7635

К 78

МІНІСТЕРСТВО ТРАНСПОРТУ ТА ЗВ'ЯЗКУ УКРАЇНИ
Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна

КРАВЕЦЬ ВОЛОДИМИР ВІКТОРОВИЧ

УДК 629.4.015, ~~629.7.081 : 530.152.1~~

УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДУ ОЦІНКИ ДИНАМІЧНОЇ НАВАНТАЖЕНОСТІ ШВИДКІСНОГО РУХОМОГО СКЛАДУ ЗАЛІЗНИЦЬ

Спеціальність 05.22.07 – рухомий склад залізниць і тяга поїздів

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття вченого ступеня кандидата технічних наук

НТБ ДНУЗТ

Дніпропетровськ 2007

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Дніпропетровському національному університеті залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна Міністерства транспорту та зв'язку України.

Науковий керівник — доктор технічних наук, професор
Мямлін Сергій Віталійович,
Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту ім. академіка В. Лазаряна, проректор з наукової роботи.

Офіційні опоненти — доктор технічних наук, професор
Богомаз Георгій Іванович,
Інститут технічної механіки Національної академії наук України, завідувач відділом.

кандидат технічних наук, с.н.с.,
Хачапурідзе Микола Михайлович,
заступник директора з наукової роботи Інституту транспортних систем і технологій Національної академії наук України „Трансмаг", завідувач відділом.

Захист відбудеться 07.12 2007 р. о 14[30] годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 08.820.02 при Дніпропетровському національному університеті залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна за адресою: 49010, м. Дніпропетровськ, вул. Академіка Лазаряна,

еці Дніпропетровського
порту імені академіка

Жуковицький І.В.

НТБ ДНУЗТ

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. На цей час розроблені основні положення концепції розвитку швидкісного залізничного транспорту і Державної науково-технічної програми створення швидкісних магістралей. Відповідно до концепції організації швидкісного руху пасажирських поїздів на мережі залізниць України передбачається поетапне підвищення швидкості руху на існуючих лініях до 200 км/г з наступним спорудженням спеціалізованих швидкісних магістралей. Підвищення швидкості руху залізничних екіпажів дозволить посилити інтеграційні процеси із країнами Європи та Азії, задовольнити попит населення країни у перевезеннях, знизити витрати електроенергії та ресурсів, дозволить задіяти виробничі потужності провідних галузей промисловості та призводить до необхідності удосконалення контролю та кількісної оцінки динамічної навантаженості рухомого складу для забезпечення безпечного, надійного і комфортного сполучення на швидкісних залізницях. Розробляються нові конструктивні схеми швидкісних екіпажів, використовуються нетрадиційні для залізничного транспорту матеріали з метою зниження пасивної ваги і зв'язаних з тим енергетичних втрат. Зниження ваги залізничного екіпажу припускає введення обґрунтованих норм по запасу міцності конструкції, яка залежить від достовірного знання очікуваних динамічних навантажень, що обумовлені інерційними силами і моментами різної фізичної природи. Тому в процесі динамічного проектування швидкісного рухомого складу кількісна оцінка динамічних навантажень складає актуальну науково-технічну задачу.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Напрямок досліджень дисертації відповідає концепції реформування транспортного сектору України, програмі підвищення безпеки руху на залізницях України, затвердженої наказом «Укрзалізниці» № 547-Ц від 15.10.2001р, проектом Державної програми розвитку рейкового рухомого складу залізниць України в 2006–2015 рр. Напрямок досліджень пов'язаний також з виконанням науково-дослідних робіт міністерства транспорту та зв'язку України, «Укрзалізниці» та відповідає приоритетним напрямкам науково-технічного розвитку держави, планам науково-дослідних робіт Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна: «Побудова алгоритмів оцінки динамічного навантаження елементів конструкції швидкісного рухомого складу на основі інерціальних систем» (номер державної реєстрації 0104U008413), «Контроль та оцінка динамічної навантаженості елементів конструкції швидкісного рухомого складу і штучних споруд за кінематичною інформацією, що [illegible] інерціальною

Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В.Лазаряна

НТБ ДНУЗТ

вимірювальною системою» (номер державної реєстрації 0106U005702), за якими дисертант є відповідальним виконавцем та автором звітів.

Мета і задачі дослідження. Метою роботи є удосконалення методів оцінки динамічної взаємодії елементів конструкції та динамічної навантаженості швидкісного залізничного екіпажу з метою підвищення безпеки руху.

За для досягнення цієї мети необхідно виконати наступні завдання: розробити математичну модель просторового руху елементів конструкції швидкісного рухомого складу; розробити експериментально-обчислювальний метод розрахунку динамічної навантаженості конструкції залізничного вагону на швидкісних магістралях; виконати аналіз теоретичної бази, принципів побудови, основних схем і конструкцій функціональних елементів інерціальних вимірювальних систем з точки зору їх використання до вирішення задач динамічної навантаженості і безпеки руху; розробити алгоритм розрахунку динамічної навантаженості у точках контакту елементів конструкції швидкісного екіпажу; визначити динамічну навантаженість елементів конструкції залізничного екіпажу на швидкісних магістралях з урахуванням кривизни колії в плані і профілі, локальних нерівностей; розробити методику побудови годографу і визначення кінематичних параметрів руху.

Об'єкт дослідження – процес виникнення інерційних сил і моментів, які впливають на елементи конструкції рухомого складу при швидкісному русі.

Предмет дослідження – методи оцінки динамічної навантаженості елементів конструкції швидкісного залізничного екіпажу.

Метод дослідження поєднує обчислювальний і натурний експерименти. Обчислювальний експеримент базується на використанні нелінійних рівнянь просторового руху в формі Ейлера–Лагранжа, які представлені кватерніонними матрицями. Обчислювальний експеримент проводиться за компактними, каскадними алгоритмами, побудованими за допомогою кватерніонних матриць, елементами яких є квазішвидкості, параметри Родріга–Гамільтона, координати центра мас, інерційні характеристики та ін. Натурний експеримент базується на використанні інформації про квазішвидкісті та квазіприскорення, яка отримана за допомогою інерціальних вимірювальних систем, що адаптовані до потреб залізничного транспорту.

Наукова новизна отриманих результатів. Вперше запропоновані блочно-матричні математичні моделі нелінійної динаміки в просторі швидкісного залізничного екіпажу, які складені із блоків кватерніонних матриць відносно квазішвидкостей та параметрів Родрига–Гамільтона.

НТБ ДНУЗТ

Вперше розроблено експериментально-обчислювальний метод визначення динамічної навантаженості конструкції швидкісного залізничного екіпажу, який базується на використанні рівнянь руху в формі Ейлера–Лагранжа, інерціальної вимірювальної системи, що дозволяє відстежувати поточний стан показників безпеки руху за допомогою керуючих систем та впливати на процес регулювання швидкості руху поїзду.

Вперше розроблено каскадний алгоритм розрахунку динамічної навантаженості у точках контакту елементів конструкції швидкісного екіпажу: кузова – надресорної балки – візка – колісної пари – рейки, з урахуванням інерційних сил і моментів, заснований на використанні експериментальних даних про кінематичні параметри стану елементів конструкції, при русі залізничною колією, з урахуванням плану і профілю колії та локальних нерівностей.

Вперше запропоновано метод кількісної оцінки взаємодії колісної пари і рейки з урахуванням гіроскопічних, коріолісових, відцентрових, тангенційних інерційних сил і моментів при проходженні локальних нерівностей рейкової колії на високих швидкостях руху.

Удосконалено математичну модель просторового руху елементів конструкції швидкісного рухомого складу у формі нелінійних рівнянь Ейлера–Лагранжа, де в якості змінних прийняті виміряні інерціальною системою компоненти вектора лінійної швидкості полюсу базового тріедру і вектора кутової швидкості на зв'язані вісі.

Дістала подальший розвиток постановка та вирішення зворотної задачі динамічного проектування швидкісних екіпажів залізничного транспорту, яка зведена до оцінки динамічної навантаженості елементів конструкції при заданому режимі руху по відомій траєкторії у вигляді рейкової колії.

Практичне значення результатів дослідження визначається тим, що:

Розроблена блочна динамічна модель і складені відповідні блочно-модульні алгоритми динамічної навантаженості залізничного екіпажу, де в якості кінцевих елементів моделі прийняті підконструкції: кузов вагона, надресорна балка, візок, колісна пара, які об'єднані згідно компонованої схеми в дискретну систему асиметричних твердих тіл.

Вирішена технічна задача о кількісній оцінці гіроскопічних сил і моментів колісної пари при вилянні і качці на високих швидкостях руху, визначена „смуга безпеки" у збуреному русі колісної пари по рейковій колії з урахуванням локальних нерівностей.

Визначені нові кінематичні співвідношення для побудови «смуги безпеки» у збуреному русі з урахуванням зміщень колісної пари та її повороту у вигляді суміщених проекцій робочих поверхонь колеса і рейки в точках контакту на горизонтальну площину. Розглянуті критичні режими руху.

НТБ ДНУЗТ

Висновки і рекомендації, що містяться в дисертації, впроваджені на ВАТ „Крюковський вагонобудівний завод" при проектуванні швидкісних пасажирських вагонів, на НВО „Хартрон-Експрес ЛТД" при створенні інерціальних вимірювальних систем для діагностування та оцінювання параметрів руху пасажирського поїзду в існуючих електронних системах, а також розроблений програмно-апаратний комплекс використовується у Дніпропетровському національному університеті залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна на кафедрі „Вагони та вагонне господарство" при виконанні наукових та експериментальних досліджень пасажирських вагонів локомотивної тяги.

Достовірність основних результатів. Основні наукові положення, висновки і рекомендації, які містяться в дисертації достатньо обґрунтовані і достовірні, оскільки забезпечуються коректною постановкою технічної задачі, використанням сучасних інерціальних вимірювальних систем, рівняннями руху у формі Ейлера–Лагранжа, апробованих розрахункових схем, узгодженістю результатів теоретичних досліджень з відомими експериментальними даними. Проведена симетризація математичної моделі нелінійної динаміки швидкісного екіпажу залізничного транспорту з метою забезпечення її адаптації до сучасної обчислювальної техніки, що безпосередньо пов'язано з підвищенням достовірності обчислювального експерименту. Симетризація матричних алгоритмів розрахунку інерційних сил і моментів дозволила полегшити складання, верифікацію і тестування обчислювальних програм, знизити вірогідність появи помилок у запису громіздких формул і обчислювальної програми.

Особистий внесок здобувача. Публікації за темою дисертації [1, 3, 4, 10, 11] виконані самостійно, в роботах підготовлених у співавторстві автору належить наступне:

– в роботі [2] розроблено каскадний алгоритм розрахунку динамічної навантаженості у точках контакту елементів конструкції швидкісного екіпажу, заснований на використанні експериментальних даних о кінематичних параметрах стану елементів конструкції при русі по залізничній колії, з урахуванням її плану і профілю, локальних нерівностей;

– в роботі [5, 8] запропоновано схему комбінованого екіпажу наземного транспорту, який забезпечує найбільший показник ходової якості при високих швидкостях руху;

– в роботі [6] розроблено алгоритм оцінки інерційних сил і моментів, що виплавають на колісну пару. Алгоритм складено із блоків кватерніонних матриць, відносно квазішвидкостей і параметрів Родріга–Гамільтона;

– в роботі [7] належить симетрізований підхід до побудови математичних моделей, який підвищує достовірність обчислювального експерименту;

НТБ ДНУЗТ

– в роботі [9] запропоновано алгоритм розрахунку динамічної навантаженості залізничної колії, який базується на використанні інерціальної вимірювальної системи;
– в роботі [12] запропоновано алгоритм визначення динамічної навантаженості залізничного моста за допомогою інерціальної вимірювальної системи;
– в роботі [13] кількісно визначена динамічна навантаженість колісної пари при проходженні локальних нерівностей колії;
– в роботі [14] запропоновано алгоритм обробки даних колієвимірювача при побудові годографу руху.

Апробація результатів дисертації. Результати дисертації доповідались на:
– 3rd EAST EUROPEAN Conference on WIND ENGINEERING. 3rd EECWE'2002 (Kyiv, Ukraine 2002).
– X Международная конференция по автоматическому управлению. Автоматика-2003 (Севастополь, 2003).
– Международная конференции «Проблемы гармонии, симметрии и золотого сечения в природе, науке и искусстве» (Винница, 2003).
– XI Международная конференция «Проблемы механики железнодорожного транспорта » (Днепропетровск, 2004).
– 65 Міжнародна науково-практична конференція «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту» (Дніпропетровськ, 2005).
– 66 Міжнародна науково-практична конференція «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту» (Дніпропетровськ, 2006).

Публікації. За результатами дисертації опубліковано 14 наукових праць, з яких 6 – у виданнях, що входять до переліку ВАК України, 2 – у збірниках наукових праць, 6 тез доповідей у міжнародних науково-технічних конференціях.

Структура та обсяг роботи. Дисертація складається зі вступу, п'ятьох розділів, висновків, переліку використаної літератури та трьох додатків. з яких основний зміст викладено на 121 сторінці, що містить 29 рисунків та 3 таблиці. Список використаних джерел складається зі 119 найменувань, викладених на 12 сторінках. Додатки складаються зі 65 сторінок та містять графіки, рисунки, опис програмного забезпечення, а також акти впровадження результатів роботи. Повний об'єм дисертації складає 199 сторінок.

НТБ ДНУЗТ

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність оцінки динамічного навантаження щодо швидкісних залізничних екіпажів і наведено огляд наукових праць, які відносяться до розглянутої проблематики. Формулюється мета і постановка задач, які вирішуються на основі запропонованого експериментально-обчислювального методу. Вказуються положення, які виносяться автором до захисту, що складають наукову новизну і практичну цінність.

Перший розділ присвячено опису процедури динамічного проектування транспортних екіпажів на основі обчислювального експерименту. Викладено сучасну технологію проведення обчислювального експерименту, яка основана на побудові блочно-матричних математичних моделей, адекватних технічним задачам динаміки складних транспортних систем, включаючи екіпажі швидкісного наземного транспорту. Побудові математичних моделей та дослідженню динаміки залізничних екіпажів присвячені фундаментальні праці наукової школи академіка В.А. Лазаряна, включаючи відомих вчених Блохіна Є.П., Ушкалова В.Ф., Дьоміна Ю.В., Коротенка М.Л., Дановіча В.Д., Манашкіна Л.А., Савчука О.М., Мямліна С.В., Радченка М.О., Богомаза Г.І., Хачапурідзе М.М., Редька С.Ф., а також вчених інших наукових шкіл, Анісімова П.С., Бороненка Ю.П., Голубенка А.Л., Осеніна Ю.І., Ткаченка О.П., Бубнова В.М., Черкащина Ю.М., Вершинського С.В., Грачева Л.О., Соколова М.М., Челнокова І.І. та ін. В цих працях при побудові математичних моделей широко використовуються рівняння Лагранжа другого роду в узагальнених координатах. Подальший розвиток цього наукового напрямку пов'язано з пошуком доцільної форми представлення математичних моделей, адаптованих до обчислювальної техніки. В даній роботі для цієї мети пропонується використовувати диференційні рівняння руху у формі Ейлера–Лагранжа і математичний апарат кватерніонних матриць. Базова модель просторового руху i-того твердого тіла у формі нелінійних рівнянь Ейлера–Лагранжа схематично записується у виді:

$$\varepsilon_i(T) = \sum_k \left\| \begin{matrix} \overline{M}^k_{yi} \\ \overline{Q}^k_{yi} \end{matrix} \right\|,$$

де $\overline{M}^k_{yi}, \overline{Q}^k_{yi}$ – приведені до маси m_i узагальнені моменти й сили, які прикладені до i-того твердого тіла, $\varepsilon_i(T)$ – ейлерів оператор.

Тут в якості змінних прийняті квазішвидкості – проекції вектора кутової швидкості тіла та лінійної швидкості полюса на зв'язані з тілом вісі

НТБ ДНУЗТ

координат. Ейлерів оператор представлено у симетричній формі за допомогою кватерніонних матриць у виді:

$$\varepsilon_i(T) = \begin{Vmatrix} \bar{I}_{yi} & \frac{1}{2}\left({}^{\prime}Y_{ci} + Y_{ci}\right) \\ \frac{1}{2}\left(Y'_{ci} + {}^{\prime}Y'_{ci}\right) & E_0 \end{Vmatrix} \begin{Vmatrix} \dot{\omega}_{yi} \\ \dot{V}_{0yi} \end{Vmatrix} + \begin{Vmatrix} \frac{1}{2}\left({}^{\prime}\Omega_{yi} + \Omega_{yi}\right) & \frac{1}{2}\left({}^{\prime}V_{yi} + V_{yi}\right) \\ 0 & \frac{1}{2}\left({}^{\prime}\Omega_{yi} + \Omega_{yi}\right) \end{Vmatrix} \begin{Vmatrix} \bar{I}_{yi} & \frac{1}{2}\left({}^{\prime}Y_{ci} + Y_{ci}\right) \\ \frac{1}{2}\left(Y'_{ci} + {}^{\prime}Y'_{ci}\right) & E_0 \end{Vmatrix} \begin{Vmatrix} \omega_{yi} \\ V_{0yi} \end{Vmatrix}$$

де E_0 – одинична матриця – (4×4); 0 – нульова матриця – (4×4); $\bar{I}_{yi}$ – приведена до маси матриця інерції тіла в зв'язаних вісях; Y_{ci}, ${}^{\prime}Y_{ci}$, Y'_{ci}, ${}^{\prime}Y'_{ci}$ – кватерніонні матриці, які складаються з координат центра мас у вісях, пов'язаних з тілом; Ω_{yi}, ${}^{\prime}\Omega_{yi}$ – кватерніонні матриці, які складаються з компонент кутової швидкості тіла в зв'язаних вісях; V_{yi}, ${}^{\prime}V_{yi}$ – кватерніонні матриці, які складаються з компонент лінійної швидкості полюса у вісях, пов'язаних з тілом.

Розглянуто дві постановки задачі динамічного проектування: традиційна і зворотна, доцільність рішення якої стосовно швидкісних залізничних екіпажів обгрунтовується в даній роботі. Традиційна постановка задач динамічного проектування зведена до находження кінематичних параметрів руху, зокрема, траєкторії, по заданим характеристикам об'єкта і зовнішньому впливу, включаючи керуючі сили і моменти, які формуються за допомогою інерціальної вимірювальної системи. Узагальнена постановка зворотної задачі зведена до знаходження динамічної навантаженості швидкісних залізничних екіпажів при заданому режимі руху по відомій траєкторії у вигляді рейкової колії, яка характеризується кривиною в плані і профілі, локальними нерівностями. Тут вважається, що кінематичні параметри руху квазішвидкісті безпосередньо виміряні інерціальною системою. Запропонована базова блочно-модульна динамічна модель і відповідна блочно-матрична математична модель нелінійної динаміки в просторі швидкісного залізничного екіпажу. Блочно-матричні диференційні рівняння руху складені відносно шести квазішвидкостей, чотирьох параметрів Родріга–Гамільтона та трьох координат полюса. Ці рівняння приведені до форми Коші, містять симетричні блоки кватерніонних матриць, які є зручними при програмуванні і ефективними при обчислюванні. Права частина диференційних рівнянь формується у вигляді суми ідентичних за структурою блочних матриць та залежить від характеру і складу сил, які впливають на залізничний екіпаж. Приводиться приклад застосування викладеного алгоритму рішення задачі

НТБ ДНУЗТ

динамічного проектування при розробці зразка комбінованого транспортного засобу.

Другий розділ присвячено аналізу конструкцій, фізичних принципів побудови чутливих елементів, адаптації інерціальної вимірювальної системи до задач динамічного проектування швидкісних залізничних екіпажів. Використання інерціальних вимірювальних систем до потреб залізничного транспорту складає новий технічний напрямок, актуальність якого зростає із збільшенням швидкості руху рухомого складу. Теоретичні основи, функціональні елементи інерціальних вимірювальних систем використовуються для вирішення задач безпеки, динамічної міцності, комфортності руху залізничних екіпажів на швидкісних магістралях.

Задача інерціальної вимірювальної системи полягає в визначенні фазового стану об'єкта, тобто параметрів, які характеризують положення полюса і орієнтацію базових напрямків у просторі, лінійну і кутову швидкість та прискорення. В загальному випадку для повного вимірювання фазового стану об'єкту інерціальна вимірювальна система будується на основі блока елементів, які складаються із трьох лінійних та кутових акселерометрів, вісі яких утворюють ортогональні базові тріедри. Вимоги, які пред'явлені до вимірювально-оброблювального комплексу та технічних засобів включають характеристики швидкодії, часу безвідмовної роботи, обмеження на габарит, вагу та ін. Розглядаються гіростабілізовані і безплатформові інерціальні вимірювальні системи.

Розглянута узагальнена схема інерціальної вимірювальної системи, яка формує вектор лінійного і кутового прискорення, лінійної і кутової швидкості, переміщення полюса базового тріедра та його орієнтування в просторі. Введено системи координат, які пов'язані з поверхнею Землі в пункті відправлення, з гіростабілізованою платформою і залізничним екіпажем. В якості полюса базового тріедра інерціальної вимірювальної системи приймається довільна точка, яка належить залізничному екіпажу, де технічно можливе встановлення чутливих елементів. Орієнтація зв'язаної системи координат відносно інерціального простору визначається кутами Ейлера–Крилова. Послідовність кутів повороту Ейлера–Крилова описується сукупністю параметрів Родрига–Гамільтона. Проекції вектору лінійної швидкості полюсу і вектору кутової швидкості екіпажу на пов'язані вісі – в базовому тріедрі безплатформової інерціальної вимірювальної системи виражаються через компоненти лінійної швидкості полюсу, параметри Родрига–Гамільтона та їх похідні за часом за допомогою кватерніонних матриць у вигляді:

$$\omega_y = 2R^t \times \dot{r}, \qquad V_{0y} = R^t \times {}^t R^t \times \dot{Z}_0.$$

НТБ ДНУЗТ

Зворотні залежності знаходяться, використовуючи відповідні кватерніонні матриці:

$$\dot{r} = 0{,}5 \times^{t} R \times \omega_y, \quad \dot{Z}_0 = R \times^{t} R \times V_{0y}.$$

Компоненти вектора кутової швидкості у гіростабілізованому і безплатформовому базисі пов'язані перетворенням $\omega_x = R \times^{t} R \times \omega_y$. Компоненти вектора кутової швидкості в інерціальній системі координат знаходяться у виді $\omega_x = 2R \times \dot{r}$, шляхом виключення ω_y. Матрична формула швидкості довільної точки в просторовому русі в проекціях на пов'язані вісі має вигляд:

$$V_y = V_{0y} + \frac{1}{2}\left(\Omega_y + {}^{t}\Omega_y \right) y.$$

Використані тут кінематичні параметри пов'язані з інваріантними співвідношеннями $4\dot{r}^{t} \times \dot{r} = \omega_y^{t} \times \omega_y = \omega_x^{t} \times \omega_x$, а також $\dot{r}^{t} \times r = 0$, $r^{t} \times r = 1$, $\dot{Z}_0^{t} \times \dot{Z}_0 = V_{0y}^{t} \times V_{0y}$. Складеним на основі числення кватерніонних матриць кінематичним залежностям притаманна компактність, симетрія, зручність складання розрахункових алгоритмів.

Третій розділ присвячено розробці алгоритмів оцінки динамічної навантаженості силової конструкції швидкісного екіпажу при різних режимах руху по рейковій колії. Алгоритми побудовані на основі експериментальних вимірювань кінематичних параметрів руху. Вимірювально-оброблювальний комплекс розміщується на борту залізничного вагона з метою безперервної реєстрації кутового та лінійного прискорень, швидкості і пересування в процесі руху по ділянці колії що досліджується. Вводиться система координат, яка зв'язана безпосередньо з вагоном і яка має вісі, зорієнтовані паралельно осям симетрії кузова вагона, і полюс, суміщений з точкою швидкісного вагона, де технічно можливий монтаж інерціальної вимірювальної системи. Проекції вектора швидкості полюса і вектора кутової швидкості кузова вагона на зв'язані вісі приймаються в якості квазішвидкостей нелінійних диференційних рівнянь просторового руху в формі Ейлера–Лагранжа. В процесі руху залізничного екіпажу по рейковій колії на кузов вагона впливає система заданих активних і пасивних сил, включаючи силу ваги, внутрішні інерційні сили і моменти, що обумовлені викривленням просторової траєкторії полюса і поворотом в просторі зв'язаних з кузовом вісей. Динамічні навантаження, які сприймаються силовими елементами конструкції, визначаються в заданому небезпечному перетині кузова. Розсікаючи кузов

НТБ ДНУЗТ

цією площиною, умовно відокремлюємо одну частину кузова разом з прикладеними до неї силами і моментами від іншої та використовуючи принцип звільнення від зв'язків вводимо в системі вісей зв'язаних з цим перетином еквівалентний результуючий момент і силу реакції взаємодії між відокремленими частинами кузова. Шукані еквівалентні динамічні навантаження у вигляді вектора моменту і сили в обраній площині знаходяться безпосередньо в явній аналітичній формі із диференційних рівнянь руху Ейлера–Лагранжа для кожної із відокремлених частин кузова:

$$-\begin{Vmatrix} M_S^e \\ N_S^e \end{Vmatrix} = m_1 \varepsilon_1(T) + m_1 g \begin{Vmatrix} \frac{1}{2}\left({}^{\prime}Y_{c1} + Y_{c1}\right) \\ E_0 \end{Vmatrix} R' \times {}^{\prime}R' \begin{Vmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ -1 \end{Vmatrix} + m_1 \begin{Vmatrix} \overline{M}_{y1}^a \\ \overline{Q}_{y1}^a \end{Vmatrix} + m_1 \begin{Vmatrix} \overline{M}_{y1}^T \\ \overline{N}_{y1}^T \end{Vmatrix},$$

або

$$\begin{Vmatrix} M_S^e \\ N_S^e \end{Vmatrix} = m_2 \varepsilon_2(T) + m_2 g \begin{Vmatrix} \frac{1}{2}\left({}^{\prime}Y_{c2} + Y_{c2}\right) \\ E_0 \end{Vmatrix} R' \times {}^{\prime}R' \begin{Vmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ -1 \end{Vmatrix} + m_2 \begin{Vmatrix} \overline{M}_{y2}^a \\ \overline{Q}_{y2}^a \end{Vmatrix} + m_2 \begin{Vmatrix} \overline{M}_{y2}^T \\ \overline{N}_{y2}^T \end{Vmatrix},$$

де $\varepsilon(T)$ – ейлерів оператор.

Для умовно відокремлених заданою площиною частин кузова виконуються наступні матричні співвідношення:

$$m E_0 = m_1 E_0 + m_2 E_0, \qquad m Y_c = m_1 Y_{c1} + m_2 Y_{c2},$$
$$m \bar{I}_y = m_1 \bar{I}_{y1} + m_2 \bar{I}_{y2}, \qquad m \varepsilon(T) = m_1 \varepsilon_1(T) + m_2 \varepsilon_2(T),$$

де m, m_1, m_2 – маса кузова і його відокремлених частин; Y_c, Y_{c1}, Y_{c2} – кватерніонні матриці, які складено за координатами центра мас кузова та його відокремлених частин; $\bar{I}_y, \bar{I}_{y1}, \bar{I}_{y2}$ – приведені до відповідної маси матриці інерції кузова і частин, що відокремлюються, які обчислені у зв'язаній системі координат.

Структура матриць узагальнених сил залежить від фізичної природи сил і моментів, діючих на кузов, до числа яких включено силу ваги, аеродинамічні навантаження, динамічну реакцію візків на кузов вагона та ін. Для вирішення поставленої задачі достатньо скористатися однією з приведених формул, друга – може служити меті контролю правильності обчислення. Експериментальні данні вимірювань трьох компонент лінійної і кутової швидкості і прискорення кузова в цілому при русі по рейковій колії перетворені до зв'язаної системи координат у вигляді відомих квазішвидкостей і квазіприскорень. До зв'язаної

ИТВ ДНУЗТ

з кузовом системи координат приводяться також і уважаються заданими матриці інерції відокремлених частин кузова, кватерніонні матриці, які складено за координатами центра мас цих частин, матриць впливу сили тяжіння на кожну із умовно відокремлених частин кузова, матриць активних сил і моментів, які прикладені до відповідних частин кузова, матриць динамічної реакції візків та інших необхідних вихідних даних. Варіюючи положення і орієнтацію січної площини, вдається оцінити розподілення динамічних навантажень по довжині кузова вагона. Тут також вдається оцінити величину складових в динамічному навантаженні кузова, обумовлених інерційними силами – тангенційними, гіроскопічними, відцентровими, кориолісовими, а також силою ваги та ін. Отримані результати необхідні для прийняття обґрунтованих рішень в процесі проектування і експлуатації рухомого складу.

У четвертому розділі розроблено каскадний алгоритм визначення динамічної навантаженості елементів конструкції швидкісного вагона в місцях контакту кузова і надресорної балки, надресорної балки і рами візка, рами візка і колісної пари, колісної пари і рейки, заснований на використанні оператора Ейлера і експериментальних даних о кінематичних параметрах стану елементів конструкції при швидкісному русі вагона по рейковій колії з урахуванням плану і профілю, локальних нерівностей. Відома ідея каскадного методу, яка запропонована П. Лапласом і Г. Дарбу, може бути використана в даній задачі і зведена до побудови послідовності рівнянь, через рішення яких виражається шукане рішення задачі в цілому.

Внутрішня динамічна реакція кузова вагона на надресорну балку і в звороті у вигляді вектора моменту і сили $M_{yl}^{K}\ N_{yl}^{K}$ визначається у явній аналітичній формі за допомогою рівнянь Ейлера–Лагранжа:

$$-\frac{1}{m_l}\begin{Vmatrix} M_{yl}^{K} \\ N_{yl}^{K} \end{Vmatrix} = g\begin{Vmatrix} \frac{1}{2}\left({}^{l}Y_{cl} + Y_{cl}\right) \\ E_0 \end{Vmatrix} R_l^{t} \times {}^{l}R_l^{t}\begin{Vmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ -1 \end{Vmatrix} + \frac{1}{m_l}\begin{Vmatrix} M_{yl} \\ Q_{yl} \end{Vmatrix} + \varepsilon_l(T)$$

де $\frac{1}{m_l}\begin{Vmatrix} M_{yl} \\ Q_{yl} \end{Vmatrix}$ – віднесені до маси кузова блочні матриці заданих узагальнених активних сил і моментів, включаючи аеродинамічний вплив і тягу;

$\varepsilon_l(T)$ – ейлерів оператор для кузова вагона.

НТБ ДНУЗТ

Тут вважаються заданими інерційні характеристики кузова ($\bar{I}_{y1}, m_1$), координати центра мас (Y_{c1}) і інші параметри, які складають необхідні вихідні дані, а також експериментально знайдені кінематичні параметри руху кузова у вигляді квазішвидкостей (ω_{y1}, V_{oy1}) і квазіприскорень ($\dot{\omega}_{y1}, \dot{V}_{oy1}$).

В ейлеревому операторі перший матричний блок визначає тангенційні інерційні сили і моменти, які проявляються в перехідних режимах руху, другий матричний блок характеризує відцентрові, гіроскопічні та коріолісові сили і моменти, які проявляються при русі в кривих з урахуванням плану і профілю колії, з притаманними їй локальними нерівностями. Експериментальні дані вимірювально-оброблювального комплексу о кінематичних параметрах руху, матриця інерції кузова, матриці узагальнених сил і моментів визначаються у пов'язаній з кузовом системі координат.

Згідно принципу звільнення від зв'язків, відокремимо надресорну балку від кузова вагона і рами візка і введемо відповідні динамічні реакції у вигляді моментів M^K_{y2}, M^H_{y2} і сил N^K_{y2}, N^H_{y2} в системі вісей, зв'язаних з надресорною балкою. Положення полюса і орієнтація цієї системи координат визначаються зручністю розміщення чутливих елементів безплатформової інерціальної вимірювальної системи безпосередньо на балці, а також особливостями функціонування чутливих елементів. Проекції вектора швидкості $V_{I0,y2}$ полюса і вектор кутової швидкості ω_{iy2} $(i=1,2,3)$ балки вдається безпосередньо вимірювати безплатформовою інерціальною вимірювальною системою. Задані також інерційні характеристики надресорної балки, система активних та пасивних сил, включаючи визначену вище динамічну реакцію кузова. За цими умовами шукана динамічна реакція рами візка на надресорну балку визначена в явній аналітичній формі на основі рівнянь Ейлера–Лагранжа:

$$-\frac{1}{m_2}\begin{Vmatrix} M^H_{y2} \\ N^H_{y2} \end{Vmatrix} = g\begin{Vmatrix} \frac{1}{2}\left({}^tY_{c2}+Y_{c2}\right) \\ E_0 \end{Vmatrix} R_2{}^t \times {}^tR_2{}^t \begin{Vmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ -1 \end{Vmatrix} + \frac{1}{m_2}\begin{Vmatrix} M^K_{y2} \\ N^K_{y2} \end{Vmatrix} + \varepsilon_2(T).$$

Тут ейлерів оператор $\varepsilon_2(T)$ характеризує динамічний вплив на раму візка, обумовлений інерційними властивостями надресорної балки. Далі, згідно каскадного методу, ізолюємо раму візка від надресорної балки і колісної пари, вводячи відповідні реакції зв'язків M^H_{y3}, N^H_{y3}, M^W_{y3}, N^W_{y3}, що приведені до системи вісей, зв'язаних з рамою візка. Положення і орієнтація введених вісей координат обумовлено функціонуванням безплатформової інерціальної вимірювальної системи, яка розміщена на рамі візка для вимірювання вектора

НТБ ДНУЗТ

лінійної швидкості $V_{i0,y3}$ полюса і вектора кутової швидкості рами $\omega_{i,y3}$ $(i=1,2,3)$. Шуканий динамічний вплив рами візка на колісну пару визначається аналогічним чином за допомогою рівнянь Ейлера–Лагранжа:

$$-\frac{1}{m_3}\begin{Vmatrix} M^W_{y3} \\ N^W_{y3} \end{Vmatrix} = g\begin{Vmatrix} \frac{1}{2}\left({}'Y_{c3}+Y_{c3}\right) \\ E_0 \end{Vmatrix} R_3' \times {}'R_3' \begin{Vmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ -1 \end{Vmatrix} + \frac{1}{m_3}\begin{Vmatrix} M^H_{y3} \\ N^H_{y3} \end{Vmatrix} + \varepsilon_3(T).$$

Тут необхідні вихідні дані по інерційним характеристикам рами візка, геометричним і конструктивним параметрам вважаються відомими, а кінематичні параметри руху рами візка – експериментально знайденими за допомогою безплатформової інерціальної вимірювальної системи.

Послідовно відокремлюємо колісну пару від рами візка і вводимо знайдену раніше динамічну реакцію M^W_{y4}, N^W_{y4} і невідому динамічну реакцію рейки на колесо M^R_{y4}, N^R_{y4} в системі вісей, зв'язаних, наприклад, з буксовим вузлом колісної пари. Безплатформова інерціальна вимірювальна система, яка розміщена безпосередньо на буксовому вузлі, дозволить виміряти вектор лінійної швидкості $V_{i0,y4}$ полюса і вектор кутової швидкості $\omega^W_{i,y4}$ $(i=1,2,3)$ повороту колісної пари. Кутова швидкість обертання колісної пари знаходиться незалежно від інерціальної вимірювальної системи по заданій швидкості поступального руху вагона. Заключною ланкою в низці каскадних рівнянь є рівняння руху Ейлера–Лагранжа для колісної пари, із яких безпосередньо визначається динамічна реакція колеса на рейку:

$$-\frac{1}{m_4}\begin{Vmatrix} M^R_{y4} \\ N^R_{y4} \end{Vmatrix} = g\begin{Vmatrix} \frac{1}{2}\left({}'Y_{c4}+Y_{c4}\right) \\ E_0 \end{Vmatrix} R_4' \times {}'R_4' \begin{Vmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ -1 \end{Vmatrix} + \frac{1}{m_4}\begin{Vmatrix} M^W_{y4} \\ N^W_{y4} \end{Vmatrix} + \varepsilon_4(T),$$

Тут ейлерів оператор для колісної пари $\varepsilon_4(T)$ містить задані геометричні і інерційні характеристики, а також кінематичні параметри, що визначаються інерціальною вимірювальною системою. Відзначимо, що збільшення швидкості руху залізничних екіпажів призводить до необхідності урахування і коректної оцінки гіроскопічних сил і моментів, що наростають за квадратичним законом в залежності від швидкості обертання колісної пари і пропорційно її моменту інерції. Також з відцентровими і гіроскопічними силами і моментами суттєвий вплив на безпеку поступального руху

НТБ ДНУЗТ

залізничного екіпажу оказують й коріолісові сили, які обумовлені коливаннями колісної пари відносно візка. Оцінка згаданих інерційних сил і моментів в загальному балансі силової взаємодії колісної пари і рейки в залежності від швидкості поступального руху представлена другим матричним блоком в операторі $\varepsilon_4(T)$.

У п'ятому розділі проводиться кількісна оцінка динамічної навантаженості швидкісного рухомого складу на основі розробленої технології обчислювального експерименту. Локальні нерівності колії викликають вертикальні та бокові коливання колісної пари, що приводить до появи гіроскопічних, віддентрових, коріолісових, тангенційних сил і моментів. Кількісна оцінка цих інерційних сил і моментів в залежності від швидкості руху поступального руху та траєкторії залізничної колії складає актуальну задачу, що безпосередньо пов'язана з проблемою безпеки руху на швидкісних магістралях. Отримана компактна блочно-матрична формула для визначення інерційних сил і моментів, що виникають при взаємодії колісної пари, яка обертається із високою швидкістю та рейок з урахуванням кривини залізничної колії в плані і профілі:

$$-\frac{1}{m_r}\begin{Vmatrix} M_{yr}^G \\ N_{yr}^G \end{Vmatrix} = \begin{Vmatrix} \frac{1}{2}\left({}'\Omega_{yr}+\Omega_{yr}\right) & \frac{1}{2}\left({}'V_{yr}+V_{yr}\right) \\ 0 & \frac{1}{2}\left({}'\Omega_{yr}+\Omega_{yr}\right) \end{Vmatrix} \times \begin{Vmatrix} \tilde{I}_{yr} & \frac{1}{2}\left({}'Y_{cr}+Y_{cr}\right) \\ \frac{1}{2}\left(Y'_{cr}+{}'Y'_{cr}\right) & E_0 \end{Vmatrix} \begin{Vmatrix} \omega_{yr} \\ V_{0yr} \end{Vmatrix}.$$

Тут V_{0yr1} – швидкість поступального руху колісної пари; V_{0yr2} – швидкість бокових і V_{0yr3} – швидкість вертикальних коливань колісної пари, що обумовлені локальними нерівностями колії. Зокрема, $V_{0yr1}=V_\infty$ де вважається, що швидкість залізничного екіпажу V_∞ є заданою і постійною. Матриця інерції $\tilde{I}_{yr}$ колісної пари розрахована у відповідності до заданих вихідних даних по колісній парі візка КВЗ И2 у обраному базовому тріедрі та приведена до маси.

Розглядається прямолінійна ділянка залізничної колії довжини L, де локальні нерівності визначались колієвимірювачем із шагом h у виді відхилень від прямої координат правої рейки. Результати вимірювань колії в плані і профілі із шагом, що є заданим, представлені у виді просторової траєкторії за допомогою двох проекцій – вертикальної і горизонтальної. Вважаємо, що розглянуту ділянку колії пройдено залізничним екіпажем із заданою і постійною швидкістю V_∞. При заданому режимі руху залізничного екіпажу із постійною швидкістю по заданій просторовій траєкторії визначається годограф полюсу базового тріедру колісної пари в залежності від часу проходження цієї ділянки колії. З метою уніфікації годографу відносно

НТБ ДНУЗТ

варіацій швидкості проходження розглянутої ділянки колії вводиться безрозмірний час, який змінюється на інтервалі $[0, 1]$, а також безрозмірні вертикальні і горизонтальні переміщення, що приведені до характерних величин. На підставі експериментальних даних будуються графіки зміни приведених бокових і вертикальних переміщень колісної пари по колії в залежності від безрозмірного часу. Використовуючи дані зчисленого диференціювання, будуються графіки зміни похідних приведених горизонтальних бокових і вертикальних переміщень колісної пари за безрозмірним часом $\overline{V}_2$, $\overline{V}_3$, що віднесені до відповідної найбільшої на відрізку величини швидкості $\overline{V}_{2\max}$, $\overline{V}_{3\max}$. За допомогою побудованого годографу визначаємо швидкість колісної пари в боковому і вертикальному напрямках. Розроблено алгоритм приведення матриці інерції колісної пари до базового тріедру. Запропоновано методику складання матриці інерції при урахуванні погрішностей виготовлення і монтажу колісної пари, які обумовлені зміщенням центру мас, перекосом головних центральних вісей інерції. Розрахункову формулу матриці інерції, що складено на основі кватерніонних матриць відрізняє компактність і симетрія структури, що забезпечує зручність реалізації алгоритму на ПЕОМ і ефективність процесу обчислення.

На підставі підготовлених вихідних даних розраховуються гіроскопічні, відцентрові, коріолісові інерційні сили і моменти, які впливають на колісну пару. Результати розрахунків по оцінці впливу локальних нерівностей залізничної колії на динамічну навантаженість колісної пари при швидкостях руху 100 км/г, 200 км/г, 300 км/г зведено до табл. 1.

Таблиця 1

Результати розрахунків сил і моментів, що впливають на колісну пару

V, км/г	$\overline{M}_1 \times 10^3$, Нм/кг	$M_{2\max}$, Нм	$M_{3\max}$, Нм	$N_{1\max}$, Н	$\overline{N}_3 \times 10^3$, Н/кг
100	0,625	45,56	490,65	700,93	0,868
200	2,7	182,2	1962,6	2803,7	3,75
300	6,076	410	4415,9	6308,4	8,43

Як видно із табл. 1 при збільшенні швидкості поступального руху по заданим локальним нерівностям колії від 100 до 300 км/г екстремальні значення динамічної навантаженості колісної пари збільшуються приблизно на порядок. Вертикальна сила і відповідно, повздовжній гіроскопічний момент на три порядку перевищує інші компоненти динамічної навантаженості та оказують найбільший вплив при оцінці можливості сходу колеса з рейки.

НТБ ДНУЗТ

Використовуючи безрозмірний час і приводячи інерційні сили і моменти до відповідних найбільшим величинам, вдається уніфікувати отримані результати розрахунків, до зміни швидкості проходження даної ділянки колії.

Пропонується блочно-матрична формула для визначення тангенційних інерційних сил і моментів, що проявляються в перехідних режимах руху, при прискоренні і гальмуванні, а також при бокових і вертикальних коливаннях в процесі проходження локальних нерівностей колії:

$$-\frac{1}{m_r}\begin{Vmatrix} M^r_{yr} \\ N^r_{yr} \end{Vmatrix} = \begin{Vmatrix} \bar{I}_{yr} & \frac{1}{2}\left({}^{l}Y_{cr}+Y_{cr}\right) \\ \frac{1}{2}\left(Y^{l}_{cr}+{}^{l}Y^{l}_{cr}\right) & E_0 \end{Vmatrix} \begin{Vmatrix} \dot{\omega}_{yr} \\ \dot{V}_{0yr} \end{Vmatrix}$$

Тут компоненти кутового $\dot{\omega}_{yri}$ і лінійного прискорення $\dot{V}_{0yri}$ $(i=1,2,3)$ колісної пари визначаються в пов'язаній системі координат. Вважається, що ці компоненти кутового та лінійного прискорень колісної пари можуть бути безпосередньо виміряні безплатформовою інерціальною вимірювальною системою або пораховані за допомогою колієвимірювача в результаті повторного численного диференціювання побудованого годографу руху $\dddot{\bar{V}}_i = d\ddot{\bar{V}}_i / d\tau, (i=1,2,3)$. На розглянутій ділянці колії найбільші величини приведених бокових і вертикальних прискорень суттєво залежать від поступальної швидкості, що показано в табл. 2.

Таблиця 2

Найбільші величини приведених бокових та вертикальних прискорень

V, км/г	$\dddot{\bar{V}}_{2\max}$	$\dddot{\bar{V}}_{3\max}$
100	0,027	0,043
200	0,109	0,172
300	0,221	0,383

Будуються графіки зміни приведеного бокового і вертикального прискорення колісної пари за безрозмірним часом. Ці графіки є уніфікованими і не залежать від зміни поступальної швидкості руху. Формули перелічення приведеного лінійного прискорення колісної пари до абсолютної величини мають вид:

$$\dot{V}_i = \frac{L_{i\max}}{t_k} \times \frac{\bar{V}_{i\max}}{t_k} \times \dddot{\bar{V}}_{i\max} \times \dddot{\bar{V}}_i(\tau) \qquad (i=1,\ 2,\ 3).$$

НТБ ДНУЗТ

Компоненти тангенційних інерційних сил і моментів також віднесені до відповідних найбільших величин, що дозволяє уніфікувати отримані результати. Найбільші величини відповідних інерційних сил і моментів суттєво залежать від поступальної швидкості руху колісної пари. Результати розрахунків по оцінці цього впливу на шукану динамічну навантаженість зведено в табл. 3.

Таблиця 3.

Результати розрахунків тангенційних інерційних сил і моментів

V, км/г	M_{1max}, Нм	N_{2max}, Н	N_{3max}, Н
100	33,9	29,8	46,3
200	135,5	118,2	185,3
300	302,8	238,2	413,7

6605а

Як видно із табл. 3, екстремальні значення тангенційних інерційних сил і моментів, які впливають на колісну пару також зростають за квадратичним законом в залежності від швидкості поступального руху вагону. Зміни тангенційних інерційних сил і моментів за часом проходження локальних нерівностей заданої ділянки колії носить стохастичний, коливальний характер. Порівняння результатів розрахунків, дозволяє зробити висновок, що в цілому величини тангенційних сил и моментів суттєво нижче гіроскопічних, однак вони впливають в поперечному і вертикальному напрямках і ними не слід зневажати при аналізі безпеки руху.

Проводиться оцінка безпечного режиму руху за кінематичними умовами, які визначають відносне розташування поверхні контакту колеса та рейки в плані. Безпечний режим руху залізничного екіпажу визначається умовою, за якою робочі поверхні катання рейки та колеса були б суміщені хоча б в одній точці. При зіставленні проекцій робочих поверхонь колеса і рейки в інерціальній системі відліку визначається «смуга безпеки» руху, де ці поверхні є суміщеними (рис. 1).

НАУКОВО-ТЕХНІЧНА БІБЛІОТЕКА
Дніпропетровського національного
університету залізничного транспорту
імені академіка В.Лазаряна
НТБ ДНУЗТ

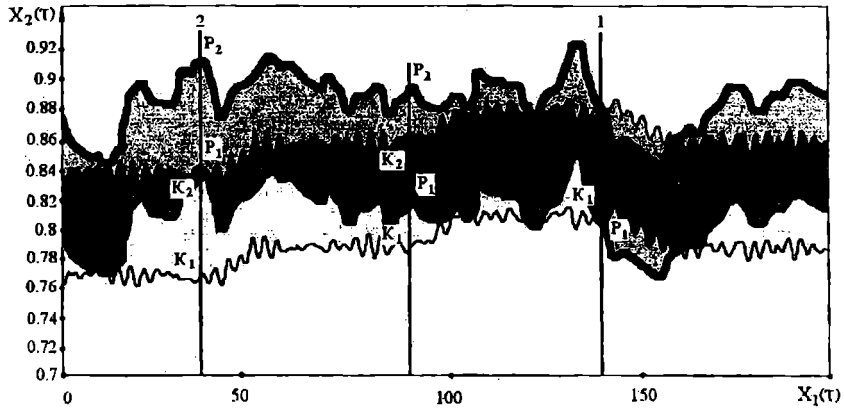

Рис. 1. «Смуга безпеки» руху колеса по рейці в горизонтальній площині.

Критичні режими руху позначені на малюнку перетинами. Цим перетинам відповідають моменти безрозмірного часу τ_1=0,7, τ_2=0,2 або фактичного часу t_1= 5 с, t_2= 1,4 с і відповідні координати вздовж колії $x_{1(5)}$= 140 м, $x_{1(1,4)}$= 40 м.

ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі на основі проведених теоретичних та експериментальних досліджень запропоновано вирішення актуальної науково-технічної задачі по удосконаленню методу оцінки динамічної навантаженості елементів конструкції швидкісного залізничного екіпажу, який дозволяє підвищити безпеку руху швидкісних пасажирських вагонів шляхом впровадження програмно-апаратного комплексу, який містить інерціальну вимірювальну систему, завдяки який забезпечується оперативне отримання необхідної інформації про кінематичні параметри руху, яка може бути використана як в процесі експлуатації швидкісних екіпажів залізничного транспорту із можливістю автоматичного керування рухом швидкісного пасажирського поїзду, так і при проведенні проектно-конструкторських робіт. На захист виносяться наступні результаті, які отримані в дисертаційній роботі:

1. Базова математична модель просторового руху елементів конструкції швидкісного рухомого складу у формі нелінійних рівнянь Ейлера–Лагранжа, де в якості змінних прийняті визначені інерціальною вимірювальною системою компоненти вектора лінійної швидкості полюса базового тріедра і вектора кутової швидкості на зв'язані вісі.

НТБ ДНУЗТ

2. Експериментально-обчислювальний метод розрахунку динамічної навантаженості конструкції залізничного вагону на швидкісних магістралях, що базується на використанні інформації о квазішвидкостях і квазіприскореннях, яка отримана за допомогою інерціальної вимірювальної системи, нелінійних рівнянь просторового руху в формі Ейлера–Лагранжа, що представлені кватерніонними матрицями. Метод дозволяє виділити складові динамічної навантаженості, які обумовлені відцентровими, гіроскопічними, коріолісовими, тангенційними інерційними силами і моментами, кількісно оцінити їх роль при русі з високою швидкістю по рейковій колії.
3. Блочні динамічні моделі залізничних екіпажів, які задовольняють блочно-модульній концепції програмування, де в якості кінцевих елементів використано асиметричні тверді тіла: кузов, надресорна балка, візок, колісна пара, які об'єднані відповідно до компонованої схеми.
4. Каскадний алгоритм розрахунку динамічної навантаженості у точках контакту елементів конструкції швидкісного екіпажу: кузов – надресорна балка – візок – колісна пара – рейки, з урахуванням відцентрових, гіроскопічних, коріолісових, тангенційних інерційних сил і моментів, що базується на використанні експериментальних даних о кінематичних параметрах стану елементів конструкції при русі по колії з урахуванням її плану і профілю, локальних нерівностей.
5. Блочно-матричні математичні моделі нелінійної динаміки в просторі швидкісного залізничного екіпажу, що складені із блоків кватерніонних матриць відносно квазішвидкостей і параметрів Родріга–Гамільтона, яким властива симетрія, компактність, універсальність і адаптованість до розрахункового експерименту на сучасних ПЕОМ.
6. Аналіз теоретичної бази, принципів побудови, основних схем і конструкцій функціональних елементів інерціальних вимірювальних систем з точки зору їх адаптації до вирішення задач динамічної навантаженості залізничних екіпажів на швидкісних магістралях.
7. Методика побудови годографу і визначення кінематичних параметрів руху, що виражені у безрозмірних змінних, за експериментально знайденій траєкторії рейкової колії з урахуванням локальних нерівностей і заданому режимі поступального руху швидкісного вагона.
8. Вирішення технічної задачі о кількісній оцінці взаємодії колісної пари і рейок з урахуванням гіроскопічних, коріолісових, відцентрових, тангенційних інерційних сил і моментів при проходженні локальних нерівностей рейкової колії на високих швидкостях руху.

НТБ ДНУЗТ

9. Методика визначення «смуги безпеки» при збуреному русі з урахуванням просторового зміщення колісної пари та її повороту на кути качки, галопування, виляння у вигляді сумісних проекцій робочих поверхонь колеса та рейки в точці контакту на горизонтальну площину.

Результати, що отримані в дисертаційній роботі знайшли використання на ВАТ „Крюковський вагонобудівний завод" при проектуванні швидкісних пасажирських вагонів, на НВО „Хартрон-Експрес ЛТД" при створенні інерціальних вимірювальних систем для діагностування та оцінювання параметрів руху пасажирського поїзду в існуючих електронних системах, розроблений програмно-апаратний комплекс використовується у Дніпропетровському національному університеті залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна на кафедрі „Вагони та вагонне господарство" при виконанні експериментальних та наукових досліджень динамічної навантаженості конструкції пасажирських вагонів локомотивної тяги.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ

1. Кравец В.В. Экспериментально-вычислительный метод расчета динамического нагружения скоростных экипажей железнодорожного транспорта // Техническая механика.– 2004. – №1. – С. 52 – 61.
2. Мямлин С.В., Кравец В.В. Каскадный алгоритм определения динамической нагруженности элементов конструкции скоростного вагона//Залізничний транспорт України.–2004.–№4.–С.47– 50.
3. Кравец В.В. Алгоритм определения гироскопических сил и моментов при взаимодействии колесной пары скоростного экипажа и рельса. // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – 2005. – Вип. 8. – С. 58 – 60
4. Кравец В.В. Об оценке динамического нагружения конструкции при скоростном движении вагона // Прикладная механика. – 2005. – Том 41, № 3.– С. 119 – 126.
5. Распопов А.С., Кравец В.В. Элементы динамического проектирования высокоскоростного наземного транспорта // Техническая механика. – 2003. – №2. – С. 101 – 108.
6. Кравец В.В., Кравец Т.В. Оценка инерционных сил и моментов, воздействующих на колесную пару при учете локальных неровностей железнодорожного пути // Техническая механика. – 2006. – № 2. – С. 52 – 61.
7. Мямлин С.В., Кравец В.В. Симметрия математической модели и достоверность вычислительного эксперимента // Збірник наукових праць

НТБ ДНУЗТ

Вінницького державного аграрного університету. Випуск 15. – Вінниця. 2003.– С. 339 –340.

8. Kravets V.V., Raspopov O.S. Concept of combined environmentally clean surface transport // Збірник праць Третьої східноєвропейської конференції з вітрової техніки 3rd EECWE'2002. Київ: Інститут гідромеханіки НАН України. 2002. – С. 14–16.
9. Кравец В.В., Распопов А.С. Применение инерциальной системы в расчетах динамического нагружения железнодорожного пути. // Тез. докл. 10-й международной конф. «Автоматика-2003». – Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2003. – Т. 2. – С. 61–62.
10. Кравец В.В. Контроль динамической нагруженности конструкции системы космических аппаратов по информации формируемой инерциальной системой. // Тез. докл. 11-й международной конф. «Автоматика-2004». – Киев: Изд-во КНУХТ, 2004. – Т. 3. – С. 15.
11. Кравець В.В. Применение инерциальных систем в задаче определения динамических усилий в элементах конструкции скоростного железнодорожного экипажа. // Тез. докл. 65-й международной научно-практической конф. «Проблемы и перспективы развития железнодорожного транспорта» – Дн-ск., ДИИТ, 2005. – С. 8–9.
12. Кравец В.В., Распопов А.С. Определение динамической нагруженности конструкции стального моста на основе инерциальной системы. // Тез. докл. 65-й международной научно-практической конф. «Проблемы и перспективы развития железнодорожного транспорта». Дн-ск., ДИИТ, 2005. – С. 268–269.
13. Кравец В.В., Кравец Т.В. Динамическая нагруженность колесной пары при прохождении локальных неровностей пути на высоких скоростях движения. // Тез. докл. 66-й международной научно-практической конференции «Проблемы и перспективы развития железнодорожного транспорта». – Дн-ск., ДИИТ, 2006. – С. 35–36.
14. Кравець В.В., Кравец Т.В., Русу С.П. Программное обеспечение обработки данных путеизмерителя при построении годографа движения. // Тез. докл. 66-й международной научно-практической конференции «Проблемы и перспективы развития железнодорожного транспорта». – Дн-ск., ДИИТ, 2006.– С.298.

НТБ ДНУЗТ

АНОТАЦІЯ

Кравець В.В. Удосконалення оцінки динамічної навантаженості елементів конструкції екіпажу швидкісного рухомого складу залізниць. – Рукопис.

Дисертація на здобуття вченого ступеню кандидата технічних наук за спеціальністю 05.22.07 – Рухомий склад залізниць і тяга поїздів. Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту ім. акад. В. Лазаряна. Дніпропетровськ, 2007.

Дисертацію присвячено розробці алгоритмів оцінки динамічної навантаженості елементів конструкції швидкісного рухомого складу на основі інерціальних вимірювальних систем. Приведена базова математична модель просторового руху елементів конструкції швидкісного рухомого складу у формі нелінійних рівнянь Ейлера–Лагранжа, де в якості змінних прийняті вимірювальні інерціальною системою компоненти вектора лінійної швидкості полюса базового тріедра і вектора кутової швидкості на зв'язані вісі. Пропонується експериментально-обчислювальний метод розрахунку динамічної навантаженості конструкції залізничного вагону. Метод дозволяє виділити складові динамічної навантаженості, які обумовлені інерційними силами і моментами, кількісно оцінити їх роль при русі з високою швидкістю по реальній колії. Розроблено каскадний алгоритм розрахунку динамічної навантаженості у точках контакту елементів конструкції швидкісного екіпажу при русі по колії, з урахуванням її плану і профілю, локальних нерівностей. Викладена методика побудови годографу і визначення кінематичних параметрів руху, що виражені у безрозмірних перемінних, по експериментально знайденій траєкторії рейкової колії і заданому режимі поступального руху швидкісного вагона. Вирішена технічна задача о кількісній оцінці взаємодії колісної пари і рейки з урахуванням гіроскопічних, коріолісових, відцентрових, тангенційних інерційних сил і моментів при проходженні локальних нерівностей рейкового шляху. Розроблено методику визначення „смуги безпеки" при просторовому зміщенні колісної пари із можливістю впливу на системи керування рухом поїзду.

Ключові слова: динамічна навантаженість, високошвидкісний рухомий склад, відцентрові, гіроскопічні, тангенційні, кориолісові інерційні сили, рівняння Ейлера–Лагранжа, інерціальна вимірювальна система, безпека руху.

НТБ ДНУЗТ

АННОТАЦИЯ

Кравец В.В. Усовершенствование оценки динамической нагруженности элементов конструкции экипажа скоростного подвижного состава железных дорог. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.22.07 – Подвижной состав железных дорог и тяга поездов. Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта им. акад. В. Лазаряна. Днепропетровск, 2007.

Диссертация посвящена усовершенствованию оценки динамической нагруженности конструкции скоростного подвижного состава на основе инерциальных измерительных систем. Приводится базовая математическая модель пространственного движения элементов конструкции скоростного подвижного состава в форме нелинейных уравнений Эйлера–Лагранжа, где в качестве переменных приняты измеряемые инерциальной системой компоненты вектора линейной скорости полюса базового триэдра и вектора угловой скорости на связанные оси. Предлагается экспериментально-вычислительный метод расчета динамической нагруженности конструкции железнодорожного вагона. Метод позволяет выделить составляющие динамической нагруженности, обусловленные инерционными силами и моментами, количественно оценить их роль при движении с высокой скоростью по реальному пути. Разработан каскадный алгоритм расчета динамической нагруженности в точках контакта элементов конструкции скоростного экипажа при движении по пути с учетом его плана и профиля пути, локальных неровностей. Изложена методика построения годографа и определения кинематических параметров движения, выраженных в безразмерных переменных, по экспериментально найденной траектории рельсового пути с учетом локальных неровностей и заданному режиму поступательного движения скоростного вагона. Решена техническая задача о количественной оценке взаимодействия колесной пары и рельса с учетом гироскопических, кориолисовых, центробежных, тангенциальных инерционных сил и моментов при прохождении локальных неровностей рельсового пути. Разработана методика определения „полосы безопасности" при пространственном смещении колесной пары с возможностью воздействия на системы управления движением поезда.

Ключевые слова: динамическая нагруженность, высокоскоростной подвижной состав, центробежные, гироскопические, тангенциальные, кориолисовы инерционные силы, уравнения Эйлера–Лагранжа, инерциальная измерительная система, безопасность движения.

НТБ ДНУЗТ

SUMMARY

Kravets' V. V. Improvement of an estimation of dynamic loading of structure elements for a vehicle of the high-speed railway rolling stock. – The manuscript.

The dissertation on competition for an academic degree of candidate of technical sciences on speciality 05.22.07 – Railway rolling stock and train traction. Dniepropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan. Dnipropetrovs'k, 2007.

The dissertation is devoted to improvement of an estimation of dynamic loading of a structure of the high-speed rolling stock on the basis of inertial measuring systems. It is substantiated the expediency of statement of inverse problems of dynamic designing the high-speed railway vehicles reducible to an estimation of dynamic loading of structure elements with the given traffic regime along a known trajectory in the form of a rail track characterized by the plan and profile curvatures as well as local irregularities taking into account the assumption that kinematics parameters of movement are being measured by sensitive elements of an inertial measuring system. The basic mathematical model of spatial movement of structural elements of the high-speed rolling stock in the form of nonlinear Euler-Lagrange equations is suggested, where the connected-axe components of a linear speed vector of a basic trihedron pole and an angular speed vector measured by an inertial system are accepted as variables. The block dynamic models of railway vehicles are developed satisfying the block&module concept of programming, where asymmetric solids (a body, a bolster, a bogie, a wheel pair) assembled according to the layout scheme are used as finite elements. The block-matrix mathematical models of nonlinear dynamics in a space of the high-speed railway vehicle are developed. These models are composed of block-type quaternion matrices with respect to quasispeeds and Rodrigues-Hamilton parameters having the symmetry, compactness, generality and adapted to computing experiment on modern personal computers. The review and analysis of theoretical base, principles of construction, basic schemes and designs of functional elements of existing inertial measuring systems from the standpoint of opportunity to apply and adapt them to solution of problems of dynamic loading, safety and comfortable conditions of movement of railway vehicles on high-speed railways have been performed. It has been suggested the experiment&computing method of calculation of internal dynamic loading of a structure of the railway wagon operated on high-speed railways based upon using the information on quasispeeds and quasiaccelerations obtained by means of an inertial measuring system and the nonlinear equations of spatial movement in the form of Euler-Lagrange represented by quaternion matrices. The method allows separating the components of dynamic loading caused by centrifugal, gyroscopic, Coriolis and tangential inertial forces and moments,

НТБ ДНУЗТ

quantitative estimating their role during the movement with high speed on a real track. It has been developed the cascade algorithm of calculation of dynamic loading at contact points of structure elements of high-speed vehicle: a body – a bolster – a bogie – a wheel pair – a rail, with taking into consideration the centrifugal, gyroscopic, Coriolis, tangential inertial forces and moments based upon the use of experimental data about kinematics parameters of conditions of structure elements during the movement on a track taking into account the track plan and profile as well as local irregularities. It has been presented the technique of building the hodograph and determining the kinematics parameters of motion expressed in dimensionless variables with the use of a trajectory of a rail track taking into account local irregularities (the trajectory has been determined experimentally by means of track measuring device) as well as the given regime of progress of the high-speed wagon. The technical problem on quantitative estimation of the wheel pair/rail interaction with the account of gyroscopic, Coriolis, centrifugal, tangential inertial forces and moments in passing the rail track local irregularities at high speeds of movement has been solved. The technique of determination of "a safety band" for spatial displacements of a wheel pair and its turns on the rolling, galloping, and hunting angles in the form of the combined projections to a horizontal plane for working surfaces of a wheel and a rail in a contact point with the opportunity of influence on control systems of train motion has been developed. The critical regimes of movement have been considered. The results of the research performed are directed to improving the safety and comfort of movement of the high-speed rolling stock; they contribute to making the reasonable decisions during their design and operation.

Keywords: dynamic loading; high-speed rolling stock; centrifugal, gyroscopic, tangential, Coriolis inertial forces; Euler-Lagrange equations; inertial measuring system; high-speed traffic safety.

НТБ ДНУЗТ

1-00

Кравець Володимир Вікторович

УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДУ ДИНАМІЧНОЇ НАВАНТАЖЕНОСТІ ШВИДКІСНОГО РУХОМОГО СКЛАДУ ЗАЛІЗНИЦЬ

Автореферат

дисертації на здобуття вченого ступеня
кандидата технічних наук

Підписано до друку « 02 » листопада 2007р. Формат 60x84 1/6.
Папір для множних апаратів. Різограф. Ум. друк арк. 0,9. Обл.-вид. 1,0.
Тираж 100 прим. Замовлення № 1702.

Дніпропетровський національний університет
залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. ДК 1315 від 31.03.2003

Адреса університету та дільниці оперативної поліграфії ДІІТу:
49010, Дніпропетровськ, 10, вул. Академіка Лазаряна, 2, www.diitrvv.dp.ua,
admin@diitrvv.dp.ua

НЕ ДЛЯ ДНУЗТ

Сканувала Камянська Н.О.