

ДНЕПРОПЕТРОВСКИЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
ИНСТИТУТ ИНЖЕНЕРОВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА
имени М.И.КАЛИНИНА

Для служебного пользования

Экз. № 000092

На правах рукописи

ИСКАНДЕРОВ АЛЕКСАНДР АЗИЗОВИЧ

УДК 629.43 ~~621.318.2~~

ПРИМЕНЕНИЕ ПОДВЕСКИ НА ПОСТОЯННЫХ МАГНИТАХ
ДЛЯ ГРУЗОВОГО ПОДВИЖНОГО СОСТАВА

05.22.07-Подвижной состав железных дорог и тяга поездов

05.22.12-Промышленный транспорт

А в т о р е ф е р а т
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
М.Л.Коротенко.

Научный консультант – кандидат технических наук, доцент
Е.М.Фришман.

Официальные оппоненты – доктор технических наук, профессор
А.В.Плакс,
кандидат технических наук, доцент
В.И.Малахов.

Ведущее предприятие – Всесоюзный научно-исследовательский и
проектно-изыскательский институт тру-
бопроводного гидротранспорта (ВНИИПИ
Гидротрубопровод).

Защита диссертации состоится "24" *апреля* 1987 года
в 15 час. *00* мин. на заседании Специализированного совета КИ14.07.01
Днепропетровского ордена Трудового Красного Знамени института ин-
женеров железнодорожного транспорта имени М.И.Калинина по адресу:
320629, Днепропетровск, ул. акад. Лазаряна, 2, ДИИТ.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью,
просим направлять в адрес Специализированного совета.

Автореферат разослан "18" *марта* 1987 года.

Ученый секретарь
специализированного совета,
кандидат технических наук, доцент

Л.В.Петрович

НТБ
ДНУЖТ

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В принятом XXV съездом КПСС директивном документе "Основные направления экономического и социального развития СССР на 1986-1990 годы и на период до 2000 года" предусмотрено "...всемерное ускорение научно-технического прогресса, повсеместное применение его результатов в производстве...". Для успешного решения этой задачи на транспорте необходимо "...ускорить создание и внедрение передовой техники и технологии, развивать новые виды транспорта".

Исследования в области магнитного подвешивания и линейного электропривода для магистрального и пригородного пассажирского транспорта, помимо своей основной цели, дают основу для разработки новых видов промышленного транспорта. Представляет большой интерес применение магнитной подвески в грузовом подвижном составе с целью уменьшения нагрузки на пару "колесо-рельс", что ведет к снижению материалоемкости, сопротивления, износа, энергозатрат, повышению надежности и, в конечном счете, уменьшает эксплуатационные расходы на перевозку грузов.

8527en1
Одним из перспективных направлений при создании новых видов транспорта является применение в грузовом подвижном составе магнитной подвески с использованием постоянных магнитов (ПМП) на основе ферритов бария или стронция. Такая магнитная подвеска, в сочетании с системой механической стабилизации, позволяет создавать составы большой протяженности, движущиеся как с малыми, так и с большими скоростями.

Диссертационная работа посвящена вопросам проектирования подвижного состава на ПМП и линейным многоиндукторным электроприводом для грузовых перевозок. Она включает выполненную автором часть исследований, проведенных в Днепропетровском институте инженеров железнодорожного транспорта и в Специальном конструкторском бюро "Транспрогресс" в соответствии с решением Бюро Научного Совета по проблемам комплексного развития транспорта при ГКНТ СССР от 15.06.83 (тема № госрегистрации 01818001521) и согласно плану НИР и ОКР, утвержденным ГКНТ СССР Постановлением №555 от 30.10.85.

Цель исследования. Разработка принципов рационального конструирования подвески на постоянных магнитах для грузового подвижного состава; теоретическое и экспериментальное обоснование ме-

ДНУЖТ

тодик расчета магнитной системы подвески и ее силовых характеристик; выбор перспективного варианта компоновки постоянных магнитов пути и экипажа с учетом реальных допусков на точность изготовления и монтажа пути, подвижного состава и его системы поперечной стабилизации; составление и экспериментальное обоснование математических моделей для исследования процессов вертикальных колебаний экипажа с ПМП при движении по упругому пути эстакадного типа с вертикальными уступами и зазорами магнитных полюсов в стыках пролетов, а также выработка рекомендаций по выбору параметров системы подвешивания и требуемой точности ее изготовления, обеспечивающих безопасность движения; определение области эффективного использования подвижного состава с ПМП для грузовых перевозок.

Методика исследований, Теоретические исследования силового взаимодействия постоянных магнитов, установленных на магнитопроводы пути и подвижного состава выполнены с применением методов эквивалентного соленоида и зеркального отображения. Выбор перспективного варианта и рациональных параметров магнитных систем пути и экипажа произведен на основании оптимизационных расчетов с применением метода нелинейного программирования – случайного поиска с самообучением. Оценка динамических качеств подвижного состава проводилась на основании результатов решения на ЭВМ нелинейных дифференциальных уравнений, описывающих его движения по пути с изолированными неоднородностями магнитной системы. Достоверность теоретических исследований оценена путем сопоставления результатов расчетов с экспериментальными данными, полученными на макетах, специальных стендах и при ходовых испытаниях опытного грузового подвижного состава на магнитной подвеске с линейным многоиндукторным электродвигателем.

Научная новизна работы заключается в следующем:

– разработана методика расчета сил взаимодействия постоянных магнитов подвески, установленных на магнитопроводы, позволяющая выбрать рациональные конструкции магнитной системы и учесть влияние изолированных дефектов магнитов пути на силовое взаимодействие экипажа и пути, проведено ее теоретическое и экспериментальное обоснование;

– исследованы особенности работы постоянных магнитов с точки зрения обратимости процессов их перемагничивания в заданном температурном интервале эксплуатации подвижного состава. Составлена методика оценки работы магнитов подвески с точки зрения об-

ДНБ

ратимости процессов перемагничивания и методика расчета параметров магнитопроводов минимального веса;

- сформулирована и решена задача многокритериальной оптимизации параметров магнитной системы с учетом достижимой точности работы системы стабилизации экипажа и качества изготовления магнитной системы;

- построена математическая модель вертикальных колебаний системы: экипажа с ПМП и механической системой поперечной стабилизации и эстакадного пути. Изучено влияние зазоров и вертикальных уступов магнитных полюсов в стыках пролетов пути на параметры колебательного процесса. Рассчитана максимальная скорость движения экипажа без второй ступени подвешивания кузова при движении по эстакадному пути;

- проведены динамические (ходовые) испытания опытного грузового состава на ПМП с многоиндукторным линейным электроприводом;

- получены результаты, подтверждающие правильность теоретических выкладок и конструкторских решений, принятых при создании опытной грузовой транспортной системы в СКБ "Транспрогресс".

Практическая ценность и реализация работы:

- исследованы различные варианты конструкций бесконтактного вертикального подвешивания (ПМП) и системы поперечной стабилизации экипажа, предложено 7 конструкций, признанных изобретениями (а.с.№№788578, 794948, 807 57, 1023736, 1099515, 1146932, 1225172);

- определены рациональные параметры магнитных систем указанных конструкций, обеспечивающих высокую удельную грузоподъемность на единицу веса постоянных магнитов экипажа и минимальные нагрузки на его систему стабилизации;

- разработана новая, более эффективная по сравнению с известными схема расположения постоянных магнитов в системе подвешивания (ПМПВ), основные технические решения по которой (а.с.№№807557, 1023736, 1225172) патентуются в США, Японии, ФРГ, Англии, Франции и Канаде;

- под руководством автора спроектирована, сооружена и испытана опытная транспортная система с грузовым составом на ПМПВ, параметры и конструкция основных элементов которых выбраны на основе рекомендаций диссертации;

- результаты работы внедрены Республиканским промышленным объединением "Транспрогресс РСФСР" в практику проектирования новых грузовых транспортных систем при создании для них специали-

ДНУЖТ

зированной оборудования – подвижного состава, модулей пролетов пути и технических средств намагничивания и контроля магнитной системы (а.с. №119082Г);

– рекомендации диссертации использованы СКБ "Транспрогресс" при создании действующей на Московском заводе "Радиоприбор" транспортно-подъемной установки с грузовой тележкой на магнитной подвеске грузоподъемностью 3кН, предназначенной для перевозки тяжелых грузов во взрывоопасных помещениях;

– технические решения и рекомендации по системе бесконтактного подвешивания, полученные в диссертации, послужили основанием для начала разработки не имеющего аналогов транспорта для перевозки грузов в "чистых комнатах" на предприятиях электронной промышленности.

Апробация работы. Основные положения диссертации доложены:

– на XIV научно-технической конференции кафедр БелиИЖТа и секций ДорНТО Белорусской железной дороги, Гомель, 1979;

– на II Всесоюзной научно-технической конференции "Итоги и перспективы создания высокоскоростного наземного транспорта (ВСНТ)", Новочеркасск, 1980;

– на заседании отдела транспорта Государственного комитета по делам изобретений и открытий при ГКНТ СССР, Москва, 1984;

– на Всесоюзной научно-технической конференции "СПЕЦТРАНС-85", Москва, 1985;

– на расширенном заседании кафедры "Теоретическая механика", ДИИТа, Днепропетровск, 1985;

– на заседании Междуведомственного координационного совета по новым видам транспорта Госплана СССР и ГКНТ, Москва, 1986.

Публикации. По результатам выполненных исследований имеется 14 печатных работ, среди них 8 авторских свидетельств СССР на изобретения.

Структура и объем. Диссертация состоит из введения, шести разделов, заключения, списка использованных источников и четырех приложений; содержит 133 страниц машинописного текста, 15 таблиц, 58 рисунков, 102 наименований источников.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы основные задачи исследований в рассматриваемой области науки и техники, определено направление диссертационной работы.

НТБ
ДНУЖТ

В первом разделе проведен обзор созданных систем магнитного подвешивания экипажей и основные направления разработок в СССР и за рубежом. Отмечено, что теоретические и экспериментальные исследования в области бесконтактных наземных транспортных средств, в основном, направлены на создание систем электромагнитного подвешивания пассажирских экипажей с линейным электроприводом. Для высокоскоростных магистральных перевозок рассматриваются также системы электродинамического подвешивания. Общая характеристика и принципы работы транспорта с бесконтактным опиранием на путь за счет пондеромоторных сил магнитного поля изложены в работах Ю.А. Бахвалова, В.И. Бочарова, В.А. Винокурова, О.П. Граписа, В.Д. Дановича, М.Л. Коротенко, В.И. Малахова, В.П. Михеева, В.Д. Нагорского, А.В. Плакса, Л.К. Побережского, Б.И. Рабиновича, А.Н. Савоськина, И.В. Салли, Ю.Д. Соколова, Н.И. Шинкарева и других ученых.

Создание в 50-х годах дешевых материалов для постоянных магнитов - ферритов, обладающих высокой стабильностью параметров и большой удельной энергией, послужило основанием начала разработки для транспорта магнитной подвески с постоянными магнитами (ПМП). К основному преимуществу ПМП следует отнести отсутствие энергозатрат на левитацию (создание подъемной силы). Это определяет относительную простоту конструкции и высокую надежность такого способа подвешивания экипажа. Разработке систем ПМП посвящены работы В.В. Базилевского, В.В. Козорева, И.В. Литвиновой, Н.М. Новогренко, А.М. Примина, О.В. Тозони, Е.М. Фришмана и других ученых.

В имеющихся публикациях не рассмотрены вопросы, решение которых соответствует цели диссертационной работы и составляет ее основное содержание.

Второй раздел посвящен анализу взаимодействия подвижного состава и пути при использовании подвешивания с постоянными магнитами. Методика расчета сил взаимодействия магнитных систем пути и экипажа основана на применении метода эквивалентного соленоида, рассмотренного в работах Ю.М. Пятиня, и метода зеркального отображения, изложенного в трудах К. Бинса и П. Лауренсона. Использование указанных методов позволило заменить постоянные магниты эквивалентной системой электропроводящих шин с линейной плотностью тока равной намагниченности материала магнитов - J (рис. I).

Анализ различных способов компоновки постоянных магнитов пути и экипажа по схемам эквивалентной замены с учетом того, что между параллельными шинами с одинаковым направлением тока действует сила притяжения, а между шинами с противоположным направле-

ДНУЖТ

нием тока действует сила отталкивания, показывает, что установка магнитов с чередующейся полярностью рабочих полюсных граней на плоские магнитопроводы (рис.1в) позволяет увеличить удельную подъемную силу на единицу веса материала магнитов в два раза по сравнению с системой без магнитопроводов с чередующейся полярностью (рис.1б) и в четыре раза по сравнению с системой без чередования полюсов магнитов (рис.1а). Выражения для расчета индукции магнитного поля и сил взаимодействия постоянных магнитов экипажа и пути получены на основании законов Био-Савара-Лапласа и Ампера и приведены в диссертации.

Анализ зависимостей сил взаимодействия магнитов системы подвешивания горизонтального типа (ПМПГ, рис.1) в широких диапазонах поперечных перемещений экипажа показал возможность создания новой системы подвешивания вертикального типа (ПМПВ, рис.2), использующей силы притяжения постоянных магнитов. Рабочие полюсные грани магнитов ПМПВ расположены в вертикальных продольных плоскостях и при их поперечном вертикальном сдвиге, в определенном диапазоне смещений, на экипаж действует подъемная сила F_z , равная сумме сил F_{z1} и F_{z2} , препятствующих сдвигу магнитов. В поперечном горизонтальном направлении на систему стабилизации экипажа, которая поддерживает постоянную величину зазора δ с точностью Δ в магнитной системе ПМПВ, действует боковая сила F_x , равная разности сил притяжения F_{x1} и F_{x2} правой и левой частей ПМПВ. Зависимость подъемной F_z и боковой F_x сил ПМПВ от величины относительного вертикального смещения δ магнитов пути и экипажа показана на рис.3.

В отличие от систем ПМПГ в системе ПМПВ воздушный зазор остается практически постоянным при вертикальных перемещениях экипажа, поэтому в ПМПВ допустим существенно меньший воздушный зазор между рабочими плоскостями магнитов пути и экипажа. Это позволяет получить при одинаковых затратах магнитного материала большую грузоподъемность ПМПВ по сравнению с ПМПГ. Конструкция ПМПВ позволяет достигать высокую точность поперечной механической стабилизации, что для системы ПМП является главным фактором, определяющим величину пондеромоторных сил магнитного поля, действующих на систему стабилизации экипажа.

Для расчета сил взаимодействия тележек экипажа и пути с ПМПВ при продольном перекосе магнитных полюсов тележки и пути применена расчетная схема, изображенная на рис. 4. Силы, действующие на тележку в ζ -ом сечении, определяются следующим соотношением:

ДНЭЖТ

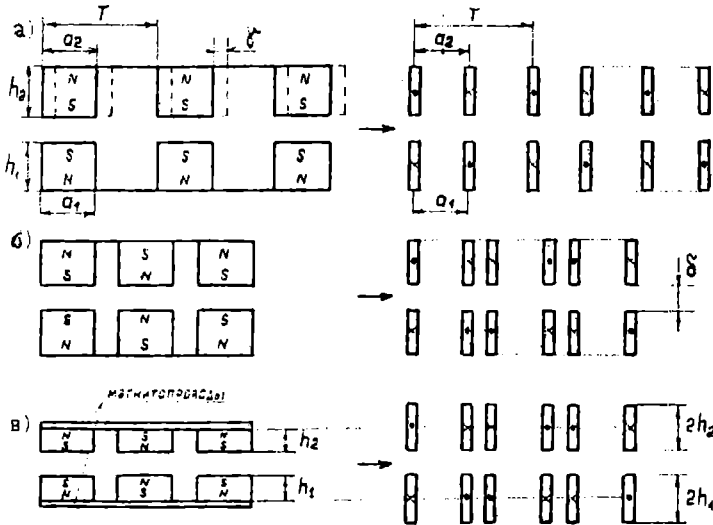


Рис. 1. Поперечные сечения магнитных систем ПМПГ и соответствующие им схемы эквивалентной замены. □ - шина с током, ▣ - шины с током противоположного направления.

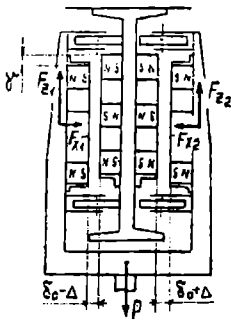


Рис. 2. Магнитная подвеска вертикального типа (ПМПВ)

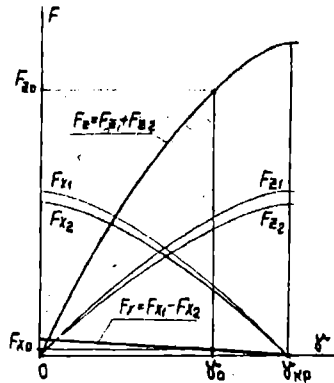


Рис. 3. Зависимость подъемной $-F_z$ и боковой $-F_x$ сил ПМПВ от вертикального смещения δ магнитов экипажа и пути.

НТБ
ДНУЖТ

$$F_z(x)_i = F_{z(x)} \left(\delta_i = -2 - (l+0.5) \frac{l}{2z} d + \eta (y_i = y + (i-0.5) \frac{l}{2z}) \right), \quad (I)$$

где $F_z(x)$ - погонная подъемная (поперечная) сила взаимодействия магнитных систем тележки и пути без их продольного перекося; l - длина магнитных полюсов тележки в продольном направлении; d - угол продольного перекося магнитных полюсов тележки и пути; z, y - вертикальная и продольная координаты центра тяжести тележки; η - текущая координата вертикальной неровности магнитных полюсов пути; $2z$ - число сечений тележки.

В соответствии с приведенной схемой в диссертации получены формулы для расчета обобщенных сил, действующих на тележки экипажа, движущегося по пути с произвольными вертикальными неровностями магнитных полюсов, в том числе и по участкам пути с вертикальными уступами и зазорами магнитных полюсов в стыках пролетов.

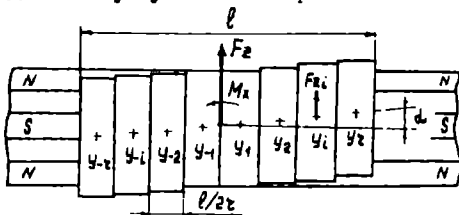


Рис.4. Схема для расчета сил взаимодействия тележки и пути с ПМПВ при их перекося в вертикальной продольной плоскости

Постоянные магниты ПМП работают при сильных размагничивающих полях, действующих между магнитами пути и экипажа. Проверка обратимости процессов перемагничивания магнитов по средним значениям напряженности внешнего и собственного полей магнитов не может гарантировать обратимости процессов их перемагничивания из-за существенного различия характеристик поля отдельных областей магнитов. Это обстоятельство потребовало разработки уточненной методики проверки обратимости процессов перемагничивания в ПМП. Методика, приведенная в диссертации, позволяет определить особые точки в сечении магнитных полюсов с максимальной напряженностью собственного и внешнего размагничивающих полей. По анализу состояния магнитов в особых точках производится проверка обратимости процессов их перемагничивания.

В данном разделе приведена также методика расчета параметров магнитопроводов ПМП минимального веса, работающих до насыщения.

Третий раздел посвящен определению рациональных параметров магнитных систем пути и экипажа с ПМП. При поиске рациональных размеров ПМП выбраны следующие показатели качества:

1. Отношение номинальной подъемной силы к среднему весу магнитной системы пути и экипажа - F_p ;

2. Отношение номинальной подъемной силы к боковой силе, действующей на систему поперечной стабилизации экипажа - F_F .

Магнитный подвес тем лучше, чем выше значения F_p и F_F .

Полученные во второй главе диссертации выражения для расчета силовых характеристик ПМП позволили выразить выбранные показатели качества через варьируемые размеры $\bar{S} = (a_1, a_2, h_1, h_2, T)$, где h_1, h_2, a_1, a_2 - высота и ширина прямоугольного сечения магнитов пути и экипажа, T - шаг магнитных полюсов в поперечном направлении. При этом для всех рассмотренных вариантов ПМП заданы одинаковый материал постоянных магнитов - I6БАI90, а также исходные параметры магнитной системы и системы поперечной стабилизации δ, δ' и Δ (рис.1,2), которые могут быть реально достигнуты в конструкции транспортной системы. На варьируемые параметры \bar{S} наложены ограничения физической реализуемости и обратимости процессов перемагничивания магнитов.

В данной постановке поиск рациональных параметров \bar{S}^* , обеспечивающих максимум показателей качества F_p и F_F и удовлетворяющих заданным ограничениям, представляет задачу многокритериальной нелинейной оптимизации. Решение задачи получено методом случайного поиска с самообучением, развитым в работах Кагана Б.М. и Даниленко С.Е. В результате решения получены параметры \bar{S}^* , оптимальные по Парето, которые приводятся в диссертации для каждого из рассмотренных вариантов ПМП. На рис.5 представлены области достижимых значений показателей качества основных вариантов ПМПГ и ПМПВ, границы которых построены по значениям $F_p(\bar{S}^*)$ и $F_F(\bar{S}^*)$.

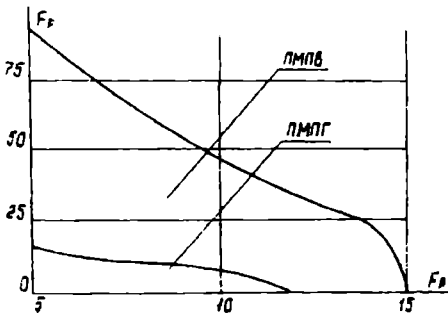


Рис.5. Области достижимых показателей качества основных вариантов ПМП

Анализ вариантов ПМП по предельным значениям показателей качества подтвердил целесообразность применения в подвеске магнито-

ДНУЖТ

проводов и перспективность разработки ПМПВ. На основании данных расчетов выбраны рациональные размеры ПМПВ пути и подвижного состава, разработанных СКБ "Транспрогресс".

Четвертый раздел диссертации посвящен исследованию динамических качеств подвижного состава на ПМПВ. Проектирование такой системы требует решения ряда принципиальных вопросов, касающихся выбора конструкции и параметров экипажа и пути, а также качества изготовления устройств магнитного подвешивания. На пути эстакадного типа в стыках пролетов необходимы зазоры для температурной компенсации и возможны вертикальные уступы магнитных полюсов, а также отсутствие части магнитов. Эти изолированные неоднородности уменьшают подъемную силу и могут приводить к ударам ограничителей вертикальных перемещений тележек экипажа о путь. При движении экипажа по пути эстакадного типа возможно возникновение вынужденных колебаний, также способных привести к нарушению безопасности движения.

Для оценки динамических качеств экипажа с ПМПВ составлена система нелинейных дифференциальных уравнений 8-го порядка, описывающая свободные и вынужденные колебания подпрыгивания и галопирования движущегося по пути с постоянной скоростью грузового экипажа, включающего две тележки и подвешенный к ним кузов. Для описания обобщенных сил взаимодействия тележек экипажа и пути использованы формулы, полученные во втором разделе диссертации. Для сокращения машинного времени при численном интегрировании на ЭВМ полученной системы нелинейных дифференциальных уравнений аналитические зависимости погонных подъемной F_z и боковой F_x сил от смещения δ аппроксимированы следующими выражениями:

$$F_{zA} = A \cdot \delta \cdot (2\delta_{кр} - \delta), \quad (2)$$

$$F_{xA} = 2A \cdot \delta \cdot (\delta_{кр} - \delta), \quad (3)$$

где $\delta_{кр}$ – величина относительного смещения, при котором равна нулю частная производная подъемной силы по величине вертикального смещения δ (см. рис.3); A – коэффициент, подсчитанный методом наименьших квадратов по полученным в диссертации формулам.

Каждая тележка экипажа создает на пути распределенную вертикальную нагрузку по всей длине своих магнитов. Из расчетов движения экипажа по пути, имеющем неровности типа ступеньки и зазора магнитных полюсов в стыках пролетов, получено, что в этих режимах вертикальное ускорение центра тяжести кузова не превышает 1 м/с^2

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ

при точности в стыках пролетов, обеспечиваемой с помощью технических средств намагничивания и контроля магнитной системы пути, созданных в СКБ "Транспрогресс". Малая величина динамических добавок вертикальных нагрузок на путь в стыках, а также одновременное движение по пролету пути до десяти сцепленных грузовых экипажей, позволяют рассматривать такой состав, движущийся с постоянной скоростью по прямому пути, как распределенную нагрузку, равную весу экипажа на единицу длины. Анализ поперечных колебаний пролетного строения при движении по нему распределенной нагрузки с применением решений, полученных в работах С.П.Тимошенко, а также результаты экспериментальных исследований переходных процессов поперечных вертикальных колебаний балок пролетов опытной системы, позволили заключить, что прогиб пролетного строения носит квазистатический характер в диапазоне скоростей движения подвижного состава до 30 м/с. В этом случае представляет интерес исследование вынужденных колебаний экипажа, находящегося в середине состава, для которого неровность пути может быть описана следующими выражениями:

$$z = -f \sin\left(\frac{\pi}{\ell_n} \cdot (y - \ell_n \cdot \left[\frac{y}{\ell_n}\right])\right),$$

$$d_n = -\frac{f\pi}{\ell_n} \cos\left(\frac{\pi}{\ell_n} \cdot (y - \ell_n \cdot \left[\frac{y}{\ell_n}\right])\right),$$

где f - статический прогиб середины пролета длиной ℓ_n , $\left[\frac{y}{\ell_n}\right]$ - целая часть отношения, d_n - уклон магнитных полюсов пути от прогиба пролетного строения.

Для всех рассмотренных выше случаев движения экипажа рассчитаны предельные значения высоты ступеньки и зазора магнитных полюсов пути в стыках и скорости движения, при которых экипаж движется без ударов о путь. Основные результаты расчетов сведены в таблице I.

Установлено, что рассмотренный грузовой экипаж без дополнительной механической ступени подвешивания между кузовом и тележками, может двигаться без ударов о путь со скоростью до 25 м/с, которая ниже критической скорости. Это объясняется малой диссипационной энергией в данной механической системе. В диапазоне скоростей до 20 м/с вертикальные перемещения в основном определяются дефектами магнитной системы пути в местах зазоров и уступов магнитных полюсов.

Пятый раздел диссертации посвящен сопоставлению результатов расчетов по разработанным в диссертации методикам и математическим моделям с данными экспериментальных исследований силового

* Расчетные значения параметров соответствуют проекту созданной СКБ "Транспрогресс" опытной грузовой транспортной системы.

Таблица I

Основные результаты расчетов динамических качеств
грузового экипажа с ПМП

Скорость движения экипажа, м/с	Масса кузова, кг	Максимально допустимый зазор магнитных полюсов в стыке пролетов, мм	Максимально допустимая ступенька магнитных полюсов в стыке пролетов, мм	Минимальное расстояние от ограничителей вертикальных перемещений тележек экипажа до пути при движении по эстакадному пути с поперечной жесткостью пролетного строения $EI=6,4 \cdot 10^6 \text{ Нм}^2$ ($f=6 \text{ мм}$, $l_n=10 \text{ м}$), мм
3	230	40	9	10,5
5		60	5	10,4
10		120	5	10,3
20		240	5	9,1
30		360	5	5,2
3	280	20	4	7,1
5		20	3	6,8
10		40	3	6,5
20		120	3	3,5
22		120	3	0

взаимодействия подвижного состава пути.

Измерения силовых статических характеристик тележек экипажа проводились на специальных стендах, на которых было реализовано три варианта ПМПТ и шесть вариантов ПМПВ, отличающихся как размерами магнитной системы, так и материалом основания для постоянных магнитов. Размеры магнитных систем силовых модулей, проходящих испытания, выбирались по результатам оптимизации размеров системы подвешивания, полученным в диссертации. Для каждого варианта проводились измерения зависимости подъемной и боковой сил взаимодействия подвижной и неподвижной частей системы подвешивания от воздушного зазора δ и относительного смещения γ .

Сопоставление теоретических и экспериментальных данных показало целесообразность учета в расчетах силы притяжения магнитов одной части подвески к магнитопроводу другой части. В этом случае расхождение теоретических и экспериментальных данных не превышает 5%, что можно отнести за счет инструментальной погрешности экспериментов и разброса параметров материала постоянных магнитов, оговоренного в технических условиях.

Магнитная подвеска вертикального типа имеет нелинейную зависимость подъемной силы от величины относительного смещения γ магнитов пути и экипажа. Поэтому для анализа динамических качеств грузового экипажа на ПМПВ без второй ступени подвешивания представляет интерес зависимость частоты ν собственных малых колебаний тележки массой m с ПМПВ, к которой подвешен на жесткой тяге груз массой M . Экспериментально такая зависимость получена после обработки переходных процессов колебаний тележки с различным грузом. Аналитическая зависимость $\nu(M+m)$, полученная с использованием формулы (2) аппроксимирующей зависимость погонной подъемной силы тележки имеет следующий вид:

$$\nu(M+m) = \sqrt{\frac{2 \cdot A \cdot (\gamma_{кр} - \gamma)}{M+m}}. \quad (4)$$

Относительная погрешность значений собственных частот, полученных в эксперименте и рассчитанных по формуле (4) не превышает 7%. Частота собственных колебаний тележки созданного опытного экипажа без груза равна 11 Гц, а тележки с грузом, равным половине веса кузова с номинальной загрузкой, составляет 3,5 Гц, при отсутствии продольного перекоса магнитных полюсов тележки и пути.

С целью всесторонней проверки результатов расчетов и решения принципиальных вопросов создания грузовых транспортных систем с подвижным составом на магнитной подвеске вертикального типа в

ДНУЖТ

1982-1983 годах создана опытная транспортная система с длиной пути 168 м и составом массой 4 т. Для привода состава использован многоиндукторный линейный асинхронный двигатель.

В ходе испытаний установлено, что деформация пролетов пути при движении состава со скоростью до 2,3 м/с носит квазистатический характер, при этом максимальный прогиб середины балки пролета равен статическому и не превышает 4,4 мм.

Амплитуды подпрыгивания и галопирования тележек состава измерялись на тележках первого и пятого экипажей при движении состава в прямом и обратном направлениях со скоростями 1,6-2,3 м/с. В таблице 2 сведены экспериментальные и расчетные параметры опытного подвижного состава.

Таблица 2

Основные параметры опытного подвижного состава

Показатель, ед. изм.	Расчетное значение	Эксперимент
Отношение подъемной силы к весу магнитной системы экипажа	15	17
Отношение веса экипажа к нагрузке на систему механической стабилизации	22	30
Основное сопротивление движению (при $v = 2,1$ м/с), Н/кН	0,7	0,5
Удельные энергозатраты, кВтч/ткм	0,03	0,02
Коэффициент динамических добавок вертикальных нагрузок в центре тяжести тележки экипажа (при $v = 2,1$ м/с)		
на стыке с зазором 20 мм	0,04	0,03
на стыке со ступенькой ± 4 мм	0,045	0,04
на участке пути, намагниченном по технологии СКБ "Транспрогресс"	0,03	0,03
на участке пути с магнитами, намагниченными до сборки магнитной системы	-	0,06

Шестой раздел посвящен экономической оценке целесообразности использования ПМПВ и линейного электропривода в кольцевых транспортных системах с подвижным составом большой длины - конвейерным поездом - предназначенным для перевозки сыпучих грузов.

В приложении к диссертации изложена методика расчета приведенных затрат системы КТМП (Кольцевая транспортная система с магнитной подвеской). На рис.6 приведен график, определяющий область эффективного взаимодействия систем КТМП с конкурирующими видами

транспорта - автомобильным и конвейерным транспортом, железной дорогой и подвесной канатной дорогой.

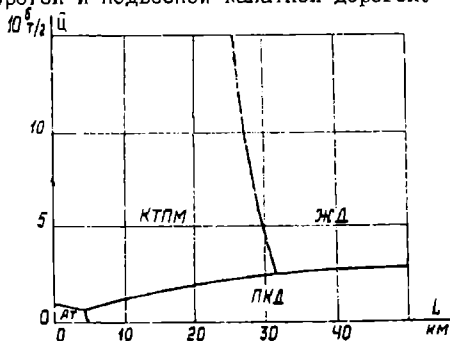


Рис.6. Область эффективного использования кольцевых транспортных систем с ПМПВ и линейным электроприводом на перевозках сыпучих грузов ($\rho = 1,6 \text{ Т/м}^3$, фракции 60 мм).

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Выполнен анализ способов магнитного подвешивания экипажей, который показал целесообразность применения в грузовом подвижном составе системы подвешивания на постоянных магнитах (ПМП) с механической системой поперечной стабилизации.

2. Разработана методика расчета силового взаимодействия постоянных магнитов, установленных на магнитопроводящее основание. С использованием данной методики выбраны рациональные варианты конструкций ПМП и предложена новая, более эффективная система подвешивания, использующая силы притяжения постоянных магнитов ПМПВ. Основные технические решения по системе ПМПВ защищены авторскими свидетельствами СССР и патентуются в промышленно развитых странах.

3. Составлены методика расчета параметров магнитопроводов минимального веса и методика проверки обратимости процессов перемагничивания постоянных магнитов, позволяющая произвести правильный выбор параметров магнитной системы и исключить размагничивание ПМП при эксплуатации в заданном температурном интервале работы пути и подвижного состава.

4. Сформулирована и решена задача многокритериальной оптимизации размеров магнитной системы ПМП. С учетом реальной технологии изготовления магнитной системы и ограничений, наложенных на варьируемые параметры и исключающие размагничивание ПМП, получены рациональные размеры магнитных систем для трех конструкций систем подвешивания. Показано, что увеличение подъемной силы на единицу веса магнитов путем изменения размеров магнитной системы приводит к возрастанию нагрузки на систему стабилизации.

8521em

ДНУЖТ

5. Использование ПМПВ с рациональными размерами и с магнитами марки 16БА190 позволило создать подвижной состав с удельной грузоподъемностью на единицу веса магнитной системы экипажа равной 17/1 и с нагрузкой на систему механической поперечной стабилизации, не превышающей 4% веса экипажа.

6. Исследования динамики экипажа показали, что экипаж с ПМПВ без второй ступени механического подвешивания кузова к тележкам может развивать скорость на прямом пути эстакадного типа до 25м/с при длине пролетов 10 м. Дальнейшее увеличение скорости рассмотренного экипажа возможно путем увеличения длины пролетов без увеличения статического прогиба середины пролета при максимальной нагрузке от веса экипажа.

7. Работоспособность подвижного состава с ПМП в существенной мере определяется качеством изготовления магнитной системы пути. Движение экипажа без ударов о путь возможно при наличии в стыках пролетов зазоров до 40 мм и вертикальных уступов полюсов до 4 мм.

Основное содержание диссертации опубликовано в работах:

1. Александров А.М., Фришман Е.М., Искандеров А.А. К расчету магнитопроводов в системах магнитного подвеса. - Изв. вузов. Электромеханика, 1984, 12, с.102-103.

2. Искандеров А.А. Расчет предельных показателей качества подвески на постоянных магнитах транспортных систем. Тез. докл. Всесоюзн. конф. СПЕЦТРАНС-85. - М. 1985, с.180.

3. Искандеров А.А., Фришман Е.М. Определение сил взаимодействия магнитов с прямоугольным сечением методом эквивалентного соленоида. - Изв. вузов. Электромеханика, 1985, №1, с.85-88.

4. Коротенко М.Л., Искандеров А.А. К исследованию динамики экипажа с подвеской на постоянных магнитах (ПМП). Тез. докл. Всесоюзн. конф. СПЕЦТРАНС-85. - М. 1985, с.112.

5. Об исследовании работоспособности и устойчивости устройства промышленного транспорта на магнитном подвесе. / Фришман Е.М., Старовойтов В.С., Искандеров А.А. и др. Тез. докл. XIУ конф. кафедр БелИИЖТа и ДорНТО Белорусской ж.-д., Гомель, 1979, с.47-48.

6. Пути повышения надежности работы системы поперечной стабилизации вагонов бесконтактного транспорта. / Фришман Е.М., Старовойтов В.С., Искандеров А.А. и др. / В сб. Совершенствование организации и ремонта вагонов и их технического обслуживания. Гомель, БелИИЖТ, 1983, с.53-65.

7. А.с. 788578 (СССР). Устройство механической стабилизации

НИИ
ДМУЖТ

экипажа на магнитной подвеске. /А.М.Александров, Е.Г.Васильев, А.А.Искандеров и др. -1980.

8. А.с.794948 (СССР). Магнитная подвеска транспортного средства /А.М.Александров, Е.Г.Васильев, А.А.Искандеров и др. -1980.

9. А.с.807557 (СССР). Магнитная подвеска транспортного средства. /А.М.Александров, Е.Г.Васильев, А.А.Искандеров и др. -1980.

10. А.с.1023736 (СССР). Магнитная подвеска транспортного средства. /А.М.Александров, А.А.Искандеров, Э.Р.Авшаров и др. -1984.

11. А.с.1099515 (СССР). Путевое полотно для транспортного средства на магнитной подвеске. /А.А.Искандеров, Е.Г.Васильев, Э.Р.Авшаров и др. -1984.

12. А.с.1146932 (СССР). Устройство механической стабилизации экипажа на магнитной подвеске. /А.М.Александров, А.А.Искандеров, Е.Г.Васильев и др. -1984.

13. А.с.1190821 (СССР). Устройство для намагничивания. /А.А.Искандеров, Е.Г.Васильев, Э.Р.Авшаров и др. -1985.

14. А.с.1225172 (СССР). Магнитная подвеска транспортного средства. /А.М.Александров, А.А.Искандеров, Е.Г.Васильев и др. -1985.

Соискатель:



Искандеров Александр Азизович

Применение подвески на постоянных магнитах для
грузового подвижного состава

05.22.07 - подвижной состав железных дорог и тяга поездов

05.22.12 - промышленный транспорт.

Подписано к печати 9.03.87.

Формат 60x84 1/16. Бумага для множительных аппаратов. Усл. печ. л. 1,0.

Уч.-изд. л. 1,0. Тираж 100 экз. Зак. 1. Бесплатно.

Участок оперативной полиграфии ДИИТа

320700, ГСП, Днепропетровск, 10, ул. Акад. В.А. Лазаряна, 2