

На правах рукописи

Иванова Юлия Анатольевна

**ИССЛЕДОВАНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ ДВИЖЕНИЯ
КОЛЕСНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ
С УЧЕТОМ НЕРОВНОСТЕЙ ПУТИ**

Специальность 05.26.02 – Безопасность в чрезвычайных ситуациях
(транспорт)

А в т о р е ф е р а т

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2009

Работа выполнена в отделе нелинейного анализа и безопасности систем Учреждения
российской академии наук Вычислительный центр им. А.А. Дородницына РАН

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, доцент
Ю.И. Голечков

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Ф.И. Ерешко
доктор технических наук, профессор
Е.П. Корольков

Ведущая организация: ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский
институт железнодорожного транспорта», г. Москва

Защита диссертации состоится “ 11 ” _____ июня 2009 г. в 16⁰⁰ час.
на заседании совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д 002.017.03
при Учреждении российской академии наук Вычислительный центр им. А.А. До-
родницына РАН по адресу: 119991, г. Москва, ул. Вавилова, д. 40, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Вычислительного центра
им. А.А. Дородницына Российской академии наук.

Автореферат разослан “ ____ ” _____ 2009 г.

Ученый секретарь
совета по защите докторских
и кандидатских диссертаций Д 002.017.03
кандидат физико-математических наук



Мухин А.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Диссертационная работа посвящена развитию методов исследования безопасности движения колесных транспортных средств с учетом неровностей пути, а также созданию пакета проблемно-ориентированных программ для исследования безопасности движения колесных транспортных средств в чрезвычайных ситуациях. В работе под колесными транспортными средствами понимаются средства железнодорожного и автомобильного транспорта.

Для предотвращения и минимизации последствий чрезвычайных ситуаций актуальной задачей является изучение закономерностей возникновения, проявления и развития чрезвычайных ситуаций техногенного характера на транспорте, разработка научно обоснованных технологических и технических мероприятий.

В настоящее время освоение возрастающего объема перевозок пассажиров и грузов при обеспечении безопасности движения транспортных средств и повышении эффективности работы указанных средств является актуальным направлением развития транспортных отраслей. Решению задач, возникающих в этом направлении, служит разработка адекватных методов и эффективной инструментальной среды для повышения безопасности технических транспортных систем в чрезвычайных ситуациях, когда аварийность осложняется факторами неровностей пути и высоких скоростей движения. Наибольшую сложность для изучения представляют системы, характеризующиеся нерегулярным поведением, вибрациями и ударными возмущениями. Несмотря на то, что исследование подобных систем ведется во многих научно-технических центрах в России и за рубежом, остается широкий диапазон нерешенных задач, требующих тщательной научной разработки и экспериментальной проверки.

Тема диссертации является актуальной, поскольку статистика чрезвычайных ситуаций на железных дорогах России показывает, что в последние годы относительные показатели числа нарушений безопасности движения ухудшаются. Количество чрезвычайных происшествий, имевших место на железнодорожном транспорте с 1992 по 2007 годы, представлено в диаграмме на рис. 1.

Сложная аварийная обстановка требует тщательного анализа основных причин возникновения чрезвычайных ситуаций и разработки мер по уменьшению количества чрезвычайных ситуаций на железнодорожном транспорте.

Актуальной задачей является разработка методов, которые позволяют проводить качественное исследование и численно-аналитическое интегрирование уравне-

ний, описывающих движение транспортных динамических систем в чрезвычайных ситуациях при произвольно большом числе фазовых переменных.

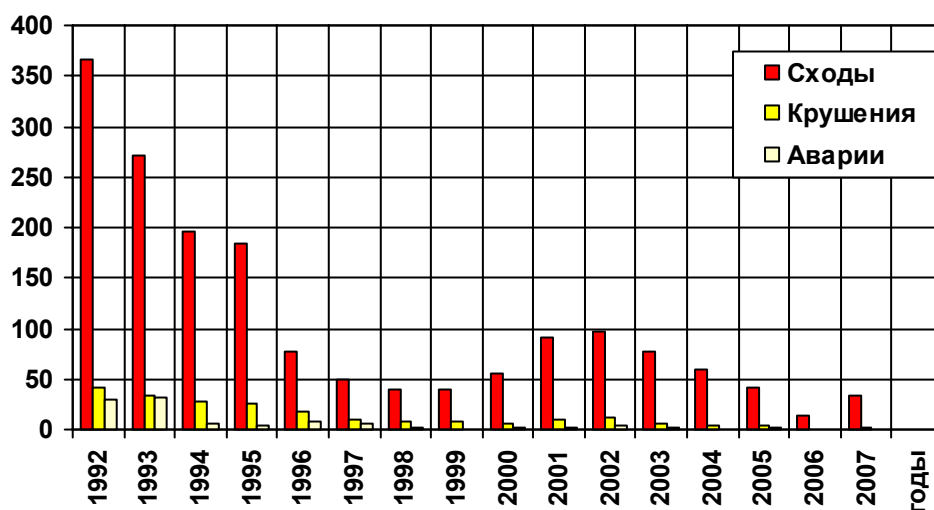


Рис. 1. Количество чрезвычайных ситуаций на железнодорожном транспорте с 1992 по 2007 годы

В связи с возросшими требованиями к проектированию, эксплуатации сложных технических объектов и технологических процессов, а также к управлению указанными объектами и процессами в чрезвычайных ситуациях, возникает необходимость изучения нелинейных дифференциальных уравнений, описывающих движение транспортных динамических систем. Для этого разрабатываются соответствующие транспортные дифференциальные уравнения второго порядка. Такие уравнения описывают функционирование многих технических динамических систем, а их разработка представляет фундаментальную научную проблему.

В диссертации изучаются три типа транспортных дифференциальных уравнений второго порядка:

1. Дифференциальное уравнение движения железнодорожного вагона с учетом заданного профиля неровностей пути:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_i} + \frac{\partial \Pi}{\partial q_i} + \frac{\partial \Phi}{\partial \dot{q}_i} = Q_i(t), \quad (1)$$

где T и Π обозначают соответственно кинетическую и потенциальную энергию вагона, q_i и \dot{q}_i – векторы обобщенных координат и скоростей, $Q(t)$ – вектор обобщенных сил и Φ обозначает диссипативную функцию вагона, t – время. Для уравнения (1) посредством разработанного в диссертации программного обеспечения исследу-

ется устойчивость и безопасность движения железнодорожного вагона по неровному железнодорожному пути для различных значений скорости движения, в том числе для высокоскоростного движения.

2. Дифференциальное уравнение движения автомобильного транспортного средства с учетом заданной формы неровностей пути:

$$M \ddot{z} + C \dot{z} + K z = Q(t, z, \dot{z}), \quad (2)$$

где M, C, K – матрицы масс, демпфирования и жесткости соответственно, $Q(t, z, \dot{z})$ – заданная нелинейная вектор-функция времени, перемещения и скорости (обобщенная возмущающая сила), z – 17-мерный вектор обобщенных координат (одно-столбцовая матрица из 17 строк, $z^T = [z_1, \varphi_1, z_2, \varphi_2, z_3, \varphi_3, z_4, z_5, z_6, z_7, z_8, z_9, z_{10}, z_{11}, z_{12}, z_{13}, z_{14}]$), верхний индекс T означает транспонирование. Уравнение (2) возникает при описании и изучении колебательных процессов летательных аппаратов в воздушном потоке, колебаний корпусов кораблей и подводных лодок при волнении в открытом море, колебаний элементов и узлов подвижного состава железнодорожного и автомобильного транспорта при движении по неровному пути. Особенности изучаемого уравнения (2) является рассмотрение нестационарного вектора возмущений и большая размерность фазового пространства. В диссертации для уравнения (2) поставлены и решены следующие задачи: описать характеристики вертикальных колебаний колесного транспортного средства при движении по неровному пути с заданной формой неровностей; реализовать алгоритмы и программы численных расчетов для различных значений скорости движения; проанализировать влияние роста скорости на характер колебаний и безопасность движения; определить значения динамических характеристик пневматической подвески сиденья водителя, обеспечивающие безопасность движения в чрезвычайных ситуациях.

3. Дифференциальное уравнение движения автомобильного транспортного средства с учетом случайного характера неровностей пути, описываемых известными спектральными плотностями и взаимными спектральными плотностями кинематических возмущений:

$$M \ddot{z} + C \dot{z} + K z = B_0 q + B_1 \dot{q}, \quad (3)$$

где M, C, K – матрицы масс, демпфирования и жесткости соответственно; B_0, B_1 – диагональные матрицы жесткости и демпфирования; z – 12-мерный вектор обобщенных координат (одно-столбцовая матрица из 12 строк, $z^T = (z_1, \varphi_1, z_2, \varphi_2, z_3, \varphi_3, z_4, z_5, z_6, z_7, z_8, z_9)$), $q^T = (q_1, q_2, q_3, q_4, q_5)$, $\dot{q}^T = (\dot{q}_1, \dot{q}_2, \dot{q}_3, \dot{q}_4, \dot{q}_5)$. Изучены случайные колебания для уравнения (3) автомобильного транспортного средства, движущегося по неровному пути, имеющему случайную последовательность выступов и впадин.

Разработано алгоритмическое и программное обеспечение расчета зависимостей средних квадратичных отклонений перемещений и ускорений ряда узлов транспортного средства от скорости при движении по профилю пути с заданной спектральной плотностью кинематического возбуждения.

Актуальность разработки и изучения перечисленных дифференциальных уравнений обусловлена необходимостью обоснования режимов функционирования транспортных динамических систем для обеспечения безопасности и устойчивости их работы в чрезвычайных ситуациях. В связи с этим возникает и актуальная потребность в разработке соответствующего пакета проблемно-ориентированных компьютерных программ.

Разработанные к настоящему времени группы методов часто не применимы для исследования фундаментальных свойств транспортных динамических систем (1)–(3), так как необходимость учета сложного поведения решений указанных систем требует дальнейшей разработки, модификации и усовершенствования этих методов. Выполненные в диссертации разработка и усовершенствование численно-аналитических и компьютерных методов исследования безопасности движения транспортных динамических систем в чрезвычайных ситуациях дают улучшенную точность по сравнению с имеющимися методами.

Отсутствие точных универсальных методов исследования транспортных нелинейных систем обусловило разработку обширного набора качественных, численно-аналитических и компьютерных методов исследования транспортных динамических систем. Методы исследования устойчивости и качественных свойств динамических систем изучались, начиная с работ А. Пуанкаре, А.М. Ляпунова, Н.Е. Жуковского и Дж. Биркгофа, в работах отечественных и зарубежных ученых: Н.Г. Четаева, Е.А. Барбашина, В.В. Немыцкого, В.И. Зубова, В.М. Матросова, А.А. Шестакова, В.В. Румянцева, В.М. Старжинского, И.Г. Малкина, Х. Массеры, Р. Беллмана, В. Коппела, Ж.П. Ла-Салля, С. Лефшеца, М. Урабе, Л. Чезари и других ученых. Важные результаты по безопасности и устойчивости движения транспортных систем получены в работах С.А. Чаплыгина, А.А. Шестакова, Н.А. Панькина, Ю.И. Першица, А.Х. Викенса, О.В. Дружининой, Т.А. Тибилова, Ю.М. Черкашина, Е.П. Королькова и других ученых. Первыми широко доступными публикациями по проблемам исследования операций, которые могут служить научной базой и для исследования системной безопасности, являются "Исследование операций" П. Блэккетта (1948 г.) и "Методы исследования операций" Ф. Морза и Д. Кимбелла (1952 г.). Крупные результаты в этом направлении получены в работах Д.А. Вентцеля, Б.В. Гнеденко, А.Н. Колмогорова, В.С. Пугачева, П.С. Краснощекова, В.Т. Карманов-

ва, Н.С. Северцева, А.Н. Катулева и других ученых, которые заложили основы понимания смысла терминов "операция", "эффективность", "неопределенность", "решение", "надежность" и помогли разработке важных фундаментальных разделов анализа конфликтных ситуаций, оптимизационных проблем принятия решений, а также математической теории надежности и безопасности.

Понятие безопасности должно иметь единое понимание. При разработке этого понятия необходимо иметь подход, основанный на системном анализе, исследовании операций и раскрывающий комплекс факторов, ситуаций, причин, поддающихся доказательству, формализации, моделированию и оптимизации.

Областью исследования в настоящей диссертации являются теоретические основы безопасности и компьютерные методы исследования транспортных динамических систем (1)–(3) и задач эффективного прогнозирования их функционирования с количественной оценкой показателей их динамической безопасности.

Цель работы. Целью диссертационной работы является разработка численно-аналитических и компьютерных методов исследования безопасности, устойчивости поведения в чрезвычайных ситуациях неавтономных транспортных динамических систем с различными типами возмущающих процессов для обеспечения безопасных режимов функционирования и прогнозирования динамики проектируемых транспортных систем различного назначения. Целью работы является также реализация единого подхода в исследовании безопасности движения различных классов транспортных динамических систем, задаваемых дифференциальными уравнениями Лагранжа второго порядка, а также разработки пакета программ компьютерной реализации разработанных в диссертации конструктивных методов, открывающих новые возможности для исследования поведения транспортных динамических систем и их управлением в чрезвычайных ситуациях.

Целью диссертации является также развитие математических методов системной безопасности, используемых при проектировании, отработке и эксплуатации сложных технических систем различного назначения, которые могут быть полезны при исследовании социальных, экономических, социально-политических, военных и других проблем принятия решений.

Методы исследования. В диссертации широко использованы методы теории безопасности, системного анализа, качественной теории дифференциальных уравнений, теории устойчивости движения, теории вероятностей, аналитической механики. В диссертации на основе развития первого метода А.М. Ляпунова и компьютерного моделирования предложен универсальный способ исследования влияния параметров диссипации и жесткости, инерционных параметров, а также геометрических па-

раметров проектируемого экипажа на устойчивость движения транспортных динамических систем, разработано соответствующее программное обеспечение.

Научная новизна диссертации заключается в следующем. Проведен анализ состояния безопасности движения на железных на дорогах РФ за период с 1992 по 2007 годы и разработаны предложения по повышению безопасности эксплуатации железнодорожных систем в чрезвычайных ситуациях. Развита методика исследования устойчивости по Ляпунову состояний равновесия решений уравнений движения транспортных динамических систем, задаваемых обыкновенными многомерными нелинейными дифференциальными уравнениями. Разработанные в диссертации методы построения предельных циклов уравнений движения железнодорожной колесной пары и проведенный анализ устойчивости предельных циклов позволяют выработать рекомендации по использованию технических характеристик, обеспечивающих безопасные режимы функционирования систем железнодорожного транспорта в чрезвычайных ситуациях. Условия существования устойчивых предельных циклов могут служить основой для разработки алгоритмов исследования устойчивости движения и использоваться для реализации в виде компьютерных программ. На основе уравнений динамики – уравнений Лагранжа второго рода построены новые дифференциальные уравнения движения транспортных динамических систем с учетом различных способов задания неровностей пути с точки зрения обеспечения безопасности. Предложены методы оценки степени безопасности транспортных динамических систем на количественном уровне, включающие параметры: вероятность безопасности, вероятность опасности, коэффициент средней опасности, коэффициент безопасности, стоимость ущерба, время – период безопасности и т.д. Проведено исследование вибробезопасности транспортных систем и на его основе предложены формулы расчета коэффициентов жесткости и показателей демпфирования различных приборов, повышающих безопасность их эксплуатации. Выполненный анализ движения колесных транспортных средств с учетом неровностей пути того или иного профиля и проведенные серии вычислительных экспериментов могут служить основой методики по совершенствованию функционирования систем транспорта с точки зрения устойчивости движения, повышения безопасности и комфортабельности передвижения пассажиров и сохранности перевозимых грузов. Расчеты в рамках иллюстрирующих примеров позволили проанализировать влияние роста скорости движения на характер колебаний и безопасность движения колесных транспортных средств, а также оптимизировать параметры элементов и узлов кинематических схем транспортного средства. Результаты об устойчивости решений уравнений движения транспортных динамических систем могут применяться в задачах численного интегрирования

дифференциальных уравнений при решении многих прикладных задач. Для оптимизации расчета характеристик транспортных динамических систем на основе первого метода Ляпунова предложен универсальный способ исследования влияния параметров диссипации и жесткости, инерционных параметров проектируемого экипажа на устойчивость и безопасность движения транспортных динамических систем, разработано соответствующее программное обеспечение.

Практическая значимость. Результаты диссертации могут быть использованы для качественного анализа безопасности транспортных динамических систем и для обеспечения оптимальных режимов функционирования сложных динамических систем в чрезвычайных ситуациях. Практическая значимость результатов диссертации состоит также в том, что разработанные диссертантом методы и алгоритмы позволили решить ряд теоретических и прикладных задач теории устойчивости и безопасности транспортных динамических систем и явились основой для создания пакета проблемно-ориентированных компьютерных программ, содержащего программы расчета динамических характеристик колесных транспортных средств.

С помощью разработанных диссертантом численно-аналитических методов с точки зрения обеспечения безопасности в чрезвычайных ситуациях исследованы уравнения движения железнодорожного экипажа, изучена устойчивость вертикальных колебаний железнодорожного вагона и автомобильного транспортного средства.

Результаты диссертации, касающиеся устойчивости и управления систем железнодорожного транспорта, могут найти применение при решении задач снижения износа гребней колес, снижения износа рельсов, задач оптимизации критических скоростей движения железнодорожного подвижного состава.

В диссертационной работе получен ряд результатов, которые составляют основу практической методики для оптимизации характеристик и оценки безопасности движения колесных транспортных средств и для управления движением в условиях высоких скоростей. В этих методиках существенную роль играют методы исследования устойчивости движения транспортных динамических систем на основе использования первого метода Ляпунова. Отметим, что предложенные алгоритмы могут быть реализованы в виде компьютерных программ в одной из сред программирования, что позволяет широко использовать их при решении многочисленных технических задач, связанных с разработкой и внедрением новых технических средств и технологических процессов.

Изучаемые в настоящей диссертации многомерные дифференциальные уравнения движения колесных транспортных средств имеют важное значение в прикладной

механике, динамике подвижного состава железнодорожного и автомобильного транспорта, в технической кибернетике и нелинейной динамике.

Реализация результатов. Результаты диссертации могут быть использованы при решении задач качественного и количественного анализа динамических систем естествознания и техники, а также при чтении курсов теории безопасности систем, математического моделирования, системного анализа, теории устойчивости движения, теории нелинейных колебаний. Ряд результатов диссертации использован в научно-исследовательской и опытно-конструкторской работе, проводящейся в Российской открытой академии транспорта, Московском государственном университете путей сообщения, а также использован при анализе и оценке безопасности движения пассажирских поездов в Московско-Курском отделении Московской железной дороги филиала ОАО «РЖД».

Достоверность полученных результатов основана на корректности постановок задач, строгом использовании аналитических и качественных методов, на сравнении с результатами, полученными с помощью других методов, на результатах моделирования в широком диапазоне условий. Все утверждения диссертации обоснованы, приведены полные обоснования выводов.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 8 научных работ, список которых приведен в конце автореферата. Три работы из этого списка опубликованы в научных изданиях, рекомендованных ВАК России.

Апробация работы. Результаты диссертации докладывались и обсуждались:

– на XVI Международной конференции «Проблемы управления безопасностью сложных систем» (PMECS–08) в ИПУ РАН (Москва, 2008 г.);

– на научно-практической конференции «Инженерные системы–2009» в Российском университете дружбы народов (Москва, 2009 г.);

– на XLV всероссийской конференции по проблемам математики, информатики, физики и химии в Российском университете дружбы народов (Москва, 2009 г.);

– на научном семинаре по методам нелинейного анализа Вычислительного центра РАН (Москва, 2008 г., 2009 г.).

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, трех глав, приложения, заключения и списка литературы. Общий объем диссертации 150 с., список литературы включает в себя 116 наименований работ отечественных и зарубежных авторов.

ОБЗОР СОДЕРЖАНИЯ ДИССЕРТАЦИИ

В настоящей диссертации дано развитие методов и алгоритмов исследования безопасности движения колесных транспортных средств, задаваемых обыкновенными многомерными нелинейными дифференциальными уравнениями с учетом неровностей пути в чрезвычайных ситуациях, а также создан пакет проблемно-ориентированных программ для исследования безопасности движения колесных транспортных средств. С помощью названных методов изучаются качественные, асимптотические и количественные характеристики транспортных динамических систем типов (1)–(3). Предложены оценки безопасности на количественном уровне.

Во **Введении** содержится обоснование актуальности темы диссертации и характеристика области исследований. Дан обзор и сравнительный анализ научных результатов, относящихся к теме диссертации, приведены основные цели и задачи исследований, охарактеризованы методы решения задач, основные результаты, отмечены их научная новизна и практическая ценность. Приведено краткое содержание работы, а также представлена общая характеристика диссертации.

Первая глава «Уравнения движения и теоретические аспекты безопасности транспортных динамических систем» диссертации посвящена построению на основе уравнений динамики Лагранжа второго рода обыкновенных многомерных нелинейных дифференциальных уравнений движения транспортных динамических систем с точки зрения обеспечения безопасности движения в чрезвычайных ситуациях. В этой главе проведен также анализ состояния безопасности движения на железных дорогах России за период с 1992 по 2007 годы и охарактеризованы существующие методы повышения безопасности движения и предупреждения аварийности на сети железных дорог. Для оценки безопасности движения транспортных динамических систем используется устойчивость по Ляпунову состояний равновесия динамических систем, которую следует рассматривать как составляющую безопасности движения. Изучена устойчивость периодических движений железнодорожной колесной пары и разработаны рекомендации по использованию технических характеристик, обеспечивающих безопасные режимы функционирования систем железнодорожного транспорта в чрезвычайных ситуациях.

Пусть уравнение движения железнодорожной колесной пары, выраженное через вектор $x = (r, T, v, \tilde{\omega})$ фазовых переменных, имеет вид

$$\dot{x} = f(x, p, t), \quad (4)$$

где f – дифференцируемое векторное поле такое, что $f: TM \times P \times I \rightarrow TM$, где $TM = M \times R^6$ – фазовое пространство, P – пространство параметров, $I \subset R$ – временной интервал. Траектория $\varphi_\xi: (0, \infty) \rightarrow TM$ уравнения (4) с начальной точкой $\xi \in TM$ в каждый момент времени t задается однозначно начальной задачей

$$\dot{x}(t) = f(x(t), p, t), \quad x(0) = \xi. \quad (5)$$

Показано, что если матрица монодромии $M(v)$ имеет n собственных значений $\rho_i(v)$, $i = 1, 2, \dots, n$, одно из этих значений равно единице, например, $\rho_n(v) = 1$, и если модули всех остальных $n - 1$ собственных значений меньше 1, то цикл орбитально устойчив. Если имеется собственное число, по модулю большее 1, то цикл орбитально неустойчив. Кроме того, рассмотрен вопрос о потере орбитальной устойчивости при изменении скорости. В самом деле, если мультипликаторы периодического решения задачи (5) представляют функции скорости v и $v < v_0$, то мультипликаторы $\rho_2(v)$, $\rho_3(v)$, ..., $\rho_n(v)$ лежат внутри единичного круга $\rho_1(v) \equiv 1$. Это означает, что периодическое решение является орбитально устойчивым. Установлено, что при изменении скорости потеря устойчивости происходит в том случае, если один из мультипликаторов покидает единичный круг, что в общем случае может произойти одним из трех способов: а) один из мультипликаторов пересекает единичную окружность в точке $+1$; б) один из мультипликаторов пересекает единичную окружность в точке -1 ; в) пара комплексно-сопряженных мультипликаторов пересекает единичную окружность в точках $e^{\pm i\omega}$, $\omega \neq 2\pi/n$, $n = 1, 2, 3, 4$. Показано, что в случае а) происходит бифуркация рождения или исчезновения пары периодических решений, в случае б) имеет место бифуркация удвоения периода, а в случае в) возникает инвариантный тор. В случае, когда уравнение (5) обладает симметрией, то при условии а) может произойти бифуркация с потерей симметрии.

Дана характеристика неровностей пути, используемая при исследовании безопасного движения колесных транспортных средств в чрезвычайных ситуациях.

Предложены оценки безопасности на количественном уровне. К количественной оценке безопасности следует отнести такие параметры, как вероятность безопасности, вероятность опасности, стоимость ущерба и время – период безопасности. Рассмотрена двумерная случайная величина $\xi = (\xi_1, \xi_2)$, где $\xi_1 = t$ – случайная наработка транспортного средства на отказ, $\xi_2 = c$ – случайная величина ущерба, к которому приводит отказ. Предполагается, что известна функция распределения $F(\xi) = F(t, c)$ вероятности того, что отказ появится за время t , и величина ущерба при этом не превысит величину c . Очевидно, что $F(0, 0) = 0$. Функция $F_1(t, c) = 1 - F(t, c)$ является функцией вероятности безопасной работы и указывает на вероятность того, что за время t не произойдет отказ и величина ущерба не будет менее c .

Если $F(t, c)$ дифференцируема по каждому из своих аргументов, то для характеристики безопасности отказов можно использовать функцию плотности

$$f(t, c) = \frac{\partial^2 F_1(t, c)}{\partial t \partial c}, \quad \int_0^\infty \int_0^\infty f(t, c) dt dc = 1.$$

Рассмотрены следующие количественные оценки безопасности: средняя нагрузка на отказ

$$T = \int_0^{\infty} t dt \int_0^{\infty} f(t, c) dc,$$

средний ущерб от отказа

$$C = \int_0^{\infty} c dc \int_0^{\infty} f(t, c) dt,$$

коэффициент средней опасности

$$D = \frac{C}{T} = \frac{\int_0^{\infty} c dc \int_0^{\infty} f(t, c) dt}{\int_0^{\infty} t dt \int_0^{\infty} f(t, c) dc},$$

коэффициент безопасности транспортного средства

$$U = \frac{1}{1 + D} = \frac{T}{T + C}.$$

Значения коэффициента безопасности лежат в диапазоне (0, 1). Значения U , близкие к единице, имеют наиболее безопасные транспортные средства, в которых отказы, приводящие к значительному ущербу, маловероятны: $\lim_{T \rightarrow \infty} U = \lim_{C \rightarrow 0} U = 1$.

Проведено изучение вибробезопасности транспортных систем и на его основе проанализированы формулы расчета коэффициентов жесткости и показателей демпфирования различных приборов, эксплуатируемых в вагонах. Пусть согласно принципа Даламбера процесс колебаний амортизируемого объекта описывается дифференциальным уравнением

$$m\ddot{z}_1 + c(z_1 - z_k) = 0, \quad (6)$$

где z_1 – перемещение амортизируемого объекта (прибора) с массой m , $z_k(t)$ – вертикальные перемещения кузова колесного транспортного средства в месте расположения прибора, c – жесткость упругих элементов. При наличии демпферов в системе амплитуды колебаний при возмущениях с любой частотой будут ограниченными. Коэффициент передачи $\eta = \frac{1}{1 - \omega^2 / v^2} = \frac{1}{1 - r^2} = 1$ ($v^2 = \frac{c}{m}$, $r = \frac{\omega}{v}$) при условии $r = 0$

и $r = \sqrt{2}$. В промежутке между этими значениями амплитуды колебаний растут. В резонансной зоне ($r > \sqrt{2}$) значение $\eta < 1$, однако с увеличением β коэффициент передачи η и амплитуды колебаний z_1 увеличиваются.

Результаты первой главы служат теоретической основой для исследования транспортных динамических систем нелинейной механики.

Во *второй главе* «Уравнения движения колесных транспортных средств с учетом неровностей пути» рассмотрены уравнения (1)–(3) движения колесных транспортных средств с учетом различных способов задания профилей неровностей пути. В частности, проведено исследование решений уравнения вертикальных колебаний при движении железнодорожного вагона с учетом заданного профиля неровностей пути, а также решений уравнения вертикальных колебаний при движении автомобильного транспортного средства с учетом неровностей пути заданной формы и неровностей пути, имеющих случайный характер и определяемых известными спектральными плотностями и взаимными спектральными плотностями кинематических возмущений. Здесь же приведены формулы расчета кинетической T , потенциальной Π энергий и диссипативной функции Φ узлов кинематических схем колесных транспортных средств. Например, для вагона:

$$T = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^3 (m_i \dot{z}_i^2 + I_i \dot{\varphi}_i^2) - \frac{1}{2} \sum_{i=4}^7 m_i \dot{z}_i^2,$$

где m_i , I_i – масса и момент инерции массы i -го тела; \dot{z}_i , $\dot{\varphi}_i$ – обобщенные скорости

i -го тела; $\Pi = \sum_{i=1}^{18} \Pi_i$, $\Phi = \sum_{i=1}^{18} \Phi_i$,

$$\Pi_1 = \frac{1}{2} k_1 (z_4 - q_1)^2, \quad \Phi_1 = \frac{1}{2} h_1 (\dot{z}_4 - \dot{q}_1)^2,$$

где k_i , h_i – коэффициенты жесткости и демпфирования i -го элемента.

Предложенные в главе 2 на основе уравнения Лагранжа второго рода уравнения (1)–(3) движения изучаемых колесных транспортных средств с учетом неровностей пути различного характера позволяют с помощью разработанного в диссертации пакета прикладных программ исследовать и оптимизировать динамические характеристики движения колесных транспортных средств с целью повышения устойчивости, комфортабельности и безопасности их движения в чрезвычайных ситуациях.

Третья глава диссертации «Исследование безопасности движения и оптимизация динамических характеристик колесных транспортных средств с учетом неровностей пути» посвящена исследованию безопасности движения и оптимизации динамических характеристик колесных транспортных средств с учетом неровностей пути. В частности, проведено численное изучение колебаний железнодорожного вагона в вертикальной плоскости при его движении по неровному пути с заданной формой неровностей. Сделаны расчеты характеристик вертикальных колебаний вагона для различных значений скоростей движения. Проанализировано

влияние роста скорости на характер колебаний и безопасность движения вагона. Выполнена оптимизация динамических характеристик узлов подвески кузова вагона, позволяющая повысить безопасность движения железнодорожного вагона при высокоскоростном движении.

Пусть железнодорожный вагон, состоящий из кузова и двух рам тележек с подбуксовым подвешиванием, кинематическая схема которого изображена на рис. 3, движется вдоль железнодорожного полотна. Рассмотрим вертикальные колебания вагона на стыках железнодорожной колеи, определяемых аналитическим выражением вида

$$q_4 = \left| a_1 \sin\left(\frac{1}{2}\omega t\right) + a_2 \sin\left(\frac{3}{2}\omega t\right) \right|,$$

где a_1 и a_2 – амплитуды неровностей пути, ω – частота воздействия стыков пути на вагон, v – скорость движения вагона, l_p – длина рельса железнодорожного пути, причем $\omega = 2\pi l_p^{-1} v$.

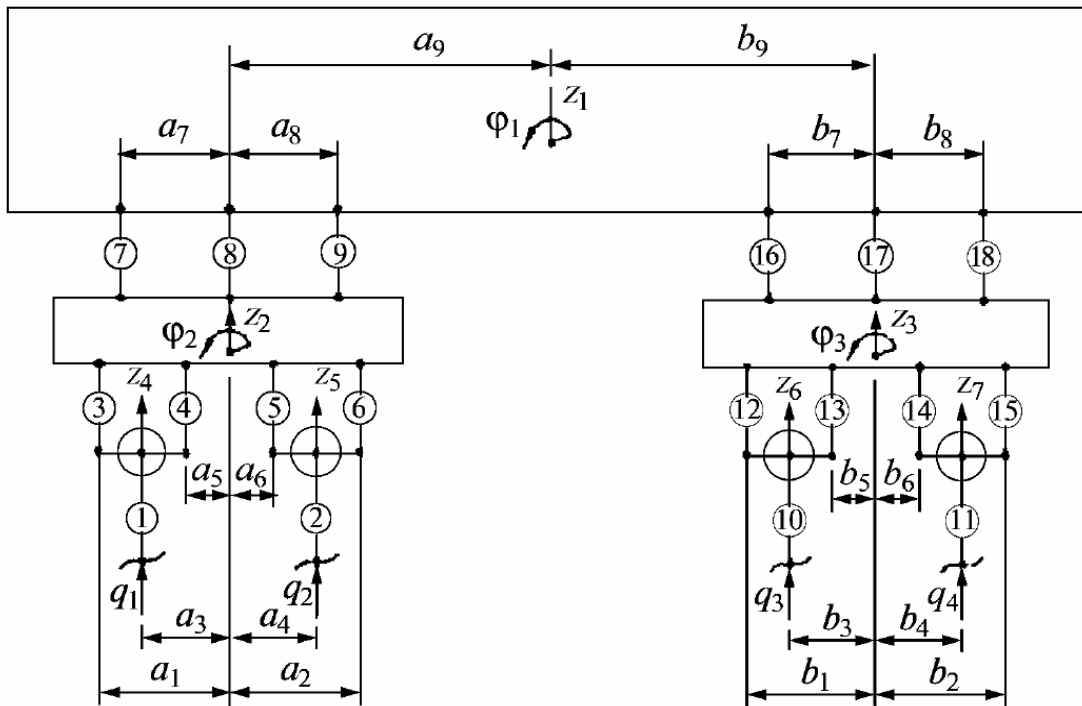


Рис. 3. Основные компоненты кинематической схемы железнодорожного вагона

Закон движения вагона в вертикальной плоскости записывается в виде:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \Gamma}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial \Gamma}{\partial q_i} + \frac{\partial \Pi}{\partial q_i} + \frac{\partial \Phi}{\partial \dot{q}_i} = Q_i(t), \quad (7)$$

где M, C, K – соответственно матрицы масс, демпфирования, жесткости, $Q(t)$ – вектор обобщенных сил, z – вектор обобщенных координат, $z^T = (z_1, \varphi_1, z_2, \varphi_2, z_3, \varphi_3, z_4, z_5, z_6, z_7)$, z_i, φ_i – обобщенные перемещения i -го тела.

Требуется: а) определить величину перемещений, линейных ускорений, углов поворота, угловых ускорений концентрированной первой массы (кузова) вагона от времени t для высокоскоростного движения $v = 240, 280$ и 320 км/ч, б) оптимизировать характеристики силовых элементов кинематической схемы вагона.

Результаты математического моделирования показывает, что графики зависимостей перемещения и ускорения концентрированной массы кузова вагона от времени имеют вид, представленный на рис. 3,4 (толщина линий на рисунках увеличивается для возрастающих значений скорости).

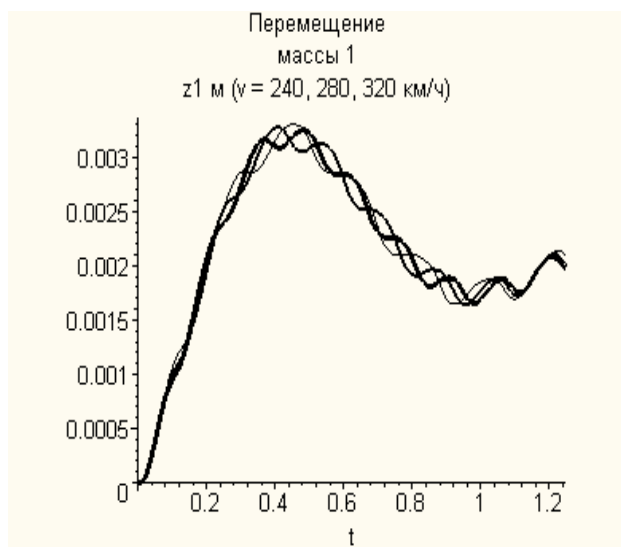


Рис.3. Зависимость перемещения от времени кузова вагона для $v = 240, 280$ и 320 км/ч

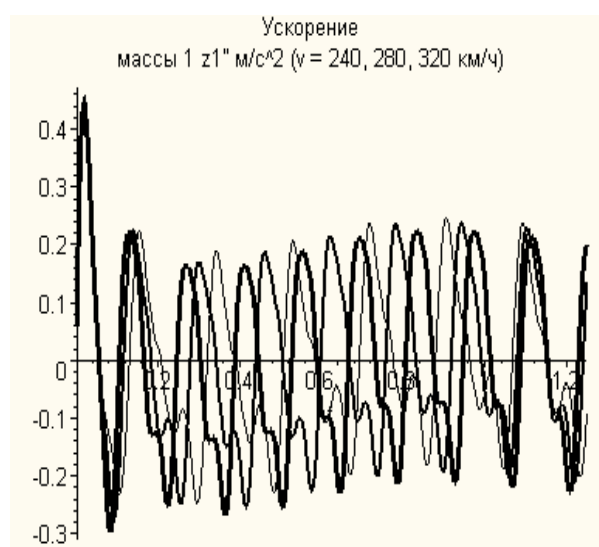


Рис.4. Зависимость ускорения от времени кузова вагона для $v = 240, 280$ и 320 км/ч

Перемещение кузова вагона невелико и составляет примерно 3–4 мм. Однако, максимальная амплитуда изменения линейного ускорения примерно равна 0,8 g, что достаточно близко к 1,0 g. Поэтому при проектировании железнодорожного экипажа следует иметь в виду, что сила реакции неровностей пути, воздействующая на экипаж, может сравняться или даже превзойти вес экипажа. В самом деле, это явление чревато разгрузкой колесных тележек и может привести к сходу тележки с железнодорожной колеи и создать чрезвычайную ситуацию. Кроме того, кузов подвержен высокочастотным вибрациям. Расчеты показывают, что для снижения максимальной амплитуды линейного ускорения и устранения высокочастотных вибраций необходимо оптимизировать работу демпфирующих и силовых элементов кинематической схемы вагона и установить следующие значения коэффициентов

демпфирования $h_7 = h_9 = h_{16} = h_{18} = 4,76 \cdot 10^3 \frac{\text{Н с}}{\text{м}}$. В результате получены графики перемещений и линейных ускорений кузова вагона, представленные на рис. 5. Результаты вычислительного эксперимента показали, что вертикальное перемещение кузова вагона немного увеличилось и стало существенно более плавным, но одновременно значительно уменьшилась амплитуда вертикального ускорения, хотя его частота и осталась прежней.

В главе выполнено также численное моделирование колебаний автомобильного транспортного средства в вертикальной плоскости при его движении по неровному пути с профилем неровностей, заданных посредством кусочно-линейной аппроксимации. Сделаны расчеты характеристик вертикальных колебаний транспортного средства для различных значений скоростей движения. Проанализировано влияние роста скорости на характер колебаний, безопасность и комфортабельность движения транспортного средства, изучены вопросы оптимизации динамических характеристик для повышения безопасности движения колесного транспортного средства по заданному профилю неровностей пути и с заданной скоростью движения. Выполнена оптимизация динамических параметров узлов пневматической подвески сиденья водителя, кабины и рамы транспортного средства, позволяющая повысить безопасность его движения.

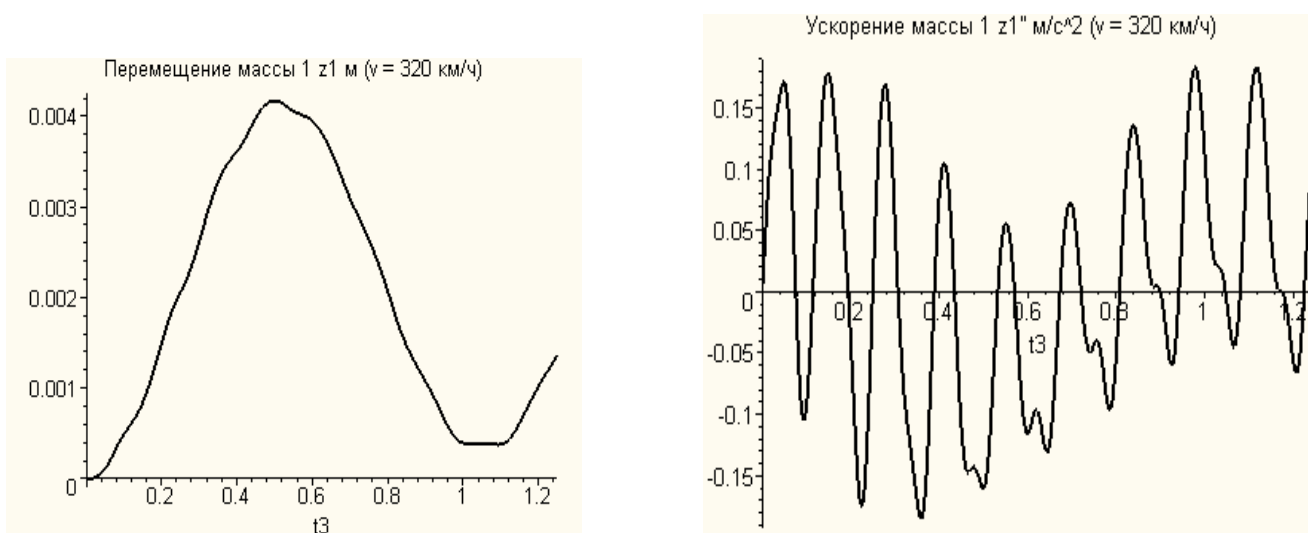


Рис.5. Результаты оптимизации динамических параметров подвески вагона

Рассмотрено движение в вертикальной плоскости автомобильного транспортного средства, состоящего из шасси, кузова, кабины, сиденья водителя, подвески и шин, кинематическая схема которого представлена на рис. 6, через препятствие заданного профиля (рис.7), аппроксимируемого следующим выражением:

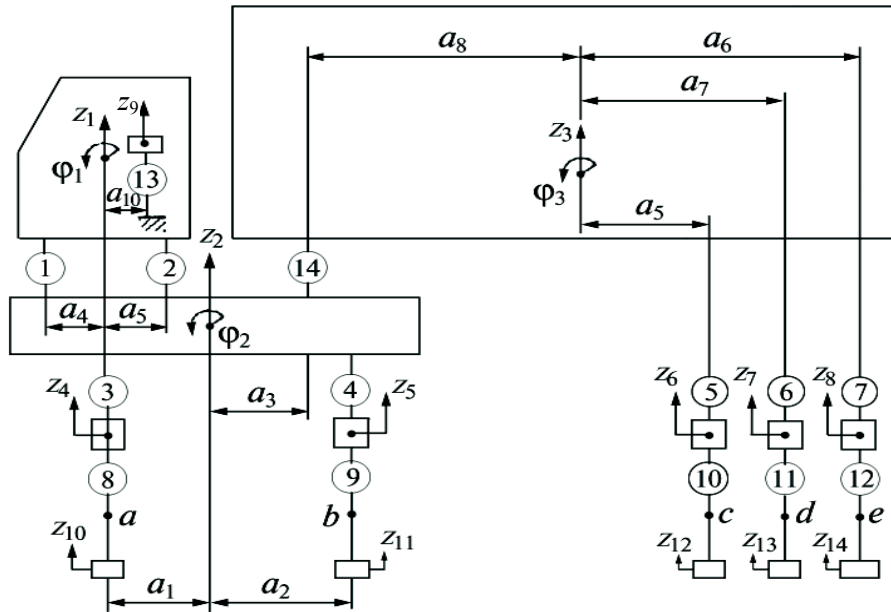


Рис. 6. Основные компоненты кинематической схемы
автомобильного транспортного средства

$$q(x) = N_{i-1}(x)q_{i-1} + N_i(x)q_i,$$

где N_{i-1} , N_i – высота неровностей дороги в точках $i-1$ и i соответственно:

$$N_{i-1}(x) = \frac{x_i - x}{x_i - x_{i-1}}, \quad N_i(x) = \frac{x - x_{i-1}}{x_i - x_{i-1}}.$$

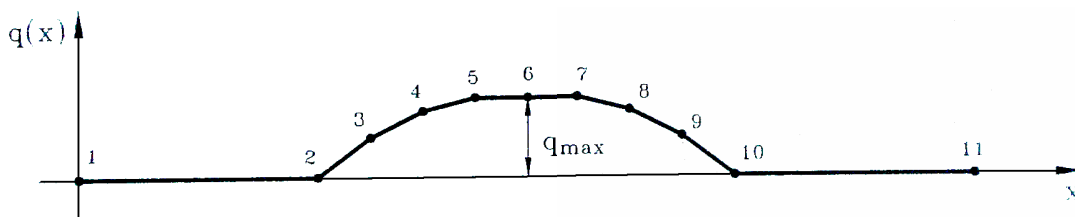


Рис. 7. Профиль неровностей дороги

Общая система уравнений движения данного транспортного средства имеет вид:

$$M\ddot{z} + C\dot{z} + Kz = Q, \tag{8}$$

где M , C , K – соответственно матрицы масс, демпфирования, жесткости, Q – вектор

обобщенных сил, z – вектор обобщенных координат, равный $z^T = (z_1, \varphi_1, z_2, \varphi_2, z_3, \varphi_3, z_4, z_5, z_6, z_7, z_8, z_9, z_{10}, z_{11}, z_{12}, z_{13}, z_{14})$, z_i, φ_i – обобщенные перемещения i -го тела.

Проведенные с помощью программы 1 расчеты показывают, что собственная частота $\omega_9 = \text{frequency}[12] = 6.649136e-01 \approx 0.66$ Hz колебаний сиденья водителя соответствует зоне комфортабельного передвижения. Тем не менее, при движении автомобильного транспортного средства через указанную неровность со скоростью $v = 100$ км/ч имеем зависимости следующего вида (толщина линий на рис. 8,9 увеличивается с ростом номера z_i и \ddot{z}_i).

Однако максимальные амплитуды перемещения z_9 и ускорения \ddot{z}_i сиденья водителя весьма значительны: $z_9 \approx 0.54$ м, $\ddot{z}_9 \approx 22$ м/с² $\approx 2.2g$. Кроме того, для скорости $v = 100$ км/ч в начальный момент появляются сильные вибрации сиденья водителя. Очевидно, управление транспортным средством в таких условиях может привести к чрезвычайной ситуации.

Для устранения указанных недостатков посредством численно-аналитических расчетов выполнена оптимизация динамических параметров узлов пневматической

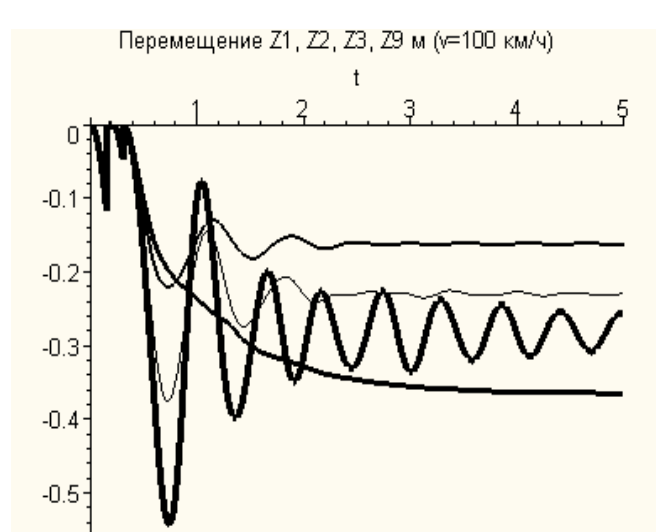


Рис. 8. Зависимость перемещения от времени ТС для $v = 100$ км/ч

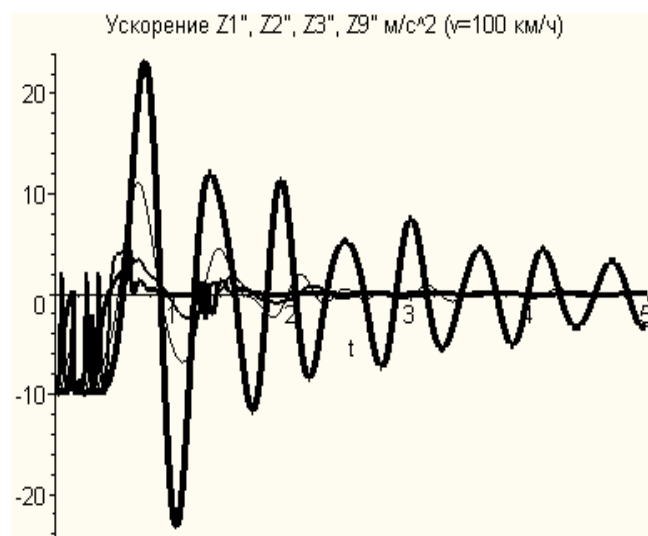


Рис. 9. Зависимость ускорения времени от узлов ТС для $v = 100$ км/ч

подвески сиденья водителя, кабины и рамы автомобильного транспортного средства, позволяющая повысить безопасность его движения. В результате оптимизации амплитуда z_9 уменьшена примерно в два раза, существенно снижена амплитуда \ddot{z}_9 , практически устранены вибрации и ускорен процесс затухания колебаний сиденья водителя. Результаты виртуальных экспериментов представлены на рис. 10.

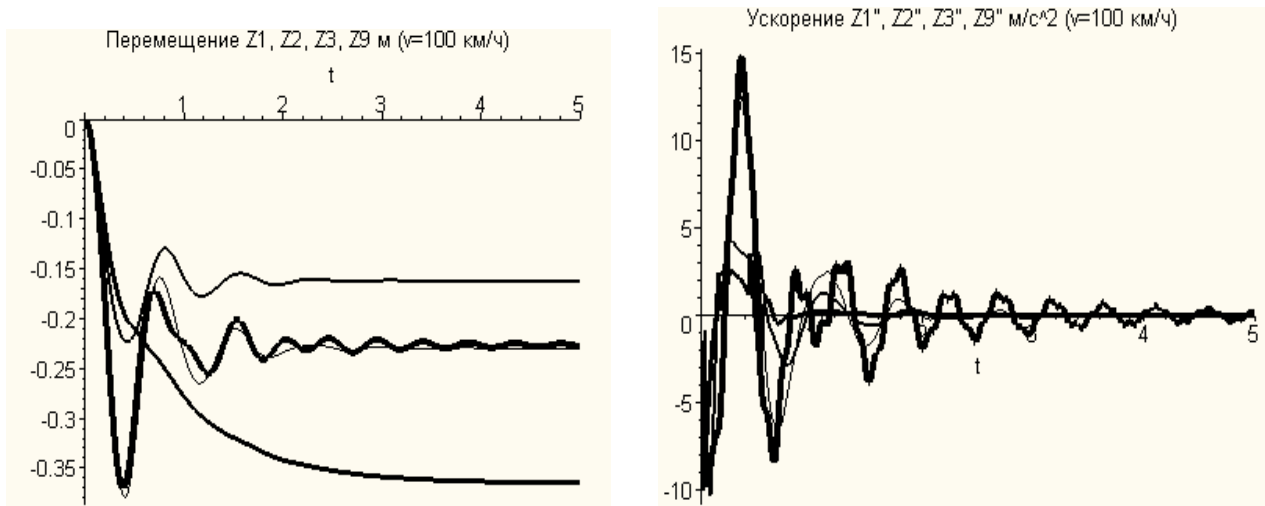


Рис.10. Результаты моделирования после оптимизации параметров подвески ТС

Колебания автомобильного транспортного средства при движении по неровному пути имеют случайный характер. Практический интерес представляет получение характеристик стационарных случайных колебаний колесного транспортного средства при движении его с постоянной скоростью по неровному пути. По результатам исследования движения автомобильного транспортного средства с заданной спектральной плотностью неровностей выполнен анализ средних квадратичных ускорений шасси, кабины и сиденья водителя и определены соответствующие значения скоростей движения, при которых могут наступать чрезвычайные ситуации.

Проведенный в диссертации анализ движения колесных транспортных средств с учетом неровностей пути того или иного профиля и выполненные серии вычислительных экспериментов могут служить основой методики по совершенствованию функционирования систем транспорта с точки зрения устойчивости движения, повышения безопасности и комфортабельности передвижения пассажиров и сохранности перевозимых грузов. Расчеты в рамках иллюстрирующих примеров позволили проанализировать влияние роста скорости движения на характер колебаний и безопасность движения транспортного средства в чрезвычайных ситуациях, а также оптимизировать параметры элементов и узлов кинематической схемы транспортного средства.

В заключении приведены основные результаты, полученные в диссертации.

Приложение к диссертации содержит написанный в интегрированной математической среде *Maple* пакет проблемно-ориентированных компьютерных программ, состоящий из четырех программ: программы 1 для расчета собственных частот колебаний, перемещений, скоростей и ускорений перемещений узлов автомобильного транспортного средства при движении по заданному профилю неровностей пути;

программы 2 для определения характеристик случайных колебаний автомобильного транспортного средства при движении по пути, поверхность которого имеет случайную последовательность выступов и впадин; программы 3 для вычисления собственных частот колебаний, перемещений, скоростей и ускорений перемещений элементов железнодорожного вагона в вертикальной плоскости при его движении по неровному железнодорожному пути и, наконец, программы графической иллюстрации расчетов, выполненных с помощью программ 1, 2 и 3 соответственно. Строки с командами программ пронумерованы в порядке возрастания. Текст программы 1 содержится в строках с номерами: 1–172, программы 2 – в строках: 173–326, программы 3 – в строках: 327–467. Запуск программ 1, 2 и 3 осуществляется соответственно в строках с номерами: 158, 317 и 450.

При необходимости с помощью программы, программные модули которой приведены в строках 1–83, возможно произвести графическую иллюстрацию расчетов, выполненных с помощью программ 1, 2 и 3 соответственно. Запуск графических подпрограмм осуществляется соответственно в строках 1, 45, 57.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ, ВЫНОСИМЫЕ НА ЗАЩИТУ

На защиту выносятся следующие результаты:

- разработка уравнений движения изучаемых транспортных динамических систем в условиях чрезвычайных ситуаций, с учетом разного характера неровностей пути и широкого диапазона скоростей движения;
- разработка рекомендаций и создание базы для методики по совершенствованию функционирования систем транспорта с точки зрения устойчивости движения, повышения безопасности и комфортабельности передвижения пассажиров и сохранности перевозимых грузов;
- разработка универсального компьютерного способа определения влияния динамических характеристик колесных транспортных средств на устойчивость и безаварийность их движения;
- исследование устойчивости периодических движений железнодорожной колесной пары и разработка рекомендаций по использованию технических характеристик, обеспечивающих безопасные режимы функционирования систем железнодорожного транспорта в чрезвычайных ситуациях;
- получение оценок безопасности на количественном уровне, таких как вероятность безопасности, вероятность опасности, коэффициент средней опасности, коэффициент безопасности, стоимость ущерба и время – период безопасности;

– проведение серии вычислительных экспериментов по анализу безопасности движения и оптимизации динамических характеристик колесных транспортных средств с учетом заданных видов неровностей пути, позволившей дать рекомендации по улучшению функционирования транспортных систем с точки зрения устойчивости, безопасности, комфортабельности, в том числе для высокоскоростного движения;

– расчет значений $h_7 = h_9 = h_{16} = h_{18} = 4,76 \cdot 10^3 \frac{\text{Н с}}{\text{м}}$ коэффициентов демпфирования, необходимых для снижения максимальной амплитуды линейного ускорения и устранения высокочастотных вибраций вагона; разработка в результате оптимизации динамических параметров узлов пневматической подвески сиденья водителя, кабины и рамы автомобильного транспортного средства рекомендаций, позволяющих существенно снизить амплитуды колебаний и ускорений колебаний сиденья водителя, а также практически устранить вибрации и ускорить процесс затухания колебаний сиденья водителя;

– разработка в интегрированной математической среде *Maple* пакета проблемно-ориентированных программ для исследования и оптимизации динамических характеристик движения колесных транспортных средств с целью повышения устойчивости, комфортабельности и безопасности движения.

Результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

а) в научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. *Иванова Ю.А., Голечков Ю.И., Дружинина О.В.* О моделировании безопасного движения железнодорожного вагона по неровному пути // *Транспорт: наука, техника, управление.* 2009. № 2. С. 6–8.
2. *Дружинина О.В., Голечков Ю.И., Иванова Ю.А.* Исследование периодических движений железнодорожной колесной пары // *Транспорт: наука, техника, управление.* 2009. № 4. С. 26–31.
3. *Иванова Ю.А., Голечков Ю.И., Дружинина О.В.* Моделирование высокоскоростного движения динамических транспортных систем // *Научно-технические ведомости СПбГПУ.* 2009. Т.10. № 3. С. 3–9.

б) публикации в других научных изданиях:

4. *Голечков Ю.И., Иванова Ю.А.* О безопасности движения колесного транспортного средства по пути с заданным профилем неровностей // *Избранные вопросы современного естествознания. Межвуз. сб. научн. трудов.* М.: МИИТ, 2009. С. 127–131.

5. Дружинина О.В., Иванова Ю.А., Масина О.Н. О совершенствовании математических моделей безопасности транспортных систем // Вопросы теории безопасности и устойчивости систем. Вып.11. М.: ВЦ РАН, 2009. С. 61–68.
6. Иванова Ю.А., Голечков Ю.И. Изучение устойчивости и безопасности транспортных систем при движении по неровному пути // Материалы 16-й Международной конф. «Проблемы управления безопасностью сложных систем». М.: ИПУ РАН, 2008. С. 271–274.
7. Иванова Ю.А. Исследование динамики колесного транспортного средства при движении по пути с заданной формой неровностей //Тез. докладов научно-практической конф. «Инженерные системы–2009». М.: РУДН, 2009. С. 24.
8. Иванова Ю.А. Моделирование движения колесного транспортного средства по пути с заданной формой неровностей // Тез. докладов XLV всероссийской конф. по проблемам математики, информатики, физики и химии. М.: РУДН, 2009. С. 21–22 .