

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

Для служебного пользования

Экз. № 000088

На правах рукописи

ЛАБУЗОВ Юрий Аркадьевич

УДК 629.439.015:538.6

УДАРНОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА
НА ЭЛЕКТРОМАГНИТНОМ ПОДВЕШИВАНИИ С ПУТЕВОЙ
СТРУКТУРОЙ ПРИ ОТКАЗЕ СИСТЕМЫ ЛЕВИТАЦИИ
(ВЕРТИКАЛЬНЫЕ КОЛЕБАНИЯ)

05.22.07 – Подвижной состав железных дорог и тяга поездов

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

ДНЕПРОПЕТРОВСК 1969

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.Д.

Официальные оппоненты
доктор технических наук, профессор ТИМИЛОВ Т.А.
кандидат технических наук, доцент ФРИШМАН Е.М.

Ведущая организация – ВЭЛНИИ (г. Новочеркасск).

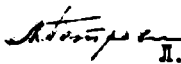
Защита состоится "22" апреля 1989 года в 15⁰⁰ час.
в ауд. 364 на заседании Специализированного совета
К II4.07.01 в Днепропетровском ордена Трудового Красного
Знамени институте инженеров железнодорожного транспорта
имени М.И.Калинина по адресу 320700, ГСП, г.Днепропетровск,
10, ул. Академика Лазаряна, 2, ауд. 364

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

Автореферат разослан "20" марта 1989 г.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные
печатью, просим направлять в совет института.

Ученый секретарь
Специализированного совета
технических наук, доцент

 Л.В.ПЕТРОВИЧ

НТБ
ДНУЖТ

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

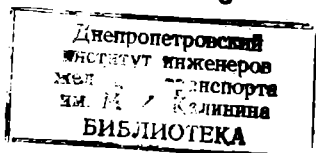
8621a cm

Актуальность темы. В принятых на XXII съезде КПСС Основных направлениях экономического и социального развития СССР на 1986-1990 годы и на период до 2000 года подчеркивается, что для выполнения основной задачи транспорта, состоящей в своевременном, качественном и полном удовлетворении потребностей народного хозяйства и населения в перевозках и повышении экономической эффективности его работы, необходимо ускорить создание и внедрение передовой техники и технологии, развивать новые виды транспорта. К числу новых, нетрадиционных видов транспорта относится высокоскоростной наземный транспорт с магнитным подвешиванием экипажей и бесконтактной передачей тягового усилия. Наибольшее распространение и развитие получили транспортные системы на электромагнитном подвешивании, имеющие определенные преимущества перед другими видами бесконтактного наземного транспорта: системами с подвешиванием на постоянных магнитах и электродинамическим подвешиванием. Экипажи на электромагнитном подвешивании создают предпосылки для выполнения перевозок пассажиров и грузов как на городских и пригородных направлениях со скоростями 100 - 250 км/ч, так и на магистральных направлениях со скоростями до 500 км/ч с достаточно хорошей экономической эффективностью. Транспорт на электромагнитном подвешивании в настоящее время конкурентноспособен с традиционными транспортными средствами по удельным капитальным вложениям, удельным расходам на эксплуатацию, провозной способности и обеспечивает существенное увеличение скорости и интенсивности перевозок.

При эксплуатации подвижного состава на электромагнитном подвешивании существенное значение имеют вопросы безопасности экипажей с ЭМП и прочности путевых структур в аварийном режиме, вызванном частичным или полным отказом системы левитации. Отключение электромагнитов подвеса приводит к соударению экипажа на ЭМП с путевой структурой. Поэтому задача исследования ударного взаимодействия подвижного состава на электромагнитном подвешивании с путевой структурой в аварийном режиме при отказе системы левитации относится к одной из наиболее актуальных проблем динамики транспортных средств.

Целью работы является :

- разработка методики исследования ударного взаимодействия подвижного состава на электромагнитном подвешивании с путевой структурой в вертикальном направлении при аварийном ре-



НТБ
ДНУЖТ

жине, вызванном отключением питания на обмотках как всех электромагнитов подвеса, так и отдельных ЭМП или их групп ;

- построение математических моделей, описывающих совместные колебания экипажа на электромагнитном подвешивании и путевой структуры как единой электромеханической системы "экипаж-САУ - путевая структура" в аварийном режиме ;

- разработка программного обеспечения для численной реализации решения задач динамического взаимодействия экипажей на электромагнитном подвешивании с путевой структурой при отказе системы левитации ;

- исследования динамических качеств экипажей на электромагнитном подвешивании и путевых структур различного конструктивного исполнения в аварийном режиме ;

- изучение влияния параметров упруговязких элементов в рессорных подвешиваниях и коэффициентов усиления САУ на динамику подвижного состава с электромагнитным подвесом и путевой структуры при отказе системы левитации ;

- определение рациональных значений параметров упруговязких элементов рессорного подвешивания аварийных скользунов подвижного состава на электромагнитном подвешивании ;

- разработка методики и программы экспериментальных исследований ударного взаимодействия подвижного состава на электромагнитном подвешивании с путевой структурой в аварийном режиме ;

- проведение экспериментальных исследований для макетного подвижного состава на электромагнитном подвешивании с целью обоснования принятой методики, определения динамических качеств экипажа и путевой структуры, уточнения математических моделей.

Методы исследования. В работе использованы современные методы математического моделирования колебаний механических систем и процессов в электромагнитных устройствах с применением цифровых вычислительных машин. Исследование ударного взаимодействия подвижного состава на электромагнитном подвешивании с путевой структурой основано на совместном решении системы нелинейных дифференциальных уравнений, характеризующих колебания экипажа как многомассовой электромеханической системы, и интегральных уравнений, описывающих колебания путевой структуры. Стыковка этих уравнений осуществлялась через функциональные уравнения, описывающие динамическое взаимодействие соударяемых тел с учетом контактных деформаций. Численное интегрирование систем нелинейных дифференциальных уравнений движения эки-

НТБ
ДНУЖТ

пажа с ЭМП в аварийном режиме выполнялось по методу Адамса-Башфорта с определением начальных значений по методу Рунге-Кутты IV порядка. Интегральные уравнения колебаний путевой структуры от действия ударных сил решались с помощью численного метода С.П. Тимошенко, а также алгоритма А.П. Филиппова.

Аналитические решения задач ударного взаимодействия двухмассовой модели экипажа на ЭМП и путевой структуры получены с помощью перехода к главным координатам и применения операционного исчисления. Экспериментальные исследования выполнены на построенных в ВЭЛИИ макетном образце однотолежечного экипажа на электромагнитном подвешивании и путевой структуре эстакадного типа с использованием аппаратуры, применяемой ДИИТом при исследовании динамических качеств рельсового подвижного состава.

Научная новизна. Предложена методика математического моделирования динамического взаимодействия подвижного состава на электромагнитном подвешивании с путевой структурой в аварийном режиме, вызванном частичным или полным отказом системы левитации. Отличие предложенной методики от известных состоит в том, что она позволяет исследовать многомассовые расчетные схемы экипажей с ЭМП, учитывать нелинейности при определении сил левитации отключенных и неотключенных электромагнитов подвеса и ударных сил, использовать нелинейные уравнения, описывающие работу САУ ЭМП. Построены математические модели и разработаны программы численной реализации для исследований динамики ряда электромеханических систем "экипаж-САУ-путевая структура" различного конструктивного исполнения в аварийном режиме. Исследованы динамические качества экипажей на электромагнитном подвешивании и прочность путевых структур при отказе системы левитации. Получены аналитические решения в случае ударного взаимодействия двухмассовой модели экипажа на электромагнитном подвешивании с путевой структурой в аварийном режиме. Определены рациональные значения параметров упруговязких элементов в подвешивании аварийных скользящих экипажей на электромагнитном подвешивании с учетом предварительной затяжки упругих элементов. Проанализировано влияние коэффициентов усиления САУ на динамику экипажей с ЭМП при аварийном режиме, вызванном отключением отдельных электромагнитов или их групп. Разработана методика экспериментальных исследований динамических качеств подвижного состава на электромагнитном подвешивании и прочности путевой структуры в аварийном режиме, вызванном частичным или полным

НТБ
ДНУЖТ

отказом системы левитации, которая использована при проведении экспериментальных исследований макетного образца однопутевого экипажа с ЭМП и путевой структуры.

Практическая ценность работы. Разработанный алгоритм и составленные программы для ЭВМ ЕС-1020 и ЕС-1050 позволяют исследовать колебания экипажей на электромагнитном подвешивании и прочность путевой структуры в аварийном режиме, вызванном внезапным отключением питания на обмотках как всех электромагнитов подвеса, так и отдельных ЭМП или их групп. Полученные с помощью предложенного пакета программ результаты численных расчетов использованы при разработке Технического предложения на четырехпутежный экипаж с электромагнитным подвесом и путевую структуру. Разработанная методика математического моделирования ударного взаимодействия подвижного состава на электромагнитном подвешивании с путевой структурой в аварийном режиме позволяет на стадии проектирования прогнозировать динамические качества экипажей с ЭМП и путевых структур, а также выбирать рациональные величины параметров упруговязких элементов в системе подвешивания аварийных скользунов.

Апробация работы. Основные результаты выполненных теоретических и экспериментальных исследований доложены и обсуждены на XXVII научно-технической конференции Новочеркасского ордена Трудового Красного Знамени политехнического института имени Серго Орджоникидзе (г.Новочеркасск, 1978 г.), Областной Научно-технической конференции "Ученые Днепропетровщины в борьбе за повышение эффективности общественного производства" (г. Днепропетровск, 1980 г.), Второй Всесоюзной научно-практической конференции "Итоги и перспективы создания высокоскоростного наземного транспорта (ВСНТ)" (г. Новочеркасск, 1980 г.), Областной конференции молодых ученых и специалистов, посвященной 63-летию ВЛКСМ (г.Днепропетровск, 1981г.), Всесоюзном научно-техническом семинаре "Электромагнитный подвес, общая компоновка и динамика экипажей, опытные полигоны высокоскоростного наземного транспорта (ВСНТ)" (г.Новочеркасск, 1983г.), Третьей Всесоюзной научно-технической конференции по высокоскоростному наземному транспорту (ВСНТ) (г.Новочеркасск, 1984 г.), Всесоюзной конференции "Проблемы механики железнодорожного транспорта: динамика, прочность и надежность подвижного состава" (г.Днепропетровск, 1986г.), Межвузовском семинаре "Математические проблемы механики" (г.Днепропетровск, 1988 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 ГИИТ СССР № 470 от 18.07.74г., №45 от 02.03.81 и № 555 от 30.10.85 и Целевой комплексной программой 0.54.07 на 86-90 г.г. Разработанное математическое обеспечение и результаты расчетов динамического взаимодействия экипажей на электромагнитном подвешивании с путевой структурой в аварийном режиме использованы при создании макетного однопутевого экипажа с ЭМП и путевой структуры, а также при разработке Технического предложения на четырехпутевый экипаж на электромагнитном подвешивании с линейными тяговыми двигателями и путевую структуру.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 11 печатных работ.

Структура и объем работы. Диссертация изложена на с. машинописного текста, состоит из введения, пяти глав, заключения, списка использованных источников (156 наименований), приложений, рисунков и таблиц в тексте диссертации.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность работ по созданию транспортных средств на магнитном подвешивании, проводится анализ существующих систем магнитного подвешивания, их преимуществ и недостатков, указывается, что электромагнитная система подвешивания в настоящее время признана специалистами наиболее просто технически реализуемой и экономически оправданной по сравнению с другими системами. Отмечается, что исследования ударного взаимодействия подвижного состава на электромагнитном подвешивании с путевой структурой в аварийном режиме, связанном с отключением питания на обмотках как всех электромагнитов подвеса, так и отдельных ЭМП или их групп, относится к одной из наиболее актуальных проблем динамики подвижного состава на ЭМП. Сформулированы цели исследования и дается краткое изложение диссертационной работы.

В первой главе проводится обзор литературы и содержится анализ современного состояния исследований по разработке и конструированию транспортных средств на магнитном подвешивании как у нас в стране, так и за рубежом, ставятся задачи диссертационной работы и дается обзор литературы по удару.

НТБ
ДНУЖТ

Динамика экипажей на электромагнитном подвешивании имеет много общего с динамикой подвижного состава железных дорог. Поэтому для исследования динамических качеств экипажей с магнитным подвесом и путевых структур естественно использовать те методы, которые применяются при исследованиях динамических качеств подвижного состава железнодорожного транспорта. Фундаментальные исследования динамики подвижного состава железных дорог выполнены отечественными и зарубежными учеными: Н.П.Петровым, С.П.Тимошенко, Н.Е.Дуковским, Ф.Картером, А.М.Годыцким-Цвирко, Г.Марье, М.В.Винокуровым, В.Б.Меделем, В.А.Лазаряном, С.М.Куценко и другими. Дальнейшее развитие основных научных направлений в области динамики подвижного состава связано с именами Е.П.Блохина, Г.П.Бурчака, М.Ф.Вериги, С.В. Вершинского, Л.О.Грачевой, В.Д.Дановича, Ю.В.Демина, А.А.Камаева, В.А.Камаева, Н.А.Ковалева, А.Я.Когана, М.Л.Коротенко, А.А.Львова, Л.А.Манашкина, А.Н.Савоськина, М.М.Соколова, Т.А.Тибилова, В.Ф.Ушкалова, В.Д.Хусидова, И.И.Челнокова и многих других.

Большой вклад в развитие подвижного состава на магнитном подвешивании внесли советские ученые С.Н.Байбаков, Д.А.Бахвалов, В.И.Бочаров, В.А.Винокуров, О.П.Грапис, В.Д.Данович, М.Л.Коротенко, В.М.Кочетков, В.П.Михеев, Ю.Н.Мурзенко, В.Д.Нагорский, Л.П. Побережский, Б.И.Рабинович, В.Д.Соколов, И.В.Салда, Т.А.Тибилов, Б.Н. Тихменев, О.В.Тозони, Е.М.Фришман и другие, а также зарубежные ученые Р.Борчертс, Е.Готтсейн, Л.Хаманн, Д.Хеллигес, В.Миддлетон, Г. Полгрин, К. Попп и многие другие.

При эксплуатации подвижного состава на электромагнитном подвешивании существенное значение имеют вопросы безопасности движения экипажей в аварийном режиме, вызванном внезапным отключением питания на обмотках как всех, так и отдельных электромагнитов или их групп. В случае отключения всех электромагнитов подвеса экипаж не сохраняет своих левитационных качеств и происходит его соударение с путевой структурой. Однако, при отключении отдельных ЭМП, благодаря работе САУ неотключенных электромагнитов, возможно сохранение экипажем режима левитации.

В целях безопасной посадки на путевую структуру в аварийном режиме экипажи на электромагнитном подвешивании оборудуются аварийными колесами или лыжами (скользунками). Для транспортных средств с ЭМП, движущихся с высокими скоростями, более приемлемыми оказываются посадочные устройства в виде лыж (скользунов), так как в этом

НТБ
ДНУЖТ

случае при посадке экипажей на путевую структуру возникают меньшие динамические усилия, чем при оборудовании экипажей аварийными колесами. Кроме того, конструкция с опорными лыжами более проста, дает существенную экономию в массе и в аварийных ситуациях выполняет функцию дополнительного тормозного устройства.

Для определения динамических качеств экипажей на электромагнитном подвешивании и путевых структур в аварийном режиме необходимо создание новой расчетной схемы, основными компонентами которой являются: экипаж, система автоматического управления и путевая структура.

В работе рассматривается динамика одно-, двух- и четырехтележечных экипажей на электромагнитном подвешивании и путевых структур, отличающихся конструктивным решением и массово-габаритными показателями. Расчетные схемы экипажей с ЭМП выбраны в виде систем абсолютно твердых тел, связанных между собой в вертикальном направлении упруговязкими связями. Путевая структура представлена в виде ряда шарнирно опертых однопролетных балок с постоянной изгибной жесткостью и постоянной плотностью. Каждый электромагнит подвеса экипажа снабжается системой автоматического управления зазором между электромагнитом и путевой структурой. Рассматривается ударное взаимодействие экипажей на электромагнитном подвешивании и путевых структур в вертикальном направлении.

Задача исследования аварийного режима экипажей на электромагнитном подвешивании в случае, когда экипаж не сохраняет режим левитации, разделяется на два этапа: первый - движение системы с момента отключения питания на обмотках электромагнитов подвеса до момента касания опорными скользунками путевой структуры и второй - непосредственно удар системы о путь. При отключении отдельных электромагнитов подвеса или их групп существенное значение приобретает задача установления таких условий, при которых экипажи на электромагнитном подвешивании сохраняют режим левитации и не происходит их соударений с путевой структурой.

Во второй главе приводится методика составления математических моделей, предназначенных для исследования динамических качеств экипажей на электромагнитном подвешивании различного конструктивного исполнения в аварийном режиме. Рассматриваются экипажи, имеющие тележечную конструкцию, когда кузов при помощи упруговязких элементов опирается на одну, две и четыре тележки.

НТБ
ДНУЖТ

Для механической части предложенных расчетных схем экипажей подвижного состава на электромагнитном подвешивании получены системы дифференциальных уравнений движения в форме уравнений Лагранжа второго рода :

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

где T , Π и Φ - соответственно кинетическая, потенциальная энергии и функция рассеивания энергии рассматриваемых систем; 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, $\bar{q}$, $\dot{\bar{q}}$ и $\ddot{\bar{q}}$ - векторы соответственно обобщенных координат, их скоростей и ускорений; $\bar{Q}$ - вектор обобщенных сил, включающий электромагнитные силы отключенных и неотключенных электромагнитов подвеса на первом этапе и ударные силы на втором этапе аварийного режима экипажа на электромагнитном подвешивании.

При взаимодействии одиночного электромагнита подвеса экипажа с путевой структурой в режиме левитации электромагнитная сила (сила левитации) F_L определяется по формуле :

$$F_L(t) = C \frac{[I(t)]^2}{[\delta_0 + q(t)]^2}, \quad (3)$$

где C - постоянная электромагнита; $I(t)$ - ток в цепи электромагнита; $q(t)$ - перемещение ЭМП от положения равновесия в режиме левитации; δ_0 - заданный зазор между ЭМП и путевой структурой в режиме левитации. Электромагнитная сила отключенного ЭМП определяется по формуле:

$$F_L(t) = C \frac{I_0^2}{[\delta_0 + q(t)]^2} e^{-\frac{R}{L}t}, \quad (4)$$

где I_0 - ток в цепи электромагнита подвеса в момент его отключения; R - омическое сопротивление обмотки ЭМП; L - индуктивность обмотки электромагнита. Закон функционирования системы автоматического управления можно описать дифференциальным уравнением :

$$R \cdot I(t) + L \frac{dI}{dt} = k_{im} [\delta(t) - \delta_0] + k_{em} \dot{\delta}(t) + k_{zm} \ddot{\delta}(t) - k_{zm} I(t), \quad (5)$$

где k_{im} , k_{em} , k_{zm} и k_{zm} - коэффициенты усиления САУ ЭМП соответственно по зазору $\delta(t)$ между электромагнитом подвеса и путевой

НТБ
ДНУЖТ

структурой, скорости $\dot{\delta}(t)$ и ускорению $\ddot{\delta}(t)$ изменения зазора и току $I(t)$ в цепи ЭМП; $\delta_0 = \delta_{\text{зад}} = 2,5 \text{ мм}$ – заданная величина зазора между электромагнитом подвеса и путевой структурой. Экипажи на электромагнитном подвешивании имеют ряд нетрадиционных узлов, таких как электромагниты подвеса, системы автоматического управления ЭМП, поэтому на первом этапе исследований была принята упрощенная двухмассовая расчетная схема экипажа, где верхняя масса – кузов, а нижняя – тележка. Движение такой системы, благодаря переходу к главным обобщенным координатам, описывается дифференциальными уравнениями с разделяющимися переменными. Систему уравнений (2) необходимо решать совместно с уравнениями (5), число которых определяется числом электромагнитов подвеса и для различных расчетных схем экипажа на электромагнитном подвешивании варьировалось от четырех до тридцати двух.

В третьей главе исследуются колебания путевой структуры в аварийном режиме экипажа на электромагнитном подвешивании. Для модели однотолежного экипажа на электромагнитном подвешивании путевая структура выбрана в виде ряда шарнирно опертых балок, поперечным сечением которых является равнополочный уголок. Получены формулы для определения вертикальных и горизонтальных перемещений путевой структуры на первом этапе аварийного режима модели экипажа при отказе системы левитации. Анализ перемещений показал, что рельсовые нити путевой структуры для модели однотолежного экипажа на электромагнитном подвешивании при действии электромагнитных сил несколько сближаются друг с другом в поперечном направлении, что необходимо учитывать при оборудовании экипажа аварийными колесами.

На втором этапе аварийного режима ударная сила $F(t)$, возникающая между аварийным колесом и верхней точкой вертикальной полки равнополочного уголка, вызывает кривой изгиб путевой структуры. Составляющая силы инерции, приложенная к центру тяжести поперечного сечения, создает крутящий момент, распределенный по длине балки. Сравнение частот изгибно-крутильных колебаний с парциальными частотами изгибных и крутильных колебаний для принятой расчетной схемы балки показало, что расхождение в частотах для крутильных колебаний сравнительно невелико, поэтому влиянием кручения на перемещения путевой структуры при изгибе, вызванном ударной силой $F(t)$, можно пренебречь. Формулы для определения вертикальных и горизонтальных динамических прогибов в середине пролета путевой структуры при её ударном нагружении моделью однотолежного экипажа на электромагнитном подвешивании в аварийном режиме имеют вид :

НТБ
ДНУЖТ

$$\begin{aligned} z_0\left(\frac{1}{2}, t\right) = \frac{qL}{8AL} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{(2m-1)^2} \int_0^t F(t_1) \left[\frac{1}{a_2} \sin \frac{(2m-1)^2 \pi^2 a_2}{L^2} (t-t_1) + \right. \\ \left. + \frac{1}{a_2} \sin \frac{(2m-1)^2 \pi^2 a_2}{L^2} (t-t_1) \right] dt_1; \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} z_2\left(\frac{1}{2}, t\right) = \frac{qL}{8AL} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{(2m-1)^2} \int_0^t F(t_1) \left[\frac{1}{a_2} \sin \frac{(2m-1)^2 \pi^2 a_2}{L^2} (t-t_1) - \right. \\ \left. - \frac{1}{a_2} \sin \frac{(2m-1)^2 \pi^2 a_2}{L^2} (t-t_1) \right] dt_1, \end{aligned}$$

Напряжения в произвольной точке с координатами (ξ, η) сечения, взятого посредине пролета балки, определяются по формуле

$$\begin{aligned} \sigma\left(\frac{1}{2}, t\right) = \frac{\sqrt{2} q E}{8AL} \sum_{m=1}^{\infty} \int_0^t F(t_1) \left[\frac{2}{a_2} \sin \frac{(2m-1)^2 \pi^2 a_2}{L^2} (t-t_1) + \right. \\ \left. + \frac{2}{a_2} \sin \frac{(2m-1)^2 \pi^2 a_2}{L^2} (t-t_1) \right] dt_1, \end{aligned} \quad (7)$$

Для приближенного вычисления интегралов, полученных в формулах (6) и (7), ударную силу $F(t)$ аппроксимируют кусочно-постоянной или кусочно-линейной функцией. В работе получены выражения динамических прогибов и напряжений путевой структуры при аппроксимации ударной силы $F(t)$ на каждом интервале времени $(r-1)T \leq t < rT$; $(r=1, \dots, n)$ кусочно-постоянной функцией

$$F(t) = F_r; \quad (F(0) = 0), \quad (8)$$

и кусочно-линейной функцией

$$F(t) = F_r - (F_r - F_{r-1}) \left(r - \frac{t}{T}\right); \quad (F(0) = 0) \quad (9)$$

В случае ударного нагружения путевой структуры двухтележечным экипажем на электромагнитном подвешивании в аварийном режиме динамический прогиб в произвольном сечении x пролета балки определим по формуле:

$$\begin{aligned} z(x, t) = \frac{2q}{8AL} \cdot \frac{L}{x^2 a} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{\sin \frac{i x \pi}{L}}{i^2} \left[\sin \frac{i x (6 + 2a)}{L} \int_0^t F_1(t_1) \times \right. \\ \times \sin \frac{i^2 x^2 a}{L^2} (t-t_1) dt_1 + \sin \frac{i x a}{L} \int_0^t F_2(t_1) \times \\ \left. \times \sin \frac{i^2 x^2 a}{L^2} (t-t_1) dt_1 \right], \end{aligned} \quad (10)$$

где b - расстояние от левой опоры пролета балки до ближайшего аварийного скользяна; $2d$ - расстояние между аварийными скользянами экипажа в продольном направлении. Напряжение в произвольной точке поперечного сечения, отстоящей на расстоянии x от главной центральной поперечной оси инерции сечения y , определим по формуле

$$\sigma(x,t) = \frac{2gEx}{\gamma A l a} \sum_{i=1}^{\infty} \sin \frac{i\pi x}{L} \left[\sin \frac{i\pi(b+2d)}{L} \int_0^t 2F_1(t_1) \times \right. \\ \left. \times \sin \frac{i\pi^2 a}{L^2} (t-t_1) dt_1 + \sin \frac{i\pi b}{L} \cdot \int_0^t 2F_2(t_1) \sin \frac{i\pi^2 a}{L^2} (t-t_1) dt_1 \right]. \quad (II)$$

Для исследования поперечного удара модели однотелечного экипажа на электромагнитном подвешивании с путевой структурой в аварийном режиме воспользуемся функциональным уравнением, связывающим перемещение ударяющего груза $\tilde{q}_2(t)$, динамический прогиб путевой структуры $z(x,t)$ и величину контактного сближения $\Delta(t)$, из которого находим $F(t)$:

$$\tilde{q}_2(t) = z(x,t) + \Delta(t). \quad (I2)$$

Контактное сближение аварийного колеса экипажа и путевой структуры определим по формуле

$$\Delta(t) = n_s \frac{1}{2} \sqrt{\frac{3}{4} \eta^2 \Sigma K} \cdot [F(t)]^{2/3}, \quad (I3)$$

где n_s - коэффициент, зависящий от параметра Ω ,

$$\Omega = \frac{1}{\Sigma K} \sqrt{(K_{11} - K_{12})^2 + (K_{21} - K_{22})^2 + 2(K_{11} - K_{12})(K_{21} - K_{22}) \cos 2\omega}$$

K_{11}, K_{12} - главные кривизны аварийного колеса в точке первоначального контакта соприкасающихся тел; K_{21}, K_{22} - главные кривизны путевой структуры в точке первоначального контакта соприкасающихся тел; ω - угол между плоскостями кривизны K_{11} и K_{21} ; $\Sigma K = K_{11} + K_{12} + K_{21} + K_{22}$ - сумма главных кривизн соприкасающихся тел; $\eta = (1 - \mu_1^2) E_1 + (1 - \mu_2^2) E_2$ - упругая постоянная соприкасающихся тел; μ_1, μ_2, E_1, E_2 - соответственно коэффициенты Пуассона и модули упругости аварийного колеса и путевой структуры. Для определения контактного сближения между аварийным скользяном (лыжой) экипажа на электромагнитном подвешивании и путевой структурой воспользуемся формулой:

$$\Delta(t) = \frac{2}{\pi R_{\Sigma K}} \left[\frac{1 - \mu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \mu_2^2}{E_2} \right] \cdot \left(C_n \frac{2R}{b} + 0,407 \right) \cdot F(t), \quad (I4)$$

где R - радиус поверхности аварийного скользяна; $b = \sqrt{\frac{2}{\pi} \left(\frac{1 - \mu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \mu_2^2}{E_2} \right) \frac{Q}{\Sigma K}}$ - полуширина площадки контакта; $R_{\Sigma K}$ - длина скользяна; Q - вес экипажа, приходящийся на один скользян в положении опирания экипажа на балку.

Четвертая глава посвящена анализу динамики экипажей на электро-

магнитном подвешивании и путевых структур в аварийном режиме, вызванном отключением питания как всех электромагнитов подвеса, так и отдельных ЭМП или их групп. Для упрощенной расчетной схемы модели экипажа на электромагнитном подвешивании, состоящей из двух масс, связанных в вертикальном направлении упругой связью, получим аналитические выражения движения масс на первом этапе аварийного режима:

$$\begin{cases} q_1(t) = g t^2/2 + (g/\omega^2)(\cos \omega t - 1); \\ q_2(t) = g t^2/2 - m_1/m_2 (g/\omega^2)(\cos \omega t - 1), \end{cases} \quad (15)$$

где m_1, m_2 - соответственно верхняя и нижняя массы; g - ускорение свободного падения; t - время движения; $\omega = \sqrt{\frac{c(m_1+m_2)}{m_1 m_2}}$ - частота собственных колебаний; c - коэффициент жесткости упругого элемента. Используя интегральное преобразование Лапласа-Карсона получим уравнения колебаний двухмассовой модели экипажа при ударе её по путевой структуре:

$$\begin{aligned} \tilde{q}_1(t) = & \frac{g t^2}{2} - \frac{1}{m_1+m_2} \int_0^t F(t_1)(t-t_1) dt_1 + \frac{1}{\omega(m_1+m_2)} \int_0^t F(t_1) \sin \omega(t-t_1) dt_1 \\ & + \frac{m_1}{m_1+m_2} \left(1 + \frac{m_2}{m_1} \cos \omega t \right) x_{10} + \frac{m_2}{m_1+m_2} (1 - \cos \omega t) x_{20} + \\ & + \frac{m_1}{m_1+m_2} \left(t + \frac{m_2}{m_1} \frac{\sin \omega t}{\omega} \right) v_{10} + \frac{m_2}{m_1+m_2} \left(t - \frac{\sin \omega t}{\omega} \right) v_{20}; \quad (16) \\ \tilde{q}_2(t) = & \frac{g t^2}{2} - \frac{1}{m_1+m_2} \int_0^t F(t_1)(t-t_1) dt_1 - \frac{m_1}{\omega m_2(m_1+m_2)} \int_0^t F(t_1) \sin \omega(t-t_1) dt_1 \\ & + \frac{m_1}{m_1+m_2} (1 - \cos \omega t) x_{10} + \frac{m_2}{m_1+m_2} \left(1 + \frac{m_1}{m_2} \cos \omega t \right) x_{20} + \\ & + \frac{m_1}{m_1+m_2} \left(t - \frac{\sin \omega t}{\omega} \right) v_{10} + \frac{m_2}{m_1+m_2} \left(t + \frac{m_1}{m_2} \frac{\sin \omega t}{\omega} \right) v_{20}, \end{aligned}$$

где $F(t)$ - ударная сила; x_{10}, x_{20} - отклонения соответственно кузова и тележки от положения статического равновесия, определяемого по отношению к недеформированной балке, в момент удара; v_{10}, v_{20} - скорости соответственно кузова и тележки в момент ударного нагружения системой путевой структуры. Получены уравнения движения масс системы в случае аппроксимации ударной силы $F(t)$ кусочно-постоянной и кусочно-линейной функциями.

Если принять, что электромагнитная сила отключенного электромаг-

НТБ
ДНУЖТ

нита подвеса на первом этапе аварийного режима изменяется по 1-му закону

$$F_z(t) = F_{L0} \left(1 - \frac{t}{t_0}\right), \quad (17)$$

где F_{L0} - значение электромагнитной силы в момент отключения ЭМП, численно равное весу модели экипажа; $t_0 = \sqrt{\frac{2\delta_0}{g}}$ - время, за которое система перемещается с высоты зазора δ_0 между аварийным колесом и путевой структурой, тогда перемещения масс системы определим по формулам:

$$\begin{cases} q_1(t) = \frac{g t^3}{6 t_0} + \frac{g}{g t_0} \left(\frac{1}{2} \sin \omega t - t \right); \\ q_2(t) = \frac{g t^3}{6 t_0} - \frac{m_1}{m_2} \cdot \frac{g}{g t_0} \left(\frac{1}{2} \sin \omega t - t \right). \end{cases} \quad (18)$$

В работе также получены аналитические решения задачи ударного нагружения путевой структуры двухмассовой моделью экипажа на ЭМП при наличии в рессорном подвешивании гасителя колебаний, установленного параллельно упругому элементу.

Анализ результатов численных расчетов динамики модели экипажа на электромагнитном подвешивании показал, что жесткое крепление аварийных колес к раме тележки нецелесообразно ввиду достаточного больших значений ударных сил. На первом этапе аварийного режима (с момента отключения питания на обмотках электромагнитов подвеса до касания аварийных колес путевой структуры) необходимо учитывать переходные процессы, происходящие в цепи отключенного электромагнита подвеса, что приводит к снижению динамических параметров при ударе на 15-20%. Для предварительной оценки динамики экипажа на электромагнитном подвешивании и путевой структуры в аварийном режиме можно принять линейный закон изменения электромагнитной силы отключенного ЭМП (17). Проведена оценка влияния коэффициентов усиления САУ и коэффициентов упруговязких элементов к рессорным подвешиваниям, на динамические качества модели однотолежного экипажа с электромагнитным подвесом и путевой структуры в аварийном режиме, связанном с частичным или полным отказом системы левитации. Анализ динамики двухтележного экипажа с электромагнитным подвесом при отказе системы левитации показал, что электромагнитная сила отключенного ЭМП за время падения экипажа на путевую структуру убывает практически до нуля, поэтому при ударе экипажа по путевой структуре её влиянием на динамику системы пренебрегаем. Определены значения ударных сил, динамических прогибов и напряжений в путевой структуре в зависимости от коэффициента вязкого трения демпфера в подвешивании аварийных скользунов.

Для обеспечения безопасности экипажа на электромагнитном подвешивании и прочности путевой структуры в аварийном режиме важным вопросом является выбор рациональных параметров упруговязких элементов и силы предварительного сжатия упругого элемента в подвешивании аварийных скользунов. Такими величинами для принятых численных значений параметров однотележного экипажа на ЭМП являются: коэффициент жесткости упругого элемента - $0,28 \text{ кН/м}$; коэффициент вязкого трения демпфера - $7,5 \text{ кН}\cdot\text{с/м}$; сила предварительного сжатия упругого элемента - 19 кН ; зазор между аварийным скользуном и путевой структурой в режиме левитации - 15 мм . Анализ результатов исследований динамики однотележного и четырехтележного экипажей на электромагнитном подвешивании в аварийном режиме, связанном с отключением отдельных электромагнитов или их групп, показал, что для принятых численных значений параметров механической части экипажа и САУ, экипаж на электромагнитном подвешивании сохраняет состояние левитации только в случае отключения одного из средних электромагнитов, расположенного на любой из тележек. Определены электромагнитные силы и токи в цепях неотключенных ЭМП, а также перемещения, скорости и ускорения масс экипажа при отказе отдельных электромагнитов подвеса.

В пятой главе изложены результаты и оценки экспериментальных исследований динамики макетного образца однотележного экипажа на электромагнитном подвешивании и путевой структуры, созданных ВЭЛНИИ, в аварийном режиме. Разработаны методика и программа проведения экспериментальных исследований динамических качеств экипажа с ЭМП и путевой структуры в аварийном режиме. В качестве основных режимов для электро-механических испытаний подвижного состава на электромагнитном подвешивании были приняты следующие режимы: перевод экипажа из положения опирания на аварийные колеса в состояние левитации, падение экипажа при отказе системы левитации и удар экипажа по путевой структуре. В результате испытаний были получены экспериментальные данные, сопоставления которых с результатами теоретических исследований показало их достаточно хорошее соответствие. Например, при внезапном отключении электромагнитов в аварийном режиме время падения макетного образца однотележного экипажа с электромагнитным подвесом на путевую структуру составляет в зависимости от величины зазора между аварийными колесами и путевой структурой $0,07 \text{ с} - 0,10 \text{ с}$ (по расчету - $0,068 \text{ с} - 0,096 \text{ с}$), максимальные значения ускорений кузова и тележки для зазора между аварийным колесом и путевой структурой равно 15 мм составляют соответственно $9,0 \text{ м/с}^2$ и $11,8 \text{ м/с}^2$ (по расчету $9,2 \text{ м/с}^2$ и

НТБ
ДНУЖТ

$11,6\text{м/с}^2$), время удара экипажа по путевой структуре составляет 0,30с (по расчету 0,35с), динамический прогиб посредине пролета путевой структуры равен 1,1мм (по расчету 1,2мм), максимальные напряжения в путевой структуре равны - 23,8 МПа (по расчету - 26,5 МПа), максимальное значение силы тока в цепи электромагнита равно 21,5 А (по расчету 23,8 А).

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ И ВЫВОДЫ

1. Разработана методика теоретических и экспериментальных исследований ударного взаимодействия подвижного состава на электромагнитном подвешивании с путевой структурой в вертикальном направлении при аварийном режиме, вызванном полным или частичным отказом системы левитации.

2. Предложено программное обеспечение для ЭВМ ЕС-1020 и ЕС-1050, позволяющее численно реализовать решение задач динамического взаимодействия экипажей на электромагнитном подвешивании с путевой структурой в аварийном режиме.

3. С использованием главных координат и операционного исчисления получено аналитическое решение задачи ударного нагружения путевой структуры двухмассовой моделью экипажа на электромагнитном подвешивании в аварийном режиме.

4. Для экипажей магистрального пассажирского транспорта на электромагнитном подвешивании с различным конструктивным исполнением - однотолежечных, двухтолежечных и четырехтолежечных, составлены соответствующие расчетные схемы и разработаны математические модели, позволяющие исследовать динамику электромеханических систем "экипаж-САУ-путевая структура" в аварийном режиме. Оценено влияние параметров упруговязких элементов в рессорных подвешиваниях и коэффициентов усиления САУ на динамику экипажа и прочность путевой структуры.

5. Предложено установить в системе крепления аварийного скользунa к тележке экипажа на электромагнитном подвешивании, помимо упругого элемента, демпфер и устройство для предварительного сжатия упругого элемента. Определены рациональные значения параметров упруговязких элементов и силы предварительного сжатия упругого элемента в подвешивании аварийных скользунков.

6. Исследована динамика однотолежечного и четырехтолежечного экипажей на электромагнитном подвешивании в аварийном режиме, вызванном отключением отдельных электромагнитов или их групп. Установлено, что экипаж сохраняет состояние левитации и не происходит его

соударения с путевой структурой только в случае отказа одного из средних электромагнитов подвеса, расположенного на любой из тележек экипажа. Оценено влияние коэффициентов усиления САУ, а также параметров упруговязких элементов в первичном и вторичном подвешиваниях на динамику экипажей.

7. Экспериментальным путем получены величины динамических показателей макетного образца однотолежного экипажа на электромагнитном подвешивании и путевой структуры в аварийном режиме, вызванном полным или частичным отказом системы левитации, сравнение которых с результатами теоретических исследований показало их хорошую сопоставимость, что доказывает достоверность результатов, получаемых с помощью разработанных математических моделей.

8. Результаты теоретических и экспериментальных исследований внедрены в ВЭЛНИИ и использованы при разработке Технической документации на четырёхтележный экипаж с электромагнитным подвесом и путевую структуру.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

1. Коротенко М.А., Лабузов Д.А. К вопросу об исследовании аварийного режима экипажа на электромагнитном подвешивании // Проблемы динамики и прочности железнодорожного подвижного состава. - Днепропетровск: Днепропетр. ин-т инж. ж.д. транспорта. - Вып. 205/26. - 1979. - С. 87-93.

2. Коротенко М.А., Лабузов Д.А. К постановке задачи исследования аварийного режима экипажа на электромагнитном подвешивании. // Высокоскоростной наземный транспорт. - Новочеркасск: Новочеркасск политех. ин-т. - 1979. - С. 102-110.

3. Коротенко М.А., Данович В.Д., Лабузов Д.А. Динамика систем с электромагнитным подвешиванием // Ученые Днепропетровщины в борьбе за повышение эффективности общественного производства: Тезисы областной научно-практической конференции. - Днепропетровск: Днепропетр. ин-т инж. ж.д. транспорта. - 1980. - С. 8-9.

4. Коротенко М.А., Данович В.Д., Лабузов Д.А. К исследованию динамики экипажа ВСНТ на ЭМП. // Итоги и перспективы создания высокоскоростного наземного транспорта (ВСНТ): Тезисы докладов Второй Всесоюзной научно-технической конференции по ВСНТ. - М: Информэлектротро. - 1980. - С. 10-11.

5. Лабузов Д.А., Материнская И.В. Исследование ударного нагру-

НТБ
ДНУЖТ

жения путевой структуры в аварийном режиме экипажа на электромагнитном подвешивании. //Проблемы динамики и прочности железнодорожного подвижного состава. -Днепропетровск: Днепропетр. ин-т инж.ж.д. транспорта. -1982. -С.94-101.

6. Коротенко М.Л., Данович В.Д., Лабузов Д.А. К исследованию динамики экипажа ВСНГ на электромагнитном подвешивании //Изв.вузов. Электромеханика. -1983. -№2. -С.103-108.

7. Коротенко М.Л., Лабузов Д.А., Попов К.Н. К вопросу о взаимодействии экипажа высокоскоростного бесконтактного наземного транспорта на электромагнитном подвешивании с путевой структурой в аварийном режиме //Тезисы докладов Третьей Всесоюзной научно-технической конференции по высокоскоростному наземному транспорту (ВСНГ). -Новочеркасск:Новочеркасск. политехн. ин-т - 1984. - С.63.

8. Коротенко М.Л., Лабузов Д.А. Динамика экипажа высокоскоростного транспорта в аварийном режиме //Динамика,нагруженность и надежность подвижного состава.-Днепропетровск: Днепропетровск. ин-т инж. ж.д. транспорта. -1985. -С.88-94.

9. Коротенко М.Л., Лабузов Д.А. Динамика экипажа высокоскоростного бесконтактного наземного транспорта при отключении групп электромагнитов подвеса // Проблемы динамики,прочности и устойчивости движения железнодорожного подвижного состава. -Днепропетровск:Днепропетровск. ин-т инж. ж.д. транспорта. -1986. -С.128-134.

10.Коротенко М.Л., Лабузов Д.А., Попов К.Н. К вопросу о взаимодействии экипажа высокоскоростного бесконтактного наземного транспорта на электромагнитном подвешивании с путевой структурой в аварийном режиме //Деп.в ЦНИИТЭИ МПС, №3416 кд Д-82.-С.9.

11. Лабузов Д.А. Динамическая нагруженность опытного вагона бесконтактного наземного транспорта с электромагнитным подвесом в аварийном режиме //Проблемы механики железнодорожного транспорта. Повышение надежности и совершенствование конструкций подвижного состава:Тезисы докладов Всесоюзной конференции.-Днепропетровск:Днепропетровск. ин-т инж. ж.д. транспорта. -1988. -С.61.

Ю.В. -

НТБ
ДНУЖТ

862101

Лабузов Юрий Аркадьевич

Ударное взаимодействие подвижного состава на электромагнитном подвешивании с путевой структурой при отказе системы левитации (Вертикальные колебания).

05.22.07 - Подвижной состав железных дорог и тяга поездов

Подписано к печати 21.02.89г. Формат 60 x 84 1/16.

Бумага для множительных аппаратов. Ротапринт. Усл. печ.л.1,0.

Уч.-изд. л. 1,0. Тираж 100 экз. Заказ 2031.

Бесплатно.

Участок оперативной полиграфии ДИИТа
320700, ГСП, Днепропетровск, 10, ул. Акад. Лазаряна, 2.

Сканировала Камянская Н.А.

НТБ
ДНУЖТ