

На правах рукописи



Митраков Артем Сергеевич

**ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ СИСТЕМЫ ПРИНУДИТЕЛЬНОГО
НАКЛОНА КУЗОВОВ ВАГОНОВ**

05.22.07 – Подвижной состав железных дорог,
тяга поездов и электрификация (технические науки)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Екатеринбург – 2020

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Уральский государственный университет путей сообщения» (ФГБОУ ВО УрГУПС)

Научный руководитель – доктор технических наук, профессор
Лапшин Василий Федорович

Официальные оппоненты:

Петров Геннадий Иванович, доктор технических наук, профессор, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Российский университет транспорта» РУТ (МИИТ), заведующий кафедрой «Вагоны и вагонное хозяйство»;

Гончаров Дмитрий Игоревич, кандидат технических наук, акционерное общество научная организация «Тверской институт вагоностроения», заведующий лабораторией «Кузова, внутреннее оборудование пассажирских вагонов и САПР».

Ведущая организация: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I» (ФГБОУ ВО ПГУПС).

Защита состоится «26» февраля 2020 г. в 11 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д 218.013.01 на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уральский государственный университет путей сообщения» по адресу: 620034, г. Екатеринбург, ул. Колмогорова, д. 66, ауд. Б2-15 – зал диссертационных советов.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уральский государственный университет путей сообщения». Адрес сайта, на котором размещена диссертация и автореферат: <http://www.usurt.ru>.

Автореферат разослан «29» декабря 2020 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета

Тимухина Елена Николаевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. В соответствии со стратегией развития железнодорожного транспорта до 2030 г. наиболее актуальными задачами развития пассажирского железнодорожного транспорта являются повышение скоростей движения и комфорта, снижение времени нахождения пассажиров в пути, в том числе при региональных перевозках на существующих магистралях.

Применение подвижного состава с увеличенной конструкционной скоростью на существующих линиях практически не оказывает влияния на средние скорости движения на участках с большим количеством кривых. Большинство магистралей спроектированы без учета организации скоростного и высокоскоростного движения, а состояние железнодорожного полотна является препятствием для повышения скоростей движения пассажирского подвижного состава.

Анализ мирового опыта организации современного пассажирского железнодорожного сообщения на существующих железнодорожных магистралях показал, что повышение средних скоростей движения и сокращение времени в пути достигается за счет применения подвижного состава с системами принудительного наклона кузовов. Система должна обеспечивать повышение скорости прохождения криволинейных участков пути при обеспечении безопасности и комфорта перевозки пассажиров. Указанные требования напрямую зависят от конструктивных решений и параметров системы принудительного наклона кузовов вагонов в кривых участках пути. Разработка и создание подвижного состава подобного типа является новым направлением для отечественного машиностроения. В связи с этим решение задачи выбора рациональных параметров системы принудительного наклона кузовов вагонов является **актуальной**.

Объект исследования. Вагоны, оборудованные системой принудительного наклона кузова.

Область исследования. Совершенствование подвижного состава, улучшение его эксплуатационных качеств. Оценка динамических качеств подвижного состава. Взаимодействие подвижного состава и пути.

Степень разработанности темы. Исследования в области оценки влияния параметров системы наклона на ее эффективность в кривых участках пути неразрывно связаны с вопросами динамики подвижного состава. Значительный вклад в развитие знаний о динамике и безопасности движения подвижного состава внесли следующие ученые: Жуковский Н. Е., Лазарян В. А., Львов А. А., Грачева Л. О., Блохин Е. П., Манашкин Л. А., Вершинский С. В., Вериго М.Ф., Никольский Л. Н., Камаев А. А., Челноков И. И., Соколов М. М., Кеглин Б. Г., Болдырев А. П., Погорелов Д. Ю., Кобищанов В. В., Михальченко Г. С., Селинов В. И., Хохлов А. А., Хусидов В. Д., Котуранов В. Н., Савоськин А. Н., Данилов В.Н., Филиппов В. Н., Ромен Ю. С., Бороненко Ю. П., Орлова А. М., Третьяков А. В., Петров Г. И., Смольянинов А. В., Павлюков А. Э., Бачурин Н. С., Колясов К.М., Буйносов А. П., Волков И. В., Галиев И. И., Николаев В. А., Мямлин С. В., Гарг В.К, Дуккипати Р. В., Iwnicki S. и др.

Исследованиями систем принудительного наклона кузова и их влиянием на пассажиров занимались следующие ученые: Förstberg J., Kufver B., Persson R.,

Turner M., Kaplan I., Бржезовский А. М. и др. Выполненные работы в основном направлены на исследование динамических качеств и комфорта пассажиров для существующего подвижного состава и не затрагивают вопросы прогнозирования этих параметров на этапе проектирования подвижного состава.

Вопросам моделирования пассажирского подвижного состава посвящены работы: Антипина Д.Я., Гончарова Д.И., Скачкова А.Н., Коршунова С.Д., Самошкина С.Л., Погорелова Д.Ю., Мямлина С.В., Михеева Г.С., Рязанова Э.М., Шорохова С.Г. и др.

Цель и задачи. Целью работы является обоснование рациональных параметров системы принудительного наклона кузовов вагонов при прохождении криволинейных участков пути в составе поезда.

Для достижения поставленной цели решались следующие **задачи**:

1. Разработка методики исследования динамических характеристик рельсового экипажа, оборудованного системой принудительного наклона кузова.
2. Разработка и верификация проблемно-ориентированной компьютерной модели движения вагонов электропоезда по реальным неровностям пути.
3. Интеграция системы наклона кузова в проблемно-ориентированную компьютерную модель движения вагонов электропоезда.
4. Разработка методики оценки комфорта пассажиров, позволяющей учитывать особенности работы системы принудительного наклона кузова.
5. Выбор рациональных параметров системы принудительного наклона кузова на основе разработанной методики.
6. Обоснование работоспособности и безопасности электропоезда, оборудованного системой принудительного наклона кузова с предложенными рациональными параметрами.

Научная новизна диссертационной работы:

- разработана методика определения параметров системы принудительного наклона кузова, основанная на численном моделировании движения вагонов с наклоняемыми кузовами в составе поезда и оценке комфорта пассажиров в поездах с использованием динамических моделей антропометрических манекенов;
- разработана проблемно-ориентированная модель движения вагона электропоезда, оборудованного системой принудительного наклона кузова с управлением опорным уровнем пневморессор, по реальным неровностям пути с учетом малых упругих деформаций кузовов;
- предложена методика оценки комфорта пассажиров с использованием антропометрических манекенов, позволяющая прогнозировать комфорт с учетом переходных процессов;
- предложена зависимость для расчета временных задержек в системе управления наклоном кузова на основе данных о предполагаемом полигоне эксплуатации, рациональных углах наклона кузова и скоростях движения поезда.

Теоретическая и практическая значимость работы:

- предложена методика выбора и обоснования параметров системы принудительного наклона кузовов вагонов на этапе проектирования подвижного состава, исходя из условия обеспечения комфорта и безопасности пассажиров;

– разработана проблемно-ориентированная компьютерная модель движения вагона электропоезда, оборудованного системой принудительного наклона кузова, по реальным неровностям пути, позволяющая прогнозировать динамические качества вагона и проводить оценку их соответствия нормативным требованиям;

– обоснована принципиальная схема наклона кузова, основанная на управлении опорным уровнем пневморессор, позволяющая учесть особенности конструкции вагонов электропоезда ЭС2Г («Ласточка»);

– установлены зависимости угла наклона кузова вагона, оборудованного системой принудительного наклона, от радиуса кривой и скорости движения;

– получены значения параметров системы принудительного наклона кузовов вагонов электропоезда ЭС2Г, обеспечивающие увеличение скорости движения в кривых участках на существующих путях железных дорог РФ до 20%;

– теоретические положения и результаты численных экспериментов, установленные зависимости угла наклона кузова вагона от радиуса кривой и скорости движения предложены для использования при разработке скоростного и высокоскоростного подвижного состава нового поколения.

Методология и методы исследований.

Поставленные задачи решены с использованием методов компьютерного моделирования динамики систем тел с использованием твердотельных и гибридных моделей. Описание упругих деформаций несущих конструкций кузовов вагонов осуществлено на основе детализированных конечноэлементных моделей. Для оценки уровня комфорта пассажиров в процессе работы системы принудительного наклона кузова в криволинейных участках пути использованы компьютерные модели антропометрических манекенов.

Положения, выносимые на защиту:

– анализ существующих систем принудительного наклона кузова в криволинейных участках пути и обоснование конструктивной схемы для отечественного подвижного состава;

– методика определения рациональных параметров системы принудительного наклона кузова вагона в криволинейных участках пути отечественных магистралей;

– проблемно-ориентированная компьютерная модель движения вагона в составе электропоезда, учитывающая упругие колебания кузова и реальные неровности пути;

– результаты верификации компьютерной модели движения вагона в составе электропоезда данными натурных ходовых испытаний;

– методика оценки уровня комфорта пассажиров с учетом их расположения в вагоне и работы системы принудительного наклона кузова в кривых;

– значения рациональных параметров системы принудительного наклона кузова вагона электропоезда ЭС2Г, полученные по результатам исследований;

– результаты анализа соответствия показателей динамики вагонов электропоезда ЭС2Г, оборудованных системой принудительного наклона кузова, требованиям нормативной документации.

Степень достоверности и апробация результатов.

Достоверность результатов подтверждается сходимостью результатов расчета с данными натурных ходовых испытаний. Расхождение результатов между теоре-

тическими и экспериментальными исследованиями при определении показателей динамики составляет не более 18,6%.

Основные результаты работы доложены на научно-технических и научно-практических конференциях: VIII Международной научно-практической конференции «Наука и образование транспорту» (СамГУПС, Самара, 2015); научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов по направлению подготовки 23.06.01 «Техника и технологии наземного транспорта» (УрГУПС, Екатеринбург, 2015, 2018); Международной научно-технической конференции «Инновационный транспорт - 2016: специализация железных дорог» (УрГУПС, Екатеринбург, 2017); IX Международном симпозиуме «Прорывные технологии электрического транспорта Элтранс-2017 (ПГУПС, Санкт-Петербург, 2017); Всероссийской научно-технической конференции «Наука и образование транспорту» (УрГУПС, Екатеринбург, 2018); научных семинарах аспирантов № 39, № 78 (УрГУПС, Екатеринбург, 2015, 2019); региональной научно-технической конференции «Транспорт Урала – 2018» (УрГУПС, Екатеринбург, 2018); научно-техническом семинаре молодых ученых УНИТ «Современные методы исследования динамики и прочности подвижного состава» (БГТУ, Брянск, 2018); заседаниях кафедры «Вагоны» (УрГУПС, Екатеринбург, 2016-2019). В целом диссертационная работа докладывалась на расширенном заседании кафедры «Вагоны» (УрГУПС, Екатеринбург, 2020).

Реализация и внедрение результатов работы. Проблемно-ориентированная компьютерная модель движения электропоезда ЭС2Г по реальным неровностям пути используется предприятием ООО «Уральские локомотивы» для оценки влияния изменений конструкции на показатели динамики подвижного состава. Результаты анализа существующих конструкций систем принудительного наклона кузова в криволинейных участках пути, методики выбора рациональных параметров системы и оценки уровня комфорта пассажиров используются кафедрой «Подвижной состав железных дорог» ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет» и кафедрой «Вагоны» ФГБОУ ВО «Уральский государственный университет путей сообщения» в учебном процессе по специальности «Подвижной состав железных дорог».

Публикации. 13 печатных работ, в том числе 3 статьи опубликованы в изданиях, входящих в «Перечень изданий, рекомендованных ВАК для публикации научных результатов диссертаций» и 2 в изданиях, входящих в международную систему цитирования Scopus.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, основных результатов и выводов, списка использованных источников, состоящего из 175 наименований. Общий объем диссертации представлен на 171 странице, основной текст содержит 166 страниц, содержит 53 рисунка и 20 таблиц и одно приложение на 5 страницах.

Автор выражает благодарность к.т.н., доценту Д.Я. Антипину за помощь в организации диссертационного исследования и подготовке рукописи.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность выбора рациональных параметров системы принудительного наклона кузовов вагонов для отечественного подвижного

состава. Сформулированы цели и задачи исследования, указаны научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, методология и методы исследований, положения, выносимые на защиту, степень достоверности результатов. Приведены сведения о реализации и апробации работы, публикациях, структуре и объеме диссертации.

В первом разделе диссертации рассмотрены основные проблемы повышения скоростей движения и обеспечения комфорта пассажиров на существующих железнодорожных линиях.

В качестве основного препятствия на пути увеличения средних скоростей выступает необходимость снижения скорости в кривых участках. Анализ поперечной динамики в кривых участках пути выявил, что ограничением на максимальную скорость в криволинейных участках пути выступает высокий уровень непогашенного ускорения, возникающий вследствие недостаточного возвышения рельса. Мировой опыт повышения средних скоростей движения на существующих линиях с большим количеством кривых показал, что наиболее эффективным методом является применение подвижного состава с технологией наклона кузова. Наклон кузова позволяет увеличить скорость прохождения кривой до 30-40%. На сегодняшний день эксплуатируются более 20 железнодорожных систем с технологией наклона кузовов подвижного состава, две из них на железных дорогах РФ. По результатам анализа выполнена классификация технологий наклона на три направления: активная, пассивная, смешанная. Выявлены их основные преимущества и недостатки.

Показано, что исходя из конструкции подвешивания наиболее целесообразным решением для вагонов электропоезда ЭС2Г, является система принудительного наклона кузова (СПНК) с использованием пневморессор в качестве активного органа. Подобная система относительно проста в реализации, обеспечивает достаточные для скоростного движения углы наклона кузова и обладает преимуществами активных систем наклона.

Наряду с указанными преимуществами СПНК возможно увеличение динамических воздействий на пассажира при ее функционировании. На практике отмечалось появление недомогания у пассажиров и развитие болезни укачивания, стимулируемого «сенсорным конфликтом» нервной системы. В результате сравнительных испытаний было выявлено укачивание до 27% пассажиров в поездах, оборудованных СПНК. Для объективной оценки комфорта необходима оценка динамических воздействий на пассажира при прохождении кривых. В соответствии с международными нормативами, для оценки воздействия на пассажиров динамических переменных в поездах, оборудованных СПНК, рекомендуется использовать «процент дискомфорта пассажиров». Данный показатель позволяет учитывать комплексное влияние на пассажиров непогашенного ускорения, скорости его изменения (рывки) и скорость наклона кузова. Анализ исследований в области прогнозирования динамических характеристик подвижного состава железных дорог, а также уровня комфорта пассажиров показал, что наиболее целесообразным методом исследования является компьютерное моделирование с подтверждением адекватности, получаемых результатов данными натурных экспериментов.

Второй раздел посвящен построению методики определения рациональных параметров системы принудительного наклона кузовов вагонов в кривых участках

пути, а также разработке и верификации проблемно-ориентированной компьютерной модели движения вагонов в составе электропоезда по реальным неровностям пути.

Выбор рациональных параметров СПНК предлагается осуществлять в несколько этапов на основе данных о динамической нагруженности подвижного состава и комфорте пассажиров, полученных в ходе компьютерного моделирования движения электропоезда. Основные этапы методики представлены на рисунке 1.



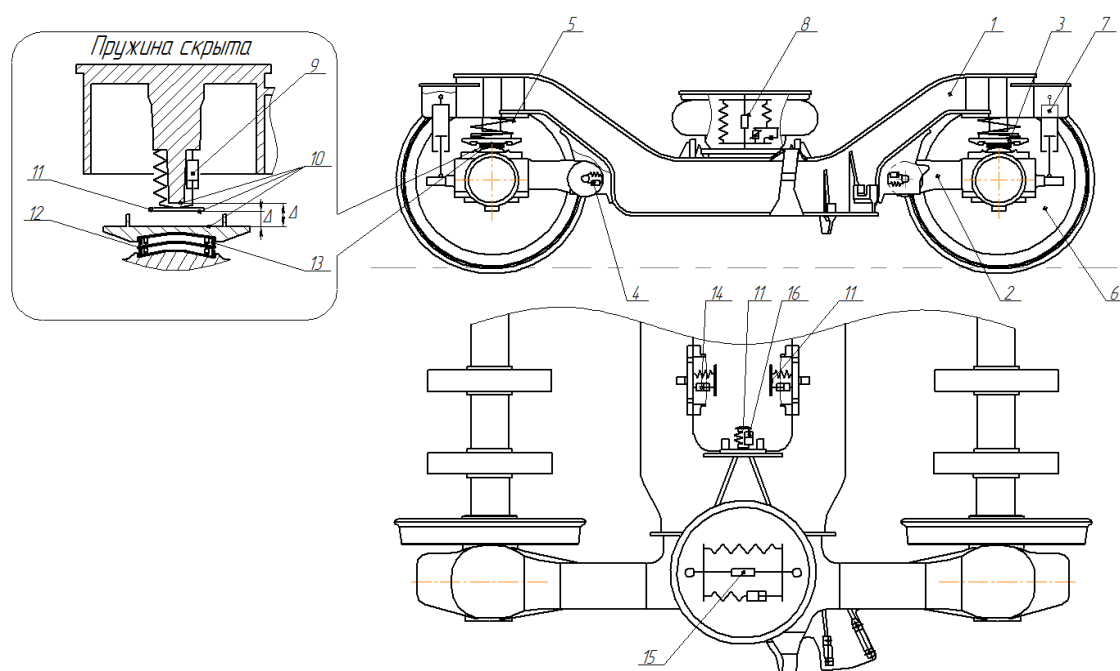
Рисунок 1 – Этапы выбора рациональных параметров СПНК

На первом этапе выбирается объект исследования, разрабатывается его детализированная проблемно-ориентированная компьютерная модель движения. По результатам моделирования выполняется верификация полученных результатов данными ходовых динамических испытаний. При получении результатов, не удовлетворяющих данным натурных испытаний, в модель вносятся соответствующие корректировки и этапы моделирования повторяются. На следующем этапе производится выбор и обоснование принципиальной схемы наклона кузова, необходимые элементы интегрируются в верифицированную модель движения вагона. На основе анализа выбранной схемы наклона определяются основные параметры системы наклона. Далее разрабатывается методика определения дополнительных динамических воздействий на пассажиров при работе системы наклона кузова и уровня комфорта, обосновываются критерии оценки. На заключительном этапе на основе многовариантных расчетов определяются рациональные параметры системы наклона кузова и дается оценка работоспособности СПНК.

Компьютерная модель движения вагонов электропоезда разработана в программной среде моделирования динамики и кинематики систем тел «Универсаль-

ный механизм» (UM). Модель сформирована методом подсистем, и включает в себя пять подсистем первого уровня (две подсистемы «головной вагон», две подсистемы «прицепной вагон с токоприемником» и подсистема «прицепной вагон с тяговым оборудованием»). Подсистемы первого уровня получены комбинацией подсистем второго уровня, описывающих свойства кузовов вагонов и экипажной части. Подсистемы «тележка» состоят из абсолютно твердых тел и подсистем низшего уровня: «колесная пара» и составных объектов третьего уровня – «листовая рессора», «гидродемпферы». Подсистемы третьего уровня параметризованы и используются для моделирования типовых элементов путем корректировки характеристик. Для формирования состава электропоезда использовались подсистемы второго уровня «цепное устройство».

На рисунке 2 приведена структурная схема подсистемы «тележка».



- 1 – рама, 2 – буксовый узел, 3 – чаша пружины; 4 – упруго-диссипативный элемент типа «сайлент-блок» связи букса-рама; 5 – пружина, 6 – подсистема «колесная пара», 7 – упруго-диссипативная модель гидродемпфера; 8, 15 – модель пневморессоры; 9 – упруго-диссипативная модель упругого упора первой ступени подвешивания; 10 – поверхности контакта; 11 – фиктивное тело; 12, 13 – элементы модели листовой рессоры; 14, 16 – упруго-диссипативная модель продольных и поперечных упоров тележки.

Рисунок 2 – Структурная схема подсистемы «тележка» (немоторная)

Общее количество абсолютно твердых тел в подсистеме «тележка» составляет 25 для немоторной, и 31 – для моторной, количество упруго-диссипативных и специальных силовых элементов составляет 34 и 42 соответственно.

Подсистемы первого уровня, описывающие кузова вагонов, представлялись абсолютно-твёрдыми телами с реальными инерционными характеристиками. Для повышения точности прогнозирования движения подвижного состава, подсистемы кузовов вагонов для которых производились измерения показателей динамики, представлялись в виде конечно-элементных моделей, позволяющих учесть малые упругие деформации кузова. Конечно-элементные модели кузовов вагонов разрабатывались в среде программного комплекса трехмерного проектирования Siemens

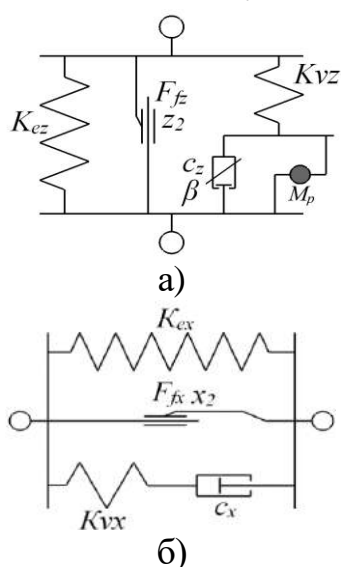
NX Advanced Simulation. Для описания несущих частей конструкции использовались трех- и четырех узловые оболочечные элементы, с пятью степенями свободы. Навесное и внутреннее оборудование вагона моделировалось путем расположения в центрах тяжести специальных элементов, позволяющих присвоить массово-инерционные характеристики узловой точке. Связь с кузовом осуществлялась с использованием невесомых стержневых элементов интерполяционного типа. Общее количество элементов модели моторного головного вагона составляет 47641, для промежуточного вагона с токоприемником – 43283, для промежуточного с тяговым оборудованием – 43135. Общее количество степеней свободы составляет 194451, 178011 и 177987 соответственно. Включение конечно-элементной модели в состав модели движения вагонов производилось с использованием модуля UMFEM программного комплекса UM.

С учетом действия внешних сил и диссипации уравнение движения упругой подсистемы имеет следующий вид:

$$M\ddot{q} + k = f_g + f_a - C\dot{q} - D\dot{q}, \quad (1)$$

где M , D , C – постоянные, симметричные матрицы масс, внутреннего демпфирования и жесткости соответственно; q – обобщенные координаты механической системы; k – вектор столбец обобщенных сил инерции; f_a – вектор-столбец обобщенных сил от приложенных нагрузок; f_g – вектор-столбец обобщенных сил реакций.

Связь подсистем «тележка» с подсистемой «кузов» осуществлена через элементы второй ступени подвешивания, включающие пневматические рессоры, торсионной системы стабилизации, шкворневой узел, наклонные гасители колебаний. На основе анализа современных математических моделей, описывающих работу пневматических рессор, в качестве рациональной была принята модель Gensys (рис. 3), способная описывать работу рессоры в вертикальной и горизонтальной плоскостях, а также учитывать массу M_p и инерцию воздуха в воздухопроводе.



а) – в вертикальном направлении;
б) – в горизонтальном направлении.

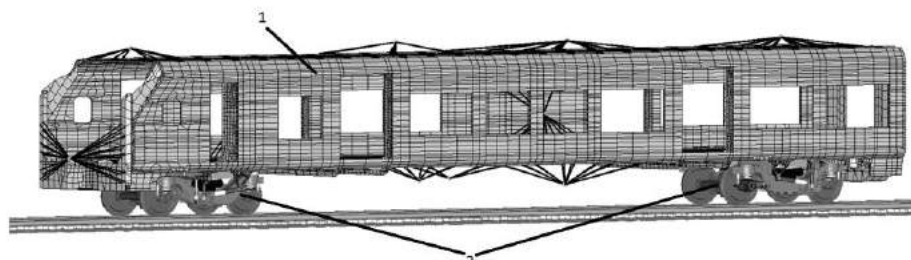
Рисунок 3 – Модель пневматической рессоры Gensys

Математическая модель рессоры включает три самостоятельных части, установленных параллельно и учитывающих действие упругих сил, сил трения и вязкого сопротивления. Упругие силы характеризуются жесткостью K_{ex} , K_{ez} и описывают поведение пневморессоры без учета частоты колебаний и рассеивания энергии. Введение сил трения $F_{fx, max}$, $F_{fz, max}$ позволяет учесть рассеивание энергии в пневморессоре с учетом диссипации, описываемой параметрами x_2 , z_2 .

Вязкие силы описывают изменение жесткости пневморессоры от частоты нагружения, для этого дополнительная жесткость K_{vx} , K_{vz} последовательно соединена с нелинейным гасителем колебаний с параметрами c_x , c_z , β .

Описание математической модели пневморессоры осуществлено в среде имитационного

моделирования Matlab/Simulink. Интеграция модели с механической частью тележки осуществлялась с использованием модуля UM Control программного комплекса UM. На рисунке 4, в качестве примера, показана компьютерная модель подсистемы «Головной вагон» с упругим кузовом.



1 – упругая подсистема «Кузов моторного вагона»;
2 – твердотельные подсистемы «Моторная тележка»
Рисунок 4 – Подсистема «Головной вагон»

Решение динамической задачи в программном комплексе UM сводилось к интегрированию уравнения вида:

$$\begin{cases} M(q, t)\ddot{q} + k(q, \dot{q}, t) = Q(q, \dot{q}, t) + G^T(q)\lambda, \\ h(q, p) = 0, \end{cases} \quad (2)$$

где q – основные координаты (глобальные координаты); p – вспомогательные координаты (локальные координаты в разрезанных шарнирах); k, Q – столбцы сил инерции и обобщенных сил; λ – множители Лагранжа, соответствующие силам реакций в разрезанных шарнирах; G – матрица Якоби уравнений связей после исключения из них вспомогательных координат; $h(q, p)$ – алгебраические уравнения связей или условия замыкания разрезанных шарниров.

Верификация модели осуществлялась путем сравнения динамических показателей, полученных в ходе моделирования, с данными натурных ходовых испытаний электропоезда ЭС2Г. Исследование показателей ходовой динамики электропоезда осуществлялось для следующих типовых режимов эксплуатации: движение по прямому участку пути со скоростями от 20 до 176 км/ч; в кривой радиусом 625 м со скоростями от 20 до 120 км/ч; в кривой радиусом 350 м со скоростями от 20 до 80 км/ч; противошерстное прохождение стрелочного перевода с максимальной скоростью 50 км/ч.

Моделирование движения электропоезда осуществлялось из положения равновесия с использованием численного метода Парка второго порядка для интегрирования нелинейных уравнений. Для снижения необходимых вычислительных мощностей, гибридные подсистемы вагонов включались в состав сцепы поочередно, остальные вагоны представлялись полностью твердотельными подсистемами.

В ходе моделирования оценивались: рамные силы H_p , вертикальные a_z и горизонтальные поперечные a_y ускорения кузова на уровне пола в шкворневой зоне, показатели вертикальной динамики первой ступени рессорного подвешивания $ПД_1$ и плавность хода в вертикальном W_z и горизонтальном W_y направлениях.

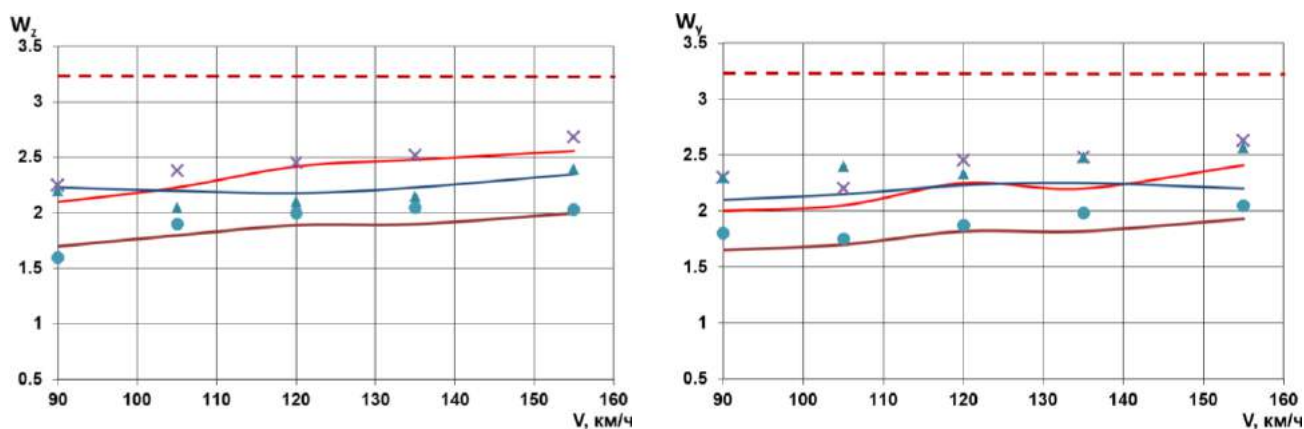
Сопоставление результатов моделирования с данными натурных ходовых испытаний показало их удовлетворительное соответствие. В частности, на рисунке 5

приведены изменения коэффициентов плавности хода от скорости движения, полученные при моделировании (сплошные линии) и при натуральных ходовых испытаниях (точки).

Наибольшее расхождение в значениях показателя плавности хода составило в вертикальном направлении для прицепного вагона с токоприемником (14,2%) и горизонтальном поперечном направлении для прицепного вагона (16,7%).

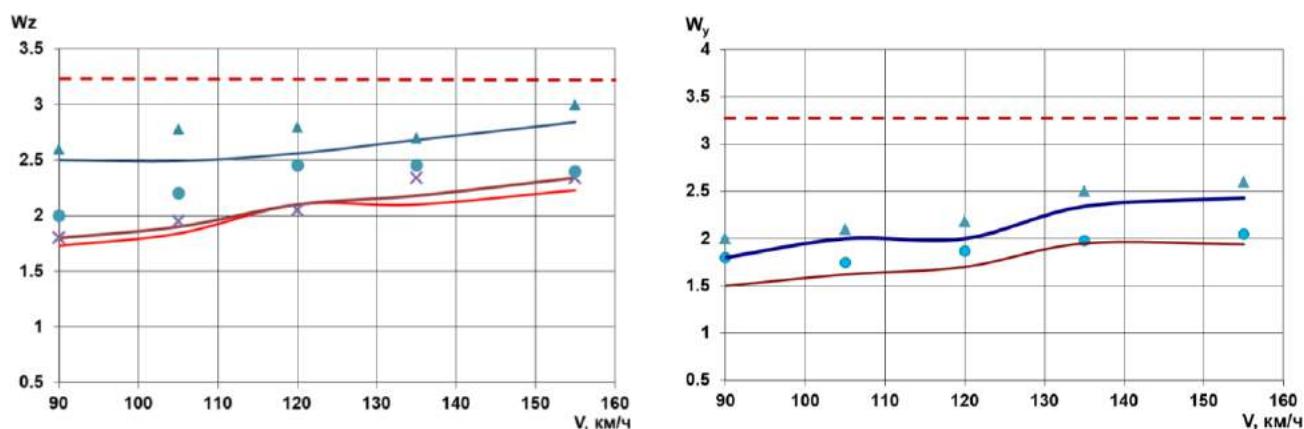
По остальным показателям расхождение результатов составило для:

- рамных сил моторного головного вагона при движении на боковое направление стрелочного перевода - 17%;
- показателя вертикальной динамики первой ступени моторного головного вагона при движении в кривой радиусом 350 м - 17,3%;
- вертикальных ускорений кузова моторного головного вагона при движении в кривой радиусом 350 м - 18,6%;
- боковых ускорений кузова головного вагона при движении в прямом участке пути - 18,1%.



× Каб. маш. испытания, — Каб. маш. моделирование, ▲ Центр кузова испытания,
— Центр кузова моделирование, ● Над тележкой испытания, — Над тележкой моделирование.

а)



● Над тележкой испытания, ▲ Центр кузова испытания,
— Над тележкой моделирование, — Центр кузова моделирование.

б)

а) – для моторного головного вагона; б) – для прицепных вагонов

Рисунок 5 – Зависимость показателя плавности хода от скорости движения для вагонов электропоезда

Максимальное расхождение между значениями показателей динамики, полученных с использованием гибридных моделей вагонов и данными ходовых испытаний не превысило 18,6%, что подтверждает возможность использования разработанной компьютерной модели для оценки динамической нагруженности и комфорта вагона электропоезда.

Третий раздел посвящен разработке принципиальной схемы наклона кузова электропоезда, обоснованию параметров системы наклона и методике оценки воздействия наклона на пассажира.

Выбор принципиальной схемы СПНК осуществлялся исходя из обеспечения внесения минимальных изменений в экипажную часть вагонов. Для электропоезда ЭС2Г целесообразно применить активную систему наклона кузова с пневматическим или электропневматическим приводом. В этом случае наклон осуществляется за счет управления уровнем опорных поверхностей пневморессор, на которые установлен кузов. В работе с учетом принятых ограничений в системе управления наклоном кузовов вводилось допущение о постоянной скорости наклона кузова в переходной кривой.

Для обеспечения наклона кузова в математическую модель пневморессоры вводился элемент, управляющий высотой опорной поверхности. При движении в кривом участке пути, для наклона кузова на необходимый угол $\varphi_{\text{рац}}$, рассчитывалось снижение давления Δp_0 в пневморессоре с внутренней стороны кривой, и увеличение – на внешней:

$$\Delta p_0 = \frac{F_{z0} + p_a \cdot A_e - \Delta z \cdot K_{ez} - (z_0 - w_s + \Delta z) \cdot K_{vz}}{A_e}, \quad (3)$$

$$\Delta z = \arctg \left(\frac{2 \cdot \varphi_{\text{рац}}}{l} \right), \quad (4)$$

где F_{z0} – нагрузка на пневморессору в положении равновесия; p_a – атмосферное давление; A_e – эффективная площадь пневморессоры; Δz – изменение высоты пневморессоры; z_0 – высота пневморессоры в положении равновесия; w_s – положение центра тяжести пневморессоры; l – расстояние между центрами пневморессор.

Разработка СПНК осуществлялась с учетом возможных временных задержек в системе управления, характеризующих разницу во времени между точкой вхождения в переходную кривую и началом наклона кузова. В работе рассмотрен вариант наклона кузова, в котором временные задержки компенсируют разницу между общим временем движения в кривой и рекомендуемым.

Задержки в работе системы управления наклоном кузова моделировались путем ввода искусственного сдвига в координатах пути. Величина рекомендуемой задержки рассчитывалась на основании длины переходной кривой, рациональной скорости наклона кузова и скорости движения:

$$t_{\text{зад}} = \frac{l}{v} - \frac{\varphi_{\text{рац}}(v)}{\dot{\varphi}_{\text{рац}}}, \quad (5)$$

где l – длина переходной кривой; v – скорость движения в кривой.

Работа системы наклона кузова связана с изменением положения центра тяжести кузова и существенным воздействием на пассажиров. Безопасность и комфорт пассажиров традиционно оцениваются на основе непогашенного ускорения, действующего на уровне буксы при движении в кривой, и плавности хода в вертикальном и горизонтальном поперечном направлении. Основой для их расчета являются среднеквадратичные значения ускорений, отфильтрованные по частоте, и не учитывающие воздействий, связанных с работой СПНК, таких как скорость и ускорение поворота кузова, а также угловые рывки и толчки.

Для учета динамических воздействий на пассажиров от работы СПНК, в том числе и на коротких участках в виде переходных кривых, предложено использовать показатель «процент пассажиров испытывающих дискомфорт» (P_{CT}), рекомендуемый CEN12299 и рассчитываемый по зависимости:

$$P_{CT} = (A \cdot |\ddot{y}_{ls}|_{max} + B \cdot |\ddot{y}_{ls}|_{max} - C) + D \cdot \dot{\phi}_{ls max} \quad (6)$$

где \ddot{y}_{ls} – боковое ускорение кузова, м/с²; \ddot{y}_{ls} – изменение бокового ускорения кузова в течение 1 с, м/с³; $\dot{\phi}_{ls}$ – угловая скорость кузова, рад/с; A, B, C, D, E – постоянные, принимаемые по нормативным документам.

Опыт эксплуатации подвижного состава, оборудованного СПНК, также указывает на возможность развития болезни укачивания. Количественно данный эффект оценивается как доза укачивания, определяемая по зависимости:

$$MSDV_z(t) = k_{MSDV} \sqrt{\int_0^t a_{wf}^2(t) \cdot dt}, \quad (7)$$

где a_{wf}^2 – частотно-взвешенное вертикальное ускорение, м/с²; $k_{MSDV} = 1/3$ – коэффициент для смешанного населения неадаптированных взрослых женщин и мужчин, у которых вероятнее всего будет наблюдаться эффект укачивания.

Расчет дозы укачивания производился для низкочастотных ускорений (менее 0,5 Гц), измеренных в вертикальном направлении.

Для градации дозы укачивания введен рейтинг развития заболеваемости $IR(t)$, определяемый по зависимости:

$$IR(t) = \frac{MSDV_z(t)}{50} \quad (8)$$

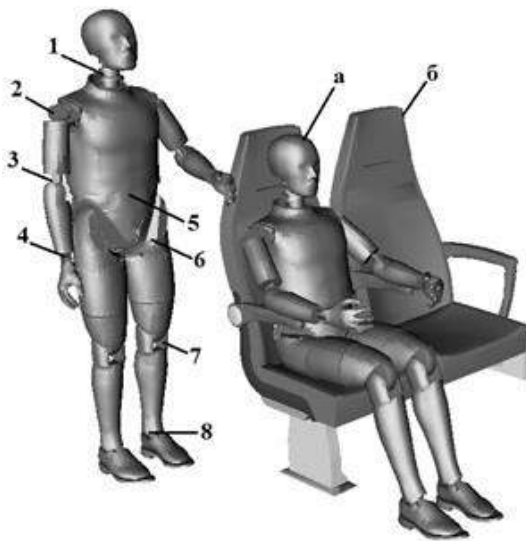
Для учета времени проявления эффекта укачивания, развития и восстановления, предложено использовать показатель - «чистая» доза укачивания. Ее математическая модель позволяет учитывать время на появление эффекта укачивания и восстановление после него. По результатам регрессионного анализа на основе «чистой» дозы укачивания определялся критерий укачивания NR , который рассчитывался в соответствии с моделью движения, учитывающей наклон кузова:

$$NR = \beta_0 + \beta_1 \cdot a_{y\ wf} + \beta_2 \cdot a_{rx\ wf}^2, \quad (9)$$

где $\beta_0, \beta_1, \beta_2$ – коэффициенты, принимаемые в соответствии с моделью, предложенной J. Forsberg; $a_{y\ wf}$ – среднеквадратичное частотно-взвешенное ускорение в горизонтальном поперечном направлении; $a_{rx\ wf}$ – среднеквадратичное частотно-взвешенное ускорение вращения вокруг продольной оси вагона.

Согласно действующей нормативной документации измерение количества движения для всех нормативных критериев комфорта производится на полу или элементах сидений, при этом замеры производятся всего в нескольких контрольных точках, не зависимо от расположения пассажиров. Такой подход упрощает исследования, но вносит значительную погрешность в количественную оценку для наклоняемых поездов. Для устранения описанного недостатка целесообразно производить измерения ускорений, действующих не на кузов, а на пассажира. Для этого в работе была предложена методика, основанная на использовании компьютерных моделей антропометрических манекенов.

Компьютерная модель (рис. 6) включает элементы салона (б) и подсистему «антропометрический манекен», состоящую из 16 абсолютно твердых тел, соединенных 14-ю шарнирами. Параметры модели соответствуют манекену, описывающему «среднестатистического» взрослого мужчину. В каждом из шарниров задавались ограничения угла поворота и упруго-диссипативные характеристики, соответствующие реальному поведению сустава.



а – компьютерная модель антропометрического манекена; б – элементы интерьера салона вагона

1 – 8 шарниры (1 – шейный отдел позвоночника; 2 – плечелопаточный сустав; 3 – локтевой сустав; 4 – лучезапястное сочленение; 5 – поясничный отдел позвоночника; 6 – тазобедренный сустав; 7 – коленный сустав; 8 – голеностопный сустав).

Рисунок 6– Компьютерная модель манекена

Подсистема «манекен» размещалась внутри подсистемы «кузов» на различных пассажирских местах салона вагона в положении сидя и стоя. Взаимодействие подсистемы «манекен» с элементами интерьера вагона описывалось введением специальных контактных элементов. Измерение ускорений, действующих на пассажиров, производилось по нижнему краю грудной клетки (центр масс) манекена для положения стоя, и по центру грудной клетки – для положения сидя.

В четвертом разделе на основе моделирования движения вагонов электропоезда с различными параметрами системы наклона кузова осуществлялся выбор рациональных параметров на основе данных об уровне комфорта пассажиров и динамической нагруженности подвижного состава. Для определения динамических характеристик вагонов электропоезда с системой наклона поезда выполнен комплекс расчетов, с общим количеством численных экспериментов 535, во время которых

было получено более 3000 зависимостей показателей динамики от параметров системы наклона кузова.

Определение рациональных параметров системы наклона кузова производилось поэтапно. На первом этапе осуществлялось определение угла наклона на основе многовариантных расчетов движения электропоезда по типовым кривым постоянного радиуса с изменением угла наклона кузова от 0 до 5 градусов с шагом в 0,5 градуса и скорости от 20 км/ч до максимальной. При моделировании определялись параметры динамики вагонов электропоезда и непогашенное ускорение, действующее на уровне буксы и модели манекенов.

Полученные результаты подтверждают положительное влияние наклона кузова на показатели поперечной динамики с увеличением угла, максимальное улучшение было выявлено по критерию непогашенного ускорения, которое достигало 87%. Для показателей вертикальной динамики наблюдалось ухудшение по критерию вертикальных ускорений до 11% и показателю вертикальной динамики первой ступени подвешивания до 16%. С увеличением радиуса кривых влияние наклона кузова на динамические показатели уменьшается. Ухудшение показателей вертикальной динамики объясняется большей компенсацией центробежной силы наклоном кузова, что приводит к снижению непогашенного ускорения кузова и увеличению добавочных вертикальных ускорений в кривой.

При выборе рационального наклона в качестве критериев, ограничивающих максимальный угол наклона, принимались показатели вертикальной динамики и нижняя граница непогашенного ускорения, величиной $0,4 \text{ м/с}^2$, выбранная из соображений исключения сенсорного конфликта. Минимальные значения угла наклона выбирались по критериям поперечной динамики вагона и верхней границе непогашенного ускорения. Зависимости рационального угла наклона кузова вагона от скорости движения и радиуса кривой приведены на рисунке 7.

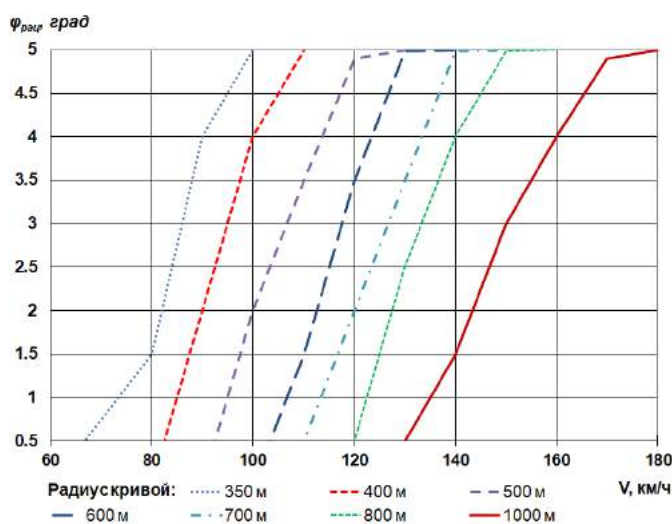


Рисунок 7— Зависимость рационального угла наклона кузова от скорости движения и радиуса кривой

По результатам анализа, для каждой из рассмотренных кривых, установлены скорости движения вагонов, при которых целесообразно использование СПНК. Максимальный угол наклона ограничивался 5 градусами, при этом значения показателей динамики не превышали требований нормативных документов.

На втором этапе определялась рациональная скорость наклона кузова по критериям укачивания и комфорта пассажиров при движении в кривых, содержащих участки переходного и постоянного радиуса.

По результатам моделирования были получены зависимости процента пассажиров, испытывающих дискомфорт в кривых участках пути, и «чистая доза» укачивания (рис.8). Анализ зависимостей показал, что значения параметров комфорта пассажиров и укачивания минимальны в

диапазоне скоростей наклона кузова от 3 до 4,5 °/с, с увеличением радиуса кривой значения показателей уменьшаются, сохраняя качественную картину распределения.

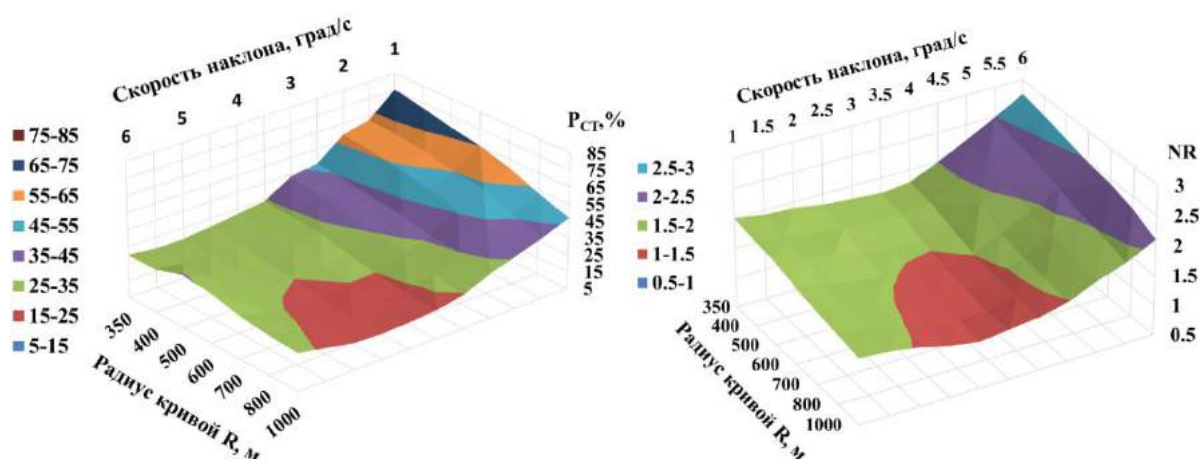


Рисунок 8 – Зависимость показателей комфорта пассажиров от наклона кузова и радиуса в переходной кривой

По результатам анализа зависимостей показателей комфорта и укачивания от скорости изменения угла наклона кузова получена рациональная величина – 3,8 °/с.

На третьем этапе рассчитывались допускаемые временные задержки на основе

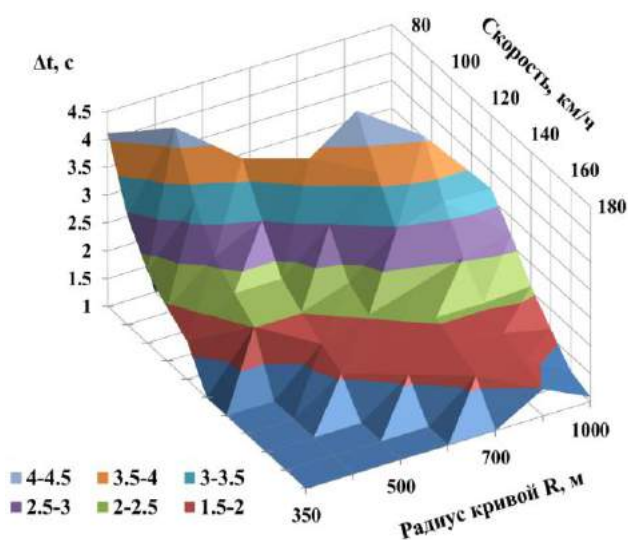


Рисунок 9 – Зависимость рациональных задержек в системе управления наклоном кузовов от скорости движения и радиуса кривой

данных о скоростях движения, рациональном угле наклона, рациональной скорости наклона и длины переходной кривой. Зависимость рациональных задержек в системе управления наклоном от скорости движения и радиуса кривой представлена на рисунке 9. Максимальные расчетные значения задержек в системе управления наблюдаются при минимальных установленных скоростях движения в рассматриваемых кривых и составляют не более 4,5 сек, с увеличением скорости движения величины задержек снижаются, достигая минимального значения равного 1,08 сек.

На заключительном этапе подтверждено соответствие показателей динамики, безопасности и комфорта пассажиров требованиям нормативных документов

путем моделирования движения вагонов с рациональными параметрами системы наклона в составе электропоезда. Максимальные скорости движения в кривых участках пути с активной СПНК принимались увеличенными по результатам опыта эксплуатации и анализа норм допускаемых скоростей движения электропоезда «Аллегро», оборудованного СПНК. Максимальные скорости движения, принимаемые в работе, для электропоезда ЭС2Г в различных условиях эксплуатации приведены в таблице 1.

Таблица 1 - Максимальные скорости движения в кривых

Максимальная скорость движения вагона в кривой, км/ч:	Радиус кривых, м						
	350	400	500	600	700	800	1000
без СПНК, км/ч	85	95	105	115	125	130	145
с СПНК, км/ч	105	120	125	135	145	155	160

В таблице 2 приведены наибольшие значения динамических показателей вагонов электропоезда при движении в различных режимах эксплуатации.

Таблица 2 – Наибольшие значения показателей динамики вагонов электропоезда при движении в различных режимах эксплуатации

Показатели, размерности	Тип вагона	Режимы		Допускаемые значения
		с СПНК	без СПНК	
Рамные силы, кН	МГ	41,8	49,9	–
	ППТ	43,6	52,6	
	ППО	39,4	47,6	
Отношение рамных сил к статической осевой нагрузке (груз 183.5 кН и 176.6 кН)	МГ	0,228	0,272	≤ 0,3
	ППТ	0,247	0,298	
	ППО	0,223	0,270	
Боковые силы, кН	МГ	78,3	97,6	≤ 100
	ППТ	78,7	94,7	
	ППО	75,8	93,5	
Коэффициенты вертикальной динамики подрессоренных масс вагонов	МГ	0,29	0,27	≤ 0,3
	ППТ	0,27	0,25	
	ППО	0,27	0,26	
Ускорения кузова вертикальные, м/с ²	МГ	1,72	1,62	≤ 2
	ППТ	1,69	1,54	
	ППО	1,67	1,57	
Ускорения кузова горизонтальные, м/с ²	МГ	1,25	1,83	≤ 2
	ППТ	1,12	1,76	
	ППО	1,03	1,64	

По результатам исследования динамики движения вагонов электропоезда по участкам пути, включающим прямые, кривые типовых радиусов и стрелки со скоростями в интервале 20-160 км/ч установлено, что динамические характеристики подвижного состава, оборудованного СПНК, соответствуют требованиям нормативных документов.

Анализ комфорта пассажиров выявил, что использование СПНК с рекомендуемыми параметрами при движении позволяет улучшить следующие показатели:

- плавность хода в горизонтальном поперечном направлении до 17,5%;
- средний комфорт пассажиров до 16,1%;
- уровень (процент) дискомфорта для сидящих пассажиров до 38,7%, для стоящих – до 32,2%;
- чистая доза укачивания до 15,8%;
- рейтинг заболеваемости пассажиров на 13,0 %.

Анализ воздействия наклона кузова на пассажиров показал, что применение СПНК с рекомендуемыми параметрами позволяет увеличить скорость движения до

20% без ухудшения показателей комфорта. При этом наблюдалось ухудшение показателя плавности хода в вертикальном направлении на 4%. Однако, это не приводит к превышению нормативных значений, а система наклона кузова не оказывает существенного влияния на качественное распределение значений показателей комфорта. Наибольший комфорт наблюдался для мест в середине вагона с ухудшением к краю вагона.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1 На основе анализа мирового опыта проектирования и эксплуатации подвижного состава, оборудованного системой принудительного наклона кузова установлено, что задача выбора параметров СПНК связана с определением динамических качеств вагона и комфорта пассажиров в зависимости от параметров системы принудительного наклона, в том числе и для эксплуатируемого подвижного состава. При определении параметров СПНК, наиболее целесообразным является подход, основанный на численном моделировании движения вагонов с наклоняемыми кузовами в составе поезда по реальным неровностям пути с учетом малых упругих деформаций кузовов.

2 На основе обзора исследований характеристик и конструктивных параметров систем принудительного наклона кузовов предложена принципиальная схема наклона кузова вагона, основанная на управлении опорным уровнем пневморессор, и позволяющая учесть особенности конструкции отечественного электропоезда ЭС2Г. Показано, что эффективность работы СПНК зависит от параметров: угла и скорости наклона кузова, времени задержки срабатывания системы наклона.

3 Разработана и апробирована методика выбора и обоснования параметров системы принудительного наклона кузовов с использованием численного моделирования динамической нагруженности подвижного состава и комфорта пассажиров, позволившая определить основные параметры системы наклона кузова отечественного электропоезда ЭС2Г в зависимости от состояния пути и скорости движения.

4 Разработана и верифицирована проблемно-ориентированная модель движения вагона в составе электропоезда, оборудованного системой принудительного наклона кузова, по реальным неровностям пути с учетом упругих свойств кузова, которая позволяет моделировать динамические качества вагона и выполнять оценку соответствия нормативным требованиям. По результатам верификации разница между натурными испытаниями и предложенной проблемно-ориентированной моделью составляет не более 18,6%.

5 Разработана и апробирована методика оценки комфорта пассажиров, основанная на использовании моделей антропометрических манекенов, которая позволяет расширить перечень критериев комфорта и учесть дополнительное воздействие на пассажиров от работы системы наклона. Данная методика позволила спрогнозировать комфорт и развитие болезни укачивания у пассажиров электропоезда, оборудованного системой наклона кузовов вагонов, с учетом их размещения в салоне.

6 Выполнена оценка динамической нагруженности вагонов электропоезда, оборудованных системой наклона, на основе гибридной верифицированной модели. Установлено, что применение системы наклона кузова с выбранными параметрами при равных скоростях движения по рассмотренным полигонам позволяет добиться

снижения горизонтальных показателей динамики до 38 %. Показатели вертикальной динамики ухудшаются не более чем на 9 %, при этом выполняется соответствие требованиям нормативных документов.

7 Выполнена оценка воздействия системы наклона кузова с выбранными параметрами на комфорт и развитие болезни укачивания у пассажиров. Установлено, что применение системы наклона с выбранными параметрами для идентичных условий эксплуатации позволяет повысить комфорт пассажиров до 38,7 % и снизить вероятность появления укачивания до 15,8 %. Плавность хода в вертикальном направлении ухудшилась на 4 %, не превысив предельно допускаемые значения.

8 Отечественный электропоезд, оборудованный системой наклона кузовов вагонов с выбранным углом и скоростью наклона, рассчитанной величиной задержек в системе управления, позволяет увеличить скорость движения в кривых на существующих участках до 20 % без ухудшения показателей комфорта пассажиров.

Перспективы дальнейшего развития данной темы могут быть связаны с расширением перечня рассматриваемых принципиальных схем наклона кузова, включая пассивные технологии и активные со смещением кузова; развитием методов оптимизации конструктивных устройств наклона кузова на базе представленной методики определения рациональных значений параметров СПНК; созданием математической модели, подробно описывающей систему управления наклоном кузова.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ДИССЕРТАЦИИ

а) научные работы, опубликованные в изданиях, включенных в перечень ВАК Минобрнауки РФ:

1. Митраков, А.С. Выбор и обоснование рациональных параметров системы принудительного наклона кузова отечественного электропоезда // Вестник УрГУПС, 2019. – №4 (44). – С. 65 - 75.

2. Митраков, А.С. Исследование уровня комфорта пассажиров в поездах с принудительным наклоном кузова в кривых методами математического моделирования / Д. Я. Антипин, П. В. Ваулин, В. Ф. Лапшин, А. С. Митраков // Транспорт Урала, 2017. – № 3 (54). – С. 3-8.

3. Митраков, А.С. Исследование динамических характеристик отечественного пассажирского подвижного состава, оборудованного системой принудительного наклона кузова в кривых / Д. Я. Антипин, В. В. Кобищанов, В. Ф. Лапшин, А. С. Митраков // Транспорт Урала, 2015. – №3 (46). – С. 54-59

б) Научные работы, опубликованные в изданиях, индексируемых в международных реферативных базах данных Scopus и Web of Science:

4. Mitrakov, A. Use of anthropometric dummies of mathematical models in the safety and comfortableness analysis of a passenger rolling stock / V. Kobishchanov, D. Antipin, S. Shorokhov and A. Mitrakov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – IOP Publishing, 2016. – Т. 124. – №. 1. – С. 012065.

5. Mitrakov, A. S. Analysis of vibrational load influence upon passengers in trains with a compulsory body tilt / D. Y. Antipin, V. V. Kobishchanov, V. F. Lapshin, A. S. Mitrakov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – IOP Publishing, 2017. – Т. 177. – №. 1. – С. 012051.

в) Научные работы, опубликованные в других изданиях:

6. **Митраков, А. С.** Анализ параметров ходовой динамики пассажирского состава, оборудованного системой принудительного наклона кузова / А. С. Митраков, Д. Я. Антипин // Транспортный комплекс в регионах: опыт и перспективы организации движения, 2015. – С. 55-58.

7. **Митраков, А. С.** Методика оценки комфорта пассажиров в поездах, оборудованных системой принудительного наклона кузова / Д.Я. Антипин, В.Ф. Лапшин, А. С. Митраков // Проблемы безопасности на транспорте: материалы VII Международн. науч.-практ. конф. – м-во трансп. и коммуникаций респ. Беларусь. М-во образования респ. Беларусь, Бел. ж.д., Белорус. гос. ун-т транспорт.; под общ. ред. В. И. Сенько. – Гомель: БелГУТ, 2015 – С. 49-50.

8. **Митраков, А. С.** Методика оценки уровня комфорта пассажиров поездов, оборудованных системами принудительного наклона кузова в кривых / А. С. Митраков, В. Ф. Лапшин, Д. Я. Антипин // Технологическое обеспечение ремонта и повышение динамических качеств железнодорожного подвижного состава: материалы третьей Всероссийской науч.-техн. конф. с международным участием в трех частях. Часть 2. – Омск: ОмГУПС, 2015. – С. 139-145.

9. **Митраков, А. С.** Оценка комфорта и безопасности пассажиров в поезде, оборудованном системой принудительного наклона кузова в кривых / Д. Я. Антипин, В. Ф. Лапшин, А. С. Митраков // Материалы VIII Международной научно-практической конференции. 21 -23 октября 2015 г. – Самара: СамГУПС, 2015. – С. 19-23

10. **Митраков, А. С.** Обоснование использования данных глобального позиционирования в системах принудительного наклона кузовов пассажирских вагонов / Д. Я. Антипин, А. С. Митраков, С. Г. Шорохов // Информационные технологии и инновации на транспорте: материалы 2-ой Международной научно-практической конференции, под общей редакцией д.т.н., проф. А.Н. Новикова (17 - 18 мая 2016 года, ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева»). – Орел: ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева», 2016. – С. 80-87.

11. **Митраков, А. С.** Влияние времени срабатывания системы принудительного наклона кузова на комфорт пассажиров / А. С. Митраков // Проблемы и перспективы развития вагоностроения: материалы VII Всероссийской науч.-практ. конф. (8 апреля 2016 г., г. Брянск) – Брянск: БГТУ, 2016. – С. 92-94.

12. **Митраков, А. С.** Оценка влияния системы принудительного наклона кузовов поезда на снижение износа колес при движении в кривых участках пути / Д. Я. Антипин, В. Ф. Лапшин, А. С. Митраков // Инновационный транспорт – 2016: специализация железных дорог: м-лы Международн. науч.-практ. конф.– Екатеринбург: УрГУПС, 2017. – Вып. 8 (227) – С. 644 – 653.

13. **Митраков, А.С.** Разработка и валидация имитационной модели отечественного электропоезда, оборудованного системой принудительного наклона кузова / А.С. Митраков // Техника и технологии наземного транспорта: материалы Всероссийской научной конференции аспирантов (25-26 января 2018г.) – Екатеринбург: УрГУПС, 2018 – С. 158 – 159.

Основные положения и результаты исследований получены автором самостоятельно. Статьи [1, 11, 13] подготовлены без соавторов. Личный вклад автора в ра-

ботах, опубликованных в соавторстве, заключается в следующем: [2] – выбор и обоснование рекомендуемых параметров системы наклона кузова вагона электропоезда, оценка эффективности применения технологии наклона кузова для повышения скоростей движения на существующих путях; [4, 7, 8, 9] – разработка методики оценки безопасности и комфорта пассажиров, прогнозирование комфорта по результатам комплекса расчетов и численных экспериментов; [3, 5, 6] – разработка проблемно-ориентированной компьютерной модели движения вагона, оборудованного системой наклона кузова, оценка динамических показателей; [10, 11] – анализ подходов к управлению наклоном кузова, введение понятия «временные задержки», оценка влияния временных задержек на безопасность и комфорт пассажиров электропоезда; [12] – оценка влияния системы принудительного наклона кузова на износ колеса и рельса.

Митраков Артем Сергеевич

**ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ СИСТЕМЫ ПРИНУДИТЕЛЬНОГО
НАКЛОНА КУЗОВОВ ВАГОНОВ**

**05.22.07 – Подвижной состав железных дорог,
тяга поездов и электрификация (технические науки)**

Подписано в печать «22» декабря 2020

Формат бумаги 60×84 1/16.
Тираж 100 экз.

Усл. печ. л. – 1,4
Заказ № 349