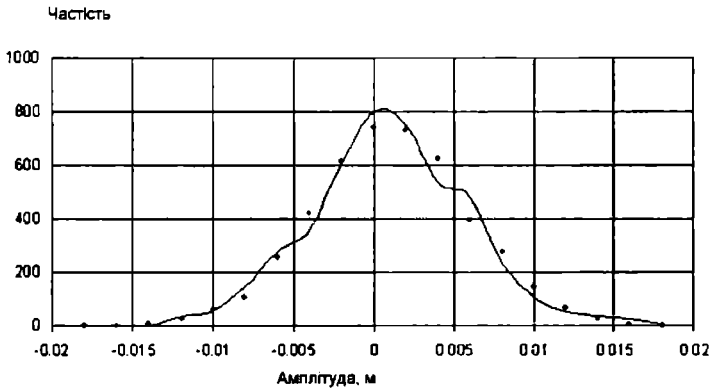


Рис. 5. Гістограми експериментально отриманої реалізації нерівності (суцільна лінія) і реалізації, отриманої методом моделювання (точки)

Далі, використовуючи отримані характеристики, необхідно згенерувати псевдовипадкову послідовність чисел. В даний час відомо кілька способів генерації псевдовипадкових чисел із заданими статистичними характеристиками. Як правило, спочатку генерується послідовність псевдовипадкових чисел V_n з рівномірним розподілом. Потім отримані послідовності перетворюють у послідовність з нормальним розподілом. Скористаємося методом Муллера:

$$R'_n = \sqrt{2 \ln(1/V_n)} \cos(2\pi V_{n-1}),$$

$$R_n = \sqrt{2 \ln(1/V_n)} \sin(2\pi V_{n-1}).$$

$S(F), \text{ dB}$

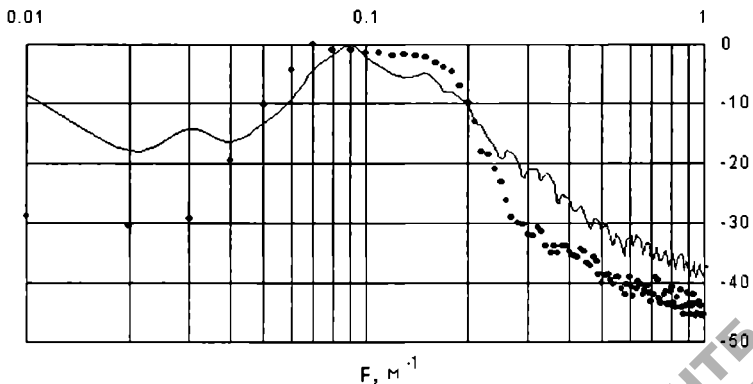


Рис. 6. Просторові нормовані спектральні щільності потужності: експеримент - суцільна лінія, моделювання - точки

Застосовуючи один з методів цифрової фільтрації, одержуємо остаточну реалізацію псевдовипадкового процесу. У даному прикладі фільтрацію необхідно проводити в діапазоні частот вихідного процесу, тобто $0,04 \dots 0,2 \text{ м}^{-1}$. Як видно з рис. 5 і 6, гістограми і просторові спектри в зазначеному діапазоні частот добре збігаються, отже, модель нерівності досить близька до реалізації, отриманої в експерименті. На рис. 7 показана отримана реалізація вертикальної нерівності рейкової нитки довжиною 200 м.

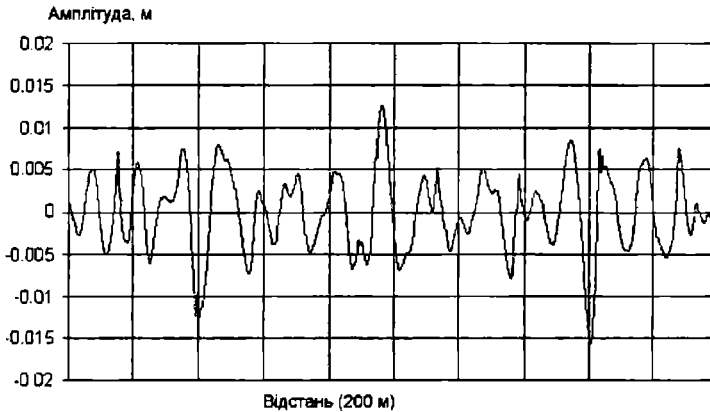


Рис. 7. Вертикальні нерівності рейкової нитки, отримані шляхом моделювання

Таким чином, запропонована методика дозволяє одержати достатню кількість реалізацій випадкових процесів (нерівностей) для статистичної оцінки поведінки рейкового екіпажа на ділянці колії, для якої нерівності виміряні в ході експерименту. Задавалися вертикальні і горизонтальні нерівності, що розділені на детерміновані і випадкові. Усі ці типи нерівностей використовувалися при розрахунках як окремо, так і в комбінаціях.

У п'ятому розділі зроблені порівняльний аналіз і вибір методів чисельного інтегрування для моделювання динамічної навантаженості механічних систем.

Розглянуто п'ять чисельних методів розв'язання диференціальних рівнянь: метод центральних різностей, метод Губольта, метод Ньюмарка, метод Парка і метод Адамса – Башфорта. Результати апроксимації похідних кінцево-різницевиими виразами в частотній області зіставлені з точними значеннями комплексного представлення операцій диференціювання першого і другого порядку, тобто з амплітудно-частотними і фазочастотними передатними функціями ідеальних диференціаторів першого і другого порядку.

З розглянутих методів чисельного інтегрування тільки методи центральних різностей і Ньюмарка не вносять у рішення фазових перекручувань; у всьому діапазоні частот метод центральних різностей дає

найменше значення узагальненої погрішності. Метод Ньюмарка дає практично таку ж похибку, як і метод центральних різностей у діапазоні $\bar{f} \leq 0,12$. При великих частотах похибка методу Ньюмарка значно більша. При частотах, близьких до частоти Найквіста, амплітудно-частотна характеристика методу Ньюмарка необмежено зростає, що в нелінійних системах може призвести до небажаних результатів. Тому прийнято метод центральних різностей.

Для перевірки правильності формування математичних моделей, а також результатів розрахунків, виконуваних за допомогою розробленої програми, зроблена їхня апробація шляхом порівняння. Порівняння проведене на прикладах розрахунку механічних систем, для яких вирази, що описують перехідні режими, можуть бути отримані аналітичним шляхом. Далі розглянуті приклади таких систем, знайдені рішення для процесів зміни координат у перехідному режимі коливань під дією сили ваги і виконане порівняння цих результатів з результатами, отриманими шляхом чисельного інтегрування диференціальних рівнянь за допомогою розробленої програми.

Крім простіших лінійних і нелінійних динамічних систем розглянуто характерний для рейкових екіпажів процес звивистого руху одиночної колісної пари, а також процес руху одиночної колісної пари колією, яка має синусоїдальну горизонтальну нерівність. В усіх випадках отримано хороший збіг результатів порівняння.

Визначено значення власних частот різних форм коливань кузовів екіпажів, що відповідають пікам амплітудно-частотних характеристик, приведеним в табл. 1. У дужках зазначені величини, отримані експериментальним шляхом. Як видно з табл.1, результати моделювання показали хороший збіг чисельних значень власних частот коливань з даними експериментів. Таким чином, за допомогою математичного моделювання реакції рейкових екіпажів на вплив різних нерівностей рейкових ниток із заданими значеннями отримані власні частоти для різних форм коливань кузовів екіпажів.

Таблиця 1

Значення власних частот різних форм коливань кузовів екіпажів

Тип екіпажа	Форми коливань			
	Вертикальні	Бокова качка	Галопування	Виляння
Навантажений піввагон	2,29 (2,25)	1,34 (1,39)	2,65 (2,70)	3,34 (3,39)
Порожній піввагон	5,31 (5,40)	2,39	6,02	7,55
Пасажирський вагон	1,32	2,92	1,62	1,18
Електровоз ДС-3	0,86	0,56	0,78	1,56
Електровоз ДЕ-1	0,78	0,63	0,59	1,66

Визначено взаємозв'язок динамічних показників із прискореннями необресорених частин у вертикальній і горизонтальній поперечній площині.

Отримані частотні характеристики коливань вертикальних і горизонтальних сил у зв'язках “Колісна пара – Бокова рама візка” для 4-осного навантаженого піввагона на візках ЦНИИ-ХЗ дозволили установити, що коливання на резонансних частотах зв'язку “Колісна пара – Бокова рама візка” у вертикальній площині виникають не тільки від дії основних частот збурювань, але і від їхніх гармонік. Визначено швидкості руху піввагона, при яких можливі коливання на резонансних частотах зв'язку “Колісна пара – Бокова рама візка” у вертикальній і горизонтальній площинах.

У шостому розділі приведені методики проведення динамічних (ходових) випробувань, описані об'єкти випробувань, зроблений вибір дослідних ділянок, представлено розміщення датчиків, описані засоби виміральної техніки. Наведені результати експериментальних досліджень і розрахунків динамічних показників якості рейкових екіпажів на прикладах вантажних вагонів (чотиривісного піввагона на візках ЦНИИ-ХЗ (модель 18-100) (навантажений і порожній), чотиривісного порожнього хопера і цистерни), пасажирських вагонів і тягового рухомого складу (електровоз ДЕ-1).

Розглянуто приклад складання моделі і виконання розрахунків для чотиривісного навантаженого піввагона на візках ЦНИИ-ХЗ, а також приведені осцилограми сил і переміщень, що виникають при просторових коливаннях екіпажа.

Для розглянутих типів рейкових екіпажів проведено зіставлення основних динамічних показників, отриманих розрахунковим шляхом, з величинами цих показників, отриманими в ході експериментальних досліджень, що підтвердило гарну їхню погодженість.

У сьомому розділі розглянуто вплив на динамічні показники якості і показники зносу коліс наступних параметрів рейкових екіпажів і колії: бази екіпажів, зазорів у буксових вузлах візків, зазору в колії, зазору в ковзунах, конічності поверхні катання колісних пар, маси кузова, положення центра мас кузова. Для усіх випадків розрахунки проводилися на криволінійних ділянках радіусом 300 і 600 м з підвищенням зовнішньої рейки 150 мм зі швидкостями рівними гранично допустимим для розглянутих величин радіусів і підвищень зовнішньої рейки і на прямолінійній ділянці зі швидкістю рівної конструкційній швидкості кожного екіпажа. Як збурювання використовувалися отримані в ході дослідних поїздок геометричні нерівності рейкової колії. При розрахунках оцінювалися величини коефіцієнтів вертикальної ($K_{дв}$) і горизонтальної ($K_{дг}$) динаміки першої ступіні підвішування, коефіцієнта запасу стійкості від вповзання колеса на рейку (K_r), показники зносу на гребені (Π_r) і на поверхні катання (Π_k) коліс.

Для оцінки впливу на основні показники безпеки розглянуті різні конструкції візків:

- для вантажних вагонів - моделі 18-100, дослідного візка моделі 18-781 і західноєвропейського візка Y25; для всіх розглянутих динамічних показників якості вантажних вагонів перевагу має візок моделі Y25;

для пасажирських вагонів моделі KB3-ЦНИИ-І, KB3-ЦНИИ-М і західноєвропейських візків моделей GP200 і Y32. На кривих малого радіуса (у даному випадку радіус дорівнював 300 м) найкращі динамічні показники має візок моделі Y32. У нього найменші значення показників $K_{двб}$, $K_{дгб}$, $A_{кг}$ і $W_{г}$, а також найбільше значення показника $K_{у}$. На кривих більшого радіуса (600 м) динамічні показники візків моделей GP200 і Y32 мають найменші значення в однаковій кількості випадків. У візка моделі Y32 найменші значення показників $K_{двб}$, $K_{дгб}$, $A_{кг}$ і найбільше значення показника $K_{у}$. У візка моделі GP200 найменші значення показників $K_{двц}$, $A_{кв}$, $W_{в}$ і $W_{г}$. На прямій ділянці динамічні показники візків моделей GP200 і Y32 також мають найменші значення в однаковій кількості випадків. У візка моделі Y32 найменші значення показників $K_{двб}$, $A_{кв}$, $A_{кг}$ і найбільше значення показника $K_{у}$. У візка моделі GP200 найменші значення показників $K_{двц}$, $K_{дгб}$, $W_{в}$ і $W_{г}$. За своїми динамічними якість візки моделей GP200 і Y32 значно перевершують візки KB3-ЦНИИ-М і KB3-ЦНИИ-І.

Знайдено залежність між значеннями жорсткості ресорного підвішування у вертикальному і горизонтальному поперечному напрямку і показниками динамічної навантаженості рейкових екіпажів. Доведено, що зміною в розглянутих діапазонах значень жорсткості ступіней підвішування можна домогтися поліпшення динамічних якостей рейкових екіпажів: для вантажних вагонів до 23%, для пасажирських вагонів до 50%.

Проаналізувавши вплив на динамічні показники якості і показники зносу коліс розглянутих параметрів рейкових екіпажів і колії, зроблений висновок, що визначальними характеристиками при виборі параметрів рейкових екіпажів є характеристики ресорного підвішування ходових частин. І надалі необхідно основну увагу приділяти оптимізації параметрів ресорного підвішування ходових частин.

Для розв'язання поставленої задачі обраний вектор оптимізуємих параметрів, функція цілі і метод розв'язання задачі. У даному випадку оптимізуємими параметрами були параметри ресорних комплектів рейкових екіпажів для кожного типу. Функція цілі визначена значеннями нормованих динамічних показників якості екіпажів. Як метод пошуку оптимальних параметрів обраний метод деформованого багатогранника чи метод Нелдера - Міда. Цей метод призначений для відшукування локальних мінімумів функцій декількох перемінних і, на відміну від інших методів, не вимагає обчислення похідних функції цілі. Для розв'язання поставленої задачі програма моделювання коливань залізничних екіпажів була доповнена модулем, що

вирішує задачу про пошук оптимальних параметрів зв'язків методом Нелдера – Міда.

У результаті оптимізації отримані нові значення параметрів ресорних комплектів рейкових екіпажів, які дозволили досягти істотного поліпшення динамічних показників якості: для вантажного вагона – від 30,1% для $K_{дr}$ до 67% для $A_{кр}$, для пасажирського вагона – від 24,8% для $W_{в}$ до 86,3% для $K_{у}$, для електровоза – від 27,5% для $W_{в}$ до 71,4% для $A_{кр}$. Зміна параметрів ресорного підвищування приводить до створення нової конструкції ходових частин. В умовах вітчизняних залізниць доцільне застосування оптимальних параметрів для нових конструкцій візків рейкових екіпажів, які можуть мати уніфіковані вузли і деталі з конструкціями, що експлуатуються.

Для здійснення вибору раціональної конструкції ходових частин рейкового екіпажа необхідно враховувати як конструктивні особливості, що дають поліпшення динамічних характеристик, так і економічні аспекти: кількість часу на розробку і виготовлення, вартість окремих етапів виробництва і т.ін. З метою підтвердження обґрунтованості виготовлення тієї чи іншої конструкції ходових частин становить інтерес розробка математичного опису алгоритму вибору раціональної конструкції. Для цього будь-які процеси можна розбити на етапи чи фази, через які проходить проект при проектуванні, технічний об'єкт при виготовленні.

Перелік фаз будемо позначати у вигляді списку

$$\Omega = [W_1, W_2, \dots, W_m],$$

кожна з фаз характеризується набором операцій

$$\Theta_i = [\theta_{i1}, \theta_{i2}, \dots, \theta_{in_i}], i = \overline{1, m},$$

яким піддається об'єкт при перебуванні у фазі W_i .

Припускаємо, що об'єкт проходить усі фази зі списку Ω , а в кожній фазі він може піддаватися деякому набору операцій. Надалі набір операцій, якому піддається об'єкт у фазі W_i , будемо позначати у вигляді множини

$$V_i \subseteq \Theta_i, i = \overline{1, m}$$

Кожній множині V_i зіставимо два числа $F_1(v_i)$, $F_2(v_i)$, де $F_1(v_i)$ – являє собою витрати коштів, $F_2(v_i)$ – тривалість перебування об'єкта у фазі W_i .

Нехай $V = [v_1, v_2, \dots, v_m]$ набір множин типу V_i , тоді

$$F_1(v) = \sum_{i=1}^m F_1(v_i), \quad (13)$$

$$F_2(v) = \sum_{i=1}^m F_2(v_i) \quad (14)$$

будуть являти собою витрати коштів і часу відповідно при проходженні об'єкта по усіх фазах.

Постановка задачі. Введемо класи множин $\zeta(\theta_i)$, $i = \overline{1, m}$, що разом з операцією симетричної різниці Δ утворюють групи. Щодо функцій $F_1(v_i)$ і $F_2(v_i)$ припускаємо, що вони є однорідними та адитивними функціями множин, визначені і кінцеві на підмножинах $v_i \in \zeta(\theta_i)$.

При зроблених допущеннях розглядається задача: знайти такі $v_i^* \in \zeta(\theta_i)$, $i = \overline{1, m}$, щоб

$$\begin{pmatrix} F_1(v^*) \\ F_2(v^*) \end{pmatrix} \rightarrow \min. \quad (15)$$

Дана задача являє собою задачу векторної оптимізації. Насамперед, пояснимо, що розуміється під рішенням задачі (15).

Визначення 1. Набір множин $\tilde{V} = [\tilde{v}_1, \tilde{v}_2, \dots, \tilde{v}_m]$ будемо називати ефективним рішенням задачі (15), якщо варіація кожного \tilde{v}_i з \tilde{V} приводить до збільшення F_1 чи F_2 , чи обох одночасно.

Визначення 2. Під рішенням задачі (15) будемо розуміти набір (клас) ефективних множин \tilde{V}

Задачу (15) зводимо до задачі на умовний екстремум

$$\begin{aligned} F_1(v) &\rightarrow \min \\ F_2(v) &\leq \alpha \end{aligned} \quad (16)$$

при тих же вимогах до v_i , як і в задачі (15).

Задачу (16) зводимо до задачі на безумовний екстремум, якщо введемо функцію Лагранжа

$$L(v, \mu) = F_1(v) + \mu F_2(v) \rightarrow \min \quad (17)$$

Позначимо через $V(\mu)$ рішення задачі (17), що залежить від множника Лагранжа μ , визначеного з умови

$$F_2(v(\mu)) \leq \alpha \quad (18)$$

Ураховуючи представлення (13) і (14), функцію Лагранжа (17) запишемо у вигляді:

$$L(v, \mu) = \sum_{i=1}^m (F_1(v_i) + \mu F_2(v_i)).$$

Тоді мінімум функції Лагранжа досягається на рішеннях задач

$$L_i(v, \mu) = F_1(v) + \mu F_2(v) \rightarrow \min \quad (19)$$

за умови $v \in \zeta(\theta_i)$.

Таких задач доводиться вирішувати m штук.

Нехай $V(\mu)$ – рішення задачі (19), тоді має місце теорема: якщо $\mu \geq 0$ таке, що має місце рівність у (18), то рішення задачі (16) являє собою

$$V^* = [V_1(\mu^*), V_2(\mu^*), \dots, V_m(\mu^*)].$$

При побудові рішення задачі (19) скористаємося тим, що функції F_1 і F_2 однорідні та адитивні, тоді

$$V_i(\mu) = \{\theta \in \Theta : F_1(\{\theta\}) + \mu F_2(\{\theta\}) \leq 0\} \quad (20)$$

Підставивши (20) у (18) одержимо нерівність

$$F_2(\mu) = \sum_{i=1}^m (F_2(V_i(\mu))) \leq \alpha \quad (21)$$

Рішення нерівності (21) може бути не єдиним. Нехай $\check{\mu}(\alpha)$ – множина рішень нерівності (21), тоді розглядаючи функцію $F_1(\mu)$

$$F_1(\mu) = \sum_{i=1}^m (F_1(V_i(\mu)))$$

визначену $\mu \in \check{\mu}(\alpha)$ приходимо до задачі визначення такого множника Лагранжа $\mu^* \in \check{\mu}(\alpha)$, щоб $F_1(\mu^*) = \min_{\mu \in \check{\mu}(\alpha)} F_1(\mu)$.

Якісний характер описаної ситуації представлений на рис. 8.

Виникає можливість вихідну задачу (15) параметризувати, звівши її до задачі (16) і одержати залежність $F_2(F_1)$, якісний характер якої представлений на рис. 9.

Зроблено оцінку економічної ефективності поліпшення параметрів ресорного підвішування рейкових екіпажів. Виконано розрахунки витрат електроенергії на тягу поїзда в залежності від часу ходу реальною ділянкою колії. Використання вагонів з оптимальними параметрами ресорного підвішування сприяє зменшенню витрати електроенергії на 5,8-14,9% для вантажного поїзда, на 5,2-8,2% для пасажирського поїзда. Таким чином підтверджена доцільність оптимізації параметрів ресорного підвішування.

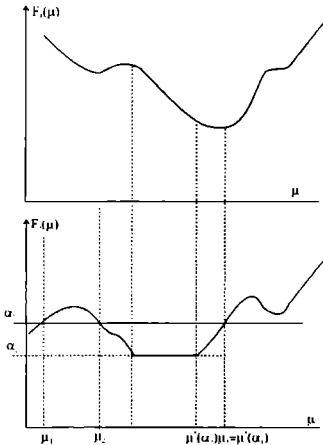


Рис. 8. Якісне співвідношення функцій $F_1(\mu)$ і $F_2(\mu)$

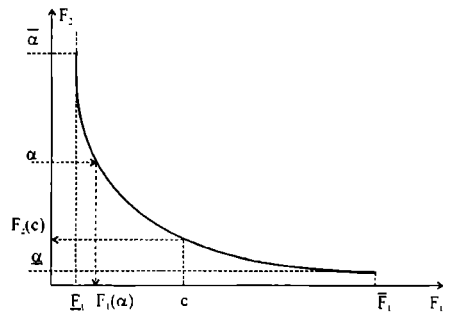


Рис. 9. Залежність функції F_2 від F_1

НТБ
ДНУЗТ

ВИСНОВКИ

1. Оцінка стану рухомого складу вітчизняних залізниць свідчить про те, що він фізично і морально застарів. У першу чергу це стосується ходових частин і їхніх динамічних характеристик, що не цілком задовольняють сучасним вимогам. Відсутність достатньої кількості коштів унеможливорює швидко заміну усього парку рухомого складу залізниць. Перехід до рухомого складу нового покоління провадиться поетапно, починаючи з удосконалення окремих вузлів. Тому поліпшення динамічних якостей рейкових екіпажів за рахунок удосконалення технічних характеристик ходових частин є однією із самих актуальних проблем залізничного транспорту України.

Огляд наукової літератури в області динаміки рухомого складу свідчить про численні теоретичні та експериментальні дослідження. Але, як правило, у дослідженнях оцінювалися параметри ходових частин або виходячи зі стійкості за Ляпуновим, або в лінійній постановці задачі, або без урахування реальних нерівностей колії. Це позначається на кінцевих розрахунках, на коректності запропонованих параметрів через допущення, що вводяться, і спрощення. У зв'язку з цим необхідний розгляд уточнених розрахункових схем, розробка більш повних математичних моделей, застосування сучасних методів програмування, уточнення математичного опису контакту колеса і рейки, комплексна оцінка параметрів.

2. Аналіз більше 500 технічних рішень ходових частин рейкових екіпажів і систем гасіння коливань дозволив класифікувати види зв'язків у рейкових екіпажах і системи гасіння коливань, а також намітити шляхи удосконалення конструкцій і поліпшення динамічних якостей рейкових екіпажів за рахунок вибору раціональних характеристик міжелементних зв'язків і ресорного підвішування.

Автором запропоновані власні технічні рішення, спрямовані на удосконалення конструкцій ходових частин і систем гасіння коливань.

3. Для вивчення процесу взаємодії рейкових екіпажів і колії, а також механізму зносу колеса і рейки розроблена докладна математична модель взаємодії колеса і рейки. Ця модель є основою для подальших більш докладних математичних моделей, що дадуть можливість вивчити взаємодію різних типів екіпажів і колії та установити фактори, які найбільше впливають як на динамічну навантаженість і стійкість руху рейкових екіпажів, так і на знос коліс і рейок.

При дослідженні коливань рухомого складу і колії звичайно розглядаються дотичні сили тертя між колесами і рейками, що діють у горизонтальній площині. У дійсності контактування колеса і рейки відбувається в площині, що проходить під кутом до площини колії. Отримано вирази для переміщень і сил, що знаходяться в зазначеній площині.

Розглянуто три фази контакту колісної пари з рейками в залежності від їхнього взаємного переміщення у вертикальній поперечній площині. Для повноти відображення реального руху запропонований математичний опис умови відриву колеса від рейки.

4. Складено рівняння руху колісної пари з урахуванням прослизань коліс по рейках. Це зроблено спочатку в плоскій постановці, а потім у просторовій постановці задачі.

5. Для складання математичних моделей просторових коливань рейкових екіпажів визначені конструктивні особливості екіпажа в цілому, його ходових частин, механізм взаємодії окремих деталей і вузлів між собою на прикладі візків пасажирських вагонів безколискової і коліскової конструкції. При складанні математичних моделей просторових коливань вантажних вагонів і локомотивів автором також виконувався аналіз конструктивних особливостей ходових частин.

6. Однією з найважливіших задач у динаміці рейкових екіпажів є визначення раціонального співвідношення між жорсткостями двох ступіней підвішування для екіпажа з подвійним ресорним підвішуванням, а також визначення раціонального співвідношення параметрів демпфірування цих же ступіней. Для розв'язання цієї задачі розроблена математична модель просторових коливань такого екіпажа в звичайній постановці. Для цього розглянуті зв'язки, накладені на систему, сили, що виникають у них, взаємні переміщення всіх тіл системи. Складено диференціальні рівняння коливань системи, для інтегрування яких розроблена програма обчислень. Аналогічні математичні моделі розроблені і для інших рейкових екіпажів, але розглядання екіпажа нової конструкції вимагає, як правило, розробки нової математичної моделі, що обмежує можливості досліджень.

7. Запропоновано метод, що дозволяє “збирати” модель будь-якого типу рухомого складу. Рейковий екіпаж органічно розділяється на об'єкти, у якості яких можуть бути обрані елементи його конструкції. Викладено методику складання рівнянь просторових коливань об'єкта, на який діють сили з боку інших об'єктів. Розроблено класи для опису об'єктів і зв'язків рейкового екіпажа.

8. Для оцінки динамічних якостей рейкових екіпажів і впливу їх на колію при русі прямолінійними і криволінійними ділянками колії визначені інерційні, геометричні та пружньо-дисипативні параметри розглянутих рейкових екіпажів і їхні динамічні показники.

9. Автором запропонований альтернативний спосіб завдання статистично однорідних реалізацій нерівностей колії, що дозволяє без істотних витрат часу одержати достатню кількість реалізацій моделей нерівностей колії для статистичної оцінки поведінки рейкового екіпажа на ділянці колії, для якої нерівності виміряні в ході експерименту.

За допомогою описаної методики є можливість задавати вертикальні і горизонтальні нерівності, що розділяються на детерміновані і випадкові. Усі ці типи нерівностей можуть використовуватися при розрахунках як окремо, так і в будь-яких комбінаціях.

10. Розглянуто п'ять чисельних методів рішення диференціальних рівнянь: метод центральних різностей, метод Губольта, метод Ньюмарка, метод Парку і метод Адамса – Башфорта. Результати апроксимації похідних кінцево-різницевиими виразами в частотній області зіставлені з точними значеннями комплексного представлення операцій диференціювання першого і другого порядку, тобто з амплітудно-частотними і фазочастотними передаточними функціями ідеальних диференціаторів першого і другого порядку. У результаті порівняння прийнятий метод центральних різностей.

11. Розроблено математичні моделі і програмне забезпечення для дослідження просторових коливань рейкових екіпажів, розглянутих як сукупність об'єктів з'єднаних зв'язками з використанням методу об'єктно-орієнтованого програмування. Комп'ютерна програма “Dynamics of Rail Vehicles” (“DYNRAIL”) захищена автором Свідомством про реєстрацію авторського права Державного департаменту інтелектуальної власності Міністерства освіти і науки України. Для перевірки правильності формування математичних моделей, а також результатів розрахунків, виконаних за допомогою розробленої програми, зроблена їхня апробація шляхом порівняння. Порівняння результатів моделювання з аналітичними розрахунками для розглянутих процесів показує їхню хорошу узгодженість.

12. Удосконалено методики проведення динамічних ходових випробувань рейкових екіпажів у частині вимірювання додаткових параметрів. Описано об'єкти випробувань, обрані дослідні ділянки для проведення динамічних ходових випробувань на магістральних залізницях. Викладено методику і програму обробки результатів експериментальних досліджень.

13. Для апробації математичної моделі розглянутий приклад складання моделі і виконання розрахунків для чотиривісного навантаженого піввагона на візках ЦНИИ-ХЗ, а також наведені осцилограми сил і переміщень, що виникають при просторових коливаннях екіпажа.

Виконано численні експериментальні дослідження динамічної навантаженості вантажних вагонів, пасажирських вагонів і електровозів в умовах магістральних залізниць України та інших країн СНД. Проведено співставлення основних динамічних показників, отриманих розрахунковим шляхом, з величинами цих показників, отриманими в ході експериментальних досліджень на прикладах чотиривісного піввагона на візках ЦНИИ-ХЗ (модель 18-100) (навантажений і порожній), чотиривісного порожнього хопера і цистерни, пасажирського вагона та електровоза ДЕ-1, що підтвердило хорошу їхню погодженість.

14. Розглянуто вплив на динамічні показники якості і показники зносу коліс наступних параметрів рейкових екіпажів і колії: бази екіпажів, зазорів у буксових вузлах візків, зазору в колії, зазору в ковзунах, конічності поверхні катання колісних пар, маси кузова, положення центру мас кузова, параметрів ресорного підвішування, а також різних конструкцій візків. Зроблено висновок, що визначальними характеристиками при виборі параметрів рейкових екіпажів є параметри ресорного підвішування ходових частин.

15. Знайдено залежність між значеннями жорсткості ресорного підвішування у вертикальному і горизонтальному поперечному напрямку і показниками динамічної навантаженості рейкових екіпажів. Доведено, що зміною в розглянутих діапазонах значень жорсткості ступіней підвішування можна отримати поліпшення динамічних якостей рейкових екіпажів: для вантажних вагонів до 23%, для пасажирських вагонів до 50%.

16. Для розв'язання задачі оптимізації обраний вектор оптимізуємих параметрів, функція цілі і метод рішення. У даному випадку оптимізуємими параметрами були параметри ресорних комплектів рейкових екіпажів для кожного типу. Функція цілі визначена значеннями нормованих динамічних показників якості екіпажів. Як метод пошуку оптимальних параметрів обраний метод деформованого багатогранника чи метод Нелдера - Міда. Для розв'язання поставленої задачі програма моделювання коливань залізничних екіпажів була доповнена модулем, що вирішує задачу про пошук оптимальних параметрів зв'язків методом Нелдера – Міда.

17. В результаті оптимізації отримані нові значення параметрів ресорних комплектів рейкових екіпажів, що дозволили досягти істотного поліпшення динамічних показників якості: для вантажного вагона – від 30,1% для $K_{дг}$ до 67% для $A_{кг}$, для пасажирського вагона – від 24,8% для W_b до 86,3% для K_y , для електровоза – від 27,5% для W_b до 71,4% для $A_{кг}$. Зміна параметрів ресорного підвішування приводить до створення нової конструкції ходових частин. В умовах вітчизняних залізниць доцільне застосування оптимальних параметрів для нових конструкцій візків рейкових екіпажів, які можуть мати уніфіковані вузли і деталі з конструкціями, що експлуатуються.

18. Для здійснення вибору раціональної конструкції ходових частин рейкового екіпажа необхідно враховувати як конструктивні особливості, що дають поліпшення динамічних характеристик, так і економічні аспекти: кількість часу на розробку і виготовлення, вартість окремих етапів виробництва і т.ін. З метою підтвердження обґрунтованості виготовлення тієї чи іншої конструкції ходових частин розроблений математичний опис алгоритму вибору раціональної конструкції.

Зроблено оцінку економічної ефективності поліпшення параметрів ресорного підвішування рейкових екіпажів. Виконано розрахунки витрат електроенергії на тягу поїзда в залежності від часу ходу реальною ділянкою

колії. Використання вагонів з оптимальними параметрами ресорного підвищення сприяє зменшенню витрат електроенергії на 5,8-14,9% для вантажного поїзда, на 5,2-8,2% для пасажирського поїзда. Сумарний економічний ефект від впровадження візків безколіскового типу моделі 68-7007 (аналог візка моделі Y32) на залізницях України в порівнянні з аналогічними візками провідних європейських виробників складе 238,196 тис.грн. на один візок. Таким чином, підтверджена доцільність оптимізації параметрів ресорного підвищення.

19. Рекомендації з вибору раціональних параметрів ресорного підвищення і конструктивних схем візків для вантажних вагонів впроваджені на АТ «Азовмаш», ВАТ «Крюківський вагонобудівний завод» і АТ «Дніпровагонмаш».

Рекомендації з вибору раціональних параметрів ресорного підвищення і конструктивних схем візків для пасажирських вагонів впроваджені на ВАТ «Крюківський вагонобудівний завод».

Рекомендації з вибору раціональних параметрів ходових частин і зв'язків між кузовом і візком для магістрального електровоза ДЕ1 запропоновані для впровадження на НВО ДЕВЗ.

Список опублікованих робіт за темою дисертації

1. Мямлин С.В. Моделирование динамики рельсовых экипажей. – Д.: Новая идеология, 2002. – 240 с.
2. Мямлин С.В. Методика моделирования пространственных колебаний железнодорожного экипажа // Залізнич. транспорт України. – 2001. – № 2. – С. 2–5.
3. Мямлин С.В. Программа моделирования пространственных колебаний подвижного состава // Залізнич. транспорт України. – 2000. – №3. –С.52–54.
4. Мямлин С.В. Влияние параметров рессор буксового подвешивания на надежность грузовых вагонов // Залізнич.транспорт України. – 2001. – № 3. – С.21–22.
5. Мямлин С.В. Математическая модель движения колеса по рельсовой нити // Зб.наук.пр. КУЭТТ: Транспортні системи і технології. Вип.1–2. – К.:КУЕТТ.–2003.–С.154–156.
6. Мямлин С.В. Способ оценки границ динамической нагруженности груженого полувагона при случайном характере неровностей пути // Геотехническая механика: Межведомст.сб.научн.тр. ИГТМ. – Днепропетровск: Поліграфіст. – 2000. – Вып.23. –С.159–164.
7. Мямлин С.В. Исследование зависимости вертикальных сил в связях груженого полувагона с ускорением букс // Вібрації у техніці та технологіях. – 2000. – № 4. –С.10–12.

8. Мямлин С.В. Зависимость между дисперсиями неровностей рельсовых нитей и динамическими показателями экипажа // *Залізнич.транспорт України.* – 2001. – № 5. – С.27–29.
9. Мямлин С.В. Связь динамических показателей груженого полувагона с ускорениями корпусов букс // *Транспорт: Зб. наук. пр.* – Дніпропетровськ: Наука і освіта. – 2001. – № 7. – С.86–89.
10. Мямлін С.В. Вплив рухомості вантажу на динамічні показники вантажного вагону // *Транспорт: Зб. наук. пр.* – Дніпропетровськ: Нова ідеологія. – 2002. – №12. – С. 126–130.
11. Мямлин С.В. Резонансные явления при колебаниях грузового вагона // *Залізнич.транспорт України.* – 2001. – № 4. – С.24–26.
12. Мямлин С.В. Влияние жесткости рессорного подвешивания на динамические показатели качества пассажирского вагона // *Транспорт: Зб. наук. пр.* – Дніпропетровськ: ДІПТ. – 2002. – № 10. – С. 46–50.
13. Мямлин С.В. Зависимость динамических качеств порожних грузовых вагонов от технического состояния ходовых частей // *Сб.научн.тр. Национальной горной академии Украины.* – Дн-ськ: Навчальна книга. – 2002. – С. 220–223.
14. Myamlin S.V. Modeling of rail line irregularities in determination of wagon dynamic loading // *Problemy eksploatacji: Kwartalnik.* –Radom: Wyd. Instytutu Technologii Eksploatacji. –1999. –№3. –Р.293–301.
15. Пшынко А.Н., Мямлин С.В. Влияние схем формирования грузовых поездов на безопасность движения порожних вагонов // *Вісник Східноукраїнського національного університету ім.В.Даля.* – Луганськ. – 2002. – № 6 (52). –С.113–119.
16. Мямлин С.В., Пшынко А.Н. Оптимизация параметров рессорного подвешивания рельсовых экипажей // *Вісник Східноукраїнського національного університету ім. В.Даля* – Луганськ. –2003. – № 9 (67).–С.79–85.
17. Мямлин С.В., Чиликина Н.Г Основные теории моделирования основания железнодорожного пути // *Залізнич. транспорт України.* – 2002. –№ 3. – С. 27–30.
18. Данович В.Д., Мямлин С.В., Недужая Л.А. Обзор технических решений конструкций ходовых частей некоторых типов локомотивов // *Техническая механика.* – 2000. – №2. – С. 111–119.
19. Данович В.Д., Коротенко М.Л., Мямлин С.В., Недужая Л.А. Математическая модель пространственных колебаний электровоза с модернизированной схемой соединения кузова с тележками // *Транспорт: Межвуз. сб. науч. тр.* – Дніпропетровськ: Січ. – 1999. – С. 183–190.
20. Мямлин С.В., Яловой А.И., Янгулова О.Л. Формирование коэффициента вертикальной динамики необрессоренной части грузовых вагонов // *Транспорт: Зб.наук. пр.* – Дніпропетровськ: ДІПТ. –2001. –Вип.9. – С. 142–146.

21. Мямлин С.В., Клименко И.В., Недужая Л.А. Влияние характеристик связи кузова и тележек электровоза на динамическую нагруженность и воздействие на путь // Транспорт. – Дніпропетровськ: ДІПТ. -1999. –Вип.4.– С.121–125.

22. Pshin'ko O., Blokhin Y., Myamlin S. Simulation of vehicle dynamic loading by means of object-oriented programming // Archives of transport. Polish academy of sciences. Committee of transport. – 2002. –Vol.14, issue 1. – P. 67–75.

23. Blokhin Y.P., Myamlin S.V., Pshin'ko O.M. Mathematical modeling of body braces in a railway vehicle // Problemy eksploatacji: Kwartalnik. – Radom: Wyd. Instytutu Technologii Eksploatacji. –2002. –№ 1. – P. 269–276.

24. Блохин Е.П., Пшинько А.Н., Мямлин С.В. О продольных ускорениях в пассажирских поездах // Залізнич.транспорт України. – 2002. –№ 1. – С. 7–11.

25. Михайленко В.М., Мямлин С.В., Ягода Д.О. Выбор оптимального способа измерения вертикальных и горизонтальных поперечных сил взаимодействия колес и рельсов // Транспорт. – Дніпропетровськ: Наука і освіта. –2000. – № 5. –С.38–44.

26. Блохин Е.П., Мямлин С.В., Грановский Р.Б., Горобець В.Л., Глухов В.В., Гаркави Н.Я., Федоров Е.Ф. О вводе в компьютер информации от датчиков при натурных испытаниях железнодорожного подвижного состава // Вісті Академії інженерних наук України: Машинобудування. – 2002. – №4(17). – С.19–28.

27. Блохин Е.П., Грановский Р.Б., Мямлин С.В., Гаркави Н.Я., Федоров Е.Ф. Статистическая обработка результатов ходовых испытаний рельсового транспорта // Сб.науч.тр.Национального горного ун-та. –Т.2.– 2002.–№15. – С.166–175.

28. Блохин Е.П., Данович В.Д., Коротенко М.Л., Клименко И.В., Мямлин С.В., Недужая Л.А. Выбор рациональных значений жесткости связи наклонной тяги с кузовом электровоза ДЭ1 // Транспорт. – Дніпропетровськ: Нова ідеологія. –2002. –Вип.11.– С. 17–20.

29. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 7305. Комп'ютерна програма “Dynamics of Rail Vehicles” (“DYNRAIL”) / Мямлін С.В.; Зареєстр. 20.03.2003.

30. Декларативний патент 46631 Україна, МПК⁶ В61F 5/00 Візок вантажного вагона / Лашко А.Д., Савчук О.М., Мямлін С.В., Пшінько О.М., Бабаєв А.М., Кондратюк В.В.; Дніпропетр. держ. техн.ун-т залізнич. тр-ту. – №2001106986; Заявл. 15.10.2001; Опубл.15.05.2002; Бюл. №5, 2002.

31. Патент № 25248 Україна, МПК⁶ В 61 F 3/02 Двовісний візок вантажного вагону / Мямлін С.В.; Дніпропетр.держ.техн.ун-т залізнич.тр-ту, – №97094599; Заявл. 11.02.98; Опубл.25.12.98; Бюл. №6, 1998.

32. Мямлин С.В., Блохин Е.П., Данович В.Д., Недужая Л.А. Математическая модель для исследования динамики электровоза // Материалы

Международ. научн.-техн. конф. "Современные проблемы машиноведения" – Гомель: ГПИ им. Сухого П.О. – 1996. – С. 99-100.

33. Blokhin E., Danovich V., Myamlin S., Litwin V. Influence of railway vehicles models degree of detail on the results of wheel wear prediction // Proc. 2nd Mini Conf. on Contact Mechanics and Wear of Rail/Wheel Systems. – Budapest: Techn. Univ. of Budapest. – 1996. – P. 297-303.

34. Pshin'ko O.M., Blokhin Y.P., Myamlin S.V. The influence of the length of horizontal and vertical irregularities of railway track on dynamic loading of an open wagon // Proc. of the 7th mini conference on vehicle system dynamics, identification and anomalies. – Budapest (Hungary). – 2000. –P.247-254.

35. Myamlin S., Pshin'ko O. Modeling of rail line irregularities using estimation of their correlation functions // 14 Konf. Naukowa Pojazdy Szynowe na przelomie wiekow. – Krakow. - 2000. – P. 101–108.

36. Михайленко В.М., Мямлин С.В., Ягода Д.А. К вопросу об измерении сил взаимодействия колес и рельсов // Труды X Международ. конф. "Проблемы механики железнодорожного транспорта". – Дн-ск: Арт-Пресс. – 2000. –С.90–91.

37. Блохин Е.П., Коротенко М.Л., Грановский Р.Б., Мямлин С.В., Недужая Л.А. Динамика электровоза ДЭ1 // Труды VII Международ. научно-техн. конф. "Проблемы развития рельсового транспорта". –Луганск: ВУГУ. – 1997.–С.18–19.

38. Блохін Є.П., Данович В.Д., Мямлін С.В. Динамічні ходові випробування електровозів // Праці 3 Міжнар. симпозиуму українських інженерів-механіків у Львові. – Львів: Львівська політехніка, 1997. –С.198.

39. Мямлин С.В., Недужая Л.А., Письменный Е.А., Яловой А.И. Оценка динамических качеств различных конструкций тележек грузовых вагонов // Труды III научно-технич. конф. «Подвижной состав XXI века: идеи, требования, проекты». – СПб: ПГУПС. – 2003. – С. 184–185.

40. Blokhin Ye.P., Pshin'ko A.N., Myamlin S.V. Spatial train oscillations and wear of the wheels // Proc. V International Scientific Conf. for Middle and Eastern European Countries. – Katowice. – 2002. – CD.

41. Blokhin Y.P., Pshin'ko O.M., Myamlin S.V. Peculiarities of dynamics of empty freight wagon // Abstracts 8th mini conf.on Vehicle system dynamics, identification and anomalies. – Budapest. – 2002. – P. 11.

42. О плавности хода пассажирских вагонов на тележках разных конструкций / Блохин Е.П., Данович В.Д., Мямлин С.В. и др. // Труды научно-технич. конф. "Подвижной состав 21 века (идеи, требования, проекты)". – СПб: ПГУПС. – 1999. –С.73.

43. Блохин Е.П., Данович В.Д., Манашкин Л.А., Мямлин С.В. К вопросу о показателях безопасности движения транспортных средств и поездов //Тез. докл. Международ. симпозиума «Безопасность перевозочных процессов». –Москва: МИИТ. –1995. –С.15.

44. Данович В.Д., Мямлин С.В., Литвин В.А. Применение компьютерного моделирования при анализе случаев схода в АРМ "Ревизор по безопасности" // Тез. докл. Юбилейной научно-техн. конф. "Железнодорожный транспорт сегодня и завтра". – Екатеринбург: УрГАПС. –1998. –С.256–257.

45. Blokhin Y.P., Pshin'ko O.M., Myamlin S.V. Optimization of parameters of spring suspension of the freight car three-piece bogie // Proc. 5th international conf. on railway bogies and running gears. – Budapest. – 2001. – P. 263–271.

46. Мямлин С.В., Недужая Л.А., Письменный Е.А., Яловой А.И. Влияние параметров центрального и буксового подвешивания на динамическую нагруженность полувагона // Труды II Научно-технич. конф. "Подвижной состав 21 века (идеи, требования, проекты)". – СПб: ПГУПС. – 2001. –С.40–41.

47. Блохин Е.П., Данович В.Д., Коротенко М.Л., Клименко И.В., Мямлин С.В., Недужая Л.А. Выбор рациональных значений жесткости связи наклонной тяги с кузовом электровоза ДЭ1 // Транспорт. – Дніпропетровськ: Нова ідеологія. –2002. –Вип.11.– С. 17–20.

48. Мямлин С.В., Капица М.И. Метод функциональных селекторов в задачах проектирования подвижного состава // Труды III научно-технич. конф. «Подвижной состав XXI века: идеи, требования, проекты». – СПб: ПГУПС. – 2003. – С. 157–158.

49. Мямлин С.В. Техничко-економічне обґрунтування модернізації трьохелементних тележок // Тези доп. II Міжнар. наук.конф. "Проблеми економіки транспорту". – Дніпропетровськ: РВВ ДІПу. –2002. – С. 188–189.

Анотація

Мямлін С.В. Поліпшення динамічних якостей рейкових екіпажів шляхом удосконалення характеристик ресорного підвішування. Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеню доктора технічних наук за спеціальністю 05.22.07 – Рухомий склад залізниць і тяга поїздів. Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля, Луганськ, 2004.

Дисертаційна робота присвячена вирішенню важливих задач, які стоять перед залізничним транспортом – підвищенню швидкості і безпеки руху, зниженню наднормативного зносу коліс і рейок за рахунок удосконалення технічних характеристик ходових частин рейкових екіпажів.

Розроблені математичні моделі просторових коливань рейкових екіпажів з використанням удосконаленої методики задавання нерівностей рейкових ниток. Запропонований математичний опис втрати контакту між колесом і рейкою.

Вперше використано метод об'єктно-орієнтованого програмування при формуванні математичних моделей рейкових екіпажів різних типів з

урахуванням уніфікації математичного опису просторових коливань окремих деталей.

Виконана векторна оптимізація параметрів ресорного підвішування для різних типів рейкових екіпажів з урахуванням основних нормованих динамічних показників. Запропоновано математичний опис алгоритму вибору раціональної конструкції візків рейкових екіпажів з урахуванням часових та економічних аспектів їхнього проектування та виготовлення.

Отримані результати використані при виборі та реалізації параметрів ходових частин на АТ «Азовмаш», ВАТ «Крюківський вагонобудівний завод», АТ «Дніпровагонмаш», НВО «ДЕВЗ».

Ключові слова: рейковий екіпаж, ресорне підвішування, динамічні якості, об'єктно-орієнтоване програмування, оптимізація.

Аннотация

Мямлин С.В. Улучшение динамических качеств рельсовых экипажей путем усовершенствования характеристик ресорного подвешивания. Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.22.07 – Подвижной состав железных дорог и тяга поездов. - Восточноукраинский национальный университет имени Владимира Даля Министерства образования и науки Украины, Луганск, 2004.

Диссертационная работа посвящена решению важнейших задач, стоящих перед железнодорожным транспортом – повышению скорости и безопасности движения, снижению сверхнормативного износа колес и рельсов за счет усовершенствования технических характеристик ходовых частей рельсовых экипажей.

Произведен анализ существующих технических решений ходовых частей рельсовых экипажей и выполнена их классификация по характерным признакам.

Разработаны математические модели пространственных колебаний рельсовых экипажей, программное обеспечение и выбраны эффективные методы интегрирования, которые учитывают возможность внесения конструктивных изменений и вариацию параметров.

Предложены уточненные математические модели, описывающие пространственные колебания вагонов и локомотивов при их движении по произвольным участкам рельсовой колеи с учетом взаимодействия с инерционным, упруго-диссипативным железнодорожным путем.

Выполнена оценка существующих возмущений, действующих на рельсовые экипажи со стороны пути и разработана методика введения возмущений в математическую модель рельсового экипажа. Предложена усовершенствованная методика задания неровностей рельсовых нитей при

моделировании пространственных колебаний рельсовых экипажей, которая способствует максимальному приближению результатов теоретических исследований к результатам эксперимента. Выполнено математическое описание потери контакта между колесом и рельсом.

Впервые использован метод объектно-ориентированного программирования при формировании математических моделей рельсовых экипажей различных типов с учетом унификации математического описания пространственных колебаний отдельных деталей. Использование объектно-ориентированного программирования при моделировании пространственных колебаний рельсовых экипажей позволяет расширить возможности теоретических исследований и более точно выбирать рациональные параметры не только рессорного подвешивания, но и определять необходимые типы и параметры связей между элементами ходовых частей рельсовых экипажей.

Проведены многочисленные экспериментальные исследования различных типов рельсовых экипажей с определением их динамической нагруженности и допускаемых скоростей движения.

Произведена апробация и проверка достоверности результатов математического моделирования динамики рельсовых экипажей путем сравнения с результатами экспериментов, которое подтвердило их хорошую согласованность.

Выполнены теоретические исследования по определению параметров рельсовых экипажей и пути, существенно влияющих на динамическую нагруженность рельсовых экипажей. Получен вывод о том, что параметры рессорного подвешивания являются определяющими.

Выполнена векторная оптимизация параметров рессорного подвешивания для различных типов рельсовых экипажей с учетом основных нормируемых динамических показателей.

Предложено математическое описание алгоритма выбора рациональной конструкции тележек рельсовых экипажей с учетом временных и экономических аспектов по их проектированию и изготовлению.

Усовершенствована методика оценки экономической эффективности улучшения параметров рессорного подвешивания рельсовых экипажей различных типов.

Полученные результаты использованы вагоностроительными и электровозостроительными заводами при выборе и реализации параметров ходовых частей на АО «Азовмаш», ОАО «Крюковский вагоностроительный завод», АО «Днепровагонмаш», НПО «ДЭВЗ».

Разработанная математическая модель и программный комплекс по изучению динамической нагруженности рельсовых экипажей используются в Днепропетровском национальном университете железнодорожного транспорта имени академика В.Лазаряна.

Ключевые слова: рельсовый экипаж, рессорное подвешивание, динамические качества, объектно-ориентированное программирование, оптимизация.

ABSTRACT

Myamlin S. V. Improvement of dynamic qualities of rail vehicles by means of modernization characteristics of running gears. Manuscript.

Thesis on competition of a scientific degree of the Doctor of Technical Sciences in a specialty 05.22.07 – Railway rolling stock and traction of trains. – The East-Ukrainian National University named after Volodymyr Dal', Lugans'k, 2004.

The thesis is devoted to solution of the most important problems that challenge the railway transport – to increase the motion speed, to improve the traffic safety, and to decrease the extra-normative wear of rail and wheels due to improving the technical characteristics of running gears of rail vehicles.

Mathematical models of spatial vibrations of rail vehicles have been developed with use of an improved procedure of specifying the irregularities of rail lines. The mathematical description of a loss of the wheel/rail contact has been suggested.

A method of object-oriented programming in development of mathematical models of rail vehicles of different types has been used for the first time taking into consideration the unification of mathematical description of spatial vibrations of separate parts.

A procedure of vector optimization of spring suspension parameters for various types of rail vehicles taking into account the basic dynamic characteristics has been performed. The mathematical description of choosing the rational design of a rail vehicle bogie has been suggested.

The results obtained have been used in choosing and realizing the parameters of running gears at the following enterprises: JSC “Azovmash”, Open JSC “Kryukiv'sky Car-Building Plant”, JSC “Dnieprovagonmash” and Research&Production Company “DEVZ”.

Keywords: rail vehicle, spring suspension, dynamic qualities, object-oriented programming, optimization.

Мямлін Сергій Віталійович

ПОЛІПШЕННЯ ДИНАМІЧНИХ ЯКОСТЕЙ РЕЙКОВИХ ЕКІПАЖІВ
ШЛЯХОМ УДОСКОНАЛЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК
РЕСОРНОГО ПІДВІШУВАННЯ

Автореферат
дисертації на здобуття вченого ступеня
доктора технічних наук

Підписано до друку 05 січня 2004 р.
Формат 60x84/16. Папір для множних апаратів. Гарнітура Times New Roman.
Ум. друк. арк. 1,85. Обл.-видав. арк. 1,9. Тираж 100 прим.
Замовлення № 3315. Безкоштовно.

Видавництво Дніпропетровського національного університету
залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. Свід. ДК № 1315.

Адреса видавництва: 49010, м. Дніпропетровськ, вул. Акад. Лазаряна, 2.

ДІАГНОСТИКА
ДНУЗТ