

СССР — МПС
ДНЕПРОПЕТРОВСКИЙ ИНСТИТУТ
ИНЖЕНЕРОВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА
им. М. И. КАЛИНИНА

На правах рукописи

ОСАДЧИЙ Геннадий Федорович

ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ ДВИЖЕНИЯ СКОРОСТНЫХ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ ЭКИПАЖЕЙ

01. 02. 06 — Динамика, прочность и надежность
машин, приборов и аппаратуры

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

ДНЕПРОПЕТРОВСК
1 9 7 4

На правах рукописи

ОСАДЧИЙ Геннадий Федорович

ИССЛЕДОВАНИЕ
УСТОЙЧИВОСТИ ДВИЖЕНИЯ
СКОРОСТНЫХ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ
ЭКИПАЖЕЙ

01. 02. 06 — Динамика, прочность и надежность
машин, приборов и аппаратуры

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

69269

Работа выполнена в Днепропетровском отделении Института механики АН УССР.

Научные руководители:

Заслуженный деятель науки УССР, академик АН УССР, доктор технических наук, профессор **В. А. ЛАЗАРЯН**

Кандидат технических наук, доцент **М. Л. КОРОТЕНКО**

Официальные оппоненты:

Доктор технических наук **А. А. ЛЬВОВ**

Кандидат технических наук, доцент **В. Д. ДАНОВИЧ.**

Ведущая организация — Всесоюзный научно-исследовательский институт вагоностроения.

Автореферат разослан „ 19 „ сентября 1974 г.

Защита состоится „ 24 „ октября 1974 г.

на заседании Ученого Совета Днепропетровского института инженеров железнодорожного транспорта им. М. И. Калинина (г. Днепропетровск, 10, ул. Университетская, 2).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

Отзыв просим направлять в двух экземплярах по адресу: 320629, ГСП, Днепропетровск, 10, ул. Университетская, 2, Институт инженеров железнодорожного транспорта.

Ученый секретарь Совета, кандидат химических наук, доцент
В. Н. ПЛАХОТНИК

На современном этапе построения материально-технической базы коммунизма перед железнодорожным транспортом страны поставлена задача значительного увеличения грузооборота и более полного удовлетворения потребности населения в быстром передвижении. Одним из наиболее эффективных путей решения этой задачи является повышение скорости движения поездов.

С целью обеспечения безопасности движения, условий комфорта, сохранности грузов при повышенных скоростях необходимо усовершенствовать существующие и создавать новые типы подвижного состава. Успешное решение этих задач невозможно без глубоких теоретических и экспериментальных исследований с использованием современных методов.

Существенным вкладом в развитие динамики железнодорожных экипажей являются фундаментальные работы отечественных ученых Н. Е. Жуковского, А. Н. Годыцкого-Цвирко, М. В. Винокурова, В. А. Лазаряна, М. Ф. Вериги, Н. А. Ковалева, С. М. Куценко, В. Б. Медея. Исследованию важных проблем динамики подвижного состава посвятили свои работы И. И. Челноков, С. В. Вершинский, Т. А. Тибилов, А. А. Камаев, А. А. Львов, Е. Н. Никольский, Л. Н. Никольский, Л. А. Шадур, Г. М. Шахунянц, М. А. Фришман и другие. Среди трудов зарубежных ученых следует отметить работы Ф. Картера, Г. Марье, Дж. Роккара, Т. Мацудайры, П. Боммеля, Б. Кэйна, А. де Патера, А. Уиккенса.

Многочисленные теоретические исследования и экспериментальные данные показывают, что необходимым условием удовлетворительных динамических качеств является асимптотическая устойчивость, в смысле А. М. Ляпунова, невозмущенного движения рельсовых экипажей. Особо важное значение имеет устойчивость движения скоростных рельсовых

экипажей. При увеличении скорости движения неустойчивого экипажа быстро увеличиваются амплитуды перемещений и ускорений узлов движущейся конструкции, растут горизонтальные поперечные силы, действующие на путь. В этом случае будет происходить интенсивный износ как ходовых частей экипажа, так и элементов верхнего строения пути. Поэтому при проектировании подвижного состава значения параметров ходовых частей необходимо выбирать таким образом, чтобы критическая скорость была выше конструктивной.

Точность определения величины критической скорости рельсового экипажа находится в прямой зависимости от корректности математической модели. Решение этой задачи связано с исследованием устойчивости движения сложных механических систем, представляющих собой расчетные схемы железнодорожных экипажей. О том, насколько удачно выбрана расчетная схема и составлена математическая модель, нужно судить на основании сопоставления результатов теоретических и экспериментальных исследований.

В данной работе изложены основные результаты теоретических и экспериментальных исследований устойчивости движения скоростных железнодорожных экипажей с двойным рессорным подвешиванием. При известных идеализациях расчетная схема экипажа представляет механическую систему из твердых тел, соединенных упруго-вязкими элементами. Об устойчивости движения можно судить по первому приближению А. М. Ляпунова, решая систему линейных дифференциальных уравнений, которая описывает возмущенное движение рассматриваемой механической системы. Задача об устойчивости движения вагона при линейной расчетной схеме сводится к определению собственных значений матрицы коэффициентов уравнений возмущенного движения.

Так как железнодорожные экипажи представляют собой нелинейные механические системы, то исследование устойчивости их движения с использованием линейных расчетных схем недостаточно для обоснования конкретных рекомендаций по выбору параметров ходовых частей. Поэтому исследование влияния нелинейностей на устойчивость движения экипажей представляет большой практический интерес.

В работе исследовано влияние на устойчивость движения дополнительных упругих элементов в рессорном подвешивании вагона (глава I) и сил сухого трения в системе

опирания кузова на тележки (главы II, III), произведен выбор рациональных, с точки зрения устойчивости движения, параметров надбуксового подвешивания пассажирского вагона и вагона электропоезда ЭР-200 (главы II, III). Проведены исследования по экспериментальной оценке используемой методики исследования устойчивости движения рельсовых экипажей путем сопоставления результатов теоретических исследований и экспериментальных данных (глава IV). В расчетах использованы параметры современных отечественных экипажей: вагона поезда РТ-200, моторного вагона скоростного электропоезда ЭР-200, скоростного вагона-лаборатории с реактивной тягой (СВЛ), пассажирского вагона. Расчетные схемы указанных вагонов аналогичны.

При построении исходной расчетной схемы принята во внимание следующая особенность предложенной конструкции вагона: кузов опирается упруго на раму вагона. Рама вагона представляет собой поддон корытообразного сечения, охватывающий кузов. Кроме того, в систему подвешивания тележного экипажа дополнительно включены упругие элементы с жесткостью $2k_0$ (на тележку) таким образом, что при поворотах надрессорных балок тележек относительно рамы вагона в горизонтальной плоскости действует восстанавливающий момент M_1 . Расчетная схема рассматриваемого экипажа в этом случае представляет механическую систему из восьми твердых тел, соединенных упруго-вязкими элементами. Линейные дифференциальные уравнения, описывающие колебания экипажа относительно состояния установившегося поступательного движения, составлены как уравнения Лагранжа второго рода и распадаются на ряд систем. Система уравнений 38-го порядка, решения которой представляют интерес с точки зрения устойчивости движения, в векторно-матричной форме имеет вид

$$A\ddot{q} + B\dot{q} + Cq = 0, \quad (1)$$

где \ddot{q} , \dot{q} , q — векторы обобщенных ускорений, скоростей и координат; $A = [a_{ij}]$ ($i=1,2,\dots,19$) — диагональная матрица инерционных коэффициентов; $C = [c_{ik}]$ ($i=1,2,\dots,19$; $k=1,2,\dots,19$) — матрица квазиупругих коэффициентов и коэффициентов при обобщенных координатах в выражениях обобщенных сил, обусловленных взаимодействием колес экипажа и рельсов; $B = [b_{ik}]$ ($i=1,2,\dots,19$; $k=1,2,\dots,19$) — матрица коэффициентов функции рассеивания энергии и

коэффициентов при обобщенных скоростях в выражениях сил псевдоскольжения.

Исследование устойчивости движения проводилось с использованием теорем А. М. Ляпунова об устойчивости движения по первому приближению. Для этого на ЭЦВМ «Минск-22» с помощью программы, реализующей QR — алгоритм, решалась полная проблема собственных значений матриц коэффициентов системы уравнений возмущенного движения (1). Об устойчивости движения исследуемой системы судим по собственным числам λ с наибольшей вещественной частью $\max (\operatorname{Re} \lambda) = h_{\max}$.

Установлено, что дополнительные упругие элементы, соединяющие кузов и раму вагона, не оказывают влияния на величину критической скорости экипажа. В дальнейших расчетах кузов и рама вагона рассматривались как одно твердое тело. Порядок системы линейных уравнений (1) в этом случае понижается до 32-го.

Исследовано влияние величины жесткости $2k_0$ дополнительных упругих элементов, создающих восстанавливающий момент M_1 при поворотах кузова относительно тележек в горизонтальной плоскости, на устойчивость движения экипажа. Показано, что увеличение жесткости этих элементов приводит к увеличению значений критической скорости $v_{кр}$. Однако увеличение жесткости $2k_0$ при движении по кривым участкам пути может вызвать увеличение восстанавливающего момента M_1 , что очевидно приведет к росту направляющих усилий. Поэтому из условий движения по кривым необходима мягкая нелинейная характеристика зависимости M_1 ($\Delta\psi$).

$$M_1 = k_\psi [1 - \alpha (\Delta\psi_1)^2] \Delta\psi_1, \quad \alpha > 0, \quad (i = 1, 2), \quad (2)$$

где $k_\psi = 2b_2^2 k_0$ — угловая жесткость упругого соединения кузова и тележки ($2b_2$ — расстояние между дополнительными упругими элементами в поперечном направлении), $\Delta\psi_1 = \psi - \psi_1$ — разность углов поворота кузова ψ и тележек ψ_1 относительно вертикальных осей. Для исследования устойчивости движения на прямом участке пути по первому приближению А. М. Ляпунова в этом случае необходимо линеаризовать уравнения движения. Используем наилучшую, в смысле Чебышева, линейную аппроксимацию и заменяем нелинейную функцию (2) ее чебышевским линейным приближением:

$$M_1^* = k_\psi [1 - 0,75\alpha (\Delta\psi_1)^2_{\max}] \Delta\psi_1 = k_\psi^* \Delta\psi_1, \quad (3)$$

где $(\Delta\psi)_{\max}$ — наибольшая разность $\Delta\psi_i$ при влияниях в прямых участках пути. Необходимую характеристику момента $M_i(\Delta\psi_i)$ можно осуществить, используя конструкцию, предложенную группой сотрудников ДО ИМ АН УССР и ДИИТа при участии автора и защищенную авторским свидетельством.

Произведен выбор рациональных значений жесткости дополнительных упругих элементов, обеспечивающих упругое соединение в горизонтальной плоскости буксовых узлов с рамами тележек. При этом принимались во внимание технические возможности реализации определенных значений жесткости в конструкции. Конструкция надбуксового подвешивания, позволяющая изменять в широких пределах жесткость надбуксового подвешивания в продольном (k_x) и поперечном (k_y) направлениях, разрабатывается в Калининском филиале ВНИИвагоностроения на базе тележки КВЗ-ЦНИИ. Устойчивость движения экипажа исследовалась как по первому приближению А. М. Ляпунова, так и решением системы нелинейных уравнений на АВМ.

Исследование устойчивости движения по первому приближению проведено при трех схемах выбора параметров k_x и k_y : 1) $k_x = k_y = 100-1500 \text{ Т. м}^{-1}$; 2) $k_x = 100-1500 \text{ Т. м}^{-1}$, $k_y = 100 \text{ Т. м}^{-1}$; 3) $k_x = 100-1500 \text{ Т. м}^{-1}$; $k_y = 200 \text{ Т. м}^{-1}$. Расчеты выполнены для двух значений коэффициента псевдоскольжения $F = 1500 \text{ Т}$ и 835 Т . Можно считать, что большее значение соответствует верхнему возможному пределу значений коэффициента псевдоскольжения, а меньшее значение — нижнему пределу.

Как показывают исследования, при изменении $k_x = k_y$ от 100 Т. м^{-1} до 400 Т. м^{-1} величина критической скорости возрастает с 44 м/сек до 89 м/сек и практически не зависит от значения коэффициента псевдоскольжения. При $k_x = k_y > 400 \text{ Т. м}^{-1}$ значения $v_{кр}$, полученные при различных F , отличны. Рациональные значения $k_x = k_y = 500-600 \text{ Т. м}^{-1}$ соответствует максимальному значению $v_{кр} \approx 92 \text{ м/сек}$ для $F = 835 \text{ Т}$. В случае схем 2 и 3 величина $v_{кр}$ не зависит от F и увеличивается с увеличением k_x , достигая максимального значения 70 м/сек и 90 м/сек при $k_x = 1500 \text{ Т. м}^{-1}$.

Для уточнения рациональных значений k_x и k_y рассмотрена нелинейная расчетная схема пассажирского вагона, когда принимается во внимание:

действие сил сухого трения (разрывные функции релейного типа) в опорах кузова на тележки;

нелинейность поверхности катания колеса (считается билинейной);

упругость рельсовых нитей в горизонтальном поперечном направлении k_{\perp} .

В линейные уравнения 32-го порядка вида (1) войдут дополнительные линейные и нелинейные члены, обусловленные выражениями обобщенных сил. Выражения обобщенных сил, вызванных взаимодействием колес и рельсов, содержат, кроме обобщенных координат, неизвестные — поперечные горизонтальные перемещения рельсовых нитей. Для их определения составлены дополнительные уравнения

$$\dot{y}_{\perp} = \dot{q}_{\text{кп}} - v q_{\text{кy}} - R y_{\perp} + L, \quad (4)$$

где y_{\perp} и y_{\perp} — векторы скоростей и перемещений рельсовых нитей; $q_{\text{кп}}$ — вектор скоростей поперечных перемещений центра масс колесных пар; $q_{\text{кy}}$ — вектор угловых перемещений колесных пар; v — скорость движения; $R = k_{\perp} F^{-1} v$; $L = P F^{-1} v (\operatorname{tg} \alpha_k - \operatorname{tg} \alpha_{k+1})$ (P — давление колеса на рельс, α_k и α_{k+1} — углы наклона касательных к профилям поверхности катания колес в точке контакта).

Система уравнений 32-го порядка вида (1) и уравнения (4) образуют систему нелинейных дифференциальных уравнений 40-го порядка, которая в нормальной форме Коши имеет вид:

$$\dot{x} = A^* x + X^*(x), \quad (5)$$

где x и \dot{x} — векторы фазовых координат и скоростей, A^* — постоянная матрица коэффициентов, $X^*(x)$ — нелинейная вектор-функция. Линеаризация таких нелинейностей как силы сухого трения недостаточно точно отражает особенности их изменения и нежелательна при решении задач, где сухое трение существенно влияет на характер движения системы. Поэтому при исследовании устойчивости движения экипажа приходится прибегать к численному интегрированию уравнений возмущенного движения (5). Решать систему нелинейных дифференциальных уравнений высокого порядка удобно путем моделирования на аналоговых вычислительных машинах.

Решение системы уравнений (5) выполнено на АВМ МН-17М. Блок-схема решения, построенная на базе АВМ МН-17М, позволила рассмотреть ряд решений при изменении

горизонтальной жесткости надбуксового подвешивания (k_x и k_y), момента силы сухого трения w , скорости движения v . Жесткость надбуксового подвешивания изменялась следующим образом: схема I — $k_x = k_y = 100, 300, 600, 1000 \text{ Т. м}^{-1}$; схема II — $k_x = 300, 500, 700, 1000 \text{ Т. м}^{-1}$; $k_y = 100 \text{ Т. м}^{-1}$. Моделирование на АВМ выполнено для коэффициента псевдоскольжения $F = 835 \text{ Т.}$

Анализ полученных решений показал, что при $k_x = k_y = 100, 300, 600 \text{ Т. м}^{-1}$ (схема I) и $k_x = 300, 500 \text{ Т. м}^{-1}$ (схема II) силы сухого трения увеличивают значение критической скорости. В случае, когда $k_x = k_y = 600 \text{ Т. м}^{-1}$, движение системы асимптотически устойчиво во всем диапазоне рассмотренных значений скорости (10—80 м/сек) при любом значении момента трения w от 0 до 3 Т. м. При остальных значениях параметров k_x и k_y (схемы выбора I и II) наблюдаются стационарные режимы колебаний, т. е. система устойчива неасимптотически.

Установлено: стационарные режимы колебаний вызваны периодическими изменениями структуры системы — уменьшением числа степеней свободы. Наименьшее значение скорости v_0 , при которой система становится неасимптотически устойчивой вследствие действия момента трения w , можно определить, рассматривая устойчивость движения линейных систем. Для этого следует сравнить критические скорости двух линейных систем: первая соответствует условию свободного поворота рам тележек относительно кузова ($\psi \neq \psi_1$, $\psi \neq \psi_2$), вторая — случаю жесткого соединения кузова и рам тележек при поворотах ($\psi = \psi_1 = \psi_2$). Если критическая скорость в первом случае $v'_{кр}$ превышает критическую скорость для второго случая $v''_{кр}$, то можно считать, что $v'_{кр} \approx v_0$. При этом легко определяются приближенные значения частоты автоколебаний. Следует отметить, что условие $v'_{кр} < v''_{кр}$ не является достаточным для отрицания возможности появления стационарных режимов колебаний. Предлагаемый способ приближенной оценки некоторых параметров автоколебаний может быть использован при исследовании устойчивости движения железнодорожных экипажей с системой подвешивания аналогично рассмотренной.

Результаты расчетов подтверждают, что с увеличением скорости выше критической значительно возрастают перемещения тел системы, усилия в упругих элементах и силы взаимодействия колес экипажа и рельсов Н_д. Причем, при $v > v_{кр}$

силы взаимодействия колес и рельсов в 1,5—2 раза больше горизонтальных поперечных усилий в упругих элементах надбуксового подвешивания.

Исследования устойчивости движения экипажа с параметрами моторного вагона электропоезда ЭР-200 свидетельствуют о том, что момент трения w дестабилизирует движение системы в рабочем диапазоне скоростей (40—60 м/сек). Значения критической скорости уменьшаются, а силы взаимодействия H_{II} возрастают (до 4Т и более) и величина сил при этом зависит от начальных условий (возмущений).

Исследована устойчивость стационарных режимов колебаний (автоколебаний) вагона ЭР-200, возникающих при действии момента трения w . При решении системы уравнений (5) на АВМ наблюдались как графики, так и фазовые траектории перемещений тел, входящих в рассматриваемую механическую систему. На примере анализа неоднородных фазовых диаграмм $y_{II} = f(y_{II})$ (y_{II} — горизонтальное поперечное перемещение колесной пары) показаны случаи появления устойчивых и неустойчивых предельных циклов. Определены амплитуды чередующихся устойчивых и неустойчивых предельных циклов и построены области притяжения устойчивых циклов при различных значениях v , w и F .

С целью улучшения ходовых качеств экипажа ЭР-200 исследована устойчивость его движения при различных значениях жесткости центрального подвешивания в горизонтальном поперечном направлении — k_z и горизонтальной жесткости надбуксового подвешивания — k_x и k_y . Определены рациональные значения параметров k_z , k_x и k_y , при которых движение экипажа асимптотически устойчиво в рабочем диапазоне скоростей при возможных значениях момента сил сухого трения $w = 1,2—2,2$ Т м.

На основании проведенных исследований можно сделать вывод, что для скоростных пассажирских вагонов целесообразно проектировать тележки так, чтобы конструктивная скорость была ниже критической.

Для экспериментальных исследований динамики подвижного состава железных дорог при высоких скоростях движения Калининским вагоностроительным заводом по проекту ВНИИвагоностроения и Конструкторского бюро Генерального конструктора по авиационной технике А. С. Яковлева построен скоростной вагон-лаборатория с реактивной тягой

(СВЛ) Одновременно с постройкой СВЛ были проведены теоретические исследования устойчивости его невозмущенного движения с использованием расчетной схемы железнодорожного экипажа с двойным рессорным подвешиванием, рассмотренной в изложенных выше исследованиях. Результаты этих исследований СВЛ показали, что его критическая скорость равна примерно 100 м/сек (360 км/ч).

В 1972 г. на Приднепровской железной дороге были проведены опытные поездки, в которых скорость движения СВЛ достигала 250 км/ч. Движение СВЛ во всем диапазоне скоростей от 0 до 250 км/ч. оказалось устойчивым. Большей скорости развить не удалось вследствие ограниченности силы тяги двигателей и длины опытного участка.

Чтобы проверить расчетные схемы и методику, по которым проводятся исследования устойчивости движения рельсовых экипажей, путем сопоставления теоретически рассчитанной и экспериментально замеренной критических скоростей, было решено изменить конструкцию СВЛ так, чтобы критическая скорость находилась в практически реализуемом диапазоне скоростей, т. е. не превышало 250 км/ч.

Теоретические исследования показывают, что критическая скорость СВЛ и вагонов с аналогичными схемами рессорного подвешивания в значительной мере зависит от величины коничности колес, горизонтальной жесткости надбуксового подвешивания (k_x и k_y) и момента трения w . Увеличивая коничность колес и уменьшая k_x и k_y и момент трения w , можно значительно снизить критическую скорость СВЛ. Для определения таких значений указанных параметров, при которых критическая скорость находилась бы в диапазоне практически реализуемых скоростей, были проведены дополнительные теоретические исследования. При этих исследованиях сначала не принималось во внимание действие сил сухого трения, коничность поверхности катания колеса считалась постоянной и равной 1:10, рельсовый путь в горизонтальном поперечном направлении принимался абсолютно жестким. Кроме того, считалось, что демпфирование в надбуксовом подвешивании отсутствует. При таких допущениях устойчивость движения экипажа определяется решением системы линейных уравнений 32-го порядка вида (1). Критические скорости, полученные в результате этих исследований оказались равными: $v_{кр} = 40,5$ м/сек (146 км/ч) при $F = 1470$ Т и $v_{кр} = 42,2$ м/сек (152 км/ч) при $F = 815$ Т

В соответствии с проведенными теоретическими исследованиями в конструкцию ходовых частей СВЛ были внесены следующие изменения. Все колеса обточены по новому профилю поверхности катания с основным уклоном 1 : 10 вместо 1 : 20. Демонтированы демпферы сухого трения в надбуксовом подвешивании, что позволило уменьшить его горизонтальную жесткость. Для уменьшения момента трения вес кузова СВЛ передавался на тележки через специальные диски, помещенные в подпятники. При такой схеме опирания кузова на тележки уменьшается разброс величины коэффициента трения.

В дальнейшем были проведены теоретические исследования устойчивости движения СВЛ с измененными значениями указанных параметров по уточненной расчетной схеме, для чего рассматривалась система нелинейных дифференциальных уравнений 40-го порядка (5). Полученные решения позволили определить значения критической скорости линейной системы ($w=0$) при подавливом пути: $v_{кр}=38,8$ м/сек и 40,8 м/сек (140 км/ч и 147 км/ч) для $F=1470$ Т и 815 Т. Отличие этих значений от найденных для линеаризованной системы уравнений получается вследствие влияния деформируемости рельсовых нитей в горизонтальном поперечном направлении. Сухое трение в опорах кузова на тележки в данном случае стабилизирует движение экипажа и при $w \neq 0$ критическая скорость $v_{кр} > 38,8$ м/сек и 40,8 м/сек. При вероятных значениях момента сил сухого трения и коэффициента псевдоскольжения значение критической скорости СВЛ находится в диапазоне 43,8—47,8 м/сек (158—172 км/ч).

Во время испытаний СВЛ с измененными параметрами измерялись силы, действующие на колесные пары, относительные перемещения частей кузова и тележек. Записи динамических процессов производились на прямом участке пути при скоростях движения в диапазоне 90—210 км/ч (25—58,3 м/сек). В результате обработки на ЭЦВМ записанных осциллограмм получены зависимости сил и перемещений от скорости движения. Из сравнения этих зависимостей с полученными теоретически сделан вывод о том, что достаточно хорошо совпадает диапазон критических скоростей, выше которого наблюдается интенсивный рост сил и перемещений. Для уточнения величины критической скорости СВЛ были проведены заезды, в которых велись непрерывные записи динамических процессов при изменении скорости движения от 120 км/ч до 180 км/ч (от 33,3 м/сек до 50 м/сек). Анализ

подобных записей позволил установить, что значение критической скорости СВЛ находится в диапазоне 155 — 170 км/ч (43—47 м/сек).

По диапазону значений критической скорости путем сравнения теоретических и экспериментальных данных оценены пределы, в которых находились значения коэффициента трения скольжения f в системе опирания кузова на тележки во время опытов. Найденные значения $f=0,07-0,18$ соответствуют тем их значениям, которые можно ожидать при опирании кузова СВЛ на пятники тележек. Сделано также заключение, что в реальной системе величина коэффициента псевдоскольжения F ближе к меньшей из рассмотренных при теоретических исследованиях.

Спектральный анализ осциллограмм, записанных во время опытных поездок, показал, что при движении СВЛ со скоростями выше критической заметно проявляются частоты, значение которых увеличивается с увеличением скорости. Частоты, определенные путем математического моделирования и экспериментально, оказались близкими.

ВЫВОДЫ

Таким образом в работе:

1. Изложены основные результаты теоретических и экспериментальных исследований устойчивости движения скоростных железнодорожных экипажей с двухосными тележками, оборудованными двойным рессорным подвешиванием. Рассмотрены расчетные схемы, представляющие дискретные линейные и нелинейные механические системы с числом степеней свободы $n=25, 31$.

2. Исследовано влияние на характер движения экипажей изменения структуры, значений некоторых параметров подвешивания и дополнительных упругих элементов, соединяющих отдельные узлы конструкции.

3. При исследовании устойчивости движения экипажей по первому приближению А. М. Ляпунова —

— рассмотрен случай упругого опирания кузова на раму вагона, представляющую корытообразный поддон, и установлено, что изменение величины жесткости дополнительных упругих элементов, соединяющих кузов и поддон, не оказывает существенного влияния на устойчивость движения;

— для вагона с дополнительными упругими угловыми соединениями кузова и рам тележек в горизонтальной плоскости получены значения критической скорости при различных характеристиках восстанавливающего момента и предложена новая конструктивная схема тележки;

— оценено влияние величины коэффициента псевдоскольжения на значение критической скорости пассажирского вагона и СВЛ.

4. Исследования, проведенные с помощью математического моделирования на АВМ, позволили установить

— что для рассмотренных нелинейных систем в определенных случаях характерно появление стационарных режимов колебаний (автоколебаний) при действии сил сухого трения, т. е. движение становится устойчивым неасимптотически;

— значения параметров (момента сил сухого трения, жесткости элементов подвешивания, скорости движения и начальных условий), при которых возникают автоколебания;

— амплитуды чередующихся устойчивых и неустойчивых предельных циклов и области притяжения устойчивых циклов при различных значениях скорости, момента сил сухого трения и коэффициента псевдоскольжения.

5. На основании исследований стационарных режимов колебаний предложен способ определения приближенных значений частоты автоколебаний и наибольшего значения скорости v_0 при котором движение системы устойчиво асимптотически.

6. Результаты исследования устойчивости движения скоростных пассажирских вагонов дают возможность рекомендовать следующие значения горизонтальной жесткости надбуксового подвешивания: $k_x = k_y \approx 400 \text{ Т м}^{-1}$, а в случае $k_x > k_y = 100 \text{ Т м}^{-1}$ величина $k_x = 300 - 500 \text{ Т м}^{-1}$. Эти рекомендации использованы при проектировании тележки перспективного пассажирского вагона в Калининском филиале ВНИИвагоностроения.

7. Для оценки точности расчетной схемы и математической модели, принимаемых при исследованиях устойчивости движения железнодорожных экипажей, проведены исследования с целью сопоставления теоретически рассчитанного и экспериментально замеренного значений критической скорости.

8. В результате теоретических исследований и направленного эксперимента подтверждена корректность принимаемых

расчетных схем, построенной математической модели и используемой методики исследования устойчивости движения рельсовых экипажей. Эту методику, разработанную в ДИИТе и ДО ИМ АН УССР, рекомендуется использовать при разработке рациональных конструкций железнодорожных экипажей, особенно подвижного состава для высоких скоростей движения.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ ДОЛОЖЕНЫ:

на юбилейных научно-технических конференциях Днепропетровского института инженеров железнодорожного транспорта (г. Днепропетровск, 1970, 1972 гг.);

на XXXIII научно-технической конференции Брянского института транспортного машиностроения (г. Брянск, 1972 г.);

на научно-техническом совещании «Некоторые задачи механики скоростного рельсового транспорта» (г. Днепропетровск, 1972 г.);

на сетевой научно-технической конференции «Динамика и меры повышения эксплуатационной надежности локомотивов в условиях железных дорог Урала и Сибири» (г. Омск, 1972 г.);

на Симпозиуме «Проблемы моделирования динамики подвижного состава» (г. Брянск, 1973 г.);

на научно-технической конференции по проблемам развития железнодорожного транспорта, посвященной 40-летию Калининского выпуска инженеров ДИИТа 1934 года (г. Днепропетровск, 1974 г.);

на научно-техническом совещании конструкторского бюро Уралвагонзавода (г. Нижний Тагил, 1974 г.);

на семинарах по механике Днепропетровского отделения Института механики АН УССР и Днепропетровского института инженеров железнодорожного транспорта (г. Днепропетровск, 1973 — 1974 гг.);

И ОПУБЛИКОВАНЫ В РАБОТАХ:

1. Устойчивость движения скоростного железнодорожного экипажа с дополнительными упругими элементами в системе подвешивания. В кн. «Материалы XXXIII научно-техничес-

кой конференции Брянского института транспортного машиностроения», Брянск, 1972 (соавторы Ю. В. Демин, М. Л. Коротенко).

2. Об устойчивости движения скоростного вагона-лаборатории с реактивной тягой. «Вестник Всесоюзного научно-исследовательского института железнодорожного транспорта», 1973, № 3 (соавторы: В. А. Лазарян, Ю. В. Демин, М. Л. Коротенко).

3. Исследование устойчивости движения высокоскоростных рельсовых экипажей. В кн. «Повышение эксплуатационной надежности локомотивов в условиях железных дорог Урала и Сибири», Омск, 1973 (соавторы: В. А. Лазарян, Л. А. Длугач, Ю. В. Демин, М. Л. Коротенко, Н. А. Радченко).

4. Тележка для экипажей рельсового транспорта. Авторское свидетельство № 370098, заявлено 21 июня 1971, опубликовано 15 февраля 1973, Бюллетень № 11 (соавторы: В. А. Лазарян и др.).

5. Влияние характера связи кузова с тележками на устойчивость движения высокоскоростного железнодорожного экипажа. В кн. «Некоторые задачи механики скоростного рельсового транспорта», Киев; «Наукова думка», 1973 (соавторы: В. А. Лазарян, Ю. В. Демин, М. Л. Коротенко).

6. Исследования влияния сил сухого трения на устойчивость движения моторного вагона электропоезда ЭР-200. Труды ДИИТа, вып. 153, Днепропетровск, 1974 (соавторы: В. А. Лазарян, Ю. В. Демин, М. Л. Коротенко).

7. О выборе параметров надбуксового подвешивания скоростного пассажирского вагона. В кн. «Некоторые задачи механики скоростного наземного транспорта», Киев, «Наукова думка», 1974 (соавторы: Ю. В. Демин, И. С. Доронин).

8. Экспериментальная проверка методов исследования устойчивости движения рельсовых экипажей. В кн. «Некоторые задачи механики скоростного наземного транспорта». Киев, «Наукова думка», 1974 (соавторы: В. А. Лазарян, Ю. В. Демин).