

**МИНИСТЕРСТВО ПУТЕЙ СООБЩЕНИЯ СССР
ДНЕПРОПЕТРОВСКИЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
ИНСТИТУТ ИНЖЕНЕРОВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА
ИМ. М. И. КАЛИНИНА**

**На правах рукописи
Для служебного пользования**

Экз. № 000087

БУРОВ Виктор Семенович

УДК 629.439.001/2

**КОЛЕБАНИЯ И УСТОЙЧИВОСТЬ ДВИЖЕНИЯ
МАГИСТРАЛЬНОГО ПАССАЖИРСКОГО
ПОДВИЖНОГО СОСТАВА НА ЭЛЕКТРОМАГНИТНОМ
ПОДВЕШИВАНИИ**

05.22.07 — Подвижной состав железных дорог и тяга поездов

**Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Днепропетровск 1987

**НТБ
ДНУЖТ**

Работа выполнена в Днепропетровском ордена Трудового Красного Знамени институте инженеров железнодорожного транспорта имени М.И.Калинина.

Научный руководитель - доктор технических наук, профессор
КОРОТЕНКО М.Л.

Научный консультант - доктор технических наук, профессор
ДАНОВИЧ В.Д.

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор ТИБИЛОВ Т.А.
кандидат технических наук, доцент ФРИШМАН Е.М.

Ведущая организация - ВЭЛНИИ (г.Новочеркасск).

Защита состоится "3" июня 1987 года в 15⁰⁰ час.
в ауд. 364 на заседании Специализированного совета К И4.07.01
в Днепропетровском ордена Трудового Красного Знамени институте
инженеров железнодорожного транспорта им.М.И.Калинина по адресу:
320700, ИСП, г.Днепропетровск, 10, ул.Академика Лазаряна, 2, ДИИТ.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Днепропетровского ордена Трудового Красного Знамени института инженеров железнодорожного транспорта им.М.И.Калинина.

Автореферат разослан "25" мая 1987 г.

Ученый секретарь
специализированного совета
кандидат технических наук,
доцент



Л.В.Петрович

НТБ
ДНУЖТ

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. В соответствии с Основными направлениями экономического и социального развития СССР на 1986-1990 г.г. и на период до 2000 года, принятыми на XXVII съезде КПСС, предусмотрено "ускорить создание и внедрение передовой техники и технологии, развивать новые виды транспорта..." К числу таких новых видов транспорта относится магистральный транспорт на электромагнитном (ЭМ) подвешивании, который по расчетам специалистов является конкурентноспособным по отношению к традиционным видам транспорта, а также к транспорту с электродинамическим подвешиванием или подвешиванием на постоянных магнитах.

Всестороннее изучение процессов, происходящих при движении подвижного состава магистрального транспорта на ЭМ-подвешивании в вертикальной продольной плоскости, имеет важное значение из-за возможных высоких (до 200, а в перспективе и 500 км/ч) скоростей движения и малого (10+20 мм) воздушного зазора между электромагнитами подвеса экипажа и путевой структурой. Параметры рессорного подвешивания этого подвижного состава и его системы автоматического управления (САУ) зазором между электромагнитами подвеса и путевой структурой необходимо выбирать так, чтобы была обеспечена устойчивость невозмущенного движения экипажа, приемлемые показатели плавности хода, небольшие величины возникающих при движении вертикальных ускорений, перемещений, усилий, рациональные значения собственных частот колебаний элементов экипажа. Поэтому задача исследования динамических качеств такого подвижного состава представляется весьма актуальной.

Цель работы состоит в:

- разработке методики исследования динамических качеств подвижного состава на ЭМ-подвешивании в вертикальной продольной плоскости;
- разработке математического обеспечения для определения динамических показателей при плоских вертикальных колебаниях подвижного состава на ЭМ-подвешивании, вызванных неровностями путевой структуры, с помощью различных расчетных схем, выбираемых в соответствии с конструкцией существующих или проектируемых экипажей;
- исследовании динамических качеств экипажей подвижного состава магистрального транспорта на ЭМ-подвешивании;
- изучении влияния параметров рессорного подвешивания и САУ на динамические качества подвижного состава на ЭМ-подвешивании;
- анализе устойчивости движения подвижного состава на ЭМ-подвешивании;

- определении рациональных параметров рессорного подвешивания подвижного состава транспорта на ЭМ-подвешивании;
- разработке методики и программы экспериментальных исследований динамических качеств подвижного состава на ЭМ-подвешивании;
- проведении экспериментальных исследований на макетном подвижном составе на ЭМ-подвешивании с целью определения динамических качеств, уточнения математических моделей.

Методы исследования. В работе применены современные методы математического моделирования колебаний механических систем, процессов в электромагнитных устройствах, теории устойчивости движения А. М. Ляпунова. Интегрирование дифференциальных уравнений движения выполнено с помощью программ, реализующих методы Рунге-Кутты IV порядка и Адамса-Башфорта; решение полной проблемы собственных значений проводилось с помощью QR -алгоритма; оптимизация параметров выполнялась с помощью одного из вариантов градиентного метода. Экспериментальная часть исследований выполнена с помощью аппаратуры, применяемой ДИИТом при исследовании динамических качеств рельсового подвижного состава, на построенном в ВЭЛНИИ макетном экипаже подвижного состава на ЭМ-подвешивании и различных стендах ВЭЛНИИ, предназначенных для отработки конструкции системы подвешивания для многогосележного экипажа на ЭМ-подвешивании.

Научная новизна. Предложена методика математического моделирования движения экипажей подвижного состава на ЭМ-подвешивании с помощью расчетных схем, соответствующих единой электромеханической системе "Экипаж - САУ - путевая структура". Отличием предложенной методики от известных является то, что она позволяет использовать многомассовые расчетные схемы экипажей, учитывать имеющиеся место нелинейности в определении усилий левитации электромагнитов; методика основана на использовании нелинейных уравнений, описывающих зависимости в системе левитации, позволяет учитывать упругодиссипативные свойства путевой структуры, а также имеющиеся детерминированные и стохастические неровности. Исследованы динамические качества существующего подвижного состава на электромагнитном подвешивании, а также показана возможность их прогнозирования на этапе проектирования такого подвижного состава. Разработана и реализована методика исследования устойчивости невозмущенного движения подвижного состава на ЭМ-подвешивании как единой электромеханической системы "экипаж на ЭМ-подвешивании - САУ". Исследовано взаимодействие экипажа подвижного состава на ЭМ-подвешивании с путевой структурой,

обладающий инерционными и диссипативными свойствами, получены величины динамических показателей движения экипажа на ЭМ-подвешивании по путевой структуре, имеющей различную жесткость. Подробно исследован одноточечный электромагнитный подвес, оценено влияние параметров такого подвеса на устойчивость движения подвеса, получена формула для оценки жесткости электромагнитного подвеса. Разработана методика экспериментальных исследований динамических качеств экипажа на ЭМ-подвешивании, с использованием которой осуществлены экспериментальные исследования макетного однотележного экипажа.

Практическая ценность работы. Разработанный алгоритм и составленные программы для ЭВМ ЕС-1020 и ЕС-1050 позволяют исследовать плоские вертикальные колебания и устойчивость движения подвижного состава магистрального транспорта на ЭМ-подвешивании с применением современных ЭВМ. Созданное математическое обеспечение позволяет оценить динамические качества подвижного состава на ЭМ-подвешивании различного конструктивного исполнения. Разработанная методика математического моделирования движения подвижного состава магистрального транспорта на ЭМ-подвешивании позволяет прогнозировать его динамические качества и выбирать рациональные величины параметров.

Апробация работы. Основные положения работы доложены и обсуждены на Научно-технической конференции молодых ученых и специалистов железнодорожного транспорта, посвященной 63-летию ВЛКСМ (Днепропетровск, 1981 г.), Всесоюзном семинаре по токосниманию высокоскоростного наземного транспорта (Омск, 1982 г.), Первом всесоюзном семинаре-совещании "Проблемы оптимизации в машиностроении" (Харьков, 1982 г.), Республиканской научно-технической конференции "Проблемы вибрационных систем и их автоматизации" (Ташкент, 1982 г.), Всесоюзной школе молодых ученых и специалистов "Проблемы оптимизации в машиностроении" (Харьков-Алушта, 1983 г.), Всесоюзном научно-техническом семинаре "Электромагнитный подвес, общая компоновка и динамика экипажей, опытные полигоны высокоскоростного наземного транспорта (ВСНТ)" (Новочеркасск, 1983 г.), III Всесоюзной научно-технической конференции по высокоскоростному наземному транспорту (ВСНТ) (Новочеркасск, 1984 г.), на Научно-техническом семинаре по перспективным экспериментальным исследованиям на полигоне "Мармари-1" (Ереван, 1985 г.), Всесоюзной научной конференции "Метод функций А.М. Ляпунова в современной математике" (Харьков, 1986 г.).

Реализация работы. Основные теоретические разработки и результаты, приведенные в диссертации, получены при выполнении работ по

разработке теоретических и экспериментальных методов исследования и созданию экипажей на электромагнитном подвешивании в соответствии с Постановлениями ЦКНТ СССР № 470 от 18.07.74 г., № 45 от 02.03.81 г., № 555 от 30.10.85 г. и Целевой комплексной программой 0.54.07 на 86-90 гг.. разработанное математическое обеспечение и результаты расчетов использованы при создании однотележного экипажа на ЭМ-подвешивании, а также при разработке Технического предложения на четырехтележный макетный экипаж с ЭМ-подвешиванием и линейными тяговыми двигателями (тема ЭО1.1175, этап 06).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 12 работ.

Структура и объем работы. Диссертация изложена на 217 с. машинописного текста, состоит из введения, пяти глав, заключения, списка использованных источников (190 наименований), приложений, рисунков и таблиц в тексте диссертации.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении указывается, что электромагнитная система подвешивания транспортных средств по оценке специалистов в настоящее время является достаточно просто реализуемой и экономически оправданной. Именно она получила наибольшее развитие в СССР и потому исследованию динамических качеств подвижного состава на ЭМ-подвешивании посвящается данная работа.

В первой главе дан обзор литературы, обоснование исследования и постановка задачи. Для оценки и прогнозирования динамических качеств подвижного состава на ЭМ-подвешивании в вертикальной продольной плоскости требуется дальнейшее развитие методов исследований колебаний, устойчивости движения и взаимодействия подвижного состава с путевой структурой. Подвижной состав на ЭМ-подвешивании имеет не только много особенностей по сравнению с существующими средствами наземного транспорта, но и много общего с подвижным составом железных дорог. Поэтому естественно использовать при изучении их динамических качеств те методы, которые широко применяются при исследовании динамических качеств рельсового подвижного состава и с помощью которых был внесен значительный вклад в развитие динамики подвижного состава советскими и зарубежными учеными. Основы таких фундаментальных исследований заложены и выполнены Е.П. Блохиным, Г.П. Бурчаком, М.Ф. Вериго, С.В. Вершинским, Л.О. Грачевой,

В.Д.Дановичем, А.А.Камаевым, В.А.Камаевым, Н.А.Ковалевым, А.Я.Коганом, М.Л.Коротенко, С.М.Куценко, В.А.Лаваряном, А.А.Львовым, Л.А.Манашкиным, В.Б.Меделем, А.Н.Савоськиным, М.М.Соколовым, Т.А.Тиболовым, В.Ф.Ушкаловым, В.Д.Хусидовым, И.И.Челноковым, М.А.Докейнишем, Т.Мандудайрой, Дж.Робаром и многими другими известными учеными. Значительный вклад в развитие транспорта на ЭМ-подвешивании внесли С.Н.Байбаков, В.И.Бочаров, Ю.А.Бажвалов, В.А.Винокуров, О.П.Грапис, В.М.Кочетков, В.П.Михеев, Ю.Н.Мурзенко, В.Д.Нагорский, Б.И.Рабинович, Ю.Д.Соколов, Т.А.Тиболов, Б.Н.Тихменев, О.В.Тозони, ряд других ученых, зарубежные ученые Е.Готтзейн, К.Попп, Б.Яялвант, Р.Мейзингер и другие.

Особенности путевой структуры для подвижного состава на ЭМ-подвешивании, необходимость в быстродействующей САУ, отличие экипажа на ЭМ-подвешивании от известного подвижного состава, использование в качестве привода линейных электродвигателей требуют создания новых расчетных схем и математических моделей. Они должны состоять из следующих частей, объединенных в одно целое: экипажа на ЭМ-подвешивании, ферромагнитной путевой структуры и САУ. При исследовании движения экипажей на ЭМ-подвешивании выбирались расчетные схемы различной сложности. Однако, когда целью исследований является оценка динамических качеств подвижного состава такого типа, сил взаимодействия и усилий в рессорном подвешивании, других характеристиках, предлагается рассматривать каждый экипаж подвижного состава на ЭМ-подвешивании как систему абсолютно твердых тел со многими степенями свободы. В работе рассматривается поведение путевой структуры, обладающей упругодиссипативными свойствами, под действием системы электромагнитов, находящихся в зависимости от положения экипажа, в одном, двух или трех пролетах. Из известных алгоритмов работы САУ выбран и применен для исследуемой системы "магнитных колес" комбинированный алгоритм, когда САУ получает величины зазора, его первой и второй производных, силы тока в цепях электромагнитов. Используются нелинейные уравнения, описывающие работу САУ и усилия левитации, учитывается зависимость индуктивности от зазора и силы тока.

Для того, чтобы подвижной состав на ЭМ-подвешивании был работоспособен, необходимо, чтобы была обеспечена устойчивость его невозмущенного движения. Кроме обеспечения устойчивости невозмущенного движения необходимо, чтобы перемещения, ускорения и усилия, возникающие вследствие движения по путевой структуре, которая не-

избежно имеет неровности, не превосходили заданные или нормируемые значения. Определенные ограничения должны быть наложены и на параметры САУ.

В задачах взаимодействия рельсовых экипажей и путевой структуры неровности задают их статистическими характеристиками, полученными из эксперимента. В работе проведено исследование при наличии статических и динамических прогибов путевой структуры, гармонических возмущений с различной амплитудой и длиной волны неровности либо при стохастических неровностях путевой структуры.

Во второй главе приводится методика составления математических моделей экипажей на ЭМ-подвешивании. Указывается, что экипажи такого подвижного состава могут быть спроектированы так, чтобы кузов опирался на одну, две или четыре тележки. Известны проекты и бестележных экипажей. При составлении расчетных схем экипажей на ЭМ-подвешивании необходимо вести ряд идеализаций, наиболее существенными из которых являются следующие: кузов, тележки и электромагниты подвеса считаются абсолютно твердыми телами; продольные перемещения электромагнитов подвеса относительно тележки и тележки относительно кузова отсутствуют; галоширование электромагнитов подвеса в ряде оговоренных случаев отсутствует; неровности, имеющиеся на ферромагнитной путевой структуре, одинаковы по обеим сторонам этой путевой структуры; силы взаимодействия электромагнитов подвеса и путевой структуры предполагаются сосредоточенными; подвижной состав на ЭМ-подвешивании движется по прямому горизонтальному пути с постоянной скоростью. Для составленных расчетных схем экипажей подвижного состава получены дифференциальные уравнения движения в форме уравнений Лагранжа второго рода:

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

где T, Π и Φ - соответственно кинетическая, потенциальная энергии и функция рассеяния рассматриваемой механической системы; q_i - обобщенные координаты; Q_i - обобщенные силы. В матричной форме уравнения движения имеют вид:

$$A \ddot{\bar{q}} + B \dot{\bar{q}} + C \bar{q} = \bar{Q}, \quad (2)$$

где A, B и C - соответственно матрицы инерционных, диссипативных и квазиупругих коэффициентов; $\bar{q}, \dot{\bar{q}}, \ddot{\bar{q}}$ - векторы соответственно обобщенных координат, их первых и вторых производных; \bar{Q} - вектор обобщенных сил.

Для случая взаимодействия электромагнита подвеса и путевой структуры используются следующие соотношения, устанавливающие связь между динамической добавкой напряжения U , подаваемой на зажимы электромагнита, динамической добавкой силы тока I в цепи электромагнита, добавкой воздушного зазора s и динамической добавкой усиления притяжения P электромагнита к путевой структуре:

$$U = L \frac{dI}{dt} + \frac{\partial L}{\partial s} \frac{ds}{dt} (I_0 + I) + \frac{\partial L}{\partial I} \frac{dI}{dt} (I_0 + I) + RI, \quad (3)$$

$$P = \alpha \left(\left(\frac{I_0 + I}{s_0 + s} \right)^2 - \frac{I_0^2}{s_0^2} \right), \quad (4)$$

где I_0 и s_0 - номинальные значения силы тока и воздушного зазора; L - индуктивность обмотки электромагнита; R - сопротивление обмотки; α - постоянная, учитывающая параметры электромагнита. Во время движения экипажа величина s постоянно меняется из-за имеющих место неровностей ζ , статических U и динамических W прогибов путевой структуры, вертикальных перемещений электромагнита подвеса z . Динамический прогиб путевой структуры при действии одного электромагнита подвеса:

$$W(x, t) = \sum_1^n \sin \frac{k\pi x}{l} \cdot q_k(t), \quad (5)$$

где l - длина балки, x определяет положение электромагнита в пролете, k - число форм колебаний, $q_k(t)$ - обобщенная координата балки, определяемая обобщенной силой T :

$$e \ddot{q}_k(t) + f \cdot h \cdot \dot{q}_k(t) + h q_k(t) = T, \quad (6)$$

где e и h - коэффициенты, зависящие от параметров путевой структуры. Величина T зависит от сил левитации:

$$T = \sum_1^z \left(P_k(t) + \alpha \frac{I_0^2}{s_0^2} \right) \sin \frac{\pi x_k}{l}. \quad (7)$$

Здесь z соответствует числу электромагнитов подвеса, взаимодействующих с балкой. САУ в каждый данный момент времени изменяет величину динамической добавки напряжения на зажимах электромагнита в зависимости от величины добавки воздушного зазора, первой и второй её производных, динамической добавки силы тока в цепи электромагнита:

$$U = a \cdot s + b \cdot \dot{s} + c \cdot \ddot{s} + d \cdot I, \quad (8)$$

где a, b, c, d - коэффициенты усиления (параметры) САУ. Таким образом, взаимодействие одиночного электромагнита, составляющего основу "магнитного колеса" экипажа на ЭМ-подвешивании, с ферромаг-

нитной путевой структурой можно описать уравнениями (3) – (8), Поскольку число электромагнитов подвеса у экипажа может варьироваться от 4 до 32, потребовалось решение и соответствующего числа уравнений. Уравнения (2) необходимо решать совместно с набором уравнений (3) – (8), поскольку экипаж, САУ и путевая структура представляют собой единую электромеханическую систему, и компоненты вектора обобщенных сил в уравнениях (2) зависят от сил левитации электромагнитов (4), определяемых выражениями (3) и (8). Поэтому необходимо включить динамические добавки силы тока каждого электромагнита подвеса в число обобщенных координат и к уравнениям (2) второго порядка добавить соответствующее число уравнений (3) первого порядка и тогда получить систему дифференциальных уравнений, описывающих движение электромеханической системы "экипаж – САУ". Поскольку силы левитации (4) зависят и от динамических прогибов путевой структуры, к полученной системе следует добавить соответствующее число уравнений (6). В результате получим, что движение макетного однотолежного экипажа будет описываться системой дифференциальных уравнений 22-го порядка, бестележного экипажа – 32-го порядка, двухтележного экипажа – 40-го порядка, четырёхтележного экипажа – 48-го порядка (при условии, что экипажи могут располагаться не более, чем в двух пролетах). Поскольку в уравнении (3) используется величина \dot{z} , то при интегрировании предполагается брать её значение, полученное на предыдущем шаге.

Третья глава посвящена анализу устойчивости движения подвижного состава на ЭМ-подвешивании по дифференциальным уравнениям первого приближения А.М.Ляпунова. Поскольку уравнения, описывающие систему "экипаж – САУ – путевая структура" нелинейны, то правые их части преобразованы с помощью формулы Тейлора с остаточным членом и члены, имеющие порядок малости выше первого, отброшены и получены уравнения первого приближения А.М.Ляпунова. Поскольку исследование по уравнениям первого приближения Ляпунова предлагается для определения устойчивости движения подвижного состава на ЭМ-подвешивании, в работе вначале определено, какие величины возмущений в рассмотренном случае являются "достаточно малыми". Затем определены области устойчивости движения макетного экипажа на ЭМ-подвешивании в рассмотренном диапазоне допустимых значений параметров. Было исследовано влияние параметров упругодиссипативных элементов первичного и вторичного подвешиваний и САУ на запас устойчивости движения. Так,

понижение жесткости упругого элемента подвеса электромагнита или увеличение коэффициента вязкого трения демпфера, установленного параллельно этому упругому элементу, в приемлемом диапазоне изменения этих параметров у макетного экипажа массой 3 т приводило к существенному изменению величины h_{\max} - от +9,6 I/c до -3,2I I/c. На показатели устойчивости движения существенное влияние оказывают и параметры САУ: увеличение коэффициента δ (по скорости) значительно увеличивает запас устойчивости (h_{\max} изменялась от +14 до -1,5 I/c при δ от 0 до 3000 B·с/м); влияние коэффициентов a и c также играет свою роль: например, изменение коэффициента c в 10 раз привело к изменению h_{\max} также в 10 раз. При $c = 0$ движение экипажа в большинстве случаев неустойчиво. Анализ позволил выбрать такие параметры, при которых движение экипажа было устойчиво асимптотически с достаточно высоким запасом устойчивости, $h_{\max} = -1,46$ I/c. Проведенная далее оптимизация на ЭМ с помощью программы, реализующей один из вариантов градиентного метода, где в качестве минимизируемого функционала выбрана величина запаса устойчивости $h_{\max} = \max \operatorname{Re} \lambda_i$, позволила получить такие величины параметров, при которых запас устойчивости был значительно выше ($h_{\max} = -3,57$ I/c), а сами параметры имели величины, более приемлемые с точки зрения проектирования механической части и САУ. Проведенные в дальнейшем экспериментальные исследования подтвердили выводы теоретических исследований о необходимости изменения параметров и была обеспечена устойчивая левитация экипажа. Выполнена оптимизация параметров многотележных экипажей подвижного состава на ЭМ-подвешивании. Применение градиентного метода позволило получить, например, для четырехтележного экипажа, $h_{\max} = -1,33$ I/c (суммарный статический прогиб рессорного подвешивания 0,249 м). Поскольку устойчивость движения является необходимым, но недостаточным условием того, чтобы экипажи обладали хорошими динамическими качествами, рациональные параметры были оценены с точки зрения вынужденных колебаний.

В четвертой главе проводится исследование собственных и вынужденных колебаний экипажей на ЭМ-подвешивании. Рассмотрены случаи одноточечного и многоточечного электромагнитного подвеса. Вначале подробно исследован одиночный электромагнитный подвес применительно к стенду, на котором реализован такой подвес с помощью совмещающего подвеса и тягу одностороннего линейного индукторного двигателя

(ОЛИД); составлены дифференциальные уравнения колебаний, получены характеристическое уравнение и амплитудно-частотные характеристики. Для оценки устойчивости системы проанализированы коэффициенты характеристического уравнения по критерию Рауса-Гурвица и получено следующее соотношение для случая $\beta = 0$ между параметрами САУ, характеристиками электромагнита и жесткостью упругого элемента, на котором подвешен взаимодействующий с путевой структурой электромагнит (ОЛИД):

$$\frac{b}{l} > \frac{a}{R+d} > I_0 \left(\frac{1}{s_0} - \frac{k_1}{2P} \right), \quad (10)$$

где k_1 - жесткость упругого элемента. При $\beta \neq 0$ верхняя граница зоны устойчивости повышается. Указанное неравенство позволяет установить влияние параметров на границы зоны устойчивости движения электромагнита. Данные экспериментальных исследований позволили получить неравенство (10) в численном виде и установить, что при зафиксированных перед проведением эксперимента параметрах движение одиночного электромагнита (ОЛИД) должно быть устойчивым, что и подтвердили эксперименты. Дальнейший анализ уравнений, описывающих движение одиночного электромагнита подвеса, позволил оценить приближенное значение жесткости электромагнитного подвеса. Её величина прямо пропорциональна номинальной подъемной силе электромагнита, коэффициенту САУ, учитывающему величину скорости изменения зазора, и обратно пропорциональна номинальной силе тока и воздушному зазору. При параметрах, зафиксированных в эксперименте, получена жесткость 420 кН/м (по данным зарубежных исследователей 400 кН/м при номинальном зазоре 15 мм и номинальной силе тока 30 А) - и правильности предположения о том, что электромагнитный подвес нельзя считать абсолютно жестким.

Переходной режим исследовался при прохождении экипажем подвижного состава на ЭМ-подвешивании стыковой неровности типа "ступенька" различной амплитуды. Анализ результатов интегрирования, полученных на ЭВМ ЕС-1020 с помощью разработанного пакета программ, показал, что демпфирование вертикальных колебаний электромагнитов необходимо, а жесткое крепление электромагнитов подвеса к тележке крайне неблагоприятно влияет на качество переходного процесса. Расчеты для режимов перехода экипажа из состояния опирания на колеса в состояние левитации показали, что на качество переходного процесса влияет запас устойчивости движения системы. В частности, прохождение стыковой неровности высотой 3 мм происходит с меньшими

перерегулированием и временем переходного процесса у экипажа с параметрами, при которых $h_{\max} = -1,1 \text{ I/c}$, чем у экипажа со сходными параметрами, но при которых $h_{\max} = -0,66 \text{ I/c}$, ниже и динамические показатели: вертикальные ускорения тележки в первом случае $0,32 \text{ м/с}^2$ против $0,46 \text{ м/с}^2$ во втором случае, ускорения ЭМП составили соответственно 12 и 15 м/с^2 , динамическая добавка силы тока соответственно $7,5 \text{ А}$ и $8,5 \text{ А}$, напряжение на зажимах электромагнита 356 В и 434 В , коэффициент форсировки $5,9$ и $7,2$. Вынужденные колебания экипажа рассмотрены при моделировании его движения со скоростями от 50 до 500 км/ч по упругой путевой структуре с синусоидальными неровностями амплитудой 6 мм и длиной волны неровности до 18 м . Проводился анализ динамических показателей тележечных экипажей при различных жесткостях упругих элементов подвешивания каждого электромагнита от $0,18 \text{ МН/м}$ до $9,0 \text{ МН/м}$ и жесткостях упругих элементов вторичного подвешивания от 50 до 221 кН/м . Результаты, полученные для таких параметров путевой структуры, при которых её можно считать достаточно жесткой ($EJ_1 = 10^7 \text{ МН/м}^2$) и для таких, какие возможны у реальной путевой структуры ($EJ_2 = 21160 \text{ МН/м}^2$), показывают, что упругие и инерционные свойства путевой структуры значительно влияют на динамические показатели подвижного состава на ЭМ-подвешивании - вертикальные перемещения кузова и величины воздушных зазоров при EJ_2 выше, например, в 3 раза, усилие левитации возрастает на 12% . Дальнейший анализ показал, что при учете упругих свойств путевой структуры, когда такой учет используется для оценки динамических качеств подвижного состава на ЭМ-подвешивании, следует принимать во внимание только одну форму колебаний путевой структуры, но учитывать также первую и вторую производные от обобщенной координаты балки.

Исследовалось также движение двухтележечного экипажа по путевой структуре, имеющей и более низкую жесткость: $EJ_3 = 17100 \text{ МН/м}^2$, $EJ_4 = 10000 \text{ МН/м}^2$, $EJ_5 = 3700 \text{ МН/м}^2$. Рассматривалось движение с максимальной скоростью и с критическими с точки зрения возникновения резонансов, лежащими в интервале от 66 до 128 км/ч (в этом интервале максимальные вертикальные ускорения кузова в установившихся режимах составляют до $0,35 \text{ м/с}^2$ вместо $0,15 \text{ м/с}^2$ при максимальной скорости). Анализ показал, что понижение жесткости путевой структуры в указанных пределах значительно влияет на вертикальные ускорения тележек и электромагнитов подвеса, а в меньшей степени - на вертикальные ускорения кузова. Сравнение динамичес-

ких показателей бестележного, двух- и четырехтележного экипажей показало, что при идентичных параметрах они обладают и сходными динамическими качествами. С точки зрения комфорта пассажиров (показатель плавности хода, вертикальные ускорения кузова) предпочтительнее четырехтележный экипаж.

Анализ динамических показателей экипажа в установившемся режиме при детерминированных возмущениях и в указанном ранее диапазоне изменения параметров рессорного подвешивания позволил рекомендовать значения параметров, которые удовлетворяют требованиям как устойчивости движения, так и требованиям с точки зрения вынужденных колебаний. Например, для четырехтележного экипажа на ЭМ-подвешивании из различных вариантов параметров, при которых были получены различные величины динамических показателей и статических прогибов рессорного подвешивания, в качестве рациональных были выбраны такие параметры, при которых $h_{\max} = -1,01 \text{ I/o}$, получены приемлемые значения динамических показателей (например, показатель плавности хода, определенный по принятой на железнодорожном транспорте методике, равен 0,63) и получен суммарный статический прогиб рессорного подвешивания 0,324 м.

Для решения задачи о колебаниях подвижного состава магистрального транспорта на ЭМ-подвешивании при случайных возмущениях в отличие от ряда зарубежных исследователей, предлагающих либо не учитывать стохастические неровности путевой структуры для экипажей на ЭМ-подвешивании, либо задавать их такими, какие имеют японские автомобильные дороги, применен достаточно простой метод, состоящий в определении дисперсии выходного сигнала по найденным частотным характеристикам системы. При отсутствии достоверных характеристик случайных неровностей реальной путевой структуры для экипажей на ЭМ-подвешивании в качестве спектральной плотности входного возмущения принимался как "белый шум" ($S_{\eta}(\omega) = 0,05 \text{ o}$), так и такая спектральная плотность, при которой "белым шумом" являлась вторая производная от неровности ($S_{\ddot{\eta}}(\omega) = 10^{-5} \text{ o}^{-3}$). В результате расчетов оказалось, что при варьировании параметров рессорного подвешивания экипажей в тех пределах, в которых это проводилось при задании детерминированных возмущений, изменения динамических показателей системы имеют аналогичный характер с полученным при детерминированных возмущениях.

В пятой главе изложены результаты и оценки экспериментальных исследований динамических качеств подвижного состава на ЭМ-подве-

шивании. Для этого разработана методика проведения таких исследований и программы исследований динамических качеств однотолежного и четырехтолежного экипажа. В качестве основных режимов для электромеханических испытаний такого подвижного состава предложены и реализованы следующие: перевод экипажа в состояние левитации, разгон экипажа до заданной скорости, движение вдоль путевой структуры, торможение экипажа, посадка на колеса или скользуны, аварийный режим.

Проводимые параллельно испытаниям теоретические исследования позволили более целенаправленно изменять параметры САУ – при этом было установлено, что имевшее место прилипание электромагнитов к путевой структуре можно устранить при изменении величин этих параметров путем подбора или в соответствии с результатами оптимизации их величин по зазору (с 10000 до 16140 В/м) и по скорости (с 1000 до 2500 В·с/м). В результате проведенных экспериментов были получены величинны параметров экипажа и его САУ, а также динамические показатели при различных режимах работы экипажа. Так, в переходном режиме имели место вертикальные колебания ЭМП и зафиксирован переходной процесс длительностью 0,3 + 0,35 с, наибольшие вертикальные ускорения ЭМП в переходном процессе – 24 м/с², в установившемся – 2 м/с². В установившемся режиме происходили колебания ЭМП с амплитудой до 2 мм. Электромагниты поднимались на такую высоту, при которой воздушные зазоры составили от 10 до 19 мм. При движении однотолежного экипажа в состоянии левитации вертикальные ускорения ЭМП достигали максимальных величин в момент прохождения стыковых неровностей – до 3,22 g, а тележки – до 1,32 g. Полученные данные позволили более точно и целенаправленно вести теоретические исследования, а сопоставление теоретических и экспериментальных данных показало их достаточно хорошее соответствие. Например, для одного из наиболее неблагоприятных режимов – режима выхода в состояние левитации – получены следующие данные: вертикальные перемещения электромагнита 18±23 мм (по расчету 20 мм), время переходного процесса 0,3 + 0,35 с (по расчету 0,28 с), максимальная сила тока в цепи электромагнита 42,8 А (по расчету 33,0 А), вертикальные ускорения электромагнита 24 м/с² (по расчету 29 м/с²). Результаты экспериментальных исследований системы подвешивания с использованием ОЛИД подтвердило её работоспособность с дискретной путевой структурой и указало на уменьшение влияния этой дискретности на экипаж при возрастании скорости движения, о чем свидетельство-

вали данные расчетов.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ И ВЫВОДЫ

1. Разработана методика теоретических и экспериментальных исследований динамических качеств подвижного состава магистрального транспорта на ЭМ-подвешивании в вертикальной продольной плоскости симметрии.

2. Исследование решений и анализ математических моделей проведено с помощью разработанного пакета прикладных программ для ЭВМ ЕС-1020 и ЕС-1050.

3. Исследованы разные конструктивные схемы экипажей на ЭМ-подвешивании – бестележечный, однотолежечный, двухтележечный, четырехтележечный. Составлены соответствующие расчетные схемы, построены математические модели единых электромеханических систем "экипаж – САУ – путевая структура". Для исследования устойчивости движения рассматриваемого подвижного состава применены уравнения первого приближения А.М.Ляпунова. Оценено влияние параметров рессорного подвешивания и САУ на устойчивость движения, как необходимое условие работоспособности экипажей.

4. Изучен однотолежечный и многотолежечный электромагнитный подвес, оценена его устойчивость по А.М.Ляпунову и критерию Рауса-Гурвица, установлено влияние параметров путевой структуры на динамические качества экипажей на ЭМ-подвешивании, определено необходимое число форм колебаний путевой структуры при решении задач о взаимодействии экипажа на ЭМ-подвешивании и путевой структуры.

5. Показана возможность определения рациональных параметров системы подвешивания и САУ экипажей с точки зрения устойчивости движения с помощью градиентного метода оптимизации и с точки зрения собственных и вынужденных колебаний экипажа на ЭМ-подвешивании при движении по упругой путевой структуре с детерминированными и стохастическими неровностями.

6. Установлено, что экипажи на ЭМ-подвешивании могут обеспечивать принятые на железнодорожном транспорте требования к комфорту пассажиров, в том числе при величине суммарного статического прогиба рессорного подвешивания $0,3 + 0,4$ м.

7. Экспериментальным путем получены величины динамических показателей однотолежечного экипажа на ЭМ-подвешивании и системы подвешивания с использованием ОЛИД для четырехтележечного экипажа.

Подтверждена работоспособность экипажей при условии выбора рациональных параметров, показана достоверность получаемых с помощью разработанных математических моделей результатов.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

1. Коротенко М.Л., Буров В.С. О влиянии упругих свойств пути на динамику высокоскоростного экипажа // Проблемы динамики и прочности железнодорожного подвижного состава. - Днепропетровск: Днепропетр. ин-т инж. ж. д. транспорта. - 1982. - С.69-76.

2. Буров В.С. Исследование устойчивости движения экипажа на электромагнитной подвеске // Деп. в ЦНИИТЭИ МПС, № 1834 жд Д-82. - С.14.

3. Буров В.С. Теоретические и экспериментальные исследования динамических качеств экипажа на электромагнитной подвеске // Деп. в ЦНИИТЭИ МПС, № 1948 жд Д-82. - С.17.

4. Коротенко М.Л., Буров В.С. Пределы применимости первого приближения А.М.Ляпунова к исследованию устойчивости движения электромеханических транспортных систем // Деп. в ЦНИИТЭИ МПС, № 1988 жд Д-82. - С.8.

5. Коротенко М.Л., Буров В.С., Дворниченко Н.А. Применение градиентных методов оптимизации и первого приближения А.М.Ляпунова к выбору рациональных параметров сложных электромеханических транспортных систем // Проблемы оптимизации в машиностроении: Тезисы докладов семинара-совещания. - Харьков: Харьковск. политехн. ин-т. - 1982. - С.294-295.

6. Коротенко М.Л., Буров В.С., Кабак А.А. Исследование колебаний и устойчивости движения электромеханических систем с автоматическим управлением // Проблемы вибрационных систем и их автоматизации: Тезисы докладов республиканской науч.-техн. конференции. - Ташкент: Ташк. политехн. ин-т. - 1982. - С.35-36.

7. Коротенко М.Л., Данович В.Д., Буров В.С. Проблемы динамики экипажей высокоскоростного наземного транспорта // Повышение качества токосъема при высоких скоростях движения и в условиях БАМа. - Омск: Омский ин-т инж. ж. д. транспорта. - 1983. - С.51-53.

8. Коротенко М.Л., Буров В.С. Исследование колебаний экипажа на электромагнитном подвешивании при движении по упругому пути // Колебания и динамические качества механических систем: Сб. научн. тр. - Киев: Наукова думка. - 1983. - С.84-90.

8564 см

9. Бочаров В.И., Коротенко М.Л., Швец Ю.П., Данович В.Д., Буров В.С. Оценка динамических качеств экипажа ВСНТ с различными схемами ходовой части // Тезисы докладов Третьей Всесоюзной научно-технической конференции по высокоскоростному наземному транспорту (ВСНТ). - Новочеркасск: Вsesoюзн.н.-иссл.ин-т электровостроения. - 1984. - С.6-7.

10. Коротенко М.Л., Буров В.С., Васиков О.А. О выборе математической модели "экипаж ВСНТ - путь" // Изв.вузов. Электромеханика. - 1985. - № 1. - С.100-103.

11. Бочаров В.И., Коротенко М.Л., Данович В.Д., Буров В.С. Теоретические и экспериментальные исследования динамики систем ВСНТ, разработанных ВЭЛНИИ // Тезисы докладов научно-техн.семинара по перспективным экспериментальным исследованиям на полигоне "Мармарик-1". - Ереван. - 1985. - С.8-9.

12. Коротенко М.Л., Буров В.С. Устойчивость и стабилизация движения электромеханической системы // Метод функций А.М.Ляпунова в современной математике: Тезисы докладов Всесоюзной научной конференции. - Харьков: ХГУ. - 1986. - С.138.



Автореферат...

Подписано к печати 14.05.87г.Формат 60x84/16.

Бумага писчая.Печать плоская.Усл.печ.л.0,93.Тираж 100.

Заказ № 184.Бесплатно.Городская типография № 3.Днепропетровского областного управления по делам издательств, полиграфии и книжной торговли,320000 г.Днепропетровск ул.Серова,7.

НТБ
ДНУЖТ