

МИНИСТЕРСТВО ПУТЕЙ СООБЩЕНИЯ СССР
ДНЕПРОПЕТРОВСКИЙ ИНСТИТУТ
ИНЖЕНЕРОВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА
имени М. И. КАЛИНИНА

На правах рукописи

ОЛЕМСКАЯ НИНА СТЕПАНОВНА

**ИССЛЕДОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ
ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ ЭКИПАЖЕЙ
С УЧЕТОМ ПЕРЕМЕННОСТИ КОЭФФИЦИЕНТА
ПСЕВДОСКОЛЬЖЕНИЯ**

05.22.07 — Подвижной состав и тяга поездов

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Днепропетровск — 1978

Работа выполнена в Днепропетровском отделении Института механики Академии наук Украинской ССР и в Днепропетровском институте инженеров железнодорожного транспорта.

Научный руководитель:

заслуженный деятель науки УССР, академик АН УССР, доктор технических наук, профессор **В. А. Лазарян.**

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор **М. Л. Коротенко;**

доктор технических наук **А. А. Львов.**

Ведущее предприятие — Всесоюзный научно-исследовательский институт вагоностроения.

Защита состоится «*25*» *мая* 1978 г. в «*14*» час. на заседании специализированного совета К 114.07.01 в Днепропетровском институте инженеров железнодорожного транспорта имени М. И. Калинина (320629, ГСП г. Днепропетровск, ул. Университетская, 2).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

Автореферат разослан «*25*» *апреля* 1978 г.

Ученый секретарь специализированного совета,
кандидат технических наук, доцент
Л. В. Петрович.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Решениями XXV съезда КПСС по развитию транспорта на 1976-80 гг. предусматривается "...обеспечить дальнейшее увеличение пропускной и провозной способности железных дорог...Повысить скорость движения грузовых и пассажирских поездов". Большое внимание уделяется техническому оснащению железнодорожного транспорта, в частности расширению парка подвижного состава вагонами перспективных конструкций. В связи с этим возрастает актуальность научно-исследовательских работ, направленных на изучение динамических качеств рельсовых экипажей, как основы для создания в оптимальные сроки и с минимальными затратами подвижного состава железных дорог, отвечающего повышенным требованиям.

6928a
Цель работы является проведение исследований колебаний и устойчивости движения рельсовых экипажей как систем с переменными параметрами (с учетом зависимости от взаимодействия колес и рельсов от времени); обоснование правомерности анализа движения вагонов при постоянных параметрах; разработка способов упрощения решения систем дифференциальных уравнений высокого порядка с периодическими коэффициентами.

Методы исследования. Устойчивость невозмущенного движения рельсовых экипажей исследована в соответствии с теорией А.М.Ляпунова. Критические скорости движения и амплитуды установившихся колебаний типовых конструкций железнодорожных экипажей с одинарным и двойным рессорным подвешиванием определены методами линейной алгебры и вычислительной математики с помощью ЭВМ. Результаты исследований по упрощенным (при фиксированных значениях параметров) и уточненным (с учетом изме-

вместности коэффициента псевдоскольжения) математическим моделям сравнивались между собой и с результатами экспериментов, опубликованными в литературе.

Научная новизна работы. Впервые проведены исследования устойчивости движения железнодорожных экипажей как систем с переменными параметрами. Показано, что периодическое изменение сил псевдоскольжения (сил, действующих в зоне контакта колеса и рельсов при их относительных проскальзываниях) может дестабилизировать движение конкретных экипажей. Предложен метод анализа устойчивости движения вагонов в зависимости от чувствительности критической скорости к разбросу значений коэффициента псевдоскольжения. Исследовано влияние переменности этого коэффициента на амплитуды установившихся колебаний при движении как по идеально ровному пути, так и по пути с горизонтальными несовершенствами. Способ понижения порядка систем дифференциальных уравнений путем исключения быстро затухающих решений распространен в работе на дифференциальные уравнения с периодическими коэффициентами, что позволяет существенно сократить время машинного счета при исследовании сложных механических систем.

Практическая ценность и внедрение результатов работы. Проведенные исследования являются частью работ по теоретическому обоснованию методов расчетов устойчивости движения железнодорожных экипажей. Предложенный в работе метод позволяет более достоверно оценить динамические качества железнодорожных экипажей и избегать их завышенных оценок. Результаты работы используются в Днепропетровском отделении Института механики АН УССР и Днепропетровском институте инженеров железнодорожного транспорта при проведении теоретических исследований устойчивости движения вагонов и локомотивов. Метод анализа устойчивости дви-

жения и колебаний рельсовых экипажей с учетом переменности коэффициента псевдоскольжения принят во ВНИИ вагоностроения для использования в разработках, связанных с созданием перспективных конструкций подвижного состава.

Апробация. Основные результаты работы доложены на Всесоюзной конференции по наземному транспорту (Днепропетровск, 1977 г.), на городском семинаре "Общая механика" (Днепропетровск, 1976-77 гг.), на Общедной научно-технической конференции Днепропетровского института инженеров железнодорожного транспорта (Днепропетровск, 1977 г.), на конференции молодых ученых Днепропетровского отделения Института механики АН УССР (Днепропетровск, 1976 г.).

Публикации. По материалам диссертации имеется 4 печатные работы.

Структура работы. Порядок расположения материала выбран из необходимости освещения основных достижений в рассматриваемой области, постановки задачи, обоснования выбора расчетных схем и методов решения поставленной задачи, изложения результатов, выводов и рекомендаций.

Объем работы. Работа изложена на 122 страницах текста; состоит из введения, пяти глав, заключения, описки литературы, включающего 120 наименований, и приложения; содержит 28 рисунков и 29 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Первая глава содержит обзор основных достижений в области колебаний и устойчивости движения железнодорожных экипажей, включает обоснование целесообразности исследования и постановку задачи.

Основы теории колебаний рельсовых экипажей были заложены

ны в трудах Н.Е.Жуковского и Н.П.Петрова и развиты советскими учеными А.М.Годышкин-Цвирко, В.Б.Меделем, С.М.Куценко, А.А.Ковалевым, Т.А.Тибиловым. Важные теоретические и экспериментальные работы М.Ф.Вериго, С.В.Вершинского, Л.О.Грачевой, А.Я.Кога-на, А.А.Львова послужили углублению представлений о ходовых ка-чествах конкретных типов экипажей. Значительные исследования по динамике и прочности подвижного состава и пути проведены М.В.Ви-нокуровым, И.И.Челноковым, А.А.Шадуром, Г.М.Шахунянцем. Веоомый вклад в развитие теории динамики подвижного состава внес акаде-мик АН УССР В.А.Лазарян. В научном коллективе, возглавляемом В.А.Лазаряном, ведутся всесторонние исследования по динамике перспективного высокоскоростного наземного транспорта. В частно-сти, вопросы устойчивости движения рельсовых экипажей успешно решаются М.Л.Коротенко, Л.А.Длугачем, Ю.В.Деминим, И.А.Зильбер-маном, Г.Ф.Осадчим, Н.А.Радченко. На совершенствование существующего и создание перспективного рельсового транспорта направле-ны работы, проводимые научно-исследовательскими институтами - ЦНИИ МПС, ВНИИВ, а также кафедрами и лабораториями вузов - ДИИТ, ЛИИЖТ, МИИТ, РИИЖТ, ХПИ и др. Широкой известностью пользуются труды зарубежных ученых, в том числе Картера, Калкера, Мапудай-ры, де Патера, Рокара, Уиккенса.

Многочисленные теоретические и экспериментальные иссле-дования показали, что ходовые качества железнодорожных экипажей оущественно зависят от сил псевдоскольжения. Изучению природы этих сил и определению их значений посвящена обширная отече-ственная и зарубежная литература. В настоящее время при исследова-нии колебаний железнодорожных экипажей наиболее широкое распро-странение получила теория псевдоскольжения, развитая Картером. В соответствии с этой теорией, при небольших проскальзываниях

контактирующих поверхностей существует линейная зависимость между относительными проскальзываниями и касательными силами. Для определения коэффициента пропорциональности (коэффициента псевдоскольжения) F рядом авторов предложены формулы, основанные на теоретических и экспериментальных исследованиях.

Обычно при исследовании пространственных колебаний экипажа все его параметры полагают постоянными. По отношению к параметрам сил взаимодействия в горизонтальной плоскости такой прием является достаточно сильной идеализацией, поскольку коэффициент псевдоскольжения изменяется в широких пределах вследствие динамических добавок к давлению колеса на рельс (обусловленных колебанием обрессорных масс), а также неустойчивости состояния контактирующих поверхностей. Таким образом, движущийся вагон относится к классу систем с изменяющимися во времени параметрами.

Для ряда механических систем известно, что переменность параметра может привести к децентрализации движения или положения равновесия. Как следует из результатов расчетов, критические скорости одних экипажей практически не зависят от разброса значений коэффициента F , определенных по различным формулам, других — существенно меняются. Ввиду указанных особенностей систем возникла необходимость изучить влияние изменчивости коэффициента псевдоскольжения на динамические качества экипажей различных типов.

В процессе эксплуатации значение коэффициента F находится в сложной зависимости от столь многих факторов, что учесть его реальный закон изменения практически не представляется возможным. В настоящей работе предложена расчетная схема, согласно которой этот коэффициент является моногармонической функцией

времени t

$$F(t) = F_c \pm \Delta F(t) = F_c (1 + a \sin \nu t), \quad (I)$$

а частота пульсации ν соответствует частоте собственных вертикальных колебаний обрессоренных масс. Здесь F_c – среднее значение коэффициента, a – относительная амплитуда пульсации.

В такой постановке задача свелась к анализу колебаний и устойчивости движения железнодорожных экипажей с учетом периодически изменяющегося коэффициента псевдоскольжения. Решение ее позволяет установить, в каких случаях возможно рассматривать движение вагонов при постоянных параметрах.

Во второй главе изложены основные допущения (принятые при построении расчетных схем), методы решения задачи и уравнения возмущенного движения рассматриваемых экипажей.

Исследования проведены по двум основным расчетным схемам. Первая из них соответствует экипажам с одинарным рессорным подвешиванием (грузовой вагон на тележках типа ЦНИИ-ХЗ), вторая – экипажам с двойным рессорным подвешиванием (пассажирский вагон, скоростной вагон – лаборатория, моторный вагон электропоезда ЭР-200, вагон метро типа "И"). Рельсовые экипажи рассмотрены как многомассовые системы с II и 26-ю степенями свободы. При составлении дифференциальных уравнений возмущенного движения экипажей в форме уравнений Лагранжа второго рода кроме обычно вводимых допущений приняты следующие: коэффициент псевдоскольжения изменяется в соответствии с (I); добавки к горизонтальным составляющим контактных сил для всех колес одинаковы и одновременны; амплитуда пульсации постоянна. Проекции $X_i(t)$ и $Y_i(t)$ сил псевдоскольжения на продольное и поперечное направления в соответствии с теорией Картера вычислены по следующим фор-

мулам: $X_i(t) = -F(t)e_{xi}$ $Y_i(t) = -F(t)e_{yi}$, где e_{xi} и e_{yi} - безразмерные характеристики проскальзывания. При этом математическая модель качественно изменилась - возникла задача об исследовании связанных дифференциальных уравнений с периодическими коэффициентами. В нормальной форме Коши такие системы уравнений имеют вид:

$$\dot{\vec{x}}(t) = [\mathcal{D} + \Delta \mathcal{D}(t)] \vec{x} + X_{nc}, \quad (2)$$

где \mathcal{D} - постоянная квадратная матрица; $\Delta \mathcal{D}(t)$ - квадратная матрица периодических коэффициентов, изменяющихся с периодом T X_{nc} - нелинейная вектор-функция; \vec{x} - вектор фазовых координат. Особенности решений уравнений (2) является существование областей параметрической неустойчивости при

$$\frac{\omega_j}{\nu} = \frac{N}{2}, \quad (N = 1, 2, 3, 4, \dots) \quad (3)$$

где ω_j - собственная частота, равная мнимой части собственного числа $\lambda_j = h_j \pm i\omega_j$ матрицы \mathcal{D} Наиболее неблагоприятным является режим главного параметрического резонанса ($N=1$). Если в этом случае механическая система мало чувствительна к периодическому изменению параметра, то можно утверждать, что при других соотношениях между собственной частотой и частотой возбуждения движение будет не менее устойчивым.

В диссертационной работе произведено сопоставление динамических качеств каждого из указанных выше экипажей в случае постоянного и переменного (с достаточно большой амплитудой пульсации) коэффициента псевдоскольжения. Устойчивость движения исследована на основе положений теории А.М.Ляпунова с помощью численных методов. Для определения условий потери асимптотической устойчивости поступательного движения вагона использованы

дифференциальные уравнения первого приближения

$$\dot{\vec{x}} = [\mathcal{D} + \Delta \mathcal{D}(t)] \vec{x} \quad (4)$$

Области устойчивости решений линейных автономных уравнений

$[\Delta \mathcal{D}(t) = 0]$ определены на основании анализа вещественных частей собственных чисел λ_j . Устойчивость решения системы параметрических уравнений (4) исследована с помощью метода характеристических показателей А.М.Ляпунова. Критерием устойчивости решения является расположение корней характеристического уравнения $|M - pE| = 0$ относительно круга единичного радиуса. Здесь $M = [\vec{x}_1(\tau), \vec{x}_2(\tau), \dots, \vec{x}_n(\tau)]$ – фундаментальная матрица значений линейно независимых решений $\vec{x}_i(t)$ системы (4), удовлетворяющих начальным условиям $X(0) = 0$, в момент $t = \tau$ (E – единичная матрица). Значения $\vec{x}_i(\tau)$ определены численным интегрированием по методу Адамса-Башфорта. Собственные значения матрицы коэффициентов \mathcal{D} и характеристические числа фундаментальной матрицы M найдены по программе, реализующей QR – алгоритм Френсиса – Кублановской.

При исследовании систем уравнений с периодическими коэффициентами затраты машинного времени возрастают в десятки раз. В реферируемой работе существенное ускорение решения достигнуто за счет понижения порядка систем путем исключения быстросходящихся решений.

Суждение об устойчивости решений систем нелинейных автономных и неавтономных уравнений составлено на основании частных решений, полученных по методу Адамса-Башфорта. Для определения амплитуд устойчивых предельных циклов нелинейных систем с постоянными коэффициентами использованы методы линейной алгебры и аппроксимация нелинейных членов по П.Л.Чебышеву.

В третьей главе приведены результаты серии расчетов по определению влияния переменности коэффициента псевдоскольжения на устойчивость движения ряда железнодорожных экипажей в предположении, что путь является абсолютно жестким, профиль поверхности катания колеса - с постоянным уклоном, действие сил сухого трения в конструкции экипажа во внимание не принимается. Диапазоны изменения коэффициента псевдоскольжения ограничены значениями, найденными различными способами: наибольшее (F_{max}) определено по формуле Картера, наименьшее (F_{min}) - по формуле Миллера.

В табл. I для каждого из рассмотренных экипажей указаны экстремальные F_{max} , F_{min} и средние F_c коэффициенты псевдоскольжения и соответствующие скорости $v_{cr}(F_{max})$, $v_{cr}(F_{min})$

$v_{cr}(F_c)$ При этих скоростях $max Re \lambda_i = 0$, где λ_i - собственное число с наибольшей действительной частью матрицы D

Грузовой вагон на тележках типа ЦНИИ-ХЗ рассмотрен в двух вариантах, которые отличаются друг от друга значением жесткости комплектов рессорного подвешивания в вертикальном k и поперечном k_x направлениях, а также угловой жесткостью рамы тележки k_φ . Исходные параметры скоростного вагона лаборатории (СВЛ) приняты в соответствии с данными экспериментальных исследований по определению критических скоростей.

Из табл. I следует, что грузовой вагон, СВЛ и пассажирский вагон являются системами "грубыми" по отношению к коэффициенту псевдоскольжения, т.к. устойчивость их невозмущенного движения практически не зависит от величины F . Однако разброс значений этого коэффициента оказывает большое влияние на критическую скорость вагона метрополитена и вагона ЭР-200.

Устойчивость движения экипажей при изменяющемся в ука-

занных пределах коэффициенты псевдоскольжения ($\alpha \approx 0,3$) исследована для разных частот возбуждения в соответствии с (3). Значения максимальных модулей $|\rho|_{max}$ характеристических чисел фундаментальных матриц M сравнивались с единицей. Показано, что движение многомерной системы наименее устойчиво, т.е. $|\rho|_{max}$ имеет наибольшее значение, в режиме главного параметрического резонанса по частоте $\omega_f = 2\pi\omega_c$.

Таблица I

Э к и п а ж	$\begin{matrix} F_{mil} \\ F_c \\ F_{max}, T \end{matrix}$	$\begin{matrix} \sigma_{cp}(F_{mil}) \\ v_{cp}(F_c) \\ v_{cp}(F_{max}), \%/c \end{matrix}$	$\bar{v}_{cp}, \%/c$	$\beta \%$
Грузовой вагон - вариант I ($\kappa = 400 \text{ Тм}^{-1}$, $\kappa_f = 600 \text{ Тм}^{-1}$, $\kappa_p = 500 \text{ Тм.рад}$)	900 1350 1800	24,6 26,2 25,5	23,5	10
Грузовой вагон - вариант II ($\kappa = 490 \text{ Тм}^{-1}$, $\kappa_f = 420 \text{ Тм}^{-1}$, $\kappa_p = 50 \text{ Тм.рад}$)	900 1350 1800	13,80 13,77 13,76	13,60	1,2
С В Л	800 1150 1500	42,7 41,3 40,7	39,4	4,6
Пассажирский вагон	800 1150 1500	44,6 43,7 43,2	41,9	4,1
Моторный вагон электро- поезда ЭР-200	900 1250 1600	30 40 73	37	7,5
Вагон метро типа "И"	700 950 1200	20,6 34,8 45,9	33,0	5,2

В табл. I приведены критические скорости при $\nu = 2\omega_f$. Из анализа результатов следует, что переменность коэффициента псе-

вдоскопления не вызывает понижение критической скорости более, чем на $\delta = 10\%$, по сравнению с $v_{кр}(F_c)$

Однако в некоторых случаях зависимости между $v_{кр}(F)$ и $\bar{v}_{кр}$ могут быть другими, о чем свидетельствуют дополнительные расчеты, проведенные для грузового полувагона. При этом учитывалось рассеивание энергии (сухое трение в рессорном подвешивании заменено вязким). В качестве F_c принято значение, вычисленное по формуле Картера; α по-прежнему равно 0,3. В табл.2 представлены результаты исследования устойчивости решений автономных и параметрических систем при разных коэффициентах вязкого сопротивления β . Из табл.2 видно, что введение гидравлического демпфирования неодинаково стабилизирует движение экипажа при разных фиксированных значениях F . Переменность этого коэффициента при $\nu=2\omega_1$ может вызвать значительное понижение критической скорости - до 36% по сравнению с $v_{кр}(F_c)$.

Таблица 2

$\beta, T \cdot M \cdot c^{-1}$	F_{min} F_c F_{max}, T	$v_{кр}(F_{min})$ $v_{кр}(F_c)$ $v_{кр}(F_{max}), M/c$	$\bar{v}_{кр}, M/c$	$\delta \%$
0	1250 1600 2350	26,0 25,5 24,5	23,5	7,8
5,5	—"	27,7 30,2 43,5	25,3	16
10	—"	29,8 43,8 43,8	28	36
15	—"	40,5 43,8 43,8	39,4	10

Возможность возникновения главного параметрического ре-

резонанса для грузовых вагонов подтверждена совпадением (с точностью до 1,5%) частот вертикальных колебаний $\frac{\omega_z}{2}$ с удвоенной частотой ω_1 собственных колебаний по основной форме. Для СВЛ и пассажирского вагона частота ω_z вдвое меньше частоты ω_1 , поэтому при выбранной амплитуде пульсации появление главного параметрического резонанса исключается. Во время эксплуатации подвижного состава соотношение между частотами ω_z и ω_1 может измениться (вследствие износа колес, разброса значений коэффициента вязкого сопротивления демпферов) и приблизиться к $\omega_z = 2\omega_1$, что наиболее неблагоприятно для систем, чувствительных к изменению коэффициента F

Результаты проведенных исследований свидетельствуют о том, что в ряде случаев при постоянном коэффициенте псевдоскольжения не исключена возможность завышенной оценки зоны асимптотической устойчивости рельсовых экипажей. В работе предложен способ анализа динамических качеств вагонов, согласно которому необходимо первоначально определять критические скорости при нескольких фиксированных существенно отличающихся друг от друга коэффициентах псевдоскольжения. Если окажется, что критические скорости разнятся между собой не более, чем на 10%, и в диапазоне скоростей, ограниченном их значениями, характер движения определяется одной и той же формой колебаний, то такие экипажи можно рассматривать как системы с постоянными параметрами. Это дает возможность описывать движение автономными дифференциальными уравнениями, методы исследования которых достаточно хорошо разработаны. Для систем, чувствительных к изменению коэффициента F необходимы проверочные расчеты с учетом $F(t)$. При этом достаточно ограничиться рассмотрением главного параметрического резонанса по частоте основной формы колебаний. Объем вычислений

можно значительно уменьшить, если предварительно упростить исходную систему дифференциальных уравнений путем исключения быстрос затухающих решений или разбиения системы на блоки (показано, что устойчивость решения автономной или параметрической систем в целом определяется одним и тем же блоком уравнений).

В четвертой главе рассматривается движение рельсовых экипажей с учетом нелинейностей, которые описываются как непрерывными, так и разрывными функциями. Диапазоны изменения коэффициента псевдоскольжения приняты такими же, как для систем первого приближения.

Проведена оценка влияния сил сухого трения на характер движения вагонов при постоянном и переменном коэффициенте F . На примере расчетной схемы СВЛ показано, что сухое трение, действующее в системе опирания кузова на тележки при их взаимных поворотах в горизонтальной плоскости стабилизирует движение вагона как при фиксированных значениях F так и в случае $F(t)$. Если скорость превышает $v_{cp}(F_c)$ и \bar{v}_{cp} , то при определенных начальных условиях движение носит автоколебательный характер. Область начальных возмущений, при которых движение вагона асимптотически устойчиво, зависит от скорости движения и от частоты возбуждения: для автономной системы ($\nu=0$) — наибольшая, для параметрической ($\nu=2\omega_r$) — наименьшая при одной и той же скорости. Кроме того, эквивалентное (в смысле рассеивания энергии) вязкое трение при малых амплитудах колебаний является более эффективным, чем сухое, для подавления параметрического резонанса.

В табл.3 представлены критические скорости v_{cp}^* и $\bar{v}_{cp}^*(\delta^{1/2})$ различных вагонов, полученные на основании расчетов для автономных (при $F=F_c$) и параметрических нелинейных систем соответственно.

Таблица 3

Экипаж	Автономная система	Параметрическая система
Грузовой вагон (вариант I)	$25 < v_{кр}^* < 27$	$25 < \bar{v}_{кр}^* < 27$
Грузовой вагон (вариант II)	$v_{кр}^* \approx 15$	$17 < \bar{v}_{кр}^* < 20$
С В Л	$46 < v_{кр}^* < 47$	$\bar{v}_{кр}^* \approx 45$
Пассажирский вагон	$58 < v_{кр}^* < 59$	$59 < \bar{v}_{кр}^* < 60$
Моторный вагон электропоезда ЭР-200	$v_{кр}^* \approx 35$	$33 < \bar{v}_{кр}^* < 35$

Сравнение данных, помещенных в таблицах I и 3 свидетельствует о том, что сухое трение оказывает аналогичное воздействие на критические скорости экипажей как при $F=const$, так и при $F=F(t)$. В частности, граница области устойчивости СВЛ, пассажирского вагона, грузового вагона на тележках типа ЦНИИ-ХЗ (при двух вариантах основных параметров) повышается, вагона ЭР-200 - понижается. Под действием сил сухого трения не изменяется чувствительность каждой из механических систем по отношению к F . Подтверждением теоретических выводов являются результаты натурных испытаний СВЛ, проведенных на Приднепровской железной дороге коллективами ВНИИ вагоностроения, ДИИТ и ДО ИМ АН УССР. Экспериментально замеренная (при движении по пути обычного содержания) критическая скорость неосуществленно отличается от рассчитанной критической скорости при постоянном или при переменном коэффициенте поездоскольжения.

Для экипажа, критическая скорость которого (по первому приближению) существенно зависит от переменности коэффициента

псевдоскольжения (грузовой вагон, вариант I, $\beta = 5,5 \text{ Т.мс}^{-1}$), исследовано влияние $F(t)$ на амплитуды устойчивых предельных циклов, имеющих место при физических и геометрических нелинейностях. Рассмотрены случаи нелинейных характеристик демпфирования и угловой жесткости тележек вида $y = \beta x + cx^3$, где β и c — постоянные. При этом профиль поверхности катания колеса принят линейным. В процессе решения амплитуды колебаний колесных пар контролировались путем сравнения с минимальным зазором в колее.

При варьировании линейных коэффициентов вязкого сопротивления и жесткости упругих элементов (β) определены (по системе первого приближения) зоны асимптотической устойчивости и неустойчивости. Для ряда скоростей из области неустойчивости найдены значения коэффициентов нелинейных добавок, удовлетворяющих условию $|h_1^*| \leq 0$, где h_1^* — действительная часть собственного числа λ_1^* , определяющего устойчивость решения линеаризованной по П.Л.Чебышеву системы. Показано, что рассматриваемые нелинейности могут способствовать неасимптотической устойчивости колебаний экипажа — установлению амплитуд предельного цикла поперечных перемещений колесной пары на уровне, не превышающем зазора в колее.

Результаты исследований с учетом переменности коэффициента псевдоскольжения (при нелинейных силах вязкого трения) свидетельствуют о том, что в параметрической системе также имеет место устойчивый предельный цикл. Амплитуды колебаний (перемещения колесных пар относительно рельсов) превосходят амплитуды соответствующей автономной системы; зависят от глубины и частоты пульсации коэффициента F .

Исследовано влияние переменности коэффициента псевдоскольжения при нелинейном профиле поверхности катания колеса на ампли-

туды колебаний системы с геометрической нелинейностью. Рассматривалось движение с постоянной скоростью, превышающей критическую, по ровному или искривленному в плане пути (рельсовые нити синусоидально отклонены от прямой линии). Принималось во внимание действие сил сухого трения в местах соединения кузова с тележкой, рассеивание энергии в вертикальных демпферах вязкого трения, упругость рельсовых нитей в поперечном направлении. При составлении дифференциальных уравнений возмущенного движения поперечные составляющие $Y_{ir}(t)$ горизонтальных сил, действующих на колеса, определялись с учетом силы псевдоскольжения $Y_i(t)$ и принимались во внимание составляющие от действия переменного давления колеса на рельс $P(t) = P(1 + \kappa_{ps} \sin \nu t)$, где P - статическое давление колеса на рельс, κ_{ps} - коэффициент динамических добавок вертикальных нагрузок. Анализ результатов численного интегрирования свидетельствует о том, что в системе имеют место колебания с постоянной амплитудой или биения. Переменность коэффициента псевдоскольжения может вызвать существенное увеличение амплитуд колебаний систем, чувствительных к изменению значения λ^* . Наиболее интенсивно возрастает сила взаимодействия колес и рельсов при наложении резонансов, обусловленных изменением параметра и несовершенствами пути.

В пятой главе предложен и апробирован способ упрощения систем дифференциальных уравнений с периодическими коэффициентами.

Исследование систем параметрических уравнений требует значительных затрат машинного времени. Для сравнения можно указать, что определение спектра собственных чисел матрицы 18-го порядка занимает не более одной минуты ЭВМ "Минск-22М", а построение фундаментальных матриц и нахождение характеристических

чисел при низкой частоте пульсации параметра - до 15 часов. Практика вычислений показала, что определение фундаментальных матриц сопряжено с потерей точности, поскольку системы параметрических уравнений весьма чувствительны к выбору шага интегрирования Δt . Величина Δt зависит от амплитуды и частоты пульсации параметра.

Способ, позволяющий существенно ускорить решение задачи, заключается в упрощении параметрических систем путем исключения быстро затухающих решений. В работе предложено сначала понижать порядок исходной автономной системы

$$\dot{\vec{x}} = \mathcal{D} \vec{x} \quad (5)$$

при постоянном минимальном $F_{min} = F^{(1)}$ и максимальном $F_{max} = F^{(2)}$ значениях переменного параметра. Если вблизи мнимой оси располагается лишь одна пара комплексно-сопряженных собственных чисел $\lambda_1^{(\kappa)}$ и $\bar{\lambda}_1^{(\kappa)}$ матрицы \mathcal{D} или две, но действительные части чисел $\lambda_2^{(\kappa)}$ и $\bar{\lambda}_2^{(\kappa)}$ не возрастают при варьировании F от $F^{(1)}$ до $F^{(2)}$ то система (5) сводится с помощью формул Виета к одному уравнению второго порядка:

$$\ddot{y} + A^{(\kappa)} \dot{y} + C^{(\kappa)} y = 0, \quad \kappa = 1, 2. \quad (6)$$

Усреднив коэффициенты $A^{(\kappa)}$ и $C^{(\kappa)}$ и значения частот $\omega_1^{(\kappa)}$, два уравнения (6) можно представить в виде одного:

$$\ddot{y} + (A + B \sin \varphi_c t) \dot{y} + (C + D \sin \varphi_c t) y = 0 \quad (7)$$

Примем, что это соответствует изменению параметра F по гармоническому закону (1) в пределах от $F^{(1)}$ до $F^{(2)}$. Устойчивость решения уравнения (7) исследуем с помощью метода характеристических показателей А.М.Ляпунова. При наличии двух неустойчи-

6928a

вых форм колебаний с частотами ω_1 и ω_2 порядок автономной системы удается понизить до четвертого, исключив быстро затухающие решения по способу, предложенному в работах В.А.Лазаряна. Уравнение с периодическими коэффициентами для каждой из двух оставшихся обобщенных координат можно получить вышеизложенным способом. Понижение порядка нелинейной параметрической системы также производится в два этапа. При этом предварительно линеаризуется (по П.Л.Чебышеву) вектор $X_{nc}(\tau)$. Далее упрощенная система с периодическими коэффициентами получается так же, как описано выше.

Эффективность способа апробирована на примерах систем дифференциальных уравнений 10, 14, 18-го порядков, решения которых определяют устойчивость движения железнодорожных экипажей рассмотренных типов. Сравнение значений максимальных модулей характеристических чисел (при разных амплитудах пульсации) и значений критических скоростей свидетельствует о том, что погрешность вычислений по линейным исходным и укороченным до 2-го порядка системам не превышает 2-3%, а время счета сокращается в 50 и более раз. Если обе формы колебаний, определяющие характер движения системы, при варьировании параметра проявляют тенденцию к дестабилизации, то порядок системы понижается до четвертого и погрешность метода возрастает до 20%. В этом случае указанный способ упрощения может быть рекомендован для предварительных исследований. Сравнение результатов интегрирования полной и укороченной нелинейных систем показывает, что погрешность определения амплитуд предельного цикла зависит от частоты и амплитуды пульсации. Погрешность в вычислении собственной частоты не превышает 2% во всех случаях.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследование колебаний и устойчивости движения железнодорожных экипажей проведено как для многомассовых механических систем с переменными параметрами. В качестве переменного параметра рассмотрен коэффициент псевдоскольжения, являющийся функцией времени. Возмущенное движение описано системами дифференциальных уравнений высокого порядка с периодическими коэффициентами. Основное внимание уделено движению в режиме главного параметрического резонанса.

Указано, что возможность возникновения параметрических колебаний подтверждается близостью частот вертикальных колебаний экипажей к областям частот параметрически возбуждаемых колебаний.

Установлено, что экипажи, малочувствительные по отношению к изменению коэффициента псевдоскольжения, можно рассматривать как системы с постоянными параметрами и получать для них удовлетворительные результаты на основании решений автономных дифференциальных уравнений. Выводы теоретических исследований подтверждены результатами натурных экспериментов скоростного вагона-лаборатории.

Исследовано влияние сил сухого трения, действующих в системе опирания кузова на тележки и в рессорном подвешивании, на устойчивость движения вагонов. Показано, что системы под воздействием сил сухого трения не становятся более чувствительными к изменению коэффициента псевдоскольжения.

Выполнены исследования колебаний систем с физическими и геометрическими нелинейностями. Показано, что амплитуды колебаний возрастает в случае переменности коэффициента псевдоскольже-

ния.

Исследования, проведенные для железнодорожных экипажей с одинарным и двойным реосорным подвешиванием, позволили получить оценку устойчивости движения вагонов типовых конструкций. На основании анализа критических скоростей, полученных по упрощенным расчетным схемам (все параметры постоянны) и с учетом переменной коэффициента псевдоскольжения, предложен способ исследования ходовых качеств экипажей в зависимости от чувствительности к изменению коэффициента псевдоскольжения.

Способ понижения порядка систем дифференциальных уравнений путем исключения быстро затухающих решений распространен на системы уравнений с периодическими коэффициентами, что дает существенную экономию машинного времени.

**Основное содержание диссертации опубликовано
в следующих работах автора:**

1. Исследование влияния упруго-вязких характеристик элементов схемы подвешивания на устойчивость движения железнодорожного экипажа. - Труды Днепропетр. ин-та инженеров жел.-дор. транспорта, вып. 182/22. Днепропетровск, 1976 (соавтор Л.А.Другач).
2. Исследование устойчивости движения вагона при переменном коэффициенте псевдоскольжения. - Труды Днепропетр. ин-та инженеров жел.-дор. транспорта, вып. 190/23. Днепропетровск, 1977.
3. Устойчивость решений систем нелинейных дифференциальных уравнений, описывающих движение рельсовых экипажей. - В кн.: Динамика и прочность сложных механических систем. К., "Наук. думка", 1977 (соавтор Л.А.Другач).
4. О понижении порядка систем уравнений с периодическими коэффициентами, определяющих устойчивость движения рельсовых экипажей. - В кн.: Механика наземного транспорта. К., "Наук. думка", 1977, (соавтор Л.А.Другач).

Ответственный за выпуск Л. В. Петрович.
БТ 62298. Сдано в производство 21. 04. 1978 г. Подписано к печати 19. 04. 1978 г.
Формат 60x84¹/₁₆. Усл. печ л 1,16. Тираж 150x20 экз. Заказ № 8668. Бесплатно.
Городская типография № 3 Днепропетровского областного управления по делам из-
дательств, полиграфии и книжной торговли. 320002, Днепропетровск, ул. Фрунзе, 6.

Сканировала Камянская Н.А.