

Федеральное агентство железнодорожного транспорта
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Омский государственный университет путей сообщения»
(ОмГУПС (ОМИИТ))

На правах рукописи



МИХАЙЛОВ Михаил Сергеевич

**ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ ТОКОСЪЕМА
В УСЛОВИЯХ СКОРОСТНОГО ДВИЖЕНИЯ
ЗА СЧЕТ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ КАРЕТОК
ТОКОПРИЕМНИКОВ ЭЛЕКТРОПОДВИЖНОГО СОСТАВА**

Специальность 2.9.3. Подвижной состав железных дорог,
тяга поездов и электрификация

Д и с с е р т а ц и я

на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, профессор
Сидоров Олег Алексеевич

Омск 2025

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
1 АНАЛИЗ УСЛОВИЙ РАБОТЫ КАРЕТОК ТОКОПРИЕМНИКОВ ЭЛЕКТРОПОДВИЖНОГО В УСЛОВИЯХ СКОРОСТНОГО ДВИЖЕНИЯ.....	13
1.1 Анализ токоприемников, применяемых в условиях скоростного и высокоскоростного движения на железных дорогах России.....	13
1.2 Обоснование применения управляемых упругих элементов в каретках токоприемников скоростного электроподвижного состава	17
1.3 Конструкции кареток токоприемников электроподвижного состава России.....	21
1.4 Анализ разновидностей управляемых упругих элементов, применяемых в каретках токоприемников	24
1.5 Применение внутрипружинных пневмоэлементов в конструкции кареток токоприемников России	27
2 РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ТОКОПРИЁМНИКА И КОНТАКТНОЙ ПОДВЕСКИ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ УПРАВЛЯЕМЫХ ПНЕВМОЭЛЕМЕНТОВ В КОНСТРУКЦИИ КАРЕТОК ТОКОПРИЕМНИКОВ.....	33
2.1 Анализ известных методов моделирования взаимодействия токоприемников с контактными подвесками.....	33
2.2 Предлагаемая математическая модель авторегулирования токоприемника с внутрипружинными пневмоэлементами.....	42
2.2.1 Разработка математической модели токоприемника с приведенными массами.....	42
2.2.2 Совершенствование математической модели контактной подвески с сосредоточенными параметрами	47
2.3 Экспериментальное получение параметров для математического моделирования взаимодействия токоприемников и контактной подвески	56

2.3.1 Экспериментальное получение параметров внутрипружинных пневмоэлементов для применения в математической модели токоприемника.....	56
2.3.2 Экспериментальное получение коэффициентов передаточной функции механизма подъема и опускания токоприемника.....	59
2.4 Реализация математической модели в программном комплексе MATLAB Simulink	65
3 РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМОВ УПРАВЛЕНИЯ КОНТАКТНЫМ НАЖАТИЕМ ТОКОПРИЕМНИКОВ, ИСПОЛЬЗУЮЩИХ УПРАВЛЯЕМЫЕ УПРУГИЕ ЭЛЕМЕНТЫ.....	70
3.1 Применение систем автоматического регулирования в токоприемниках электроподвижного состава	70
3.2 Разработка алгоритмов управления нажатием токоприемника	73
3.3 Применение датчика сжатия упругого элемента каретки в системе автоматического регулирования.....	78
3.4 Моделирование взаимодействия токоприемника, оснащенного системой автоматического регулирования статического нажатия и характеристики сжатия кареток, с контактной подвеской	81
4 АПРОБАЦИЯ РАБОТЫ ТОКОПРИЕМНИКОВ, ОСНАЩЕННЫХ УПРАВЛЯЕМЫМИ УПРУГИМИ ВНУТРИПРУЖИННЫМИ ПНЕВМОЭЛЕМЕНТАМИ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ УСЛОВИЯХ ЭКСПЛУАТАЦИИ.....	84
4.1 Обоснование и выбор параметров износостойких внутрипружинных пневмоэлементов.....	84
4.1.1 Обоснование и выбор материала для изготовления внутрипружинных пневмоэлементов.....	84
4.1.2 Оценка износостойкости оболочек внутрипружинных пневмоэлементов	89

4.2 Экспериментальные исследования динамических характеристик токоприемников с управляемыми внутрипружинными пневмоэлементами в каретках	94
4.2.1 Колебательный стенд для исследования динамических характеристик токоприемников.....	94
4.2.2 Методика планирования эксперимента по испытаниям токоприемников с управляемыми внутрипружинными пневмоэлементами в каретках	97
4.3 Анализ условий эксплуатации внутрипружинных пневмоэлементов.....	103
4.3.1 Исследование работоспособности внутрипружинных пневмоэлементов в условиях низких температур.....	104
4.3.2 Оценка работоспособности кареток оснащенных внутрипружинными пневмоэлементами с учетом ударов при наезде на препятствия на контактной подвеске.....	112
4.3.3 Исследование влияния внутрипружинных пневмоэлементов на аэродинамические характеристики кареток токоприемников	117
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	125
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	127
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	141
ПРИЛОЖЕНИЕ 1. Патенты РФ на изобретения и полезные модели.....	142
ПРИЛОЖЕНИЕ 2. Акты внедрения научно-технической продукции	147

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. Одним из приоритетов «Транспортной стратегии РФ на период до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года» (распоряжение Правительства Российской Федерации от 27 ноября 2021 г. № 3363-р) является создание интегрированной сети высокоскоростного и скоростного сообщения, что повысит мобильность населения и увеличит пассажиропоток [1]. Также разработка новых технологий для транспортных систем включена в утвержденные Указом Президента Российской Федерации №899 от 7 июля 2011 г. «Приоритетные направления развития науки, технологий и техники в Российской Федерации» [2].

Однако скоростной подвижной состав для скоростей 160 – 200 км/ч в настоящее время в России не производится. Таким образом, сегодня существует необходимость разработки технических решений, позволяющих использовать уже производящиеся токоприемники в условиях скоростного движения на скоростях 160 – 200 км/ч.

С ростом скорости движения увеличиваются динамические и аэродинамические нагрузки, воздействующие на токоприемник, что негативно сказывается на качестве передачи электрической энергии на электроподвижной состав (ЭПС) и приводит к возникновению нарушений токосъема. Увеличение тягового тока усугубляет эти проблемы, вызывая оплавление токосъемных элементов токоприёмника и пережоги контактных проводов.

Современные токоприёмники электроподвижного состава оснащены авторегулирующими устройствами, которые улучшают качество токосъема за счёт оптимизации контактного нажатия, что снижает износ контактных вставок и проводов, уменьшает искрение и нагрев токосъемных элементов. Исследования в области автоматического регулирования токосъема ведутся как отечественными, так и зарубежными специалистами.

С увеличением скорости движения токоприёмники, оснащенные системами автоматического регулирования контактного нажатия (САР), увеличи-

вают статическое нажатие за счёт повышения давления в подъемном пневмоэлементе. В конечном итоге это приводит к чрезмерному сжатию пружин кареток, вплоть до их полного «пробоя», когда цилиндрические пружины полностью сжимаются и перестают обеспечивать свои упругие свойства. В результате контактное нажатие скачкообразно возрастает, что провоцирует удары, отрывы и повышает риск повреждений как токоприёмников, так и всей системы токосъёма.

В современных скоростных электропоездах управляемые пневмоэлементы применяются в механизмах подъёма и опускания токоприёмников, однако каретки оснащены неуправляемыми пружинными элементами. Отсутствие регулируемых упругих элементов в верхнем узле токоприёмников ограничивает их эксплуатационные возможности, снижая надёжность, экономичность и эффективность работы при эксплуатации токоприёмников на высоких скоростях движения.

Использование управляемых пневмоэлементов в сочетании со стандартными цилиндрическими пружинами кареток токоприёмников позволит существенно улучшить их характеристики без необходимости серьёзных конструктивных изменений и значительных финансовых затрат. Такое решение обеспечит возможность регулирования контактного нажатия в зависимости от силы тока, скорости движения и внешних условий, включая обледенение. Благодаря этому стандартные токоприёмники смогут эффективно применяться не только на современном грузовом и пассажирском электроподвижном составе, но и в скоростном движении без необходимости крупных капитальных вложений, что способствует укреплению потенциала транспортной отрасли в области импортозамещения, снижая зависимость от зарубежных поставок, что особенно важно в современных геополитических условиях.

Степень разработанности темы исследования. Исследованием и совершенствованием устройств токосъёма, в том числе при применении систем автоматического регулирования токоприёмников и управляемых упругих

элементов в каретках, занималось значительное число отечественных и зарубежных ученых: И. А. Беляев, В. Я. Берент, Е. А. Вологин, Е. И. Гершман, И. С. Гершман, А. С. Голубков, Г. Р. Ермачков, А. В. Ефимов, Д. А. Ефимов, И. В. Ларькин, В. Н. Ли, А. М. Маханько, Н. В. Мирнонос, В. П. Михеев, В. М. Павлов, А. В. Паранин, Л. Н. Рачек, И. Л. Саля, О. А. Сидоров, А. Н. Смердин, С. А. Ступаков, А. Т. Тибиллов, В. В. Томилов, П. Г. Тюрнин, В. М. Филиппов, А. В. Чичинадзе, М. А. Abdullah, В. Allota, J. Ambrosio, S. Aoki, G. Auditeau, E. Balmes, F. Bartolini, J.-P. Bianchi, H. Biesenack, A. Collina, M. Deutzer, R. Dixon., J. Guo., T. Harisson, M. H. Harun., M. Ibrahim, M. Ikeda, W. Midgley, M. Ko, Ch. Laurent, S. Kobayashi, S. Kubo, J.-P. Massat, C. M. Pappalardo, M. Patel, L. Pugi, B. Tinsley, B. Wang, J. Wang, T. Usuda, Y. Shen, W. Shaofang, M. A. Spiroiu, Y. Yamashita, M. Yokoyama.

Работы представленных авторов направлены на совершенствование системы токосъема для обеспечения высоких скоростей движения. Значительное внимание уделено вопросам внедрения систем автоматического управления нажатием токоприемника. Высокие скорости движения способствуют увеличению разброса контактного нажатия и возникновению резонансных явлений, что негативно сказывается на качестве токосъёма.

Кроме того, в современных токоприёмниках могут использоваться различные типы токосъёмных элементов с разной массой, что влияет на резонансные частоты и может нарушать нормальную работу токоприёмника электроподвижного состава. Также изменение массы токосъёмных элементов происходит вместе с их износом в процессе их эксплуатации.

Значительное влияние на процесс токосъема оказывает аэродинамические силы, действующие на элементы токоприемника. При этом подъемные силы становятся сравнимыми с силой статического нажатия токоприемника, что оказывает негативное влияние на процесс токосъема.

Цель диссертационной работы – повышение качества токосъема за счет применения в каретках токоприемников скоростного электроподвижного состава управляемых внутрипружинных пневмоэлементов.

Для выполнения указанной цели были поставлены следующие задачи:

1. Обосновать целесообразность применения и предложить новые технические решения по использованию внутрипружинных пневмоэлементов в рычажных и рычажно-плунжерных каретках отечественных токоприемников для обеспечения надежного токосъема в условиях скоростного движения на железных дорогах Российской Федерации при скоростях до 200 км/ч.

2. Разработать усовершенствованную математическую модель взаимодействия токоприемника с контактной подвеской с учетом применения управляемых внутрипружинных пневмоэлементов в каретках и переходных процессов при регулировании.

3. Предложить алгоритм управления нажатием токоприемников, использующих управляемые упругие элементы в каретках.

4. Разработать методы экспериментальных исследований токоприемников, оснащенных управляемыми внутрипружинными пневмоэлементами в каретках, учитывающие различные условия эксплуатации и оценить их влияние на характеристики токоприемника.

Объект исследования – токоприемники электроподвижного состава.

Направления исследований – методы и технические решения, направленные на повышение надежности токосъема в условиях скоростного движения.

(Соответствует пункту 10 паспорта научной специальности 2.9.3. Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация: Взаимодействие токоприемников электроподвижного состава и контактных подвесок. Системы контактных подвесок и токоприемников, устройства и материалы повышающие, повышающие надежность, работоспособность, электробезопасность и экологичность системы токосъема, в том числе в условиях скоростного, высокоскоростного и тяжеловесного движения.)

Научная новизна диссертационной работы заключается следующем:

1. Разработана усовершенствованная математическая модель взаимодействия токоприемника с контактной подвеской, отличающаяся тем, что в ней

учитываются характеристики управляемых внутрипружинных пневмоэлементов кареток токоприемников и переходные процессы при регулировании, а приведенная масса контактной подвески представлена в виде инертора.

2. Предложен алгоритм регулирования нажатия токоприемника с управляемыми внутрипружинными пневмоэлементами в каретках.

3. Разработаны усовершенствованные методы экспериментальных исследований токоприемников, оснащенных каретками с внутрипружинными пневмоэлементами, в различных условиях эксплуатации.

Теоретическая и практическая значимость диссертационной работы заключается в следующем:

1. Разработанная усовершенствованная математическая модель взаимодействия токоприемника с контактной подвеской, отличающаяся тем, что в ней учитываются характеристики управляемых внутрипружинных пневмоэлементов кареток токоприемников с учетом переходных процессов при регулировании, а приведенная масса контактной подвески представлена в виде инертора, позволяет выбирать параметры и характеристики токоприемника и внутрипружинных пневмоэлементов для обеспечения надежного токосъема в условиях скоростного движения.

2. Разработанные усовершенствованные методы экспериментальных исследований токоприемников, оснащенных каретками с внутрипружинными пневмоэлементами, позволяют выполнять оценку работоспособности токоприемников с учетом различных условий эксплуатации.

3. Предложенные новые технические решения конструкций кареток, оснащенных внутрипружинными пневмоэлементами с автоматическим управлением нажатием токоприемника, позволяют предотвратить отрывы и вертикальные удары контактного провода, приводящие к повышенному износу контактных материалов.

Методология и методы исследований. В ходе выполнения поставленных задач использовались положения теории токосъема, математической статистики, теории планирования эксперимента, теории систем автоматического

управления, математического моделирования, аэродинамики. При экспериментальных и теоретических исследованиях задействованы аналитические и численные методы аппроксимации и сглаживания, методы теоретической механики, численные методы решения дифференциальных уравнений, методы корреляционного и регрессионного анализа.

Для проведения расчетов и анализа данных применялись следующие программные продукты: Microsoft Word, Microsoft Excel, среда графического программирования Matlab Simulink, система автоматизированного проектирования Solidworks, универсальная программная система анализа методом конечных элементов Ansys Fluent.

Основные положения диссертации, выносимые на защиту:

1. Математическая модель взаимодействия токоприемника с контактной подвеской в которой учитываются характеристики управляемых внутрипружинных пневмоэлементов кареток токоприемников с учетом переходных процессов при регулировании, а приведенная масса контактной подвески представлена в виде инертора.

2. Алгоритм управления контактным нажатием токоприемника, оснащенного управляемыми внутрипружинными пневмоэлементами в каретках.

3. Методы экспериментальных исследований токоприемников, оснащенных внутрипружинными пневмоэлементами в каретках, учитывающие различные условия эксплуатации.

4. Новые научно обоснованные технические решения по применению управляемых внутрипружинных пневмоэлементов в каретках токоприемников электроподвижного состава.

Реализация результатов работы. Усовершенствованная математическая модель взаимодействия токоприемника с контактной подвеской, в которой ее приведенная масса представлена в виде инертора, внедрена в Инжиниринговом центре железнодорожного транспорта (Сколково, г. Москва), алгоритм управления нажатием токоприемника с использованием внутрипружинных пневмоэлементов в каретке использовался при реализации необхо-

димых режимов работы токоприемника при выполнении программы исследовательских испытаний контактной сети КС-400 в рамках научно-исследовательской работы «Участие в проведении динамических испытаний контактной сети КС-400» (ВНИИЖТ, г. Москва), методика экспериментального определения характеристик кареток токоприемника использовалась при проведении испытаний токоприемника ТА 60-СЭТ 300 2400 (ООО «ИЦ «Привод-Н», г. Новочеркасск). Фактическое использование результатов диссертационной работы подтверждено актами внедрения.

Степень достоверности научных положений и результатов диссертационной работы доказана с помощью экспериментальных исследований, основанных на принципах теории планирования эксперимента, математической статистики и математического моделирования. Достоверность полученных результатов подтверждена достаточной степенью совпадения теоретических расчётов с экспериментальными данными, расхождение не превышает 10 %.

Апробация результатов работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на международной научно-практической конференции «Инновационный путь развития как ответ на вызовы нового времени» (Уфа 2021), международной научно-практической конференции «Научное обозрение: актуальные вопросы теории и практики» (Пенза 2023) международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы проектирования и эксплуатации устройств электроснабжения электрического транспорта» (Омск 2023), на ежегодных всероссийских научно-практических конференциях «Инновационные проекты и технологии в образовании, промышленности и на транспорте» (Омск 2023 – 2025), на расширенном заседании кафедры «Электроснабжение железнодорожного транспорта» ОмГУПС (Омск 2025).

Публикации. По результатам проведенных исследований опубликована **21** научная работа, в том числе **три** статьи в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК при Минобрнауки России, **пять** патентов РФ на изобретения и полезные модели, **две** статьи на английском языке в сбор-

никах конференций, индексируемых в базе данных Scopus, **четыре** статьи в рецензируемых научных изданиях, индексируемых в базах данных RSCI и входящих в ядро РИНЦ, и **семь** статей в прочих изданиях.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех разделов, заключения, списка использованной литературы из 106 наименований и содержит 149 страниц текста, включая 78 рисунков и 8 таблиц.

1 АНАЛИЗ УСЛОВИЙ РАБОТЫ КАРЕТОК ТОКОПРИЕМНИКОВ ЭЛЕКТРОПОДВИЖНОГО В УСЛОВИЯХ СКОРОСТНОГО ДВИЖЕНИЯ

1.1 Анализ токоприемников, применяемых в условиях скоростного и высокоскоростного движения на железных дорогах России

Система оценки эффективности токосъема, разработанная В. П. Михеевым, включает в себя выявление трех ключевых аспектов: надежности, экономии и экологичности. Надежность токосъема заключается в обеспечении бесперебойной передачи электроэнергии от контактной сети к электроподвижному составу с использованием токоприемников, предотвращающих отрывы и повреждения, которые могут вызвать остановку движения [3].

Ключевым параметром, влияющим на токосъем, является сила контактного нажатия. Согласно U-образным кривым износа контактных элементов, существует оптимальное значение контактного нажатия, обеспечивающее минимальный износ [4]. Снижение нажатия приводит к резкому увеличению электрического износа из-за повышенного образования дуг и электроэрозионного разрушения. В то время как повышение контактного нажатия приводит к увеличению износа из-за увеличенного механического воздействия.

Токоприемники – это устройства, служащие для передачи электрической энергии от контактной сети на электроподвижной состав железных дорог [3, 5]. Они состоят из базовых, альтернативных и дополнительных элементов.

Базовые элементы включают систему подвижных рам, привод, основание, токопроводящие, изолирующие и контактирующие элементы. Они обеспечивают надежное снятие тока и безопасность.

Конструкция альтернативных элементов токоприемников зависит от рода тока и конструкции электроподвижного состава, на котором устанавливаются.

ливаются токоприемник. К ним относят полоза, каретки, токопроводящие и изолирующие элементы.

Дополнительными элементами являются устройства, служащие для улучшения надежности, экономичность и экологичность токосъема. К ним относятся демпфирующие, авторегулирующие, аэродинамические, предохранительные, охлаждающие и другие устройства.

В соответствии с ГОСТ 34530 – 2019 «Транспорт железнодорожный. Основные понятия. Термины и определения» по скорости движения подвижной состав разделен на следующие типы:

- скоростное движение: 160 – 200 км/ч;
- высокоскоростное движение: свыше 200 км/ч.

Основной тренд в развитии токоприемников – уменьшение массы и размеров при сохранении надежности. Это особенно важно для скоростного движения, где требуется баланс между малым весом и достаточным контактным нажатием для обеспечения надежного токосъема.

В качестве скоростных токоприемников на зарубежных железных дорогах широкое распространение получили асимметричные токоприемники, такие как Faiveley Transport AX, CX (Франция), Stemmann-Technik DSA 200, 350, 380 (Германия), Siemens SSS 87, Siemens SSS 400+ (Германия) [6].

При этом, используемые в настоящее время в высокоскоростном движении ЭВС1/ЭВС2 «Сапсан» используют токоприемники производства Siemens (Германия): SSS87 – для постоянного тока и SSS400+ – для переменного.

Наибольшее распространение в настоящее время на современном электроподвижном составе России получили токоприемники производства «Новочеркасского электровозостроительного завода (НЭВЗ)» (ТАС и ЛАС) и «Софрино Электротранспорт» (ТА-СЭТ и ЛА-СЭТ) [7]. Указанные токоприемники отечественного производства не предназначены для движения на скоростях свыше 160 км/ч и используются на таких электровозах и электропоездах, как ЭП2К, ЭП20, 2ЭС4К, 2ЭС6, 2ЭС8, 2ЭС10, ЭП2Д, ЭП3Д, ЭГ2Тв «Иволга», ЭС1 «Ласточка» и др. На рисунке 1.1 приведены токопри-

емники, применяемые на современном электроподвижном составе, производимом в России.



а



б

Рисунок 1.1 – Токоприемники, применяемые на современном электроподвижном составе России: а – ТАС 10-02, б – ЛА 19-СЭТ 160 1200

В настоящее время в России ведутся работы по разработке высокоскоростного подвижного состава со скоростью движения до 400 км/ч, однако скоростного подвижного состава для скоростей 160 – 200 км/ч в настоящее время не производится. Таким образом, сегодня существует необходимость разработки технических решений, позволяющих использовать уже производящиеся токоприемники в условиях скоростного движения на скоростях 160 – 200 км/ч.

Использование систем автоматического регулирования нажатием для уже разработанных токоприемников является одним из способов повышения улучшения надежности токосъема. Они позволяют поддерживать контактное нажатие на уровне, необходимом для обеспечения безотрывного токосъема, что позволяет увеличить допустимую скорость движения электроподвижного состава. В настоящее время такие системы в настоящее время применяются на токоприемниках Siemens, Faiveley, Schunk и др.

Выбор оптимального уровня контактного обуславливается U-образными кривыми износа конкретной контактной пары [8] (рисунок 1.2),

в соответствии с которыми выбирается интервал оптимального контактного нажатия P_{opt} , при котором обеспечивается минимальный износ контактных материалов (обозначен как $min g$). В токоприемниках, в которых не применяются системы автоматического регулирования статическое нажатие токоприемника P_p соответствует данному уровню (рисунок 1.2, а).

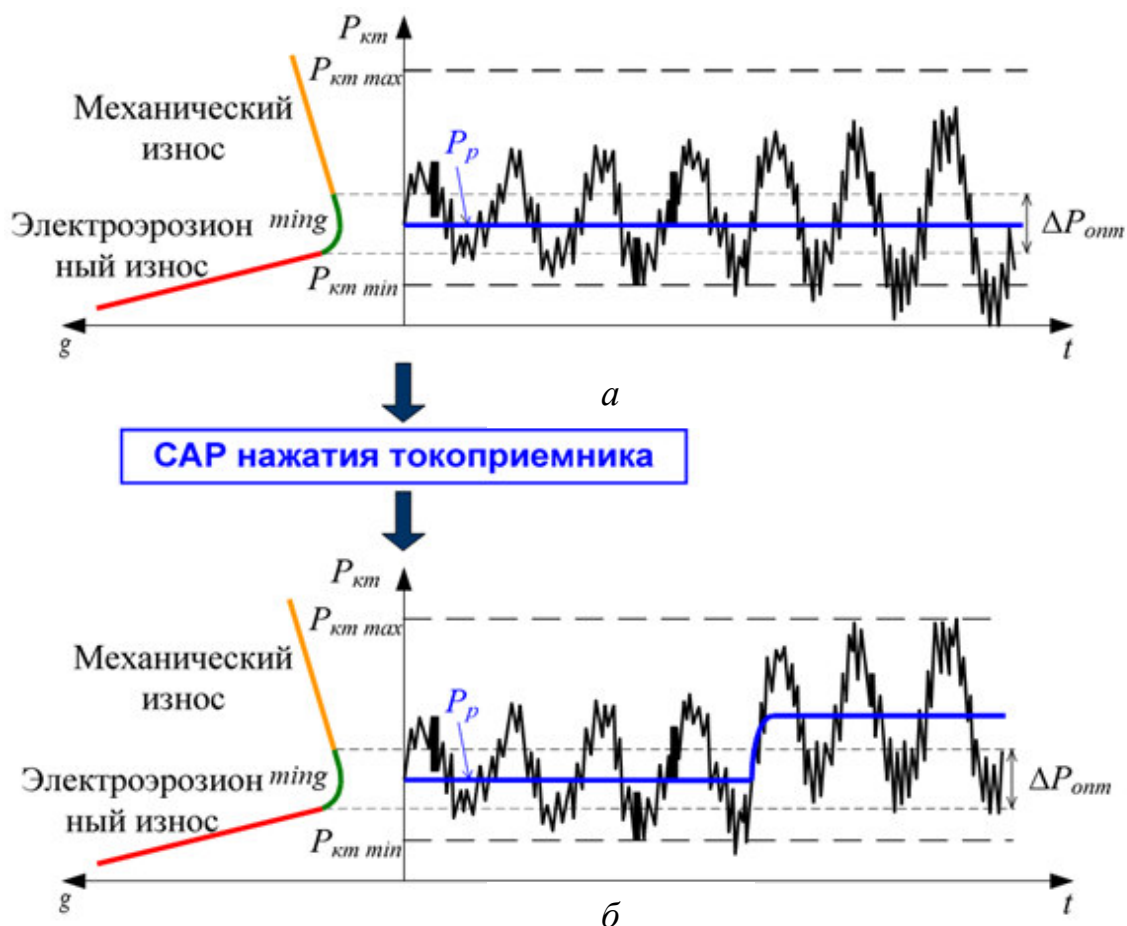


Рисунок 1.2 – Выбор статического нажатия токоприемника: а – без использования САР нажатия; б – при использовании САР нажатия

Для токоприемников, оснащенных системами автоматического регулирования нажатия, оптимальный уровень P_{opt} контактного нажатия также используется в качестве базового уровня статического нажатия токоприемника P_p . Однако увеличение скорости движения, воздействие аэродинамических сил, колебаний электроподвижного состава и других внешних факторов приводит к увеличению разброса контактного нажатия, что вызывает нарушения токосъема, связанные с возникновением вертикальных ударов и отрывов.

Поэтому для обеспечения надежного токосъема система автоматического регулирования токоприемника увеличивает силу статического нажатия, что позволяет обеспечить надежность процесса токосъема (рисунок 1.2, б). Для эффективного управления токоприемниками предлагается применение различных типов активно регулируемых токоприемников [9, 10].

1.2 Обоснование применения управляемых упругих элементов в каретках токоприемников скоростного электроподвижного состава

Каретки токоприемников, служащие для снижения инертности системы подвижных рам за счет подрессоривания полоза токоприемника, оказывают значительное влияние на процесс токосъема. В соответствии с требованиями ГОСТ 32204-2013 «Токоприемники железнодорожного электроподвижного состава. Общие технические условия» [11] сжатие упругих элементов кареток при воздействии силы пассивного нажатия должно поддерживаться в интервале 20 – 50 % (рисунок 1.3).

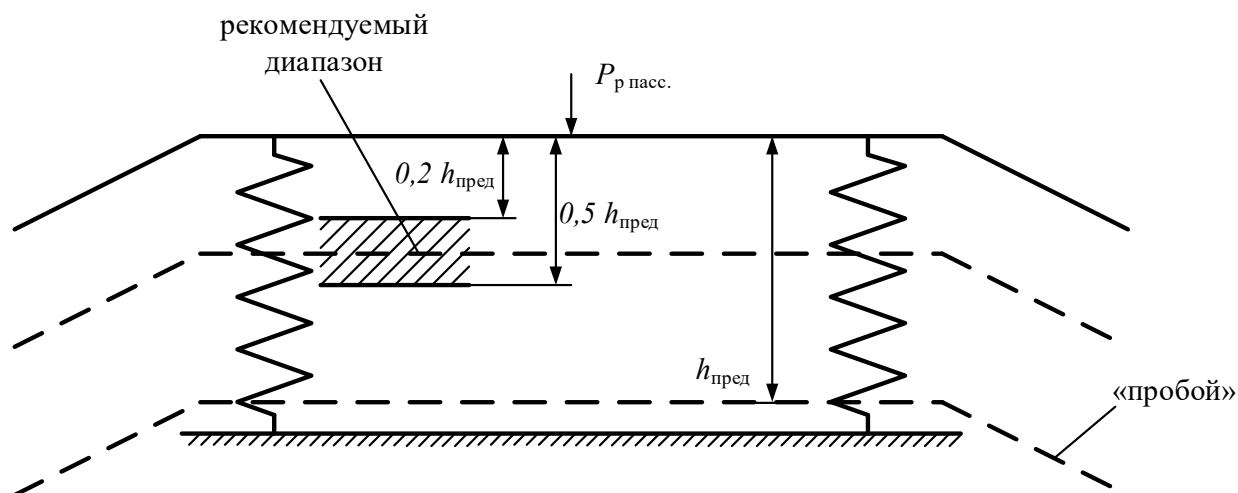


Рисунок 1.3 – Регламентированная характеристика сжатия кареток

При этом в процессе работы кареток нельзя допускать «пробоев» (полного сжатия) упругих элементов кареток, которые приводят к появлению вертикальных ударов, что, в свою очередь, вызывает резкое увеличение разброса контактного нажатия, нарушающего процесс токосъема из-за появления искрения и отрывов.

В процессе работы на сжатие упругих элементов оказывает воздействие значительное число факторов:

- 1) динамические усилия со стороны полоза и системы подвижных рам;
- 2) изменение статического нажатия при работе систем автоматического регулирования;
- 3) изменение массы полоза и системы подвижных рам при гололёде;
- 4) изменение массы полоза по мере износа контактных вставок;
- 5) изменение массы полоза при применении контактных вставок различных типов;
- 6) вертикальные составляющие аэродинамических сил, действующих на токоприемник.

При этом оценить, какое влияние (увеличение или уменьшение сжатия пружин) окажут перечисленные факторы достаточно сложно, поскольку они сами зависят от значительного числа внешних факторов: скорости движения подвижного состава, скорости и направления ветра, состояния контактной подвески, погодных условий, особенностей эксплуатации подвижного состава и др.

Увеличение жесткости пружин позволяет уменьшить сжатие пружин кареток (рисунок 1.4), что обеспечивает работоспособность кареток при повышенном нажатии токоприемника в условиях скоростного движения при увеличении вертикальной составляющей аэродинамических сил и увлечении статического нажатия вследствие работы систем автоматического регулирования, при этом среднее контактное нажатие может достигать 150 – 200 Н.

Однако использование кареток с пружинами увеличенной жесткости приводит к недостаточному сжатию кареток при движении на низких скоростях, когда влияние указанных факторов не столь значительно, из-за чего каретки могут полностью разжиматься, из-за чего может возникать искрение. Кроме того, изменение жесткости кареток может негативно повлиять на процесс токосъема, поскольку жесткость пружин кареток подбирается на этапе

проектирования системы токосъема, включающей в себя контактную подвеску и токоприемники.

Регулирование характеристики сжатия кареток за счет увеличения или уменьшения силы, создаваемой каретками при использовании в них управляемых упругих элементов, может обеспечить поддержание оптимального уровня сжатия кареток вне зависимости от работы систем автоматического регулирования, аэродинамического воздействия и других факторов.

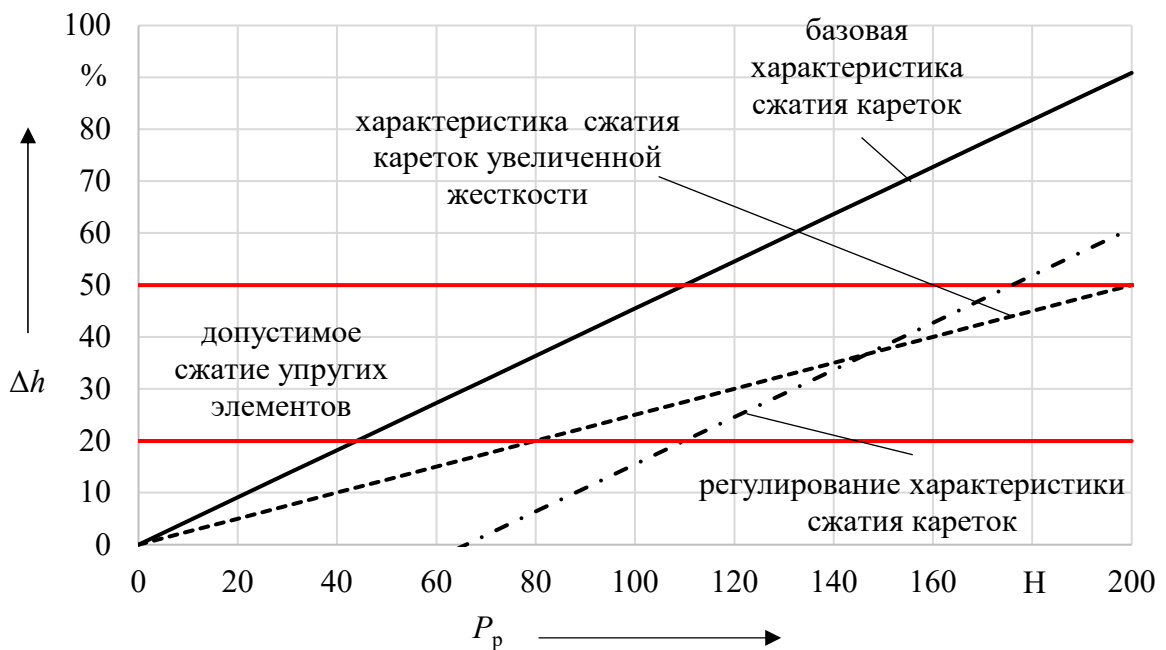


Рисунок 1.4 – Изменение характеристики сжатия кареток

Применение систем автоматического регулирования является одним из действенных способов повышения качества и надежности токосъема [12 – 15]. Однако увеличение статического нажатия вследствие работы систем автоматического регулирования нажатия токоприемников приводит к увеличению перемещения подвижной части каретки относительно неподвижной, вплоть до «пробоя» упругих элементов. Этот эффект негативно сказывается на качестве токосъема, как показано на рисунке 1.5.

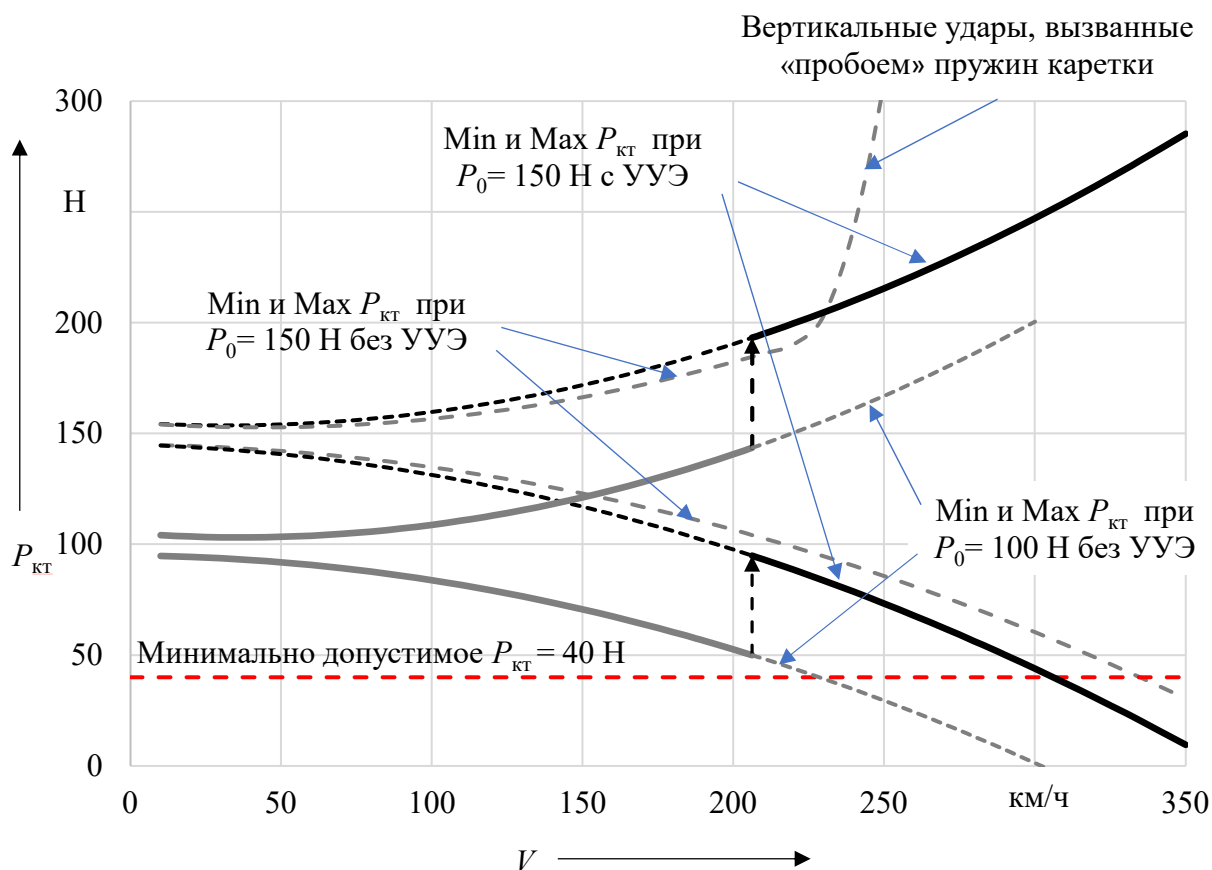


Рисунок 1.5 – Применение управляемых упругих элементов (УУЭ) в каретке токоприемника

Поэтому необходимо удерживать кривую среднего сжатия упругих элементов в зоне допустимых значений, которая регламентируется ГОСТ 32204-2013 в интервале от 20% до 50%. При этом целесообразно поддерживать среднее сжатие упругих элементов кареток близким к 50%, поскольку это позволяет обеспечить максимальный ход каретки как в сторону сжатия, так и в сторону разжатия.

Соответственно для предотвращения «пробоев» кареток необходимо применять системы автоматического регулирования статической характеристикой кареток токоприемника за счет изменения силы разжатия кареток при применении управляемых упругих элементов (УУЭ). При этом важным остается сохранение их изначальной жесткости, поскольку она значительно влияет на процесс токосъема [16].

1.3 Конструкции кареток токоприемников электроподвижного состава России

На рисунке 1.6 приведена классификация кареток токоприемников электроподвижного состава.

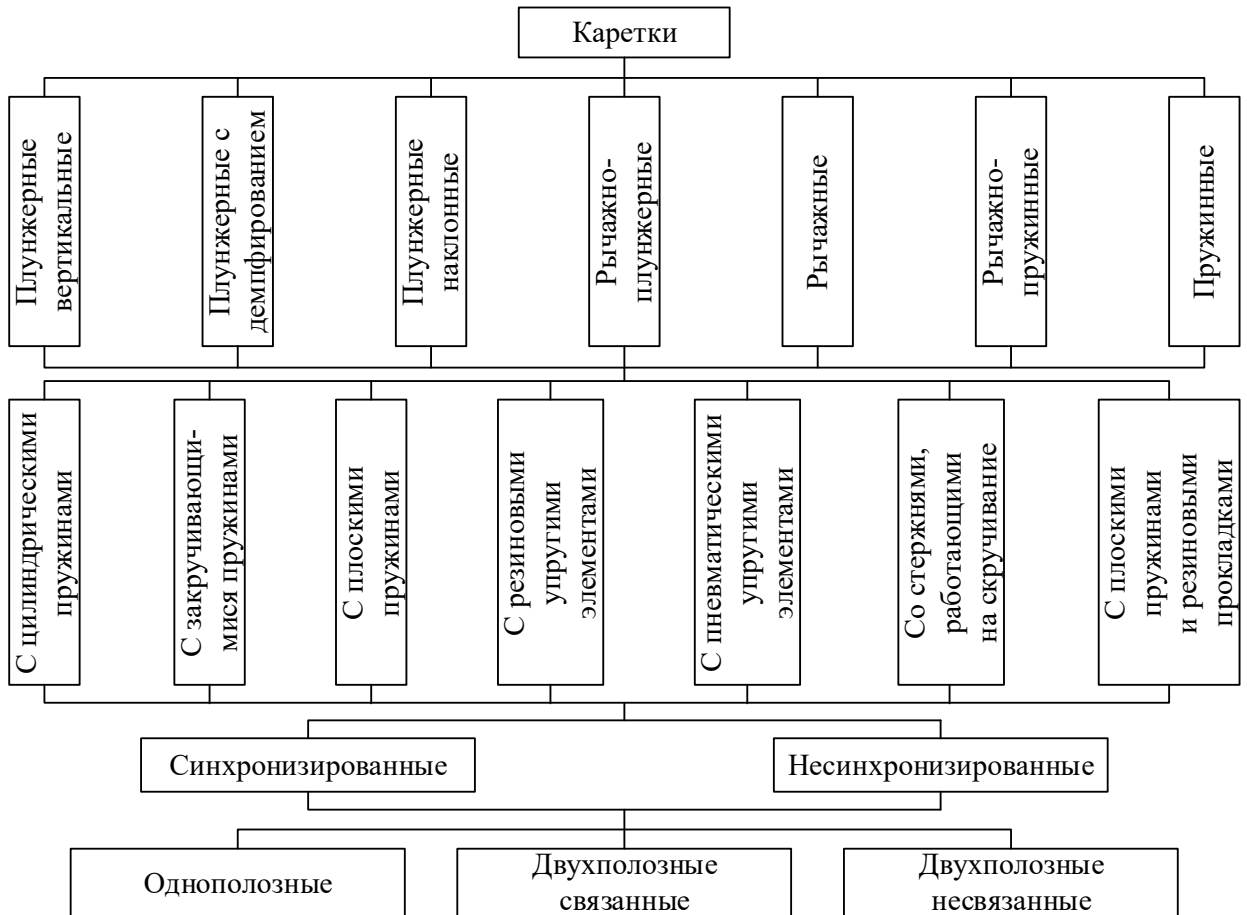


Рисунок 1.6 – Классификация кареток токоприемников

В зависимости от связи их работы с противоположными концами полоза каретки могут быть синхронизированными или несинхронизированными.

Также каретки двухполозных токоприемников в зависимости от связи между полозами, установленными на токоприемнике, разделяют на связанные и несвязанные.

Жёсткость кареток определяют в статике и динамике по первой резонансной скорости, учитывая синхронизацию, свободный ход, массу и форму полоза. Рабочий ход кареток зависит от стрел провеса контактного провода.

При наличии на линиях стрел провеса более 100 мм в случае использования синхронизированных кареток их необходимо оснащать демпферами, а в случае применения несинхронизированных кареток необходимо использовать полоза с дугообразными полозами.

Токоприемники, применяемые в настоящее время на отечественном электроподвижном составе, производимые «Новочеркасским электровозостроительным заводом» и компанией «Софрино Электротранспорт», оснащаются, как правило, рычажными каретками, в которых используется цилиндрические пружины. Они представляют собой рычажную конструкцию, связывающую верхнюю часть каретки, на которой устанавливается полз токоприемника, и верхний шарнир системы подвижных рам (рисунок 1.7).



а



б

Рисунок 1.7 – Распространенные каретки токоприемников современного электроподвижного состава: а – рычажная, б – рычажно-плунжерная

Конструкция кареток, применяемых в токоприемниках, производимых в России, приведена на рисунке 1.8, а – д.

Наибольшее распространение в настоящее время имеют рычажные и рычажно-плунжерные каретки (рисунок 1.8, а - г), что обуславливается простотой их конструкции при удовлетворительных динамических характеристиках. Однополозные каретки (рисунок 1.8, а, в) используются в токоприемниках на пассажирских локомотивах и электропоездах как постоянного, так и переменного тока и на грузовых локомотивах переменного тока.

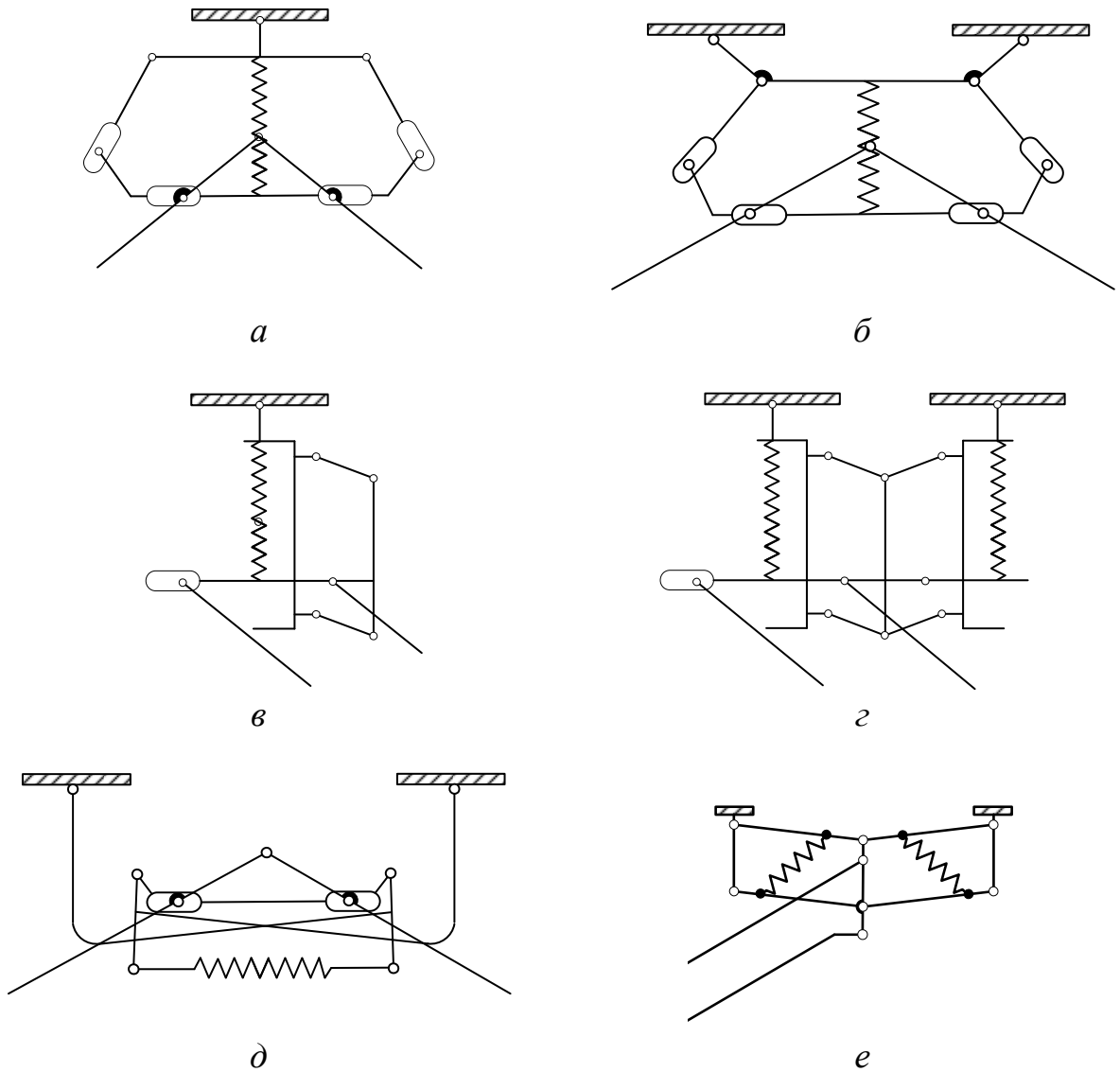


Рисунок 1.8 – Конструкции кареток токоприемников подвижного состава, эксплуатирующегося на железных дорогах России: *а* – рычажная однополосная, *б* – рычажная двухполосная, *в* – рычажно-плунжерная однополосная, *г* – рычажно-плунжерная двухполосная, *д* – клещеобразная рычажно-пружинная, *е* – рычажно-пружинная Siemens

Тогда как двухполосные каретки (рисунок 1.8, б, г) применяются в основном на грузовых поездах постоянного тока, что обуславливается необходимостью снятия высоких токов при сравнительно низком напряжении.

На высокоскоростных поездах ЭВС1/2 «Сапсан» применяются двухпозные рычажно-пружинные каретки, конструкция которых приведена на рисунке 1.8, е.

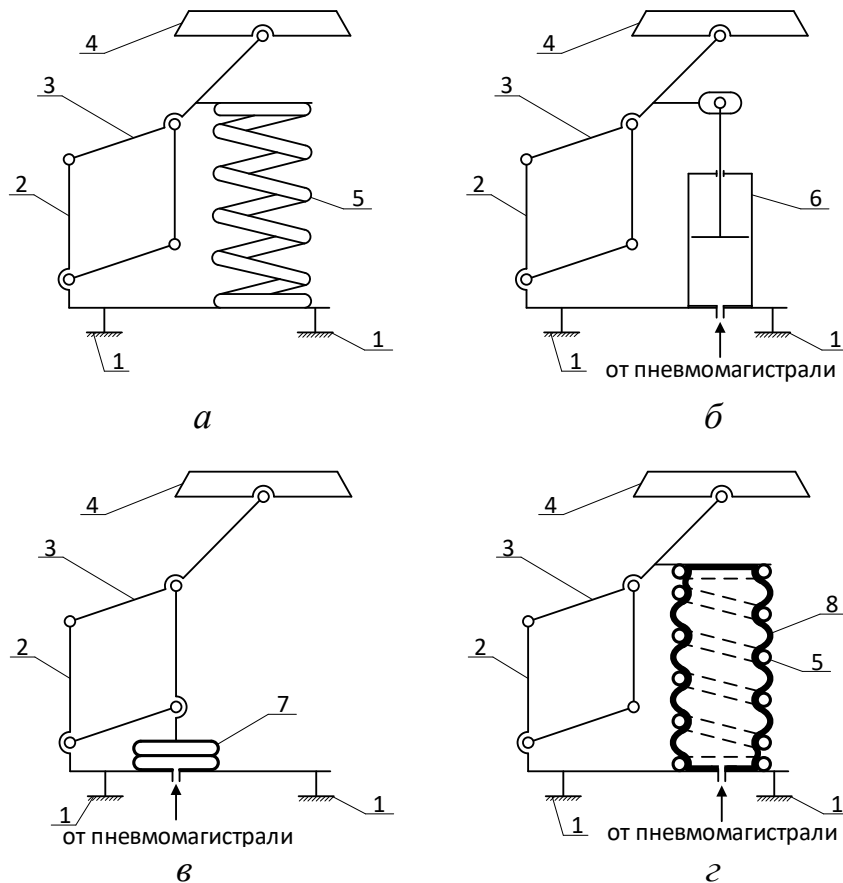
1.4 Анализ разновидностей управляемых упругих элементов, применяемых в каретках токоприемников

В качестве подъемных элементов на современных токоприемниках в основном используются резинокордные пневмоэлементы, их использование позволяет осуществлять управление статическим нажатием токоприемника без необходимости внесения изменений в конструкцию токоприемника, что позволяет сохранить приведенную массу токоприемника, и при этом повысить качество токосъема за счет поддержания надежного электрического контакта.

Однако в настоящее время управляемые упругие элементы в каретках токоприемников не применяются. Это обуславливается высокими требованиями к надежности и массе верхнего узла токоприемника. Но применение систем автоматического регулирования для управления каретками токоприемников является перспективным, поскольку это позволяет снизить влияние инерции элементов конструкции токоприемника в процессе регулирования, что позволит повысить быстродействие систем авторегулирования и обеспечить благоприятный режим работы кареток за счет поддержания требуемого уровня сжатия кареток.

Рассмотренные ранее современные российские токоприемники, применяемые на электроподвижном составе России, содержат каретки, которые оснащены стандартными цилиндрическими пружинами сжатия. Конструкция каретки токоприемника рычажно-плунжерного типа, применяемой на российских токоприемниках, приведена на рисунке 1.9, а. Они обладают постоянной жесткостью, а их преднатяжение настраивается в процессе сборки токоприемника или в ходе обслуживания токоприемников в условиях депо.

Для управления характеристикой сжатия кареток могут применяться различные активно управляемые упругие элементы: электромагнитные, электромеханические, гидравлические, пневматические и другие типы управляемых элементов. Однако наиболее целесообразным является применение управляемых пневматических элементов (рисунок 1.9, б – г), таких как пневмоцилиндров, сильфонов (резинокордных оболочек). Это обуславливается тем, что электроподвижной состав железных дорог использует уже использует пневматические резинокордные оболочки для обеспечения подъема токоприемников.



1 – рама токоприёмника, 2 – основание каретки, 3 – шарнирно-рычажный механизм, 4 – контактные элементы, 5 – цилиндрическая пружина, б – пневмоцилиндр, 7 – резинокордный элемент, 8 – пневмопружинный элемент

Рисунок 1.9 – Конструкции кареток токоприёмников: а – базовая конструкция каретки; б – каретка с пневмоцилиндром, в – каретка с резинокордным элементов; г – каретка с пневмопружинным элементом

Кроме того, применение пневматических систем значительно упрощает обеспечение гальванической развязки по сравнению с упругими элементами с электрическим питанием. Таким образом, пневматические элементы являются наиболее перспективными для использования в каретках токоприемников.

В каретках токоприемников в качестве управляемых пневматических упругих элементов могут применяться пневматические цилиндры [13, 17]. Конструкция рычажно-плунжерной каретки, в которой в качестве управляемого упругого элемента используются пневматический цилиндр представлена на рисунке 1.9, б. Для обеспечения необходимой жесткости пневмоцилиндр может дополняться пружинами, поскольку сила создаваемая пневмоцилиндром не зависит от его сжатия, а пневмоцилиндр может регулировать силу, создаваемую кареткой в широких пределах. Несмотря на широкие возможности настройки, пневмоцилиндры имеют существенные недостатки – крупные габариты и значительную массу. Это негативно влияет на динамические свойства токоприемника и усложняет процесс установки.

Другим типом пневматических элементов, которые могут применяться в каретках являются резинокордные пневмоэлементы (рисунок 1.9, в) [17, 18]. Они обладают собственной нелинейной характеристикой сжатия и значительными диссипативными силами, обусловленными большой толщиной их оболочек, что может обеспечивать демпфирование резонансных колебаний, возникающих в процессе взаимодействия токоприемника и контактной подвески. Однако они обладают большими габаритными размерами и массой при малом рабочем ходе, что вызывает сложности при их установке в каретках токоприемников.

Для управления характеристикой сжатия кареток могут использоваться внутрипружинные пневмоэлементы, предложенные для использования в каретках токоприемников специалистами [19, 20]. Они представляют собой цилиндрическую пружину, внутрь которой устанавливаются пневмобаллон, выполненный из эластичного материала (рисунок 1.9, г).

Для их интеграции необходимы цилиндрические пружины, работающие на сжатие и наличие места для подключения пневматических магистралей, поэтому их внедрение в уже применяющееся в настоящее время рычажные и рычажно-плунжерные каретки не потребует внесения значительных изменений в их конструкцию. Также масса гибкой оболочки внутрипружинного пневмоэлемента невелика и поэтому не окажет значительного влияния на динамические процессы.

При этом каретка может использоваться и при нарушениях герметичности гибкой оболочки, поскольку жесткость такой каретки обуславливается жесткостью пружины, а внутрипружинный пневмоэлемент служит создания дополнительной силы, разжатые при изменении статического нажатия токоприемника. Также гибкая оболочка пневмоэлемента обеспечивает демпфирование за счет сил трения в ней и перетока воздуха при колебаниях.

Сила разжатия каретки, создаваемая внутрипружинными пневмоэлементами может варьироваться в широких пределах, что позволяет использовать их для управления характеристикой, что позволяет использовать их для управления характеристикой сжатия кареток в широких пределах и обуславливает перспективность их внедрения в каретки уже существующих токоприемников [21, 22].

1.5 Применение внутрипружинных пневмоэлементов в конструкции кареток токоприемников России

Одним из недостатков кареток токоприемников эксплуатирующегося в настоящее время в России электроподвижного состава можно отнести отсутствие средств для поглощения колебаний держателя относительно основания. Это создает повышенный риск возникновения резонансных явлений, когда собственная частота колебаний держателя совпадает с частотой возмущающих колебаний от контактной подвески или рамы токоприемника. Этот процесс может сопровождаться резким увеличением амплитуды колебаний полоза и, следовательно, отрывами контактных элементов от контактного провода. Это,

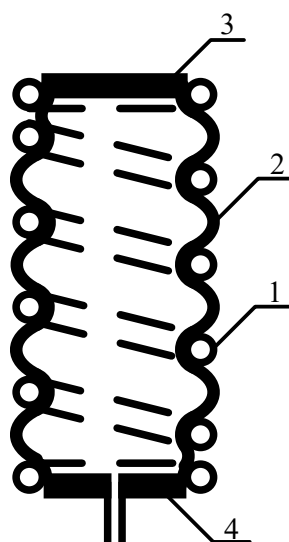
в свою очередь, неизбежно приводит к возникновению электродуговых процессов и интенсивному износу токоъемных элементов. Учитывая широкий диапазон скоростей движения электроподвижного состава, вероятность возникновения подобных резонансных явлений крайне высока.

Также невозможность настройки характеристики сжатия мешает достижению оптимальных параметров при установке контактных элементов с различными токоъемными вставками, обладающими разной массой. Все это приводит к увеличению разброса контактного нажатия при движении с высокой скоростью и возникновении резонансных явлений.

Для обеспечения упругого подрессоривания полоза относительно системы подвижных рам в каретках, эксплуатирующихся в настоящее время токоприемников, используются цилиндрические пружины, при этом внутренняя полость пружины остается свободной. Кроме того, нижние опорные витки пружин упираются в опорные пластины, которые могут быть достаточно легко модернизированы для обеспечения подачи сжатого воздуха в полость внутрипружинного пневмоэлемента.

Таким образом, благодаря простоте конструкции рычажных и рычажно-плунжерных кареток они могут быть дополнены внутрипружинными пневмоэлементами в целях улучшения эксплуатационных характеристик токоприемников электроподвижного состава.

Внутрипружинный пневмоэлемент представляет собой эластичную оболочку, устанавливаемую вовнутрь цилиндрической пружины [23]. Эластичная оболочка снабжается двумя фланцами, один из которых содержит штуцер для подачи в полость оболочки сжатого воздуха. Фланцы служат для герметизации эластичной оболочки. Также фланцы служат удержания пружины и для передачи усилий от внутрипружинного пневмоэлемента на каретку. Схема внутрипружинного пневмоэлемента представлена на рисунке 1.10. Разработанная конструкция защищена патентом РФ на полезную модель [19].



1 – цилиндрическая пружина, 2 – эластичная оболочка,
3 – глухой фланец, 4 – фланец со штуцером

Рисунок 1.10 – Схема устройства внутрипружинного пневмоэлемента

Внутрипружинный пневмоэлемент для кареток токоприемников магистрального электроподвижного состава разрабатывается в соответствии с ГОСТ 32204-2013 «Токоприемники железнодорожного электроподвижного состава. Общие технические условия» и должен работать в следующих условиях:

- предельное вертикальное перемещение подвижной части каретки относительно неподвижной от 50 до 100 мм;
- вертикальное перемещение подвижной части каретки относительно неподвижной от 20 % до 50 % от предельного при приложении к центру полза (ползов) вертикальной силы, направленной к основанию токоприемника и равной пассивному нажатию;
- увеличение вертикальной составляющей силы нажатия полза на контактный провод с ростом скорости электроподвижного состава.

Применение цилиндрических пружин позволяет обеспечить требуемое предельное вертикальное перемещение подвижной части каретки относительно неподвижной, эластичная оболочка не препятствует её перемещению.

Жесткость пружины должна подбираться так, чтобы обеспечивать оптимальный токосъем.

При этом требуемое вертикальное перемещение подвижной части каретки может быть обеспечено за счет изменения давления в полости эластичной оболочки внутрипружинного пневмоэлемента.

Каретка токоприемника электроподвижного состава, оснащенная внутрипружинным пневмоэлементом (рисунок 1.11) включает в себя токосъемные элементы 1, держатель 2, тяги 3, основание 4, закрепленное на раме токоприемника 5. Держатель 2 соединен с основанием 4 через тяги 3. Для обеспечения упругого перемещения полоза в каретке установлена цилиндрическая проволочная пружина 6, работающая сжатие. Управление характеристикой сжатия каретки внутри этой пружины обеспечивается герметичным гибким пневмоэлементом 7. Подача сжатого воздуха в полость гибкой оболочки 8, которого приводит к ее прижатию к внутренним поверхностям витков пружины 6. Для обеспечения регулирования давления в пневмоэлементе 7 используется подключенный через пневмомагистраль регулятор давления воздуха 9.

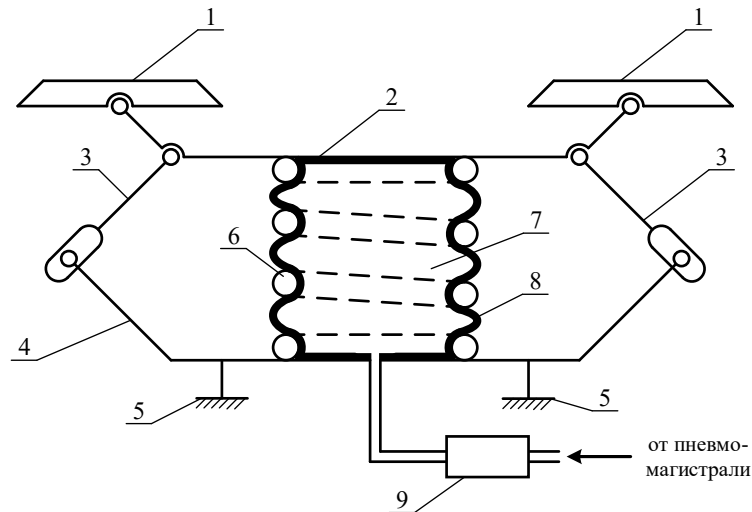


Рисунок 1.11 – Каретка токоприемника, оснащенная внутрипружинным пневмоэлементом

Для изготовления гибкой оболочки 8 пневмоэлементов 7 должен использоваться гибкий термо- и морозостойкий материал, устойчивый к воз-

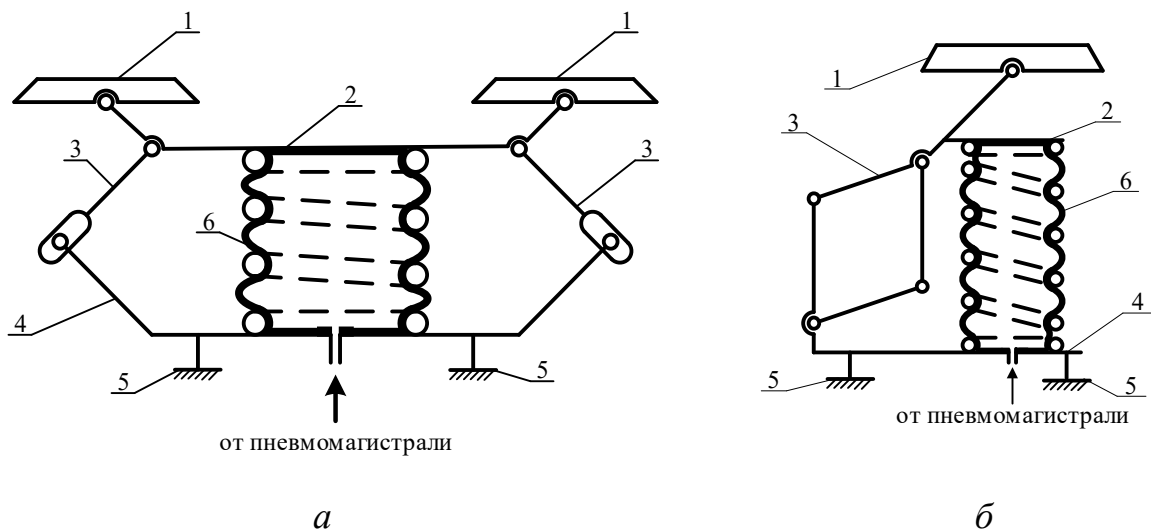
действию образующихся в процессе токосяема искр.

Демпфирующие качества пневмоэлемента 7 каретки достигается благодаря трению между слоями гибкой оболочки 8 пневмоэлемента. Это уменьшает амплитуду колебаний в случае резонанса.

Описанная конструкция каретки с внутрипружинным пневмоэлементом позволяет демпфировать колебания и регулировать жёсткость кареток в зависимости от нажатия, аэродинамических сил, воздействующих на токоприемник и типа контактных элементов.

Внутрипружинные пневмоэлементы могут применяться в конструкции любых кареток токоприемников, оснащенных цилиндрическими пружинами, работающих на сжатие, со свободным внутренним объемом и устанавливаются вместо штатной цилиндрической пружины кареток, использующихся в распространенных токоприемниках магистральных железных дорог.

Схема возможной установки внутрипружинного пневмоэлемента в конструкцию распространенных кареток токоприемников приведена на рисунке 1.12.



- 1 – контактный элемент, 2 – держатель, 3 – подвижные рычаги,
4 – основание, 5 – верхний шарнир токоприемника,
6 – внутрипружинный пневмоэлемент.

Рисунок 1.12 – Варианты установки внутрипружинных пневмоэлементов:

а – в двухполозную каретку, б – в однополозную каретку

Основными техническими характеристиками, внутрипружинного пневмоэлемента являются:

- жесткость пружины (выбирается в зависимости от типа токоприемника и кареток): 3000 Н/м;
- избыточное давление в оболочке внутрипружинном пневмоэлементе: 25...100 кПа;
- площадь сечения оболочки пневмоэлемента: $500 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$.

Применение внутрипружинного пневмоэлемента позволит обеспечить постоянство вертикальное перемещение подвижной части каретки относительно неподвижной при изменении вертикальной составляющей силы нажатия полоза на контактный провод с ростом скорости электроподвижного состава.

По результатам изложенного в первом разделе можно сделать следующие выводы:

1. Несмотря на тенденции, направленные на повышение скоростей движения, в настоящее время в России не производится токоприемников, рассчитанных на скоростное движение;
2. Для обеспечения стабильного электрического контакта подъемно-опускающий механизм (привод) токоприемника должен быть управляемым, позволяющим регулировать статическое нажатие на контактный провод;
3. Токоприемники, оснащенные системой регулирования статического нажатия, должны быть оснащены управляемыми элементами в каретках для изменения нажатия кареток и устранения случаев полного сжатия их пружин.
4. Для кареток отечественных скоростных токоприемников целесообразно в качестве управляемых элементов применять внутрипружинные пневмоэлементы.

2 РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ТОКОПРИЁМНИКА И КОНТАКТНОЙ ПОДВЕСКИ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ УПРАВЛЯЕМЫХ ПНЕВМОЭЛЕМЕНТОВ В КОНСТРУКЦИИ КАРЕТОК ТОКОПРИЕМНИКОВ

2.1 Анализ известных методов моделирования взаимодействия токоприемников с контактными подвесками

Анализ взаимодействия контактной подвески и токоприёмников необходим, как для улучшения конструкции контактной подвески, так и для совершенствования самих токоприёмников. Однако проведение натуральных экспериментов зачастую затруднено, поэтому для изучения этого взаимодействия разрабатываются разнообразные модели токоприёмников.

Модели токоприемников с приведенными массами разрабатывали В. П. Михеев, А. В. Фрайфельд, Э. С. Почаевец, К. Г. Марквардт, А. В. Плакс, Д. А. Ефимов, А. В. Паранин [24], М. М. Ерофеева [25], В. М. Павлов [16], Й. Сонг, Г. Т. Фросетх, П. Навик, А. Ронняуист [26], Й. Бенет, Ф. Цуартеро, Т. Роё, П. Тендеро, Е. Ариас, Дж. Гил, М. Тур [27] и др.

Аналитические модели, в которых токоприемник рассматривается в виде жестких стержней и материальных точек описывали В. А. Вологин, И. Л. Саля, А. О. Шимановский [28], С. Д. Еппингер, Г. Чен, Й. Янг, Я. Янг, Дж. Ванг, Г. Мей [29] и др.

Имитационные статистические модели были разработаны В. В. Литвиновой, В. В. Моисеевым [30], Г. Р. Ермачковым, Й. Сонгом, Гуннстеин Т. Фросетхом, П. Навиком, А. Ронняуистом [31], М Кузнарком, А. Лоренцом [32] и др.

Методы имитационного компьютерного многотельного моделирования для описания токоприемников использовали Т. А. Ецков [33], А. Н. Смердин, Ф. Г. Раутер [34], Й. Помбо [35], Й. Амбросио [36], М. Перейра [34], Ж.-П. Массат [13], К. Лаурент, Й.-П. Бианчи, Е. Балмес и др.

Методы имитационного конечноэлементного моделирования для описания работы токоприемников развивали Е. В. Авотин, Н. В. Миронос, И. Н. Титух [37], Щ. Й. Яиан, Г. Х. Чен, Щ. Х. Жанг, Х. Оуянг [38], З. Р. Жоу и др.

Разработкой математических моделей токоприемников, оснащенных управляемыми упругими элементами в каретках, занимались Й. Ямашита, М. Икеда [17, 18], Ж.-П. Массат, Ч. Лаурент, Й.-П. Бианчи, Е. Балмес [13], Б. Аллотта, Л. Пуги, Ф. Бартолини [39] и др.

В настоящее время разработано большое число математических моделей токоприемников различных типов и различного функционального назначения. Поэтому целесообразным для их дальнейшего рассмотрения классифицировать их по функциональному назначению, используемому математическому аппарату, размерности и методам решения.

Методы расчета, в которых учитывалась подвеска с сосредоточенными параметрами, разрабатывали Р. Ниблер [40], И. И. Власов [41], С. Фуджики, Н. Сибата, И. Кумезава, А. В. Плакс, Л. Паскуччи [42], Э. С. Почаевец [43], В. П. Михеев [44], Р. Моррис, В. А. Ан, А. В. Фрайфельд, М. М. Ерофеева, Г. Г. Энгельс, З. Е. Фидрих, В. Т. Жарков [45], Л. Д. Тавровский [46], А. Н. Горбань, В. М. Павлов, О. А. Сидоров, А. Н. Смердин, Х. Дуан, Р. Диксон, Э. Стюарт [47] и др.

Взаимодействие токоприемников с подвеской в виде жесткой кривой рассматривали Б. Финк [48], И. Бейер, Ф. Нитхаммер, И. А. Беляев, Р. Н. Решетов, Т. Кобаяси, А. И. Гуков, Ю. Н. Щерба, В. П. Михеев, А. Н. Горбань, О. А. Сидоров, И. Л. Саля и др.

Методы расчета, в которых учитывалась подвеска с распределенными параметрами, разрабатывали Г. Г. Марквардт [49], К. Г. Марквардт, В. Бюкер, Г. Джилльберт, Х. Дэвис [50], Р. Моррис, А. В. Плакс, С. Н. Ковалев [51], Р. Т. Грей, С. Леви, Я. А. Бейн, Е. Я. Леклерк [52], К. Тзючия, Фудзин, Н. Эхара, М. Р. Эббот, П. М. Кейн, П. Р. Скотт [53], Т. А. Тибиллов, А. И. Филоненко, М. В. Заволжанский, П. Д. Титаренко, А. В. Ефимов, А. Г. Галкин [54], В. П. Михеев, А. Д. Кокоев, В. И. Себелев, А. Н. Горбань, М. Мюнхоф,

Ф. Г. Раутер, А. Н. Смердин, Е. В. Кудряшов [55], А. В. Паранин, М. Ву, Х. Жанг, Р. Жоу, Дж. Ванг [56] и др.

Влияние кузова подвижного состава на процесс взаимодействия токоприемника с контактной подвеской исследовали Д. Л. Коффман, Х. Л. Престон [57], М. Манцо [58], Р. Моррис, А. В. Фрайфельд, З. Е. Фидрих, Г. Г. Энгельс, В. П. Михеев, А. Н. Горбань и др.

Теоретические исследования влияния аэродинамического воздействия на качество токосъема проводили К. Аллен, В. Лангер, М. Манцо, Р. Келлер, Н. Сибата, И. Кумезава, А. В. Плакс, В. П. Михеев, И. А. Беляев [59], Г. П. Маслов, В. А. Нехаев, А. П. Стариков, В. М. Павлов, В. Н. Ли, А. К. Кузнецов, О. А. Сидоров, Т. А. Ецков [60], У. Сонг, Ж. Лю, Х. Оянг, Х. Ванг [61], и др.

В зависимости от способа описания модели можно разделить на аналитические и имитационные. К последним относятся модели, основанные на передаточных функциях, статистике, а также модели, созданные с помощью специализированного программного обеспечения для физического моделирования (симуляционные модели).

Для расчёта таких моделей применяются как аналитические методы, так и численные методы решения, в том числе с использованием вычислительной техники.

По своему функциональному назначению математические модели токоприёмников делятся на механические, аэродинамические, тепловые и электрические. Классификация моделей токоприёмников, используемых при расчетах их взаимодействия с контактной подвеской, приведена на рисунке 2.1.

В аналитических моделях токоприемник представляется в виде системы дифференциальных уравнений, описывающих взаимодействие элементов токоприемника между собой. Для решения полученных систем уравнений могут использоваться как аналитические, так и численные методы.



Рисунок 2.1 – Классификация механических моделей токоприёмников

Имитационные модели представляют собой «чёрный ящик», поведение которого воспроизводит работу реального токоприёмника. Для их описания, в отличие от аналитических моделей, не требуется непосредственного описания функциональных зависимостей, характеризующих поведение токоприёмника.

Наибольшее распространение получили среди аналитических получили модели с приведёнными массами (рисунок 2.2). Такие модели позволяют проводить анализ взаимодействия токоприёмников и контактной подвески с достаточной точностью для прикладных задач. Однако они не позволяют проводить непосредственный механический анализ конструкции токоприёмников, поскольку не позволяют оценить силы, возникающие в элементах их конструкции.

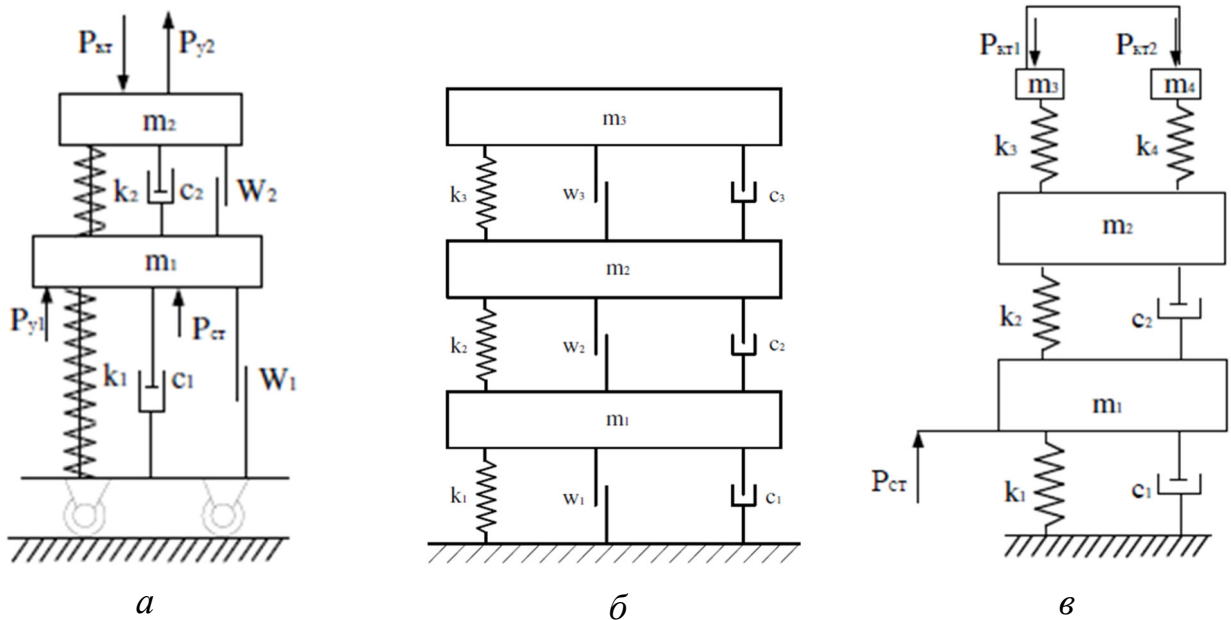


Рисунок 2.2 – Примеры моделей с приведёнными массами: а – двухмассовая модель, б – трехмассовая модель, в – четырёхмассовая модель с учётом неравномерности нажатия на полоза токоприёмника

Обычно данные модели выполняются одномерными с числом степеней свободы, равным числу приведённых масс, количество которых выбирается в соответствии с требуемым уровнем детализации. Приведенные массы соединяются между собой с помощью упругих, демпфирующих и других элементов, имитирующих процессы, происходящие в реальном токоприёмнике. Параметры необхо-

димые для модели определяются экспериментально либо с применением других методов моделирования.

Широкое применение получили двухмассовые модели, в которых приведенные массы имитируют систему подвижных рам и верхнего узла токоприемника, включающего полз и каретки.

Исследование взаимодействия токоприёмников и контактной подвески показало, что наличие упругой деформации верхнего рычага токоприёмников оказывает значительное влияние на процесс токосъема, что приводит к появлению высокочастотных колебаний верхнего рычага относительно нижнего рычага токоприёмника. Для учета этих деформаций применяются модели, где приведённая масса системы подвижных рам разделяется на 2 части (рисунок 2.2, б). Одна из этих масс является приведенной массой нижней рамы, а другая – верхней рамы. Упругий элемент между ними учитывает изгибную жесткость верхней рамы.

С усложнением конструкции токоприёмников стало необходимым моделирование устройств с несколькими ползками и учёт их продольных, поперечных и угловых движений. Для этого в модель добавляют новые компоненты, соединения и степени свободы. Это позволяет учитывать различия в усилиях нажатия на полза, их разную высоту и другие процессы, возникающие при использовании многоползковых токоприёмников (рисунок 2.2, в).

Ещё одним видом аналитических моделей являются модели, в которых токоприемник представляется в виде системы стержней и материальных точек (рисунок 2.3). В таких моделях стержни обычно считаются абсолютно жёсткими для упрощения расчётов, хотя возможно также использование гибких стержней, что значительно усложняет моделирование. Эти схемы описывают взаимосвязи между элементами конструкции токоприёмника и воздействующие на них силы.

В отличие от моделей с приведенными массами упрощенные механические модели позволяют оценить силы и перемещения элементов конструкции токоприёмника.

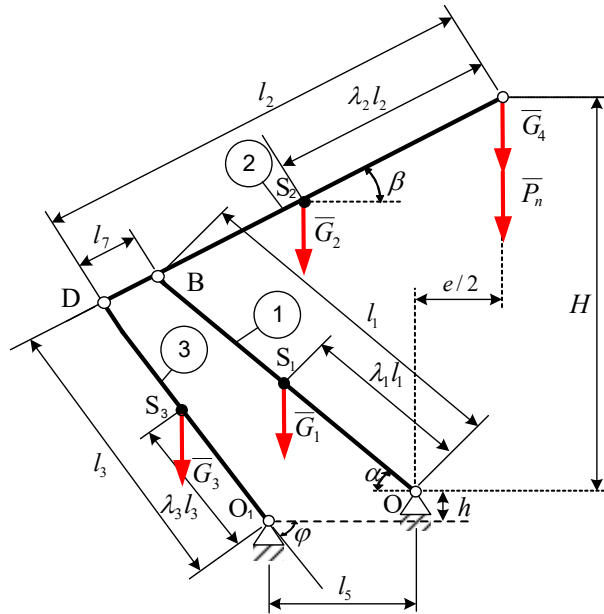


Рисунок 2.3 – Упрощенная механическая схема асимметричного токоприёмника

Как правило, такие механические модели являются двумерными – в вертикальной плоскости, расположенной вдоль направления движения, поскольку построение трёхмерных моделей связано с большими вычислительными трудностями. Тем не менее, при необходимости возможно создание и трёхмерных моделей, хотя они требуют более сложных расчётов.

В отличие от моделей с приведёнными массами, упрощённые механические схемы позволяют оценивать перемещения и нагрузки на отдельные элементы конструкции токоприёмника.

Обычно такие модели применяются для расчета статических характеристик токоприёмника, поскольку аналитическое описание динамических процессов в подобных моделях достаточно затруднительно и требует значительного числа допущений.

Передаточные модели широко применяются в системах автоматического регулирования для описания связи между входными и выходными параметрами с помощью дифференциальных операторов. Это позволяет, через преобразование Лапласа, определять выходной сигнал по заданному входному.

Моделирование токоприёмника и контактной подвески на основе передаточных функций обычно опирается на экспериментальные данные, но возможно и

аналитическое построение модели. Реальные переходные процессы аппроксимируются с определённой точностью, зависящей от качества измерений и метода аппроксимации. Однако передаточные модели ограничены в учёте множества факторов, влияющих на работу токоприёмника, что приводит к упрощению общей математической модели системы.

Статистические модели применимы для описания систем, подверженных случайным воздействиям, что делает их актуальными для моделирования токоприёмников. Работа токоприёмника зависит от множества трудно предсказуемых факторов – вибраций, погодных условий, отклонений параметров подвески, пути и состава. В отличие от аналитических моделей, статистические не описывают физику процессов напрямую, а выявляют зависимости между входными и выходными параметрами. Это позволяет учитывать влияние факторов, которые сложно формализовать аналитически. Такие модели строятся на основе экспериментальных данных с применением регрессии, нейросетей и других методов статистического анализа.

Для симуляционного моделирования применяются специализированные программные среды физического моделирования, такие как MATLAB, MSC Adams, ANSYS и другие. В рамках исследования создаётся «цифровая копия» токоприёмника – модель, которая может включать определённые упрощения, необходимые для повышения эффективности моделирования и проведения расчётов.

На основе этой цифровой модели программное обеспечение автоматически формирует систему уравнений, описывающих поведение токоприёмника. Затем встроенные численные решатели выполняют расчёт, обеспечивая точное воспроизведение рабочих процессов. Такой подход позволяет учитывать факторы, которые сложно включить в аналитические модели, обеспечивая при этом высокую достоверность результатов. Уровень детализации модели ограничивается лишь производительностью вычислительных устройств.

Многотельное моделирование – один из наиболее широко используемых подходов в симуляции (рисунок 2.4). Оно основывается на создании трёхмерных твердотельных моделей конструктивных элементов, связанных между собой

с учетом кинематических и силовых ограничений. Это позволяет воспроизводить поведение реального токоприёмника в различных режимах работы.

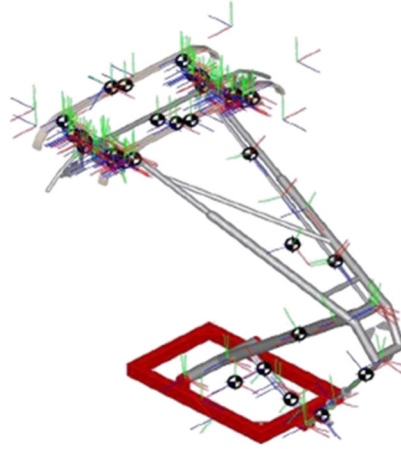


Рисунок 2.4 – Многотельная модель с жёсткими элементами конструкции

Ранее такие модели строились на допущении полной жёсткости всех элементов. Однако с ростом вычислительных возможностей стало возможным учитывать упругость – в частности, моделировать подвижные рамы как гибкие тела. Динамика многотельных систем описывается с использованием уравнений Лагранжа второго рода и уравнений Ньютона–Эйлера.

Конечно-элементные модели (рисунок 2.5) могут применяться для моделирования работы токоприемников. Основной их целью являются прочностные расчеты элементов токоприемника, но в том числе они могут использоваться для моделирования их взаимодействия с контактной подвеской. Их создание состоит в разбиении исследуемого объекта на функционально связанные элементы, для которых формируются системы линейных алгебраических уравнений.



Рисунок 2.5 – Конечно-элементная модель токоприёмника

2.2 Предлагаемая математическая модель авторегулирования токоприемника с внутривибрационными пневмоэлементами

2.2.1 Разработка математической модели токоприемника с приведенными массами

Для расчета используется трехмассовая модель токоприемника (рисунок 2.6), поскольку данный тип моделей позволяет исследовать взаимодействие токоприемника с контактной подвеской с достаточной степенью достоверности при низких затратах вычислительных ресурсов. Реальный токоприемник заменяется на колебательную систему, состоящую из трех приведенных масс: верхний узел токоприемника (m_1); верхнюю раму (m_2) и нижнюю раму (m_3) [62].

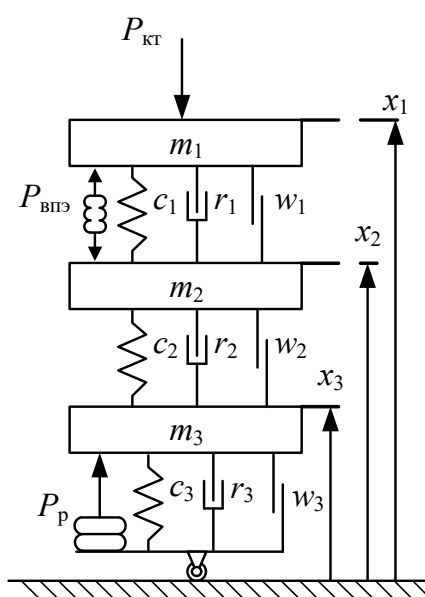


Рисунок 2.6 – Расчетная схема трехмассовой модели токоприемника, оснащенного внутривибрационными пневмоэлементами в каретке

Приведенные массы связями между собой с помощью элементов, имитирующих жесткость, вязкое и сухое трение. Приведенные массы и параметры указанных элементов могут быть вычислены аналитически или получены экспериментальным путем.

При составлении математической модели токоприемника были приняты следующие допущения:

- амплитуда вертикальных колебаний является малой по сравнению с полным рабочим ходом токоприемника и подъемный резинокордный элемент соединен с дополнительным резервуаром бесконечно большого объема, что позволяет принять статическое нажатие токоприемника постоянным;
- нижняя рама принята абсолютно жесткой;
- аэродинамические подъемные силы, действующие на токоприемник, не учитываются, их значение принимается равным нулю;
- токоприемник обладает абсолютной жесткостью в продольном и поперечном направлениях;
- не учитывается вращательное движение полоза токоприемника;
- не учитывается перераспределение контактного нажатия по ширине полоза токоприемника;
- не учитываются вертикальные колебания кузова электроподвижного состава, поскольку колебания кузова современного электроподвижного состава малы по сравнению с изменением высотного положения контактного провода в пролете;
- здесь и далее нелинейные силы сухого трения в расчетах были линеаризованы следующей кусочно-постоянной функцией:

$$\begin{cases} \text{sign}(x_i - x_k) = -1 & x_i - x_k \leq -0,01; \\ \text{sign}(x_i - x_k) = 100 \cdot (x_i - x_k) & x_i - x_k > -0,01; \\ \text{sign}(x_i - x_k) = 1 & x_i - x_k > 0,01. \end{cases} \quad (2.1)$$

На расчетной схеме приняты следующие обозначения: x_1 – высотное положение верхнего узла токоприемника; x_2 – высотное положение верхней рамы; x_3 – высотное положение нижней рамы; m_1 – масса верхнего узла токоприемника; m_2 – приведенная масса верхней рамы; m_3 – приведенная масса нижней рамы; c_1 – жесткость кареток; c_2 – жесткость верхней рамы; c_3 – жесткость нижней рамы; r_1 – коэффициент вязкого трения в каретке; r_2 – коэффициент вязкого трения в верхней раме; r_3 – коэффициент вязкого трения в нижней раме; w_1 – сила нелинейного сухого трения в каретке; w_2 – сила нелинейного сухого трения в верхней раме; w_3 – сила нелинейного сухого трения в нижней раме, P_p – сила, создаваемая

подъемным пневмоэлементом токоприемника, $P_{\text{кт}}$ – контактное нажатие токоприемника. И в зависимости от типа токоприемника, особенностей методов решения и других причин из данных моделей могут исключаться или, наоборот, включаться дополнительные элементы.

Математическая модель токоприемника с приведенными массами может быть описана с помощью уравнений Лагранжа второго рода, связывающих движение тел, входящих в модель с помощью дифференциальных уравнений второго порядка:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}} \right) - \frac{\partial T}{\partial q} + \frac{\partial \Pi}{\partial q} + \frac{\partial \Phi}{\partial \dot{q}} = Q_q; \quad q \in [x_1, x_2, x_3], \quad (2.2)$$

где q – обобщенная координата;

T – кинетическая энергия системы;

Π – потенциальная энергия системы;

Φ – диссипативная функция;

Q_q – обобщенная сила по обобщенной координате q .

Для решения уравнений движения приведенной математической модели токоприемника требуется составление системы, состоящей из трех уравнений.

Кинетическая энергия системы рассчитывается для абсолютных скоростей движения:

$$T = \frac{m_1 \dot{x}_1^2}{2} + \frac{m_2 \dot{x}_2^2}{2} + \frac{m_3 \dot{x}_3^2}{2}. \quad (2.3)$$

Потенциальная энергия, накапливаемая в упругих элементах модели, рассчитывается как сумма кинетических энергий входящих в систему элементов:

$$\Pi = \frac{c_1 \cdot \Delta x_{1-2}^2}{2} + \frac{c_2 \cdot \Delta x_{2-3}^2}{2} + \frac{c_3 \cdot \Delta x_{3-0}^2}{2}. \quad (2.4)$$

где Δx_{1-2} – сжатие пружин каретки,

Δx_{2-3} – деформация верхней рамы,

Δx_3 – деформация нижней рамы.

Сжатие пружин каретки и деформация верхней и нижней рамы могут быть рассчитаны как разность положений соответствующих приведенных масс модели:

$$\begin{aligned}\Delta x_{1-2} &= x_1 - x_2; \\ \Delta x_{2-3} &= x_2 - x_3; \\ \Delta x_{3-0} &= x_3.\end{aligned}\tag{2.5}$$

Диссипативная функция исследуемой трехмассовой модели токоприемника описывается с помощью следующего выражения:

$$\Phi = \frac{r_1(\dot{x}_1 - \dot{x}_2)^2}{2} + \frac{r_2(\dot{x}_2 - \dot{x}_3)^2}{2} + \frac{r_3\dot{x}_3^2}{2}.\tag{2.6}$$

После дифференцирования производные кинетической энергии (2.3) по времени примут следующий вид:

$$\begin{aligned}\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{x}_1} \right) &= m_1 \ddot{x}_1; \\ \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{x}_2} \right) &= m_2 \ddot{x}_2; \\ \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{x}_3} \right) &= m_3 \ddot{x}_3.\end{aligned}\tag{2.7}$$

При этом частные производные кинетической энергии (2.3) по обобщенным координатам в результате дифференцирования оказываются равными нулю:

$$\frac{\partial T}{\partial x_1} = \frac{\partial T}{\partial x_2} = \frac{\partial T}{\partial x_3} = 0.\tag{2.8}$$

Частные производные потенциальной энергии (2.4) по обобщенным координатам после дифференцирования принимают следующий вид:

$$\begin{aligned}
\frac{\partial \Pi}{\partial x_1} &= c_1(x_1 - x_2); \\
\frac{\partial \Pi}{\partial x_2} &= -c_1(x_1 - x_2) + c_2(x_2 - x_3); \\
\frac{\partial \Pi}{\partial x_3} &= -c_2(x_2 - x_3) + c_3x_3.
\end{aligned} \tag{2.9}$$

Диссипативная функция (2.6) в результате вычисления частных производных описывается с помощью следующих зависимостей:

$$\begin{aligned}
\frac{\partial \Phi}{\partial \dot{x}_1} &= r_1(\dot{x}_1 - \dot{x}_2); \\
\frac{\partial \Phi}{\partial \dot{x}_2} &= -r_1(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) + r_2(\dot{x}_2 - \dot{x}_3); \\
\frac{\partial \Phi}{\partial \dot{x}_3} &= -r_2(\dot{x}_2 - \dot{x}_3) + r_3\dot{x}_3.
\end{aligned} \tag{2.10}$$

Обобщенные силы по обобщенным координатам могут быть рассчитаны в соответствии со следующими вырождениями:

$$\begin{aligned}
Q_1 &= -w_1 \text{sign}(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) + P_{\text{ВПЭ}} - P_{\text{КТ}}; \\
Q_2 &= w_1 \text{sign}(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) - w_2 \text{sign}(\dot{x}_2 - \dot{x}_3) - P_{\text{ВПЭ}}; \\
Q_3 &= w_2 \text{sign}(\dot{x}_2 - \dot{x}_3) - w_3 \text{sign}(\dot{x}_3);
\end{aligned} \tag{2.11}$$

После вычисления частных производных кинетической, потенциальной энергий и диссипативной функции (2.7 – 2.11) составляется система дифференциальных уравнений второго порядка:

$$\begin{cases}
m_1 \ddot{x}_1 + c_1(x_1 - x_2) + r_1(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) = -w_1 \text{sign}(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) + P_{\text{ВПЭ}} - P_{\text{КТ}}; \\
m_2 \ddot{x}_2 - c_1(x_1 - x_2) + c_2(x_2 - x_3) - r_1(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) + r_2(\dot{x}_2 - \dot{x}_3) = \\
= w_1 \text{sign}(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) - w_2 \text{sign}(\dot{x}_2 - \dot{x}_3) - P_{\text{ВПЭ}}; \\
m_3 \ddot{x}_3 - c_2(x_2 - x_3) + c_3x_3 - r_2(\dot{x}_2 - \dot{x}_3) + r_3\dot{x}_3 = w_2 \text{sign}(\dot{x}_2 - \dot{x}_3) - w_3 \text{sign}(\dot{x}_3).
\end{cases} \tag{2.12}$$

Жесткость кареток токоприёмника в зависимости от их хода с учётом ограничения свободного хода может быть определена исходя из следующих условий:

$$c_1(x_2 - x_1) = \begin{cases} c_{1 \text{ уд}}, & x_2 - x_1 < 0; \\ c_1, & 0 \leq x_2 - x_1 \leq h_k; \\ c_{1 \text{ уд}}, & x_2 - x_1 > h_k, \end{cases} \quad (2.13)$$

где $c_{1 \text{ уд}}$ – ударная жесткость ограничителей кареток, Н/м.

2.2.2 Совершенствование математической модели контактной подвески с сосредоточенными параметрами

Моделирование контактной подвески также является актуальной задачей при исследовании работы системы токосъема. Наибольшее распространение в настоящее время получили конечноэлементные модели контактной сети. В таких моделях контактная подвеска делится на достаточно малые связанные между собой фрагменты – конечные элементы. Они позволяют получить наиболее полную информацию о процессах, происходящих в контактной подвеске при ее взаимодействии с токоприемником. Однако, ввиду высокой детализации для их программной реализации требуются значительные вычислительные ресурсы и время, из-за чего их применение затруднительно для исследования процесса токосъема при выборе рациональных параметров токоприемников на этапе их разработки [63, 64].

Более простыми являются модели подвесок с сосредоточенными параметрами, где контактная подвеска представляется в виде одномерного колебательного контура [65]. Хотя данные модели содержат большое число допущений и не позволяют учитывать волновые процессы, происходящие в контактной подвеске, их применение целесообразно при разработке токоприемников, поскольку такие модели не требуют значительных затрат вычислительных мощностей, что позволяет оперативно подбирать рациональные параметры токоприемников на этапе их разработки.

При использовании моделей с приведенными массами (рисунок 2.7, а) контактная подвеска обычно представляется в виде перемещаемой по обобщенной координате (x_k) и приведенной к точке контакта массы контактной подвески ($m_{\text{пкс}}$), которая посредством элементов упругости ($c_{\text{пкс}}$), вязкого ($r_{\text{пкс}}$) и сухого тре-

ния ($w_{\text{ПКС}}$) соединена с точкой, изменяющей свое вертикальное положение во времени в соответствии с вертикальной координатой контактного провода в пролете при отсутствии контакта между полозом и контактным проводом ($x_{\text{к0}}(vt)$), зависящей от скорости движения токоприемника вдоль контактной подвески. При этом элементы вязкого ($r_{\text{ПКС}}$) и сухого трения ($w_{\text{ПКС}}$) могут соединяться как с точкой, соответствующей вертикальному положению контактного провода ($x_{\text{к0}}(vt)$), так и с неподвижной точкой, не перемещающейся с течением времени.

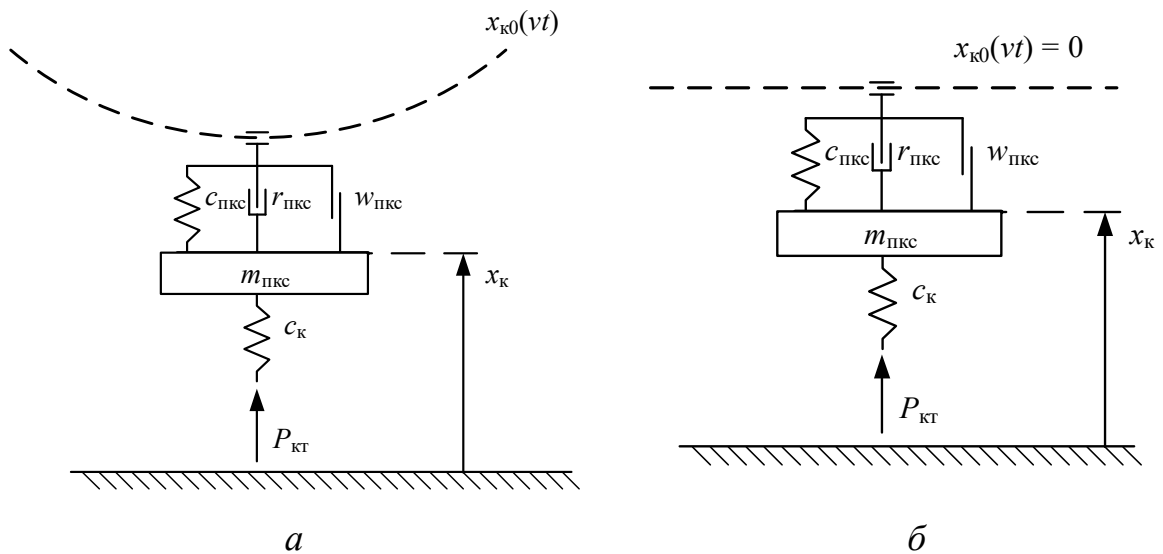


Рисунок 2.7 – Обобщенная расчетная схема модели контактной подвески с приведенными массами: а – модель с вертикальными перемещениями контактного провода, б – модель с изменяющейся жёсткостью контактной подвески

При моделировании взаимодействия токоприемников и контактной подвески для имитации контакта широко применен метод штрафных функций. Его суть заключается в оценке величины «зазора» между контактными элементами и контактным проводом:

$$\begin{cases} P_{\text{кт}} = c_{\text{к}}(x_{\text{кп}} - x_1), & (x_{\text{кп}} - x_1) \leq 0; \\ P_{\text{кт}} = 0, & (x_{\text{кп}} - x_1) > 0. \end{cases} \quad (2.14)$$

где $c_{\text{к}}$ – жесткость контакта;

$x_{\text{кп}} - x_1$ – «зазор» между контактным проводом и полозом токоприемника.

Таким образом, в данной схеме контактная подвеска представляет собой колебательный контур, перемещающийся относительно обобщенной координаты x_k (рисунок 2.7, а). При вертикальных перемещениях точки ($x_{k0}(vt)$) возникают вынужденные колебания, изменяющие положение приведенной массы контактной подвески. Возникновение вынужденных колебаний обуславливается невозможностью мгновенного перемещения приведенной массы контактной подвески относительно приведенной координаты x_k , из-за чего вертикальное положение контактной подвески в пролете изменяется даже при отсутствии воздействия на нее со стороны токоприемника. Такое представление контактной подвески позволяет с достаточной степенью достоверности описывать взаимодействие контактной подвески и токоприемника при малых скоростях движения, но с ростом частоты вертикальных колебаний точки контакта при увеличении скорости движения подвижного состава влияние данного эффекта на результаты моделирования увеличивается.

Также широко используются модели контактной подвески, лишенные описанного недостатка, где вертикальное положение контактного провода принимается постоянным ($x_{k0}(vt) = \text{const}$) (рисунок 2.7, б) [66, 67], поскольку в ряде случаев неравномерность жёсткости (эластичности) контактной подвески в пролёте оказывает более значительное влияние на процесс токосъема, чем изменение вертикального положения контактного провода из-за наличия стрел провеса. Вертикальные перемещения полоза в таких моделях обуславливаются неравномерностью жесткости контактной подвески в пролете. Однако совершенствование контактных подвесок за счет обеспечения равномерности жесткости контактной подвески в пролете, приводит к росту влияния стрел провеса на динамику взаимодействия, что требует учета обоих факторов: неравномерности жесткости и стрел провеса контактного провода. Для повышения точности моделирования такие модели могут совершенствоваться за счет получения дополнительной информации на основе конечно-элементных моделей контактной подвески [47].

Для снижения влияния указанного эффекта, связанного с возникновением вынужденных колебаний приведенной массы контактной подвески в исходной

модели (рисунок 2, а), предлагается использовать инертора [68] – элемент, создающий силу пропорциональную некоторому коэффициенту b , который измеряется в кг, и разности ускорений между точками, между которыми размещается инертор [69]:

$$P_{\text{и}} = b \cdot (\ddot{x}_1 - \ddot{x}_2). \quad (2.15)$$

Данный элемент является аналогом силы инерции, накапливающейся от кинетической энергии относительно некоторой точки, перемещаемой в пространстве. Это позволит более точно имитировать проведенную к точке контакта массу контактной подвески.

В предлагаемой расчетной схеме модели контактной подвески с приведенными массами (рисунок 2.8) вместо приведенной массы контактной подвески заменяется на инертор, соединяющий точку $x_{\text{к0}}(vt)$, соответствующую вертикальному положению контактного провода при отсутствии воздействий на него со стороны токоприемника и точку контакта $x_{\text{к}}$. Коэффициент b принимается равным приведенной массе контактной подвески.

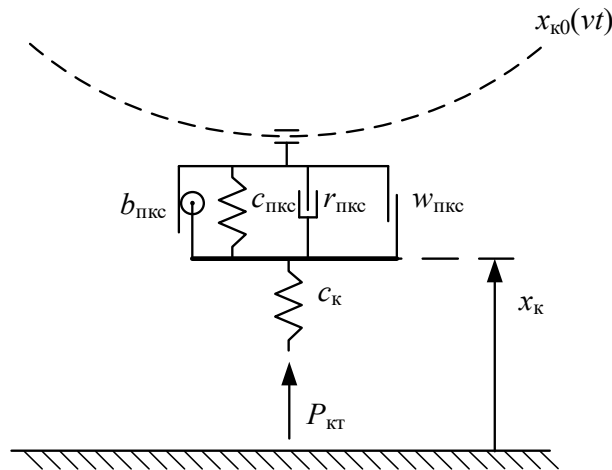


Рисунок 2.8 –Предлагаемая схема модели контактной подвески

В соответствии со II законом Ньютона и принципом Даламбера равнодействующая сил в точке $x_{\text{к}}$ будет равна:

$$b_{\text{ПКС}} (\ddot{x}_{\text{к0}} - \ddot{x}_{\text{к}}) + c_{\text{ПКС}} (x_{\text{к0}} - x_{\text{к}}) + r_{\text{ПКС}} (\dot{x}_{\text{к0}} - \dot{x}_{\text{к}}) + w_{\text{ПКС}} \cdot \text{sign}(\dot{x}_{\text{к0}} - \dot{x}_{\text{к}}) + P_{\text{кТ}} = 0. \quad (2.16)$$

Параметры подвески приняты в соответствии с экспериментальными данными, полученными при исследовании контактной подвески КС-250-06: стрела провеса контактного провода принята равной 0,035 м, распределение жесткости приведено на рисунке 2.9, высотное положение приведено на рисунке 2.10.

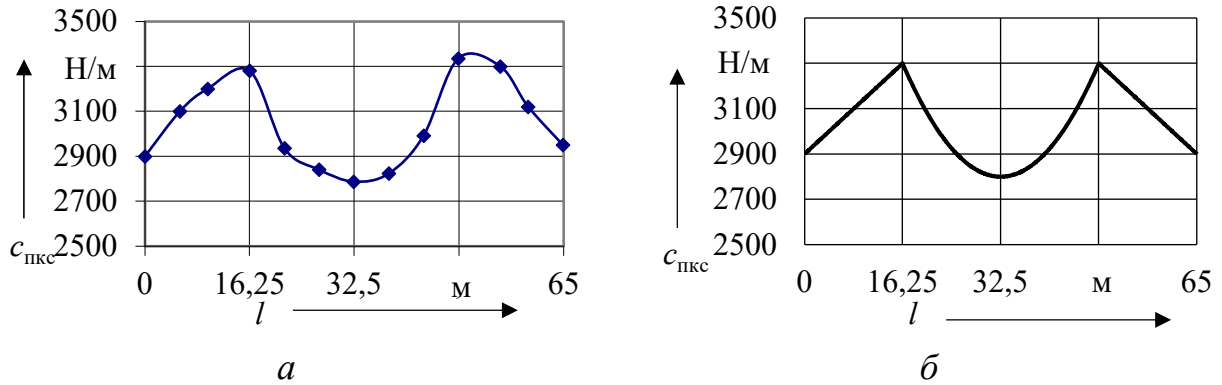


Рисунок 2.9 – Распределение жесткости контактной подвески в пролете:
а – полученное экспериментально, б – принятое для использования в модели

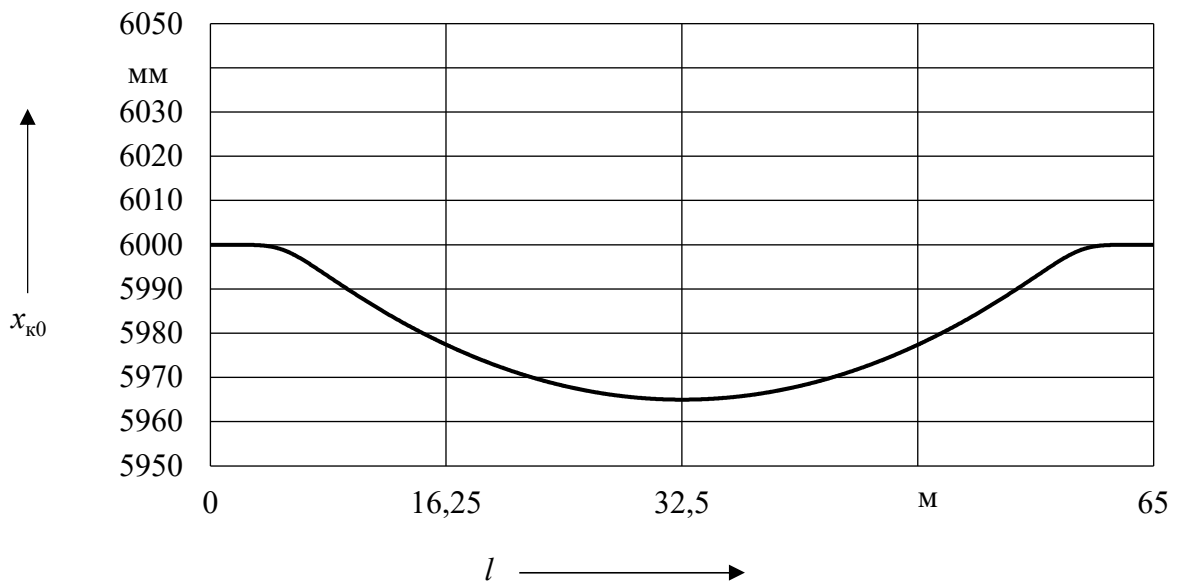


Рисунок 2.10 – Высотное положение контактного провода в пролете

В качестве параметра для валидации модели было выбрано отжатие контактного провода, поскольку контактное нажатие в процессе взаимодействия токоприемника и контактной подвержено влиянию различных факторов, вносящих в кривые нажатия практически случайные шумы, которые сложно отфильтровать без потери полезной информации. Тогда как в функции отжатия шумы сглажива-

ются естественным образом за счет инертности полоза токоприемника и контактного провода.

На рисунке 2.11 приведены функция отжатия, полученные в результате испытаний реальной контактной подвески КС-200-06 при движении на скорости 200 км/ч, а также кривые, полученные с использованием различных типов моделей. Кривые, полученные экспериментально, изображены сплошной линией, в результате моделирования – пунктирными линиями.

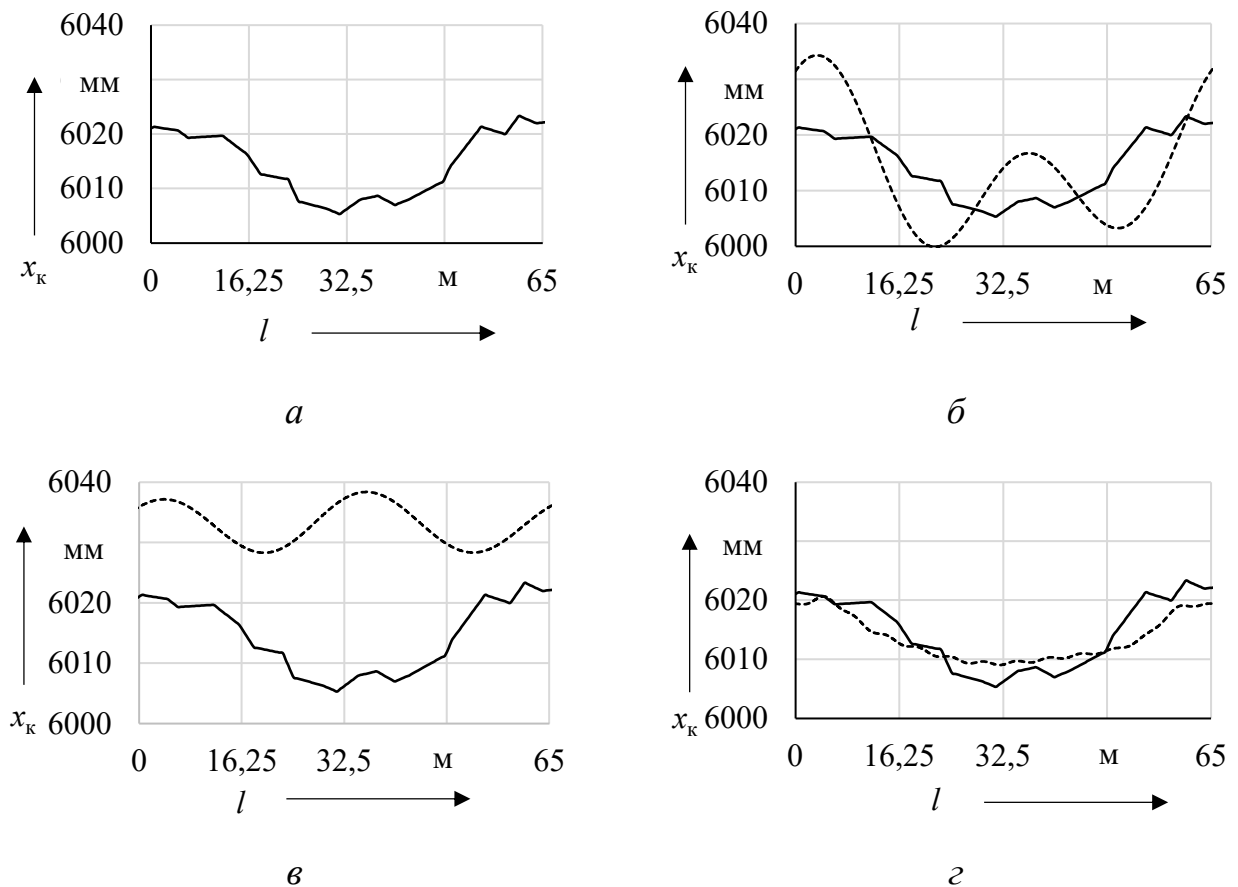


Рисунок 2.11 – Функция отжатия и положение контактного провода в пролете:
а – экспериментальные данные, б – исходная модель, в – модель с изменяемой в пролете жесткостью, г – предлагаемая модель

Экспериментальная функция отжатия (рисунок 2.11, а) отличается от пролета к пролету, что обусловлено различными длинами пролетов, стрелами провеса контактного провода и распределением жесткости в пролетах реальной контактной подвески.

Для оценки достоверности известных и предложенной моделей были определены коэффициент корреляции Пирсона и среднеквадратическая ошибка (RMSE), для чего в анализируемом пролете было выделено 100 точек.

Коэффициент корреляции Пирсона определяет, насколько синхронно изменяются две кривые и отражает только форму зависимости между графиками. Коэффициент находится в интервале от -1 до 1 (значения близкие к 1 указывают на совпадение форм графиков) и может быть вычислен по формуле:

$$r_{xy} = \frac{\sum_i (x_i - \bar{x})^2 (y_i - \bar{y})^2}{\sqrt{\sum_i (x_i - \bar{x})^2 \sum_i (y_i - \bar{y})^2}}, \quad (2.17)$$

где x, y – массивы точек функций отжатия, полученных экспериментально и при моделировании, соответственно;

\bar{x}, \bar{y} – средние значения функций отжатия, полученных экспериментально и при моделировании, соответственно.

Среднеквадратическая ошибка (RMSE) определяет количественную разницу между значениями, предсказанными моделью, и фактическими значениями, и имеет тот же масштаб, что и сравниваемые величины. Меньшее значение указывает на более точное совпадение кривой, полученной в результате моделирования, и кривой, полученной экспериментально. Среднеквадратическая ошибка рассчитывается по следующей формуле:

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_i (y_i - x_i)^2}{n}}, \quad (2.18)$$

где n – число точек в массиве.

Таким образом, коэффициент корреляции Пирсона оценивает сходство тенденций функций отжатия, а среднеквадратическая ошибка – численное сходство.

При использовании исходной схемы моделирования контактной подвески (рисунок 2.11, б) функция отжатия хотя и повторяет траекторию провисания контактного провода, но в середине пролета наблюдается вертикальные колебания

точки контакта, что обуславливается инерционными характеристиками приведенной массы контактной подвески. Коэффициент корреляции экспериментальной и расчетной функции отжатия составил 0,54, среднеквадратическая ошибка – 8,6 мм.

Модели, в которых учитывается только изменение жесткости в пролете (рисунок 2.11, в), не позволяют реалистично моделировать функцию отжатия при равномерной жесткости контактной подвески, которая достигается в современных контактных подвесках, что объясняется отсутствием имитации стрелы провеса контактного провода. Коэффициент корреляции функции отжатия такой модели составил 0, среднеквадратическая ошибка – 20,2 мм.

Предлагаемая модель контактной подвески позволяет получить наиболее достоверные данные о функции отжатия среди исследованных моделей. Таким образом, описание приведенной массы контактной подвески с использованием инертора позволяет с более достоверно моделировать взаимодействие токоприемника и контактной подвески при использовании моделей с приведенными массами. Для предлагаемой модели коэффициент корреляции составил 0,91, среднеквадратическая ошибка – 3,0 мм.

На рисунке 2.12 представлены кривые огибающих минимального и максимального контактного нажатия полученные различными методами представления контактной подвески. В моделях с жестким токопроводом, являющихся наиболее простым способом представления контактной подвески, резонанс, приводящий к возникновению отрывов, возникает при скорости 90 м/с, при этом на скорости 60 м/с наблюдается резонанс, связанный с работой кареток, который, однако, не приводит к отрывам.

При использовании исходной модели в процессе моделирования наблюдается увеличение разброса контактного нажатия по мере роста скорости до 60 м/с, на которой возникает резонанс. Однако при дальнейшем повышении скорости амплитуда колебаний уменьшается, и при скоростях свыше 90 м/с размах контактного нажатия стабилизируется в диапазоне от 50 до 150 Н.

Применение моделей в которых учитывается только неравномерность жесткости в пролете и игнорируется стрела провеса, не позволяют получить реали-

стичные данные о контактном нажатии в условиях применения контактных подвесок с низким коэффициентом неравномерности эластичности контактной подвески, из-за чего размах колебаний контактного нажатия не превышает 5 – 10 Н, что не является реалистичным.

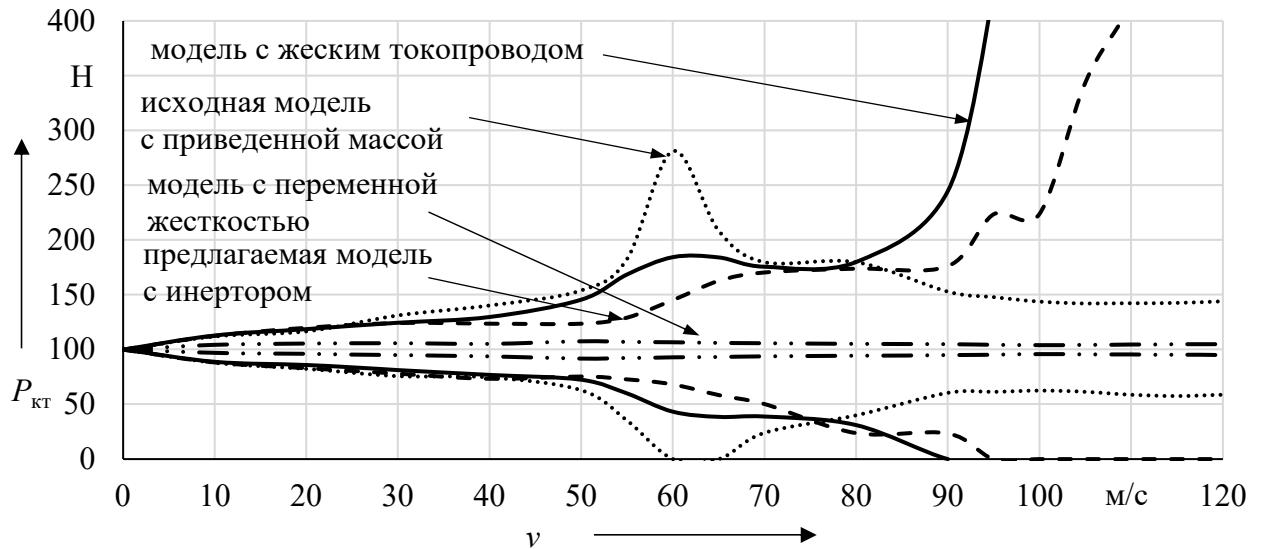


Рисунок 2.12 – Кривые размаха контактного нажатия в зависимости от типа применяемой модели с сосредоточенными параметрами контактной подвески

В соответствии с предлагаемой моделью с инертором, имитирующим приведенную массу контактной подвески, скорость, на которой появляются отрывы составляет 95 м/с и дальнейшее ее увеличение не приводит к выходу контактного нажатия из зоны отрывов, при этом резонанс на скорости 60 м/с отсутствует. Таким образом, математическая модель с сосредоточенными параметрами, в которой приведенная масса имитируется с помощью инертора обеспечивает достаточную степень достоверности результатов, при сравнении их с результатами, полученными в результате экспериментальных данных, полученных специалистами кафедры «Электроснабжение железнодорожного транспорта» ОмГУПСа при исследовании взаимодействия токоприемников и контактной подвески.

2.3 Экспериментальное получение параметров для математического моделирования взаимодействия токоприемников и контактной подвески

2.3.1 Экспериментальное получение параметров внутрипружинных пневмоэлементов для применения в математической модели токоприемника

Для реализации математической модели токоприемника необходимо получение статической характеристики кареток токоприемников, оснащенных внутрипружинными пневмоэлементами. Статическая характеристика каретки является зависимостью силы P_k , создаваемой кареткой, от ее сжатия Δh .

Исследование статической характеристики внутрипружинных элементов осуществлялось на испытательном стенде, разработанном на кафедре «Электроснабжение железнодорожного транспорта» Омского государственного университета путей сообщения. Структурная схема стенда приведена на рисунке 2.13.

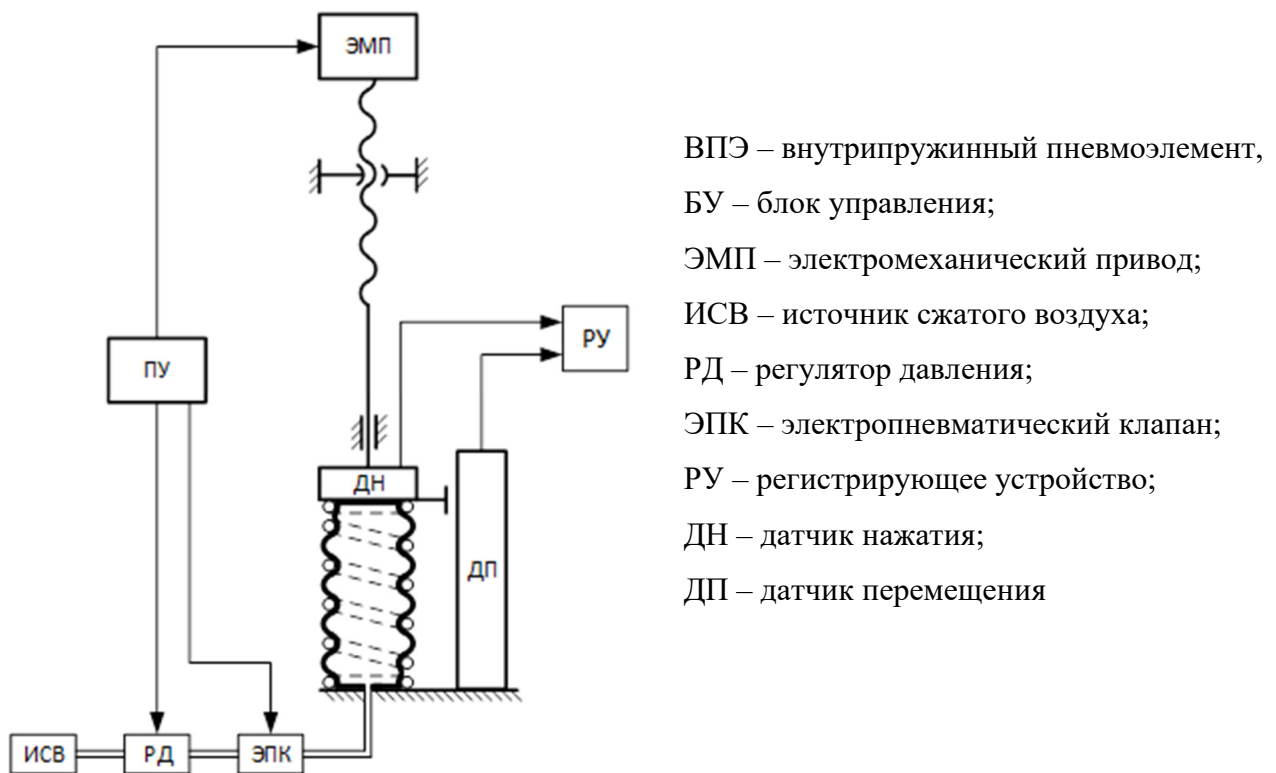


Рисунок 2.13 – Структурная схема стенда для исследования статической характеристики внутрипружинных пневмоэлементов

Воздух подается от источника сжатого воздуха через регулятор давления и электропневматический клапан, включение которого осуществляется блоком

управления, в полость внутрипружинного пневмоэлемента. Давление регулируется с помощью регулятора давления, который управляется с помощью блока управления. Сжатие внутрипружинного пневмоэлемента осуществляется с помощью винтовой передачи, приводимой в движение с помощью электромеханического привода.

Для регистрации силы, создаваемой пневмоэлементом используется датчик нажатия, представляющий собой S-образный тензодатчик. Вертикальные перемещения регистрируются с помощью датчика перемещения. Информация от датчиков поступает в регистрирующее устройство и впоследствии обрабатывается с помощью ЭВМ. Общий вид испытательного стенда приведен на рисунке 2.14.

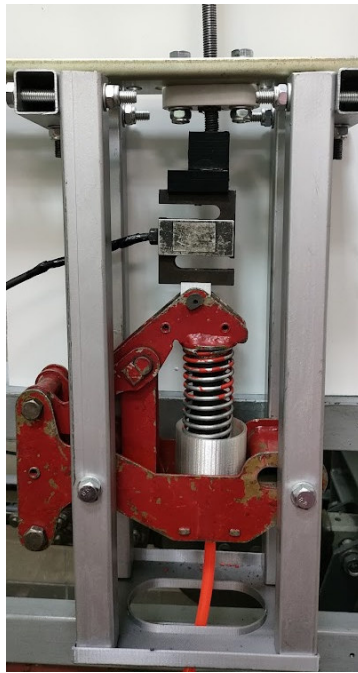


Рисунок 2.14 – Общий вид стенда для исследований статической характеристики кареток

На рисунках 2.15 и 2.16 приведены примеры статических характеристик однослойного и двуслойного внутрипружинных элементов (в зависимости от числа слоев материала, использовавшихся при их изготовлении). Толщина их оболочки составила 1 мм и 2 мм соответственно при давлении внутри их полости 0, 100 и 150 кПа.

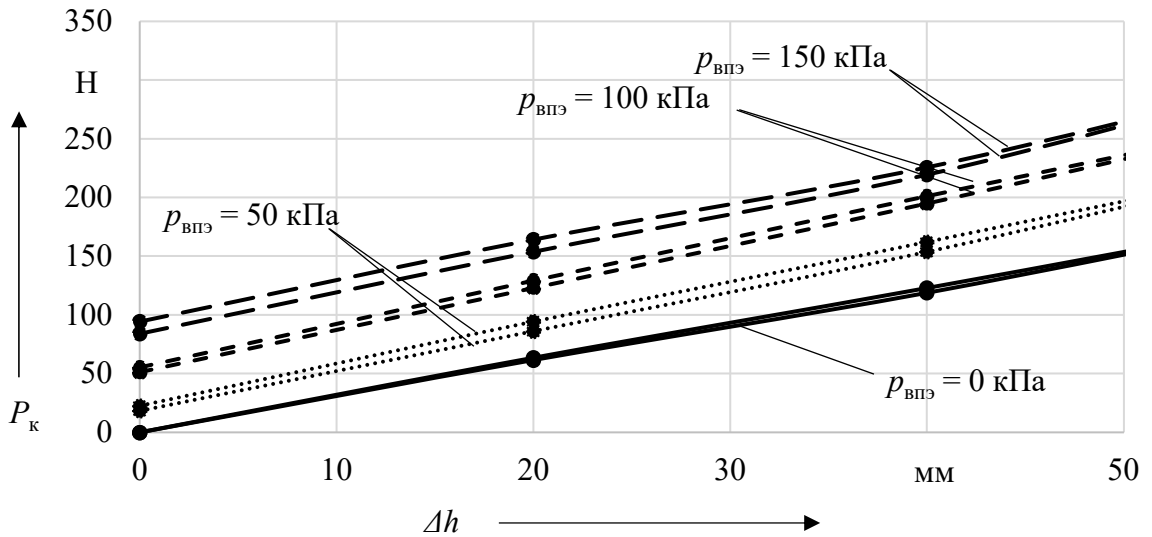


Рисунок 2.15 – Статическая характеристика однослойного внутрипружинного пневмоэлемента

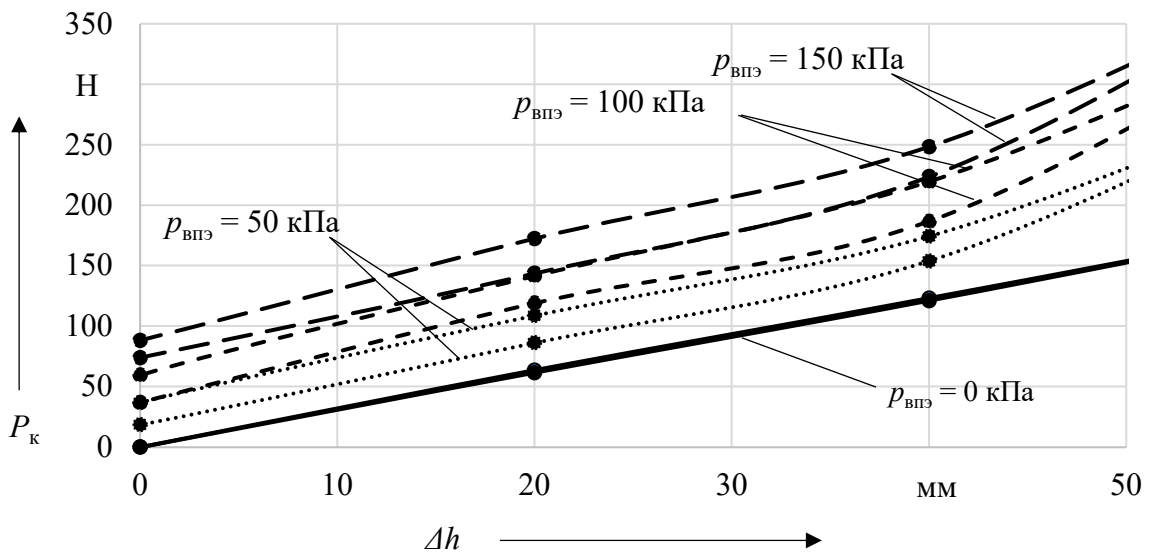


Рисунок 2.16 – Статическая характеристика двухслойного внутрипружинного пневмоэлемента

Статическая характеристика однослойного внутрипружинного элемента каретки является практически линейной. Это является преимуществом при их использовании в качестве упругих элементов кареток, поскольку вносит значительно меньшие изменения в процесс токосяема, чем двухслойные внутрипружинные пневмоэлементы, статическая характеристика которых в области сжатия больше 40 мм обладает ярко выраженной нелинейностью. Кроме того, внутрипружинные

пневмоэлементы с толщиной оболочки 1 мм обладают меньшими внутренними силами трения, что также обеспечивает снижение их влияния на процесс токосъема.

Избыточное давление во внутрипружинном пневмоэлементе целесообразно поддерживать в пределах 25 – 100 кПа что обеспечивает создание ими силы до 50 Н. Таким образом суммарная сила, создаваемая внутрипружинными пневмоэлементами двух кареток составит 100 Н, что позволит компенсировать избыточное сжатие кареток при увлечении среднего контактного нажатия до уровня 200 Н.

Поддержание минимального уровня давления выше 25 кПа необходимо для поддержания их работоспособности, поскольку отсутствие в них давления может привести к повреждениям гибкой оболочке при сжатии.

Для однослойных внутрипружинных пневмоэлементов сила, создаваемая им, может быть приблизительно вычислена с использованием следующего выражения:

$$P_{\text{ВПЭ}} = c_{\text{пр}} \cdot \Delta h + c_{\text{пэ}}(p_{\text{пэ}}) \cdot \Delta h + P_{\text{пэ}0}(p_{\text{пэ}}), \quad (2.19)$$

где $c_{\text{пр}}$ – жесткость пружин каретки, Н/м;

Δh – сжатие внутрипружинного пневмоэлемента, м;

$c_{\text{пэ}}$ – жесткость внутрипружинного пневмоэлемента, Н/м;

$p_{\text{пэ}}$ – избыточное давление в пневмоэлементе, Па;

$P_{\text{пэ}0}$ – сила внутрипружинного пневмоэлемента при нулевом сжатии, обусловленная избыточным давлением в полости пневмоэлемента, Н.

2.3.2 Экспериментальное получение коэффициентов передаточной функции механизма подъема и опускания токоприемника

В общем виде любая система может быть представлена в виде передаточной функции следующего вида:

$$W(s) = \frac{1 + b_1s + b_2s^2 + \dots + b_ms^m}{1 + a_1s + a_2s^2 + \dots + a_ns^n} \cdot e^{-\tau s}, \quad (2.20)$$

где a_i и b_i – коэффициенты числителя и знаменателя,

m и n – степень полинома числителя и знаменателя,

s – оператор передаточной функции,

τ – транспортное запаздывание.

Аналитические методы заключаются в составлении систем дифференциальных уравнений и последующих преобразованиях Лапласа, и частотном анализе. Необходимость математического описания работы всей системы целиком может быть затруднительным при исследовании сложных систем, из-за чего на практике наибольшее распространение получили экспериментальные методы.

Одним из методов экспериментального определения коэффициентов передаточных функций является изучение зависимости выходного параметра от ступенчатого изменения входного, которая получила название разгонной кривой. При этом образная связь системы размыкается, а входной параметр системы ступенчато изменяется так, чтобы обеспечить максимальное изменение выходного параметра, но при этом не повлиять на нормальное функционирование объекта исследования.

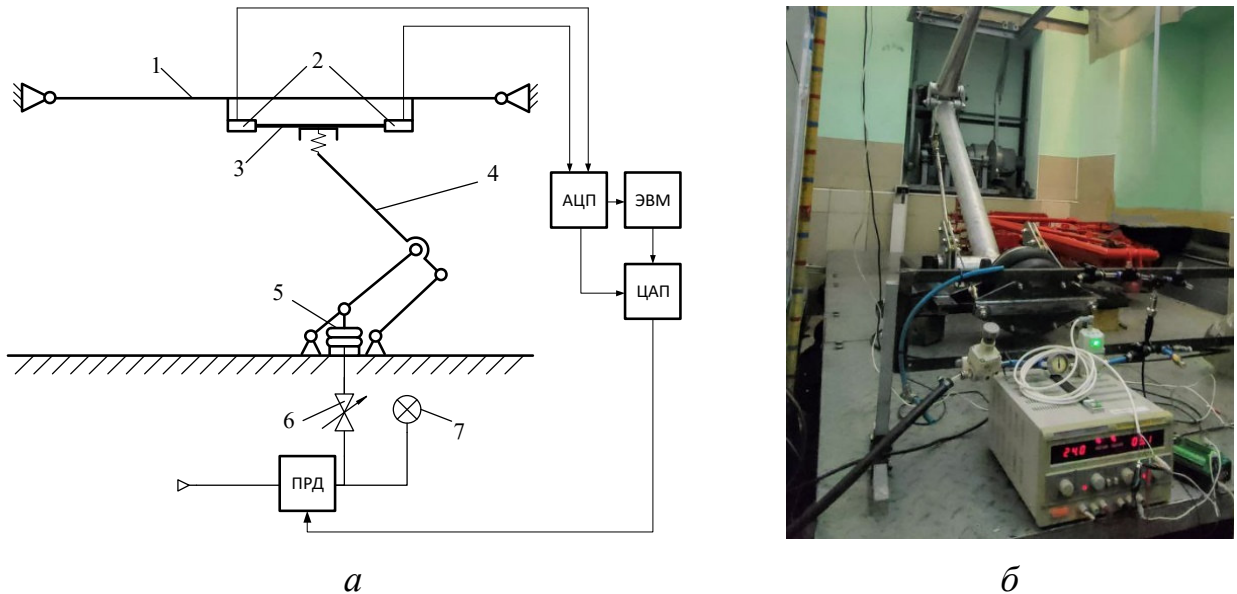
Для определения параметров передаточной функции системы автоматического регулирования статическим нажатием токоприемника был разработан испытательный стенд, который приведен на рисунке 2.17 [70]. ЭВМ генерирует управляющие сигналы, которые передаются на пропорциональный регулятор давления, изменяющий давление в резинокордном элементе, что, соответственно приводит к изменению силы статического нажатия токоприемника.

Для исследования переходных процессов системы автоматического регулирования нажатия токоприемника был использован скоростной токоприемник ЛА 19-СЭТ 160 1200, давление в подъемном резинокордном пневмоэлементе которого регулировалось посредством пропорционального регулятора давления ARP-EPV, способного плавно регулировать давление на выходе при изменении уровня напряжения, подаваемого на его вход.

В ходе проведения экспериментальных исследований посредством ЦАП напряжение, подаваемое на пропорциональный регулятор давления, ступенчато

изменялось с 1 В до 1,5 В (изменение давления от 101,25 до 151,88 кПа), что соответствует изменению статического нажатия токоприемника с 30 Н до 130 Н.

Для простоты дальнейшего анализа входной сигнал и полученная разгонная кривая были сглажены и нормированы, то есть диапазон их изменения приведен к интервалу от 0 до 1. Нормированный выходной сигнал ЦАП и экспериментально полученная нормированная разгонная кривая приведены на рисунке 2.18.



1 – основание; 2 – тензодатчики; 3 – балка; 4 – токоприемник, 5 – резинокордный подъемный пневмоэлемент; 6 – кран; 7 – манометр; ЭВМ – компьютер; АЦП – аналогово-цифровой преобразователь; ЦАП – цифро-аналоговый преобразователь; ПРД – пропорциональный регулятор давления

Рисунок 2.17 – Определение коэффициентов передаточной функции САР статического нажатия и силы разжатия ВПЭ: а – схема, б – общий вид

Одним из методов получения коэффициентов передаточной функции по экспериментальным данным является метод площадей М. П. Симою [71]. Суть метода заключается в разбиении полученной разгонной кривой на достаточно малые участки так, что изменение выходного параметра приближается к линейному и в вычислении коэффициентов разложения, являющихся интегральными отклонениями (площадями) определенного порядка от соответствующих аппроксимирующих функций.

Для получения передаточной функции при изменении статического нажатия токоприемника была принято допущение, что переходный процесс может быть описан посредством дифференциального уравнения второго порядка, поскольку уравнения данной степени позволяют с достаточной степенью достоверности описать происходящие процессы при регулировании нажатия.

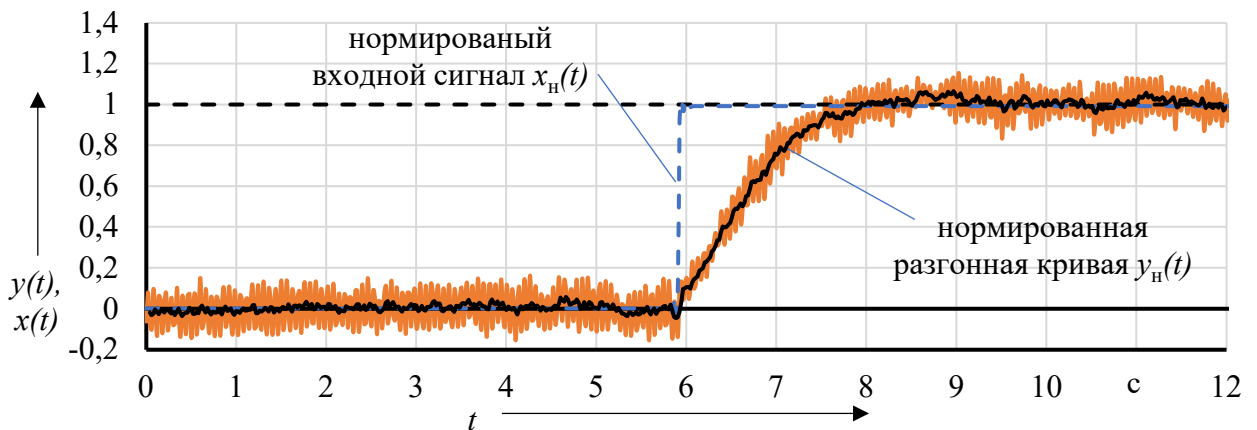


Рисунок 2.18 – Нормированные входной сигнал и разгонная кривая

Транспортное запаздывание принято равным нулю в соответствии с полученной разгонной кривой. Тогда передаточная функция будет иметь следующий вид:

$$W(s) = \frac{k}{a_2 s^2 + a_1 s + 1}, \quad (2.21)$$

где k – коэффициент передачи, определяемый по формуле:

$$k = \frac{\Delta y_{уст}}{\Delta x_{уст}}, \quad (2.22)$$

где $\Delta y_{уст}$, $\Delta x_{уст}$ – изменение выходного и входного сигнала в установившемся режиме, соответственно

Коэффициенты a_1 и a_2 могут быть рассчитаны в соответствии со следующими выражениями:

$$a_1 = F_1 = \Delta t \left(\sum_{i=0}^k (1 - y_n(k \cdot \Delta t)) - 0,5 \cdot (1 - y_n(k \cdot \Delta t)) \right), \quad (2.23)$$

$$a_2 = F_2 = F_1 \Delta t \left(\sum_{i=0}^k (1 - y_H(k \cdot \Delta t)) \cdot \left(1 - \frac{k \cdot \Delta t}{a_1} \right) - 0,5 \cdot (1 - y_H(k \cdot \Delta t)) \right). \quad (2.24)$$

Код программы, предназначенной для расчета коэффициентов методом М. П. Симою с использованием редактора таблиц Excel и встроенного в него языка программирования VBA for applications приведен на рисунке 2.19. В результате расчетного определения коэффициентов была получена передаточная функция системы регулирования статического нажатия:

$$W(s) = \frac{200}{0,275s^2 + 0,893s + s}. \quad (2.25)$$

```

Sub simou()
N = 290
k = 490
dt = 0.2002002 / 2
Sum = 0
Sum2 = 0
Sum3 = 0
For k = 0 To 19
avgI = 0
For i = 0 To 4
avgI = avgI + Cells(N + 5 * k + i - 2, 4) / 5
Next
Cells(k + 1, 6) = 1 - avgI
Sum = Sum + 1 - avgI
Next
a1 = dt * (Sum - 0.5)
Cells(10, 7) = a1
For k = 0 To 19
avgI = 0
For i = 0 To 4
avgI = avgI + Cells(N + 5 * k + i - 2, 4) / 5
Next
Sum2 = Sum2 + (1 - avgI) * (1 - k * dt / a1)
Next
a2 = a1 * dt * (Sum2 - 0.5)
Cells(11, 7) = a2

For k = 0 To 19
avgI = 0
For i = 0 To 4
avgI = avgI + Cells(N + 5 * k + i - 2, 4) / 5
Next
Sum3 = Sum3 + (1 - avgI) * (1 - 2 * k * dt / a1 + 0.5 * (k * dt / a1) ^ 2)
Next
a3 = a1 * a1 * dt * (Sum3 - 0.5)
Cells(12, 7) = a3

End Sub

```

Рисунок 2.19 – Программа для расчета коэффициентов передаточной функции

Для валидации полученных в результате анализа коэффициентов передаточной функции была собрана модель переходного процесса в среде MATLAB *Simulink*, полученная в результате моделирования разгонная кривая приведена на рисунке 2.20. Коэффициент детерминации, определяющий степень соответ-

ствия полученной кривой и экспериментальных данных, для полученной передаточной функции составил 0,997.

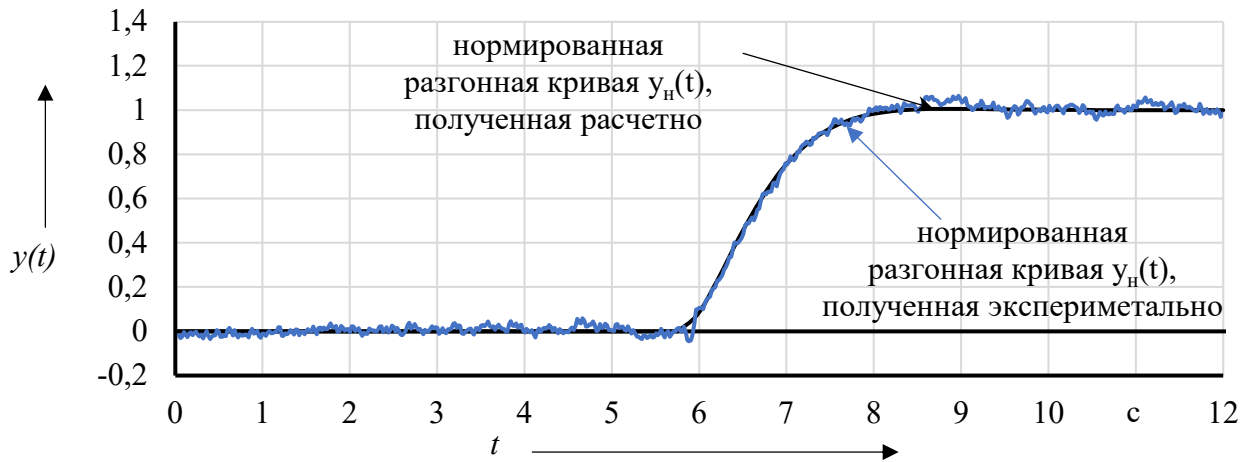


Рисунок 2.20 – Разгонная кривая при регулировании нажатия токоприемника, полученная в результате моделирования

Аналогичным образом может быть получена передаточная функция внутрипружинных пневмоэлементов, устанавливаемых в каретках токоприемников электроподвижного состава. Для этого используется испытательная установка, аналогичная установке используемой при определении передаточной функции подъемного пневмоэлемента (рисунок 2.17), однако верхний шарнир жестко фиксируется для обеспечения неподвижности основания кареток.

При определении передаточной функции внутрипружинных пневмоэлементов давление в них изменялось скачкообразно от 0 до 1 В (изменение давления от 0 до 101,25 кПа), что соответствует изменению нажатия на 68,8 Н для одной каретки.

В результате расчетов (2.22 – 2.24) была получена передаточная функция кареток, с установленными в них внутрипружинными пневмоэлементами:

$$W(s) = \frac{137,6}{0,0018s^2 + 0,057s + s}. \quad (2.26)$$

Сравнение кривых отклика, полученных экспериментально и в результате моделирования, приведено на рисунке 2.21, коэффициент детерминации составил 0,97.

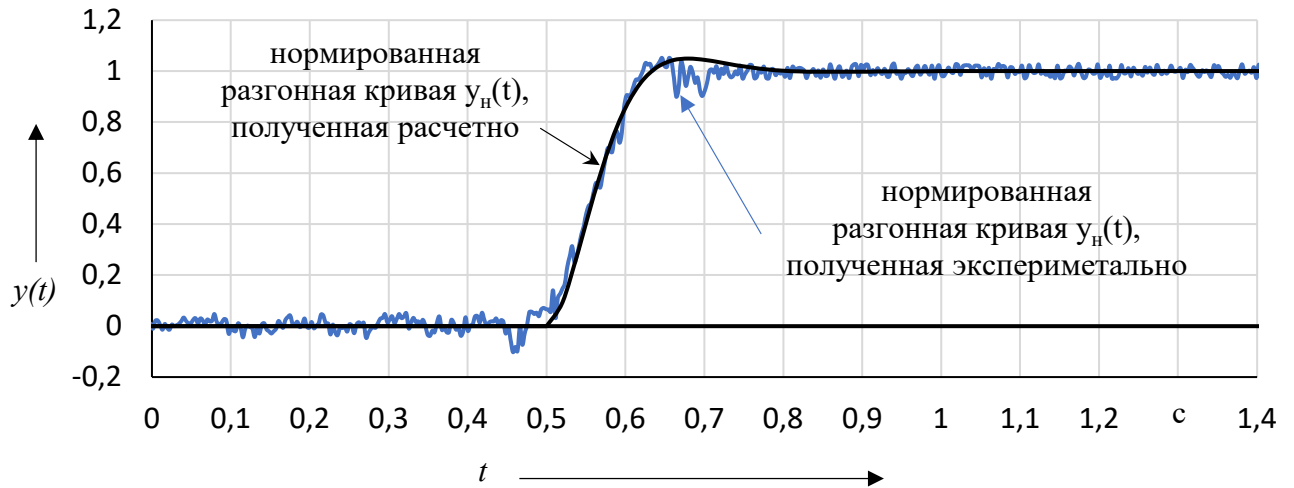


Рисунок 2.21 – Разгонная кривая при регулировании силы внутрипружинного пневмоэлемента, полученная в результате моделирования

2.4 Реализация математической модели в программном комплексе MATLAB Simulink

В MATLAB Simulink решение дифференциальных уравнений осуществляется посредством графического интерфейса, где математические операции представлены блоками. Уравнения преобразуются в уравнения первого порядка, где производные рассчитываются с помощью интеграторов, а другие операции выполняются через сумматоры, коэффициенты умножения и другие блоки. Входные сигналы определяют поведение системы, а численное интегрирование выполняется с использованием встроенных методов. Simulink предоставляет возможность легко изменять модель, добавляя нелинейности, обратные связи и другие компоненты, что делает его удобным инструментом для изучения динамических систем.

После запуска модели можно визуализировать результаты с помощью осциллографов или передавать данные в рабочее пространство для дальнейшего анализа в виде таблиц. Результаты моделирования можно экспортировать в MATLAB Workspace для дальнейшей обработки, включая создание графиков и использование численных методов.

Общая расчетная схема модели взаимодействия токоприемника, представленного в виде трехмассовой модели и контактной подвески, в которой приведенная масса подвески представлена в виде инертора приведена на рисунке 2.22.

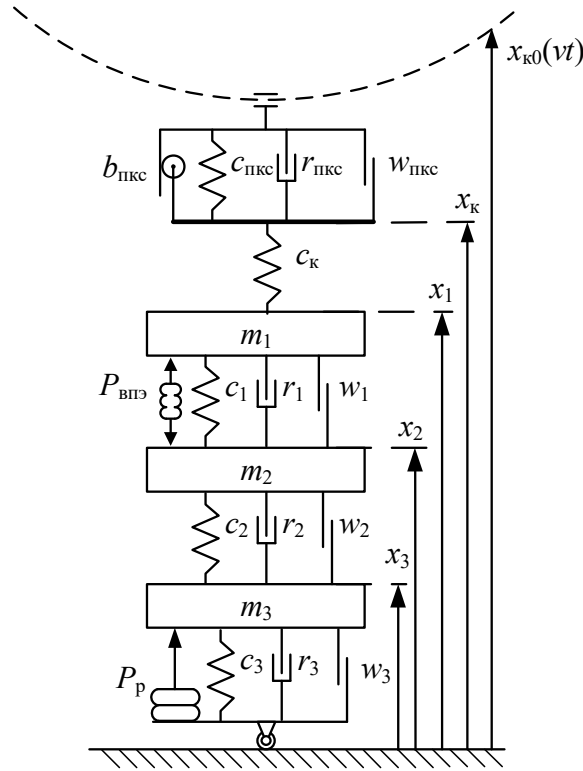


Рисунок 2.22 – Расчетная схема модели взаимодействия токоприемника

Для моделирования контактной подвески в среде *MATLAB Simulink* выражения могут быть сведены в одну систему и записаны в форме, необходимой для реализации в программном комплексе:

$$\left\{ \begin{array}{l} \ddot{x}_k = \frac{b_{пкк} \cdot \ddot{x}_{k0} + c_{пкк} (x_{k0} - x_k) + r_{пкк} (\dot{x}_{k0} - \dot{x}_k) + w_{пкк} \cdot \text{sign}(\dot{x}_{k0} - \dot{x}_k) - c_k (\dot{x}_k - \dot{x}_1)}{b_{пкк}}; \\ \ddot{x}_1 = \frac{c_k (\dot{x}_k - \dot{x}_1) - c_1 (x_1 - x_2) - r_1 (\dot{x}_1 - \dot{x}_2) - w_1 \text{sign}(\dot{x}_1 - \dot{x}_2)}{m_1}; \\ \ddot{x}_2 = \frac{c_1 (x_1 - x_2) - c_2 (x_2 - x_3) + r_1 (\dot{x}_1 - \dot{x}_2) - r_2 (\dot{x}_2 - \dot{x}_3) + w_1 \text{sign}(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) - w_2 \text{sign}(\dot{x}_2 - \dot{x}_3)}{m_2}; \\ \ddot{x}_3 = \frac{c_2 (x_2 - x_3) - c_3 x_3 + r_2 (\dot{x}_2 - \dot{x}_3) - r_3 \dot{x}_3 + w_2 \text{sign}(\dot{x}_2 - \dot{x}_3) - w_3 \text{sign}(\dot{x}_3) + P_p}{m_3}. \end{array} \right. \quad (2.27)$$

На рисунке 2.23 представлена структурная схема математической модели токоприемника, разработанной в среде MATLAB Simulink. Модель включает систему автоматического регулирования статического нажатия и статической характеристики кареток, управление которой осуществляется на основе данных о сжатии кареток. Основными блоками, входящими в разработанную модель, являются: блок имитации контактной подвески (Catenary), блок имитации токоприемника (Pantograph), блок имитации подъемного резинокордного элемента (LPA), блок имитации внутрипружинного пневмоэлемента (ISPE), контур управления статического нажатия (LPA ACS) и контур управления статической характеристикой каретки (ISPE ACS).

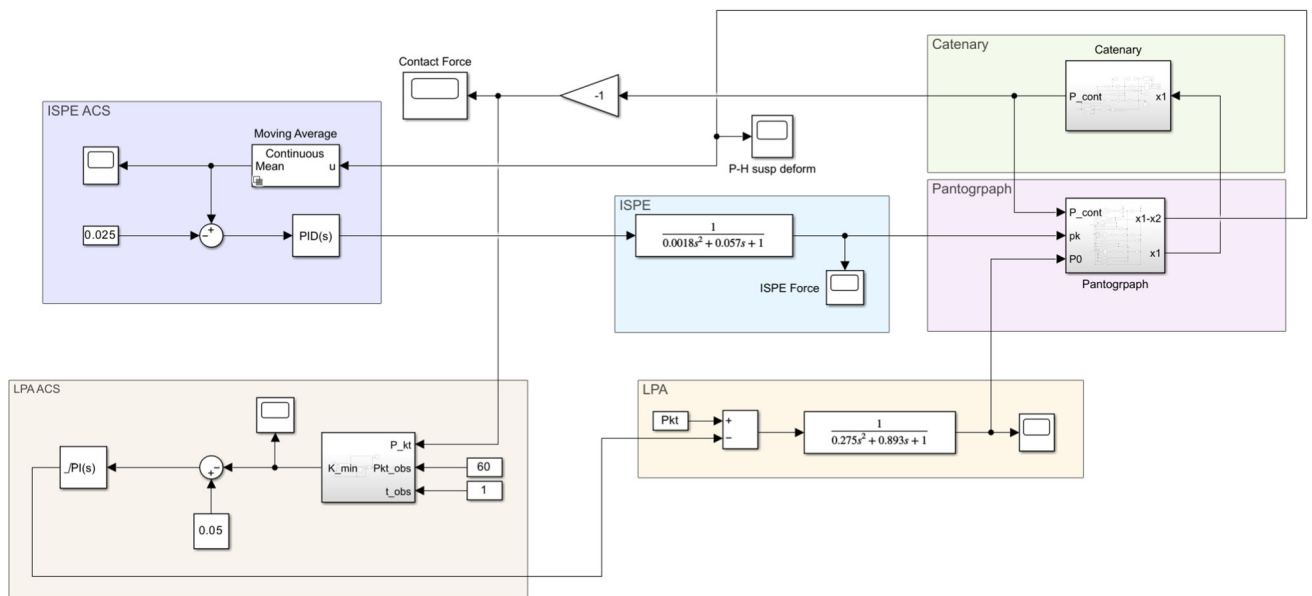


Рисунок 2.23 – Структурная схема математической модели, выполненной в программном комплексе *MATLAB Simulink*

На рисунках 2.24 – 2.25 приведены структурные схемы математических моделей контактной подвески и токоприемника, оснащенного внутрипружинными элементами в каретках.

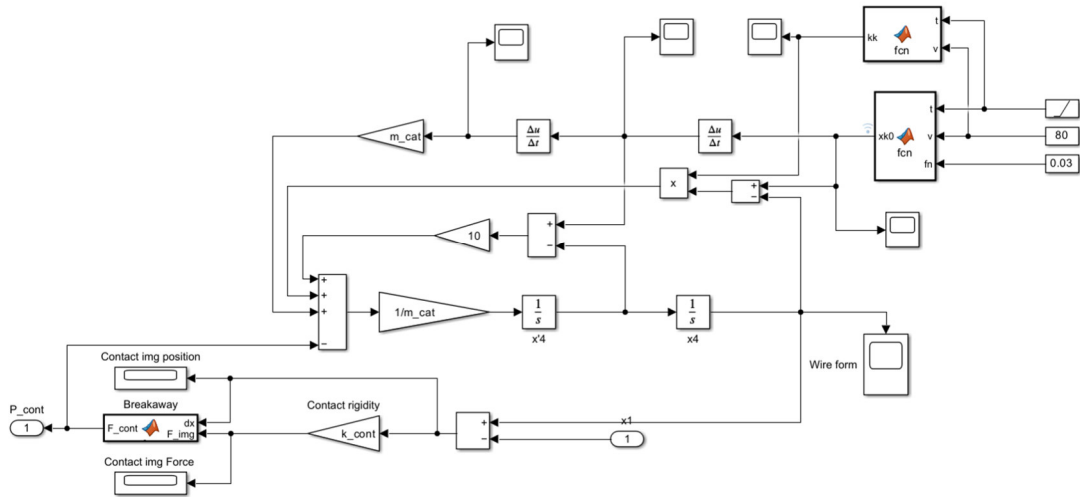


Рисунок 2.24 – Структурная схема математической модели контактной подвески

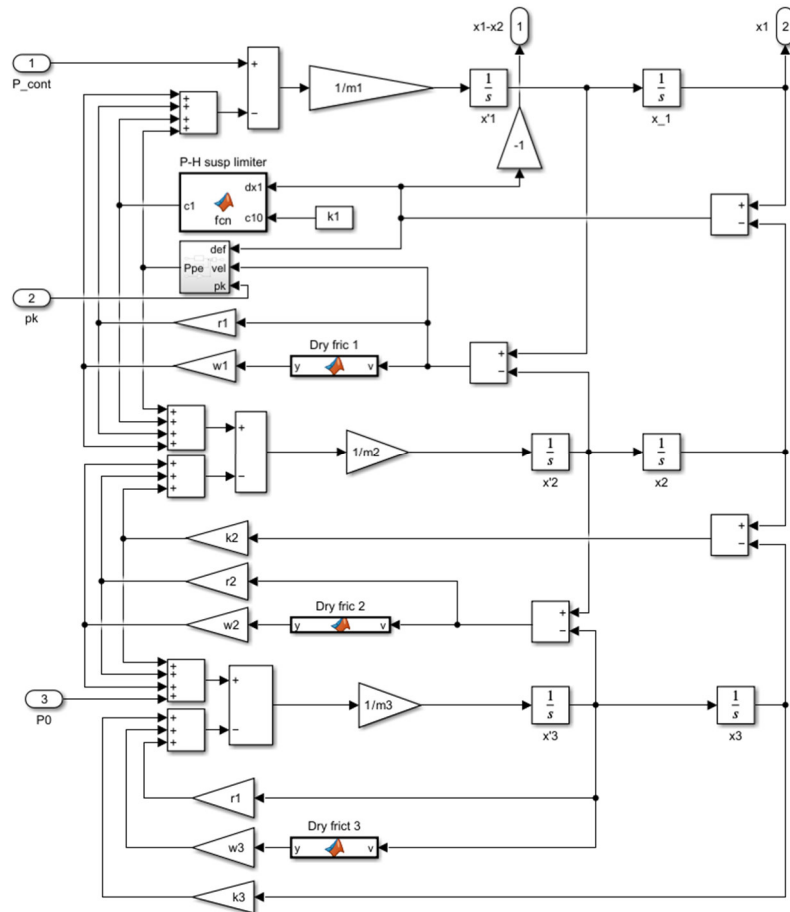


Рисунок 2.25 – Структурная схема выполненной математической модели токоприемника, оснащенного внутрипружинными элементами в каретках

Выводы по второму разделу:

1. Выполнен анализ известных методов моделирования токоприемников, показавший, что на этапе разработки систем автоматического регулирования

нажатия целесообразно применять математические модели с приведенными массами.

2. Разработана трехмассовая математическая модель токоприемника, оснащенного внутрипружинными управляемыми пневмоэлементами в каретках.

3. Разработана и валидирована математическая модель контактной подвески с сосредоточенными параметрами, в которой ее приведенная масса представлена в виде инертора, расхождение расчетных и экспериментальных данных не превышает 10 %.

4. Полученные экспериментальные данные о статических характеристиках внутрипружинных пневмоэлементов свидетельствуют о том, что оптимальным выбором являются внутрипружинные пневмоэлементы с толщиной оболочки 1 мм при поддержании в них избыточного давления на уровне 25 – 100 кПа.

5. Экспериментально получены переходные функции подъемного пневмоэлемента и внутрипружинных пневмоэлементов для использования этих данных в математической модели, коэффициент детерминации которых превышает 0,95.

6. Разработанная математическая модель реализована в программном комплексе MATLAB Simulink.

3 РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМОВ УПРАВЛЕНИЯ КОНТАКТНЫМ НАЖАТИЕМ ТОКОПРИЕМНИКОВ, ИСПОЛЬЗУЮЩИХ УПРАВЛЯЕМЫЕ УПРУГИЕ ЭЛЕМЕНТЫ

3.1 Применение систем автоматического регулирования в токоприемниках электроподвижного состава

Системы автоматического регулирования токоприемников электроподвижного состава активно внедряются для повышения качества токосъема за счёт управления параметрами токоприемника (рисунок 3.1).

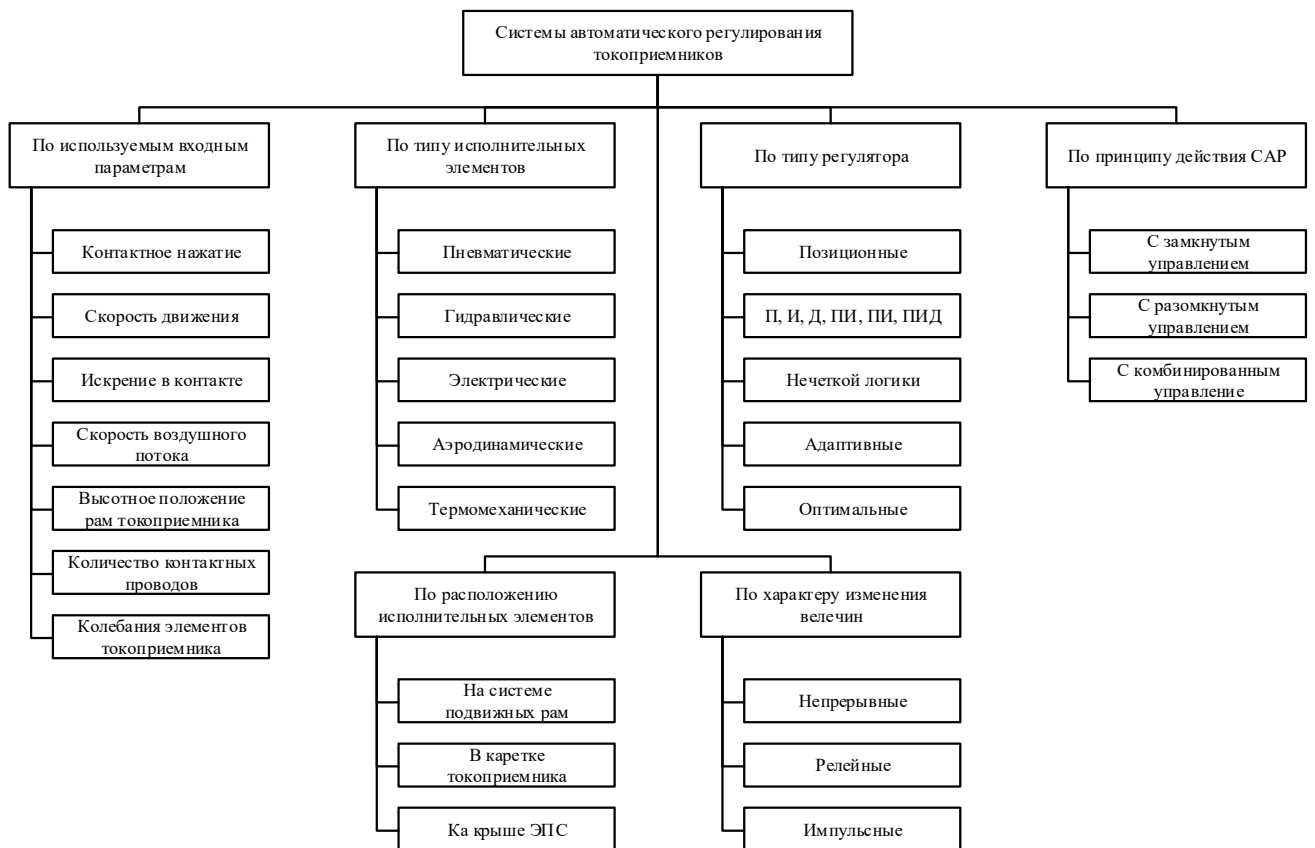


Рисунок 3.1 – Классификация САР токоприемников

Классификации САР по цели их применения и по типу исполнительных устройств приведена на рисунках 3.2, 3.3.



Рисунок 3.2 – Классификация САР токоприемников по цели использования

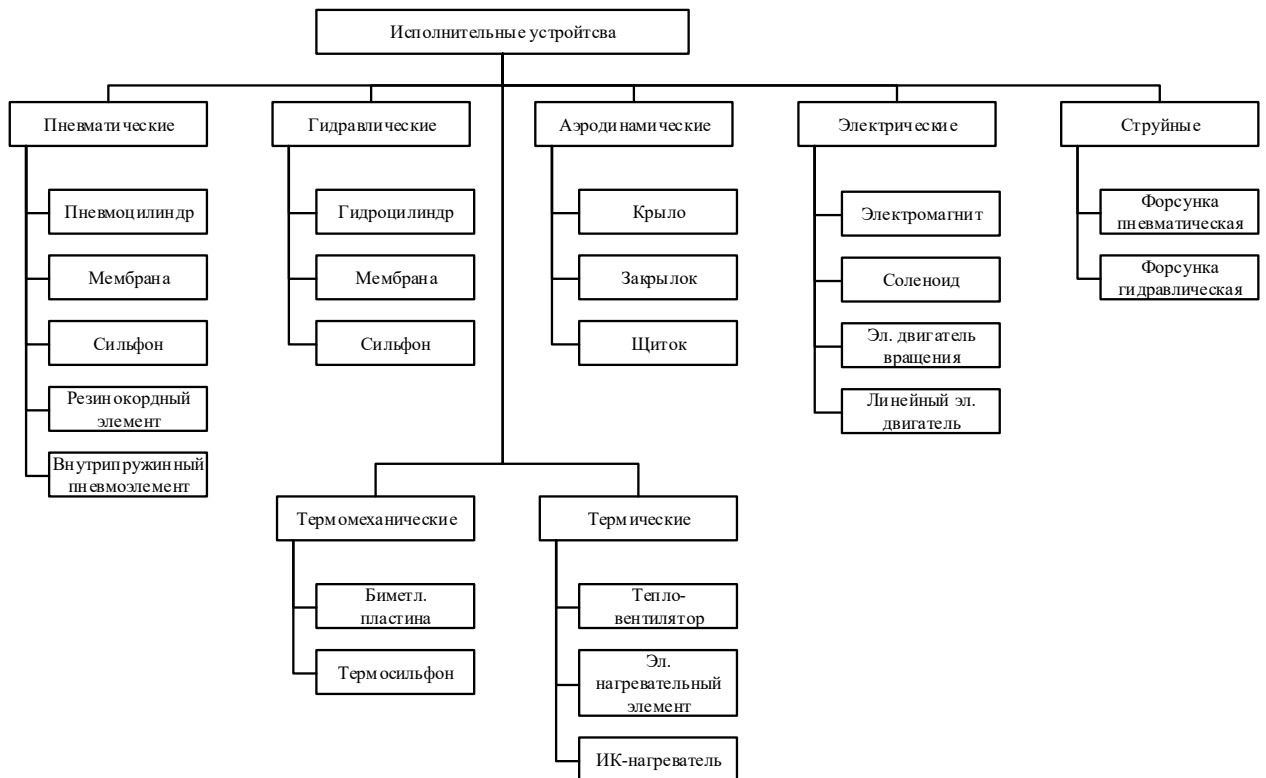


Рисунок 3.3 – Классификация исполнительных устройств авторегулируемых токоприемников

Широкое распространение получили системы автоматического регулирования статического нажатия токоприемника, поскольку их применение позволяет избежать отрывов и искрения [72 – 76].

Наиболее широко применяются системы автоматического регулирования статического нажатия, которые предотвращают отрывы полоза и искрение. Однако изменение нажатия влияет на сжатие упругих элементов кареток, что может привести к их пробоям и резким скачкам контактного давления. Для решения этой проблемы используются управляемые упругие элементы, позволяющие адаптировать статическую характеристику кареток.

Ключевым параметром оценки качества токосъема является контактное нажатие (рисунок 3.4). Его разброс увеличивается из-за дефектов контактной подвески, образования гололеда и других факторов. Особенно опасны отрывы токоприемника, способные вызвать дугообразование и тем самым повреждать контактные провода. Особенно они опасны при скоростях свыше 160 км/ч, когда значительно возрастает размах контактного нажатия. Поэтому рекомендуется как повышение статического нажатия, так и управление характеристиками кареток для исключения ударов.

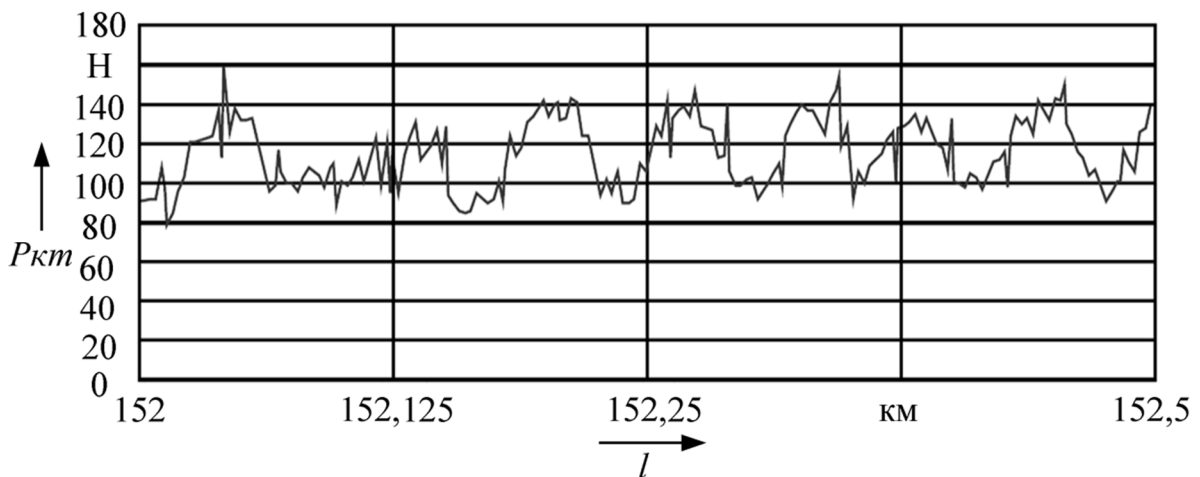


Рисунок 3.4 – Пример кривой контактного нажатия при движении электропоезда

Разработка систем автоматического регулирования включает выбор закона управления и типа регулятора. Наибольшее распространение получили позиционные, П-, ПИ-, ПИД-, нечеткие, адаптивные и оптимальные регуляторы [77 – 79].

ПИД-регуляторы в случае использования системы авторегулирования для снижения амплитуды колебаний контактного нажатия эффективны при скоростях до 90 км/ч, требуют наличия датчика нажатия и обеспечивают точную корректировку. Позиционные регуляторы проще и дешевле, но менее точны. Нечеткая логика позволяет адаптировать поведение САР к реальным условиям без точной математической модели.

Нарушения регулировки контактной подвески и её элементов, таких как секционные изоляторы, воздушные стрелки, соединения анкерных участков и др., наряду с дефектами контактных вставок, проводов и образованием гололёда, являются основными причинами увеличения разброса контактного нажатия. Наибольшую угрозу представляют отрывы токоприемника от контактной сети, так как они могут вызывать электрическую дугу, способную привести к отжигу или пережогу контактного провода.

Выбор регулятора и исполнительного устройства определяет переходный процесс – апериодический или колебательный, зависящий от характеристик системы. Поддержание стабильного контактного нажатия критично для обеспечения безотрывной работы токоприемника.

3.2 Разработка алгоритмов управления нажатием токоприемника

Контактное нажатие – ключевой параметр, влияющий на качество токосъема, поэтому обеспечение его стабильности является приоритетной задачей при оптимизации этого процесса. Определение оптимального уровня нажатия играет решающую роль в организации эффективного токосъема [80, 81]. При снижении контактного нажатия, сопровождающемся отрывами полозов, износ контактных элементов резко возрастает, что связано с резким ростом электроэрозионной составляющей износа из-за значительного усиления искрения, тогда как повышенное контактное нажатие хотя и увеличивает механическую составляющую износа, но не приводит к резкому росту износа и нарушениям токосъема [4].

Поэтому в целях оптимизации процесса токосъема в настоящее время широкое распространение получают системы автоматического регулирования стати-

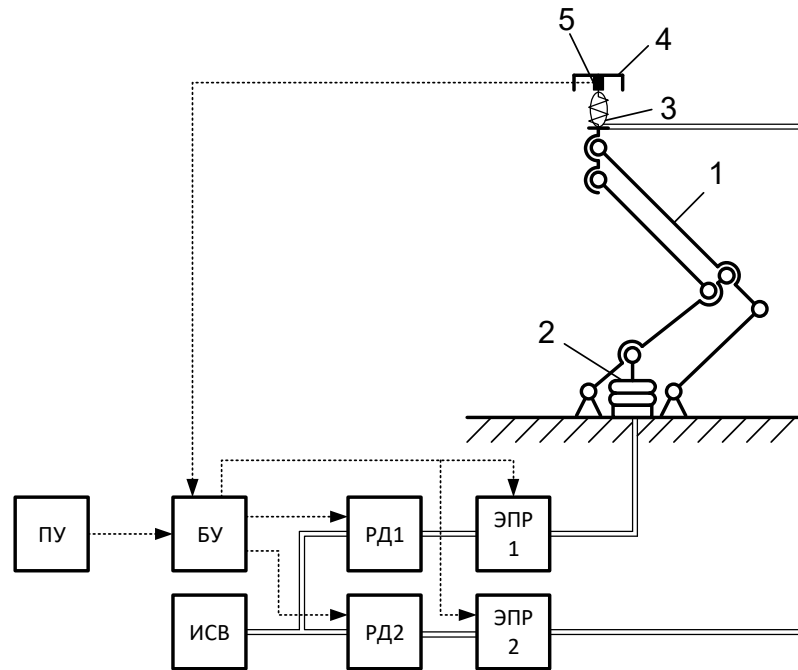
ческого нажатия токоприемников, которые за счет повышения уровня контактного нажатия снижают риск отрывов полозов и возникновения искрения, что представляет основную угрозу в процессе токосъема [9,10].

Рост статического нажатия токоприемника при этом вызывает увеличение сжатия упругих элементов кареток, что может привести к их полному сжатию («пробою»). В результате возникают вертикальные удары, вызывающие отрывы полоза и искрение. Поэтому при применении систем автоматического регулирования статического нажатия важно поддерживать сжатие упругих элементов кареток в допустимых пределах.

Для решения данной проблемы в каретках могут быть использованы пневматические элементы с управляемой статической характеристикой, которая является зависимостью силы, создаваемой упругим элементом каретки, от ее сжатия. При этом необходимо обеспечить минимальное влияние на жесткость каретки (угол наклона статической характеристики), поскольку она выбирается на этапе проектирования для обеспечения оптимального токосъема. Поэтому управление статической характеристикой необходимо осуществлять за счет создания дополнительной силы разжатия кареток, т. е. путем вертикального смещения характеристики [23].

На рисунке 3.5 приведена конструкция токоприемника с системой автоматического регулирования статического нажатия [82, 83].

Подъемный механизм системы подвижных рам 1 данного токоприемника основан на резинокордном пневмоэлементе 2, а упругие элементы кареток представлены внутрипружинными пневмоэлементами 3. Регулировка силы статического нажатия осуществляется изменением давления в полости РКЭ с помощью регулятора давления (РД1). Аналогично, изменение давления в полости ВПЭ через регулятор давления (РД2) позволяет настраивать статическую характеристику кареток.



1 – рамы токоприемника; 2 – подъемный пневмоэлемент; 3 – внутрипружинный пневмоэлемент; 4 – полз токоприемника; 5 – датчик контактного нажатия; БУ – блок управления; ПУ – пульт управления; ИСВ – источник сжатого воздуха; РД – регулятор давления; ЭПР – электропневматический распределитель

Рисунок 3.5 – Принципиальная токоприемника, оснащенного САР статического нажатия и сжатия кареток

Регуляторы давления РД1 и РД2 управляются блоком управления (БУ), который получает данные от датчика силы нажатия, установленного на ползке токоприемника. Команды на подъем или опускание токоприемника поступают от пульта управления (ПУ) в кабине машиниста в БУ, который координирует работу электропневмораспределителей ЭПР1 и ЭПР2. При необходимости, например, при образовании гололеда, машинист может вручную увеличить усилие нажатия, передав сигнал в БУ для оперативной настройки параметров.

Управление статическим нажатием токоприемника и сжатием каретки осуществляется с использованием ПИ-алгоритма (рисунок 3.6) управления давлением воздуха в подъемном резинкордном пневмоэлементе и внутрипружинных пневмоэлементах, установленных в каретках [84 – 86]. Информация о уровне контактного нажатия поступает в систему управления от датчика нажатия, установленного на ползке токоприемника.

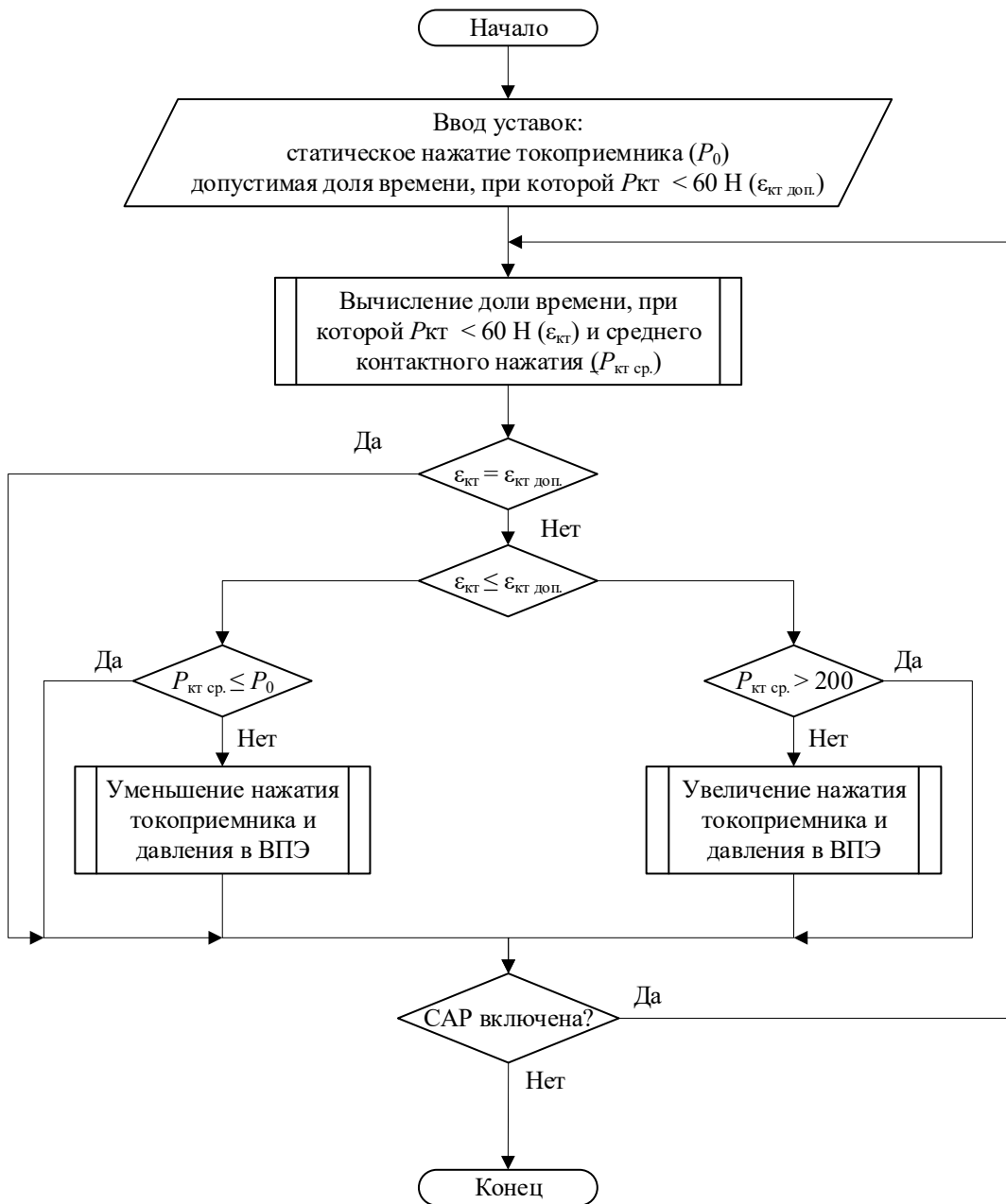


Рисунок 3.7 – Алгоритм регулирования нажатия токоприемника

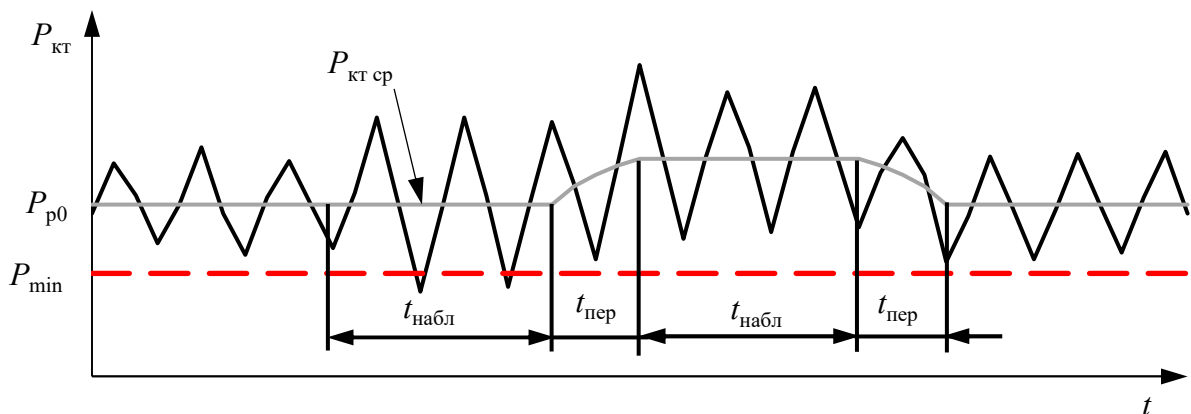


Рисунок 3.8 – Принцип действия САР статического нажатия

Однако увеличение статического нажатия может привести к избыточному сжатию упругих элементов кареток и их «пробой», для чего сжатие кареток поддерживается на уровне, близком к середине рабочего хода кареток (Δh_k) (рисунок 3.9). Для предотвращения этого ИЭ2 отслеживает средний уровень контактного нажатия в течение времени отслеживания ($t_{\text{набл}}$) и, при превышении уставки У2 ($P_p = 100 \text{ Н}$), передает сигнал на РУ2 для увеличения давления в ВПЭ, что позволяет поддерживать сжатие кареток в безопасных пределах. Уровень давления подбирается в соответствии с экспериментально полученной характеристикой сжатия кареток с внутривспружинными пневмоэлементами.

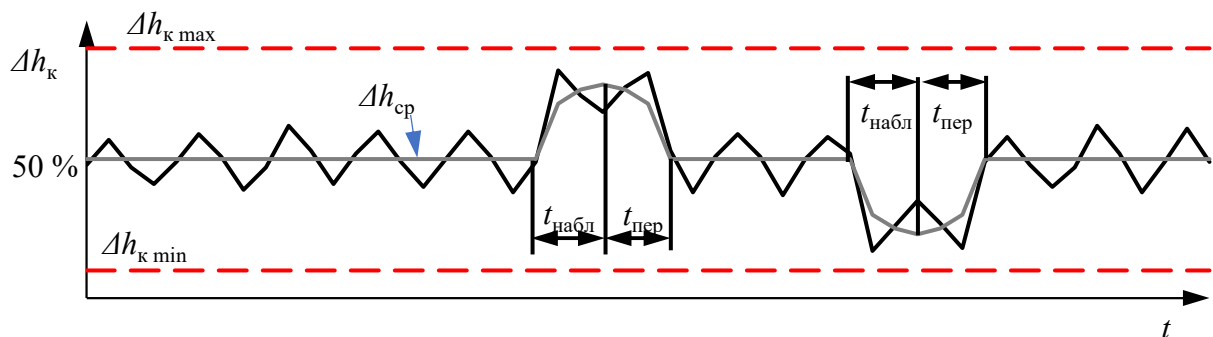


Рисунок 3.9 – Принцип действия САР статической характеристики каретки

3.3 Применение датчика сжатия упругого элемента каретки в системе автоматического регулирования

Пробой кареток может предотвращаться не только на основе информации о уровне контактного нажатия, но и на основании непосредственно получаемой от датчика сжатия упругих элементов каретки информации о сжатии упругих элементов каретки.

Сжатие пружин каретки токоприемника зависит от множества факторов, поэтому невозможно задать универсальное избыточное давление в пневмоэлементе, обеспечивающее оптимальную работу во всех режимах. Это обуславливает необходимость регулирования силы, создаваемой внутривспружинным пневмоэлементом в реальном времени в зависимости от текущего среднего сжатия кареток.

Так при увеличении статического нажатия в системе автоматического регу-

лирования возрастает сжатие пружин каретки, что может привести к их полному сжатию. Также на пружины влияют аэродинамические силы, действующие на конструкцию токоприемника. При движении «коленом вперед» подъемная сила меньше, чем при движении «коленом назад», в результате чего сжатие пружин снижается. Ветер дополнительно воздействует на подъемную силу, изменяя сжатие пружин.

В неблагоприятных погодных условиях на поверхности токоприемника может образоваться гололёд, что увеличивает массу конструкции. Рост массы рам снижает подъемную силу и уменьшает сжатие пружин, а увеличение массы полоза, напротив, усиливает сжатие. Тип и масса контактных элементов также влияют на пружины: при эксплуатации масса снижается из-за износа, что уменьшает сжатие.

Для поддержания сжатия упругих элементов в требуемых пределах может быть использована система автоматического регулирования давления в полости внутрипружинного пневмоэлемента (получен патент на изобретение) [87], которая отслеживает сжатие упругих элементов каретки. Принципиальная схема системы автоматического регулирования сжатия каретки, оснащенной внутрипружинными пневмоэлементами приведена на рисунке 3.10.

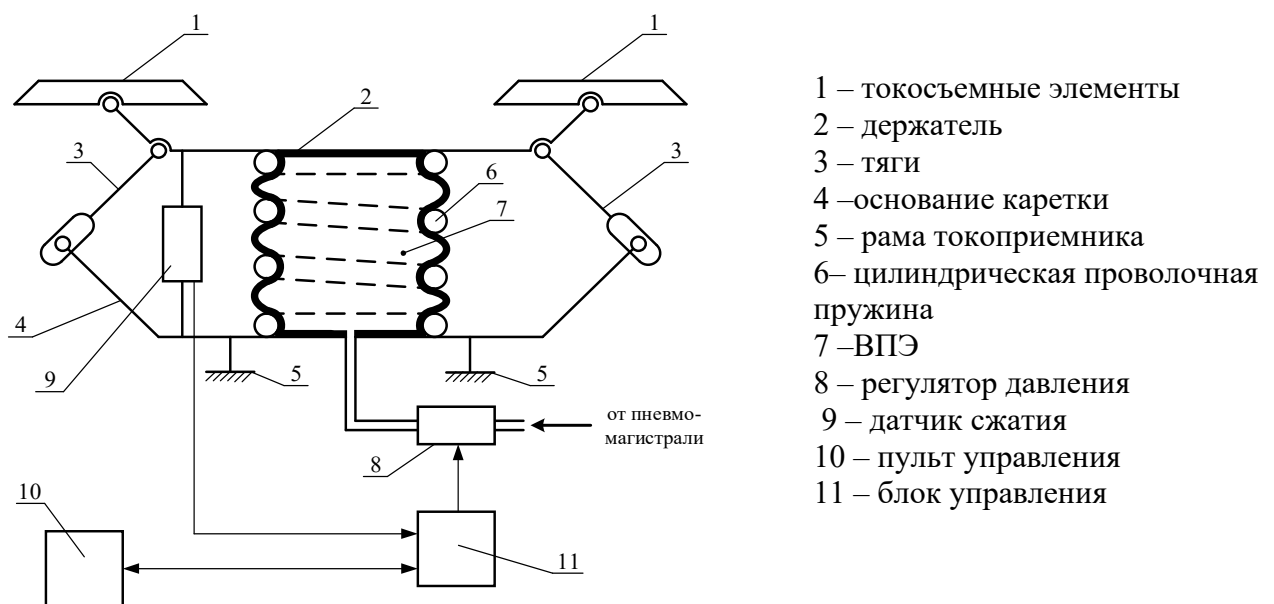


Рисунок 3.10 – Система автоматического регулирования каретки, оборудованной датчиком сжатия

Алгоритм регулирования приведен на рисунке 3.11.

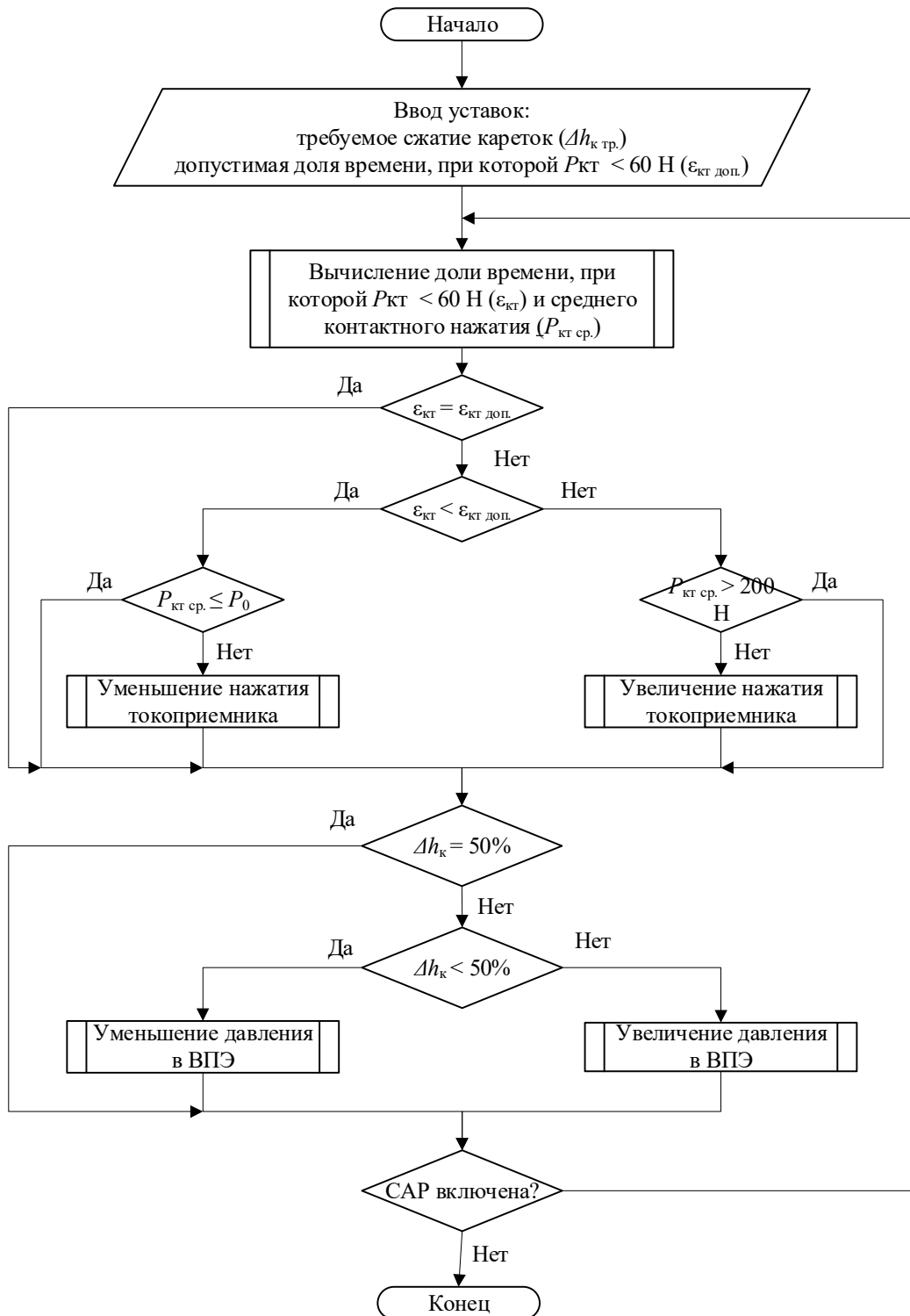


Рисунок 3.11 – Алгоритм регулирования токоприемника с каретками, оснащенными датчиком сжатия

Выход параметров за пределы допустимого диапазона регистрируется блоком управления, который сигнализирует о сбое в процессе токосъёма на пульт машиниста.

Датчик сжатия пружины фиксирует перемещение держателя относительно основания и передаёт данные в блок управления. Тот вычисляет среднее значение сжатия за определённый интервал. Если оно превышает 50 %, блок повышает уставку регулятора давления, увеличивая давление в пневмоэлементе, что приводит к разжатию пружины и возврату сжатия к 50 %. При снижении сжатия ниже 20 % давление уменьшается, снижая силу разжатия, создаваемую внутривиточным пневмоэлементом, и сжатие возвращается к 20 %.

3.4 Моделирование взаимодействия токоприемника, оснащенного системой автоматического регулирования статического нажатия и характеристики сжатия кареток, с контактной подвеской

На основании полученных с использованием модели с сосредоточенными параметрами, разработка которой описана в главе 2, данных была получена информация о процессе взаимодействия контактной подвески и токоприёмника, оснащенного системой автоматического регулирования контактного нажатия и сжатия кареток. Математическая модель контактной подвески, в которой приведенная масса контактной подвески была представлена в виде инертора и модель токоприемника с приведенными массами, в которой токоприемник был представлен в виде трех масс: нижнего рычага, верхнего рычага и верхнего узла (полоз).

На рисунке 3.12 приведены полученные в результате моделирования с использованием MATLAB Simulink кривые контактного нажатия токоприемников.

Скорость движения электроподвижного состава увеличивалась от 10 до 70 м/с. Снижение контактного нажатия ниже уровня $P_{км\ min} = 40$ Н значительно повышает риск искрения и отрывов и принимается за нарушение процесса токосъема.

На рисунке 3.12, а приведена кривая контактного нажатия токоприемника, не оснащенного САР статического нажатия и статической характеристики каретки. При движении по контактной подвеске с указанными параметрами со скоростью свыше 60 м/с контактное нажатие снижается до 40 Н, что значительно повышает риск искрения и электроэрозионный износ контактных вставок и провода.

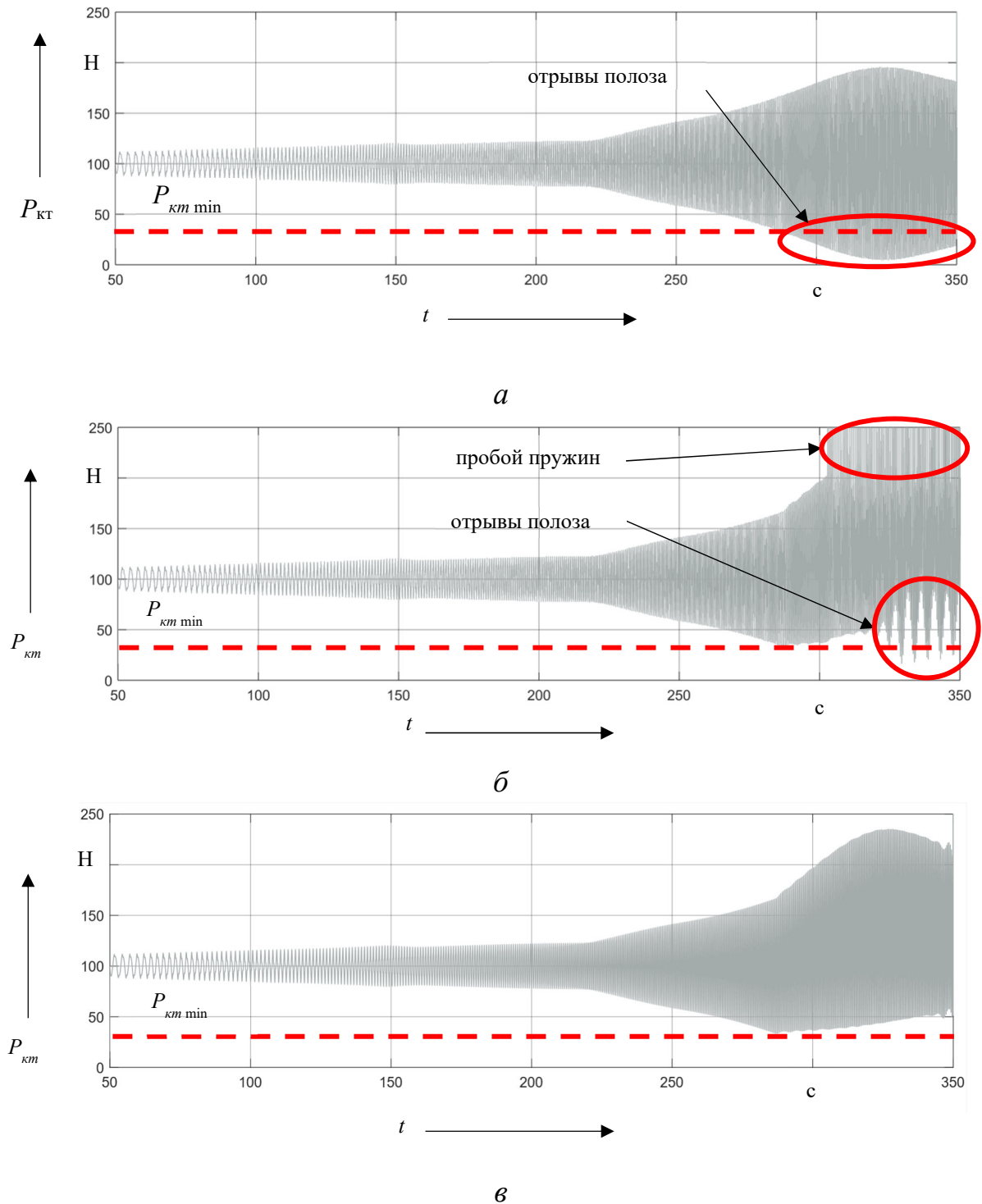


Рисунок 3.12 – Кривые контактного нажатия, полученные в результате моделирования: *a* – без САР; *б* – только САР статического нажатия; *в* – САР статического нажатия и статической характеристики кареток

Использование одной САР статического нажатия (рисунок 3.12, б) позволяет снизить риск отрывов и искрения за счет повышения статического нажатия токоприемника. Однако дальнейшее повышение скорости при использовании

САР статического нажатия движения приводит к появлению «пробоев» пружин каретки, что сопровождается скачкообразным ростом размаха контактного нажатия. Это связано с тем, что САР повышает статическое нажатие во избежание недопустимого снижения контактного нажатия, что приводит к увеличению сжатия пружин кареток выше предельно допустимого уровня. Кроме того, вследствие пробоев также появляется риск отрывов, связанных с нарушением нормальной работы кареток.

Одновременное применение САР статического нажатия и статической характеристики кареток (рисунок 3.12, в) позволяет не только избежать попадания в зону отрывов, но и стабилизировать сжатие упругих элементов кареток. Вместе с повышением давления в подъемном пневмоэлементе, приводящем к росту силы статического нажатия, статическая характеристика каретки регулируется таким образом, чтобы обеспечить среднее сжатие внутрипружинного пневмоэлемента близким к 50 % от его предельного сжатия. Это позволяет обеспечить надежный токосъем и избежать отрывов и искрения.

Выводы по третьему разделу:

1. На основе анализа известных элементов систем автоматического регулирования токоприемников разработан алгоритм управления давлением воздуха в внутрипружинном пневмоэлементе каретки, синхронизированным с контуром управления давлением в нажимном резинокордном пневмоэлементе.

2. Разработана структурная схема САР, реализующая ПИ-алгоритм управления нажатием токоприемника, оснащенного внутрипружинными пневмоэлементами в каретках.

3. Результаты моделирования взаимодействия токоприемника и контактной подвески в среде MATLAB Simulink показывают, что применение ПИ-алгоритма управления, учитывающего работу внутрипружинных пневмоэлементов, способствует повышению стабильности контактного нажатия. Это, в свою очередь, улучшает качество токосъема и обеспечивает надежный токосъем при увеличении скорости движения на 20%.

4 АПРОБАЦИЯ РАБОТЫ ТОКОПРИЕМНИКОВ, ОСНАЩЕННЫХ УПРАВЛЯЕМЫМИ УПРУГИМИ ВНУТРИПРУЖИННЫМИ ПНЕВМОЭЛЕМЕНТАМИ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ УСЛОВИЯХ ЭКСПЛУАТАЦИИ

4.1 Обоснование и выбор параметров износостойких внутрипружинных пневмоэлементов

4.1.1 Обоснование и выбор материала для изготовления внутрипружинных пневмоэлементов

Для обеспечения работы внутрипружинных пневмоэлементов и минимизации влияния нелинейности характеристик эластичных материалов на их общую характеристику, толщина эластичной оболочки разрабатываемых внутрипружинных пневмоэлементов должна быть достаточно небольшой (около 1 – 2 мм). Кроме того, поскольку каретки токоприемников эксплуатируются снаружи электроподвижного состава, они подвергаются влиянию негативных факторов окружающей среды, в число которых входят низкие и высокие температуры, ультрафиолетовое излучение, наличие абразивных частиц и другие факторы.

Таким образом, материал, используемый для изготовления внутрипружинных пневмоэлементов должен обладать высокой эластичностью и быть устойчивым к влиянию негативных факторов окружающей среды.

Наибольшее распространение для изготовления эластичных пневмоэлементов в настоящее время получили натуральные и синтетические каучуки. Для использования в качестве материала для изготовления эластичных оболочек внутрипружинных пневмоэлементов целесообразно использовать бутилкаучуки благодаря их высокой атмосферной стойкости и низкой зависимостью эластичности от температуры по сравнению с другими видами каучука. Диапазон их рабочих температур составляет от –55 до +100 °С, однако при низких температурах бутилкаучукам свойственна повышенная текучесть [88].

Бутилкаучук получил широкое распространение в автомобильной промышленности в качестве материала для изготовления камер и шин, которые также как

и разрабатываемые внутрипружинные пневмоэлементы работают в условиях воздействия на них факторов окружающей среды. Регламентированные ГОСТ 4750-89 «Шины пневматические для велосипедов. Технические условия» характеристики бутилкаучука и каучука, используемого при изготовлении велосипедных камер приведены в таблице 4.1 [89].

Таблица 4.1 – Свойства каучуков

Параметр	Бутилкаучук	Каучук общего назначения
Предел прочности, МПа	8,3	12,75
Прочность на раздир, кН/м	24,52	24,52
Удлинение при разрыве, %	500	550

Широкое распространение в настоящее время получают силиконы (кремнийорганическая резина) [90]. Хотя их механические характеристики уступают каучукам, но их стойкость к агрессивным факторам окружающей среды, воздействию низких и высоких температур делают их перспективным материалом для изготовления эластичных пневматических элементов. Кроме того, силиконы обладают низким коэффициентом трения, что также повышает их стойкость к истиранию.

Также существуют силиконы, специально разработанные для эксплуатации в особо холодных условиях, что позволяет использовать их без потери их эластичности вплоть до температуры $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ [91].

Кроме того, разрабатаны и изготавливаются силиконы с улучшенными механическими характеристиками, что позволяет повысить их прочность и износостойкость. При этом они также, как и другие силиконы обладают высокой атмосферостойкостью и широким рабочим диапазоном температур.

Характеристики силиконов сведены в таблицу 4.2.

Таблица 4.2 – Свойства силиконов

Параметр	Базовый силикон	Морозостойкий силикон	Износостойкий силикон
Предел прочности, МПа	5	6	8
Прочность на раздир, кН/м	12	20	35
Удлинение при разрыве, %	250	350	400
Рабочий диапазон температур, °С	-50...240	-100...250	-60...230

Хотя силиконы и обладают большей газопроницаемостью по сравнению с каучуками, это не вызовет значительных проблем при их применении в качестве материала для эластичных оболочек внутрипружинных пневмоэлементов, поскольку их полость постоянно связана с пневмомагистралью, поддерживающей в нем требуемое давление.

При этом существование значительного числа типов кремнийорганической резины позволяет подобрать оптимальный вариант для её использования в качестве материала для изготовления внутрипружинных пневмоэлементов кареток токоприемников электроподвижного состава.

Для изготовления макетных образцов оболочки внутрипружинных пневмоэлементов, предназначенных для установки в каретках токоприемников, применяемом на современном электроподвижном составе России. Характеристики применяемого литьевого силикона сведены в таблицу 4.3.

Таблица 4.3 – Свойства литьевого силикона

Твёрдость по Шору, А°	40
Предел прочности, МПа	4,5
Прочность на раздир, кН/м	22,5
Удлинение при разрыве, %	570
Плотность, кг/м ³	1050
Предельная температура кратковременного нагрева, °С	200

Для отливки оболочек внутрипружинных пневмоэлементов была разработана и изготовлена с применением аддитивных технологий форма для отливки внутрипружинных пневмоэлементов. Она приведена на рисунке 4.1.



Рисунок 4.1 – Форма для отливки оболочек внутрипружинных пневмоэлементов

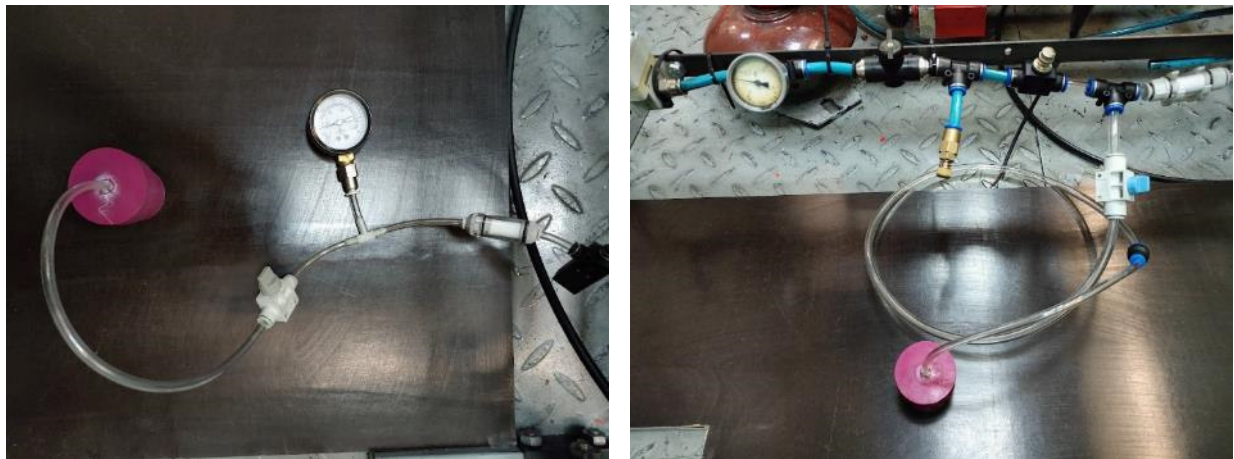
Процесс отливки макетных образцов оболочек внутрипружинных пневмоэлементов состоит из следующих этапов:

1) Подготовка смеси для литья (рисунок 4.2). Для этого в емкости для дегазации смешиваются компоненты А и Б в необходимой пропорции.



Рисунок 4.2 – Смешивание литьевого силикона в емкости для дегазации

2) Дегазация полученного литьевого силикона (рисунок 4.3). Дегазация осуществляется в два этапа: сначала из полученная смесь помещается в разреженной среде (при давлении -80 кПа относительно атмосферного давления), что позволяет удалить пузырьки воздуха, возникшие в результате смешивания, после чего подвергается воздействию повышенного давления (при избыточном давлении 400 кПа относительно атмосферного давления), что позволяет удалить оставшиеся мелкие пузырьки, оставшиеся после первого этапа. Для создания повышенного давления используется компрессор, который также служит источником питания для вакуумного эжектора, служащего для создания низкого вакуума для дегазации.



а

б

Рисунок 4.3 – Дегазация литьевого силикона: а – вакуумная обработка, б – обработка повышенным давлением

Полученная в процессе дегазации смесь заливается в форму (рисунок 4.4).



Рисунок 4.4 – Заливка литьевого силикона в форму для изготовления оболочек внутрипружинного пневмоэлемента

3) Заполненная форма оставляется в вертикальном положении для недопущения образования в оболочке внутрипружинного пневмоэлемента полостей, незаполненных литьевым силиконом, а также для выхода пузырьков воздуха, возникших в процессе заливки.

4) После отверждения силиконовая оболочка вместе с остовом извлекается из формы и образовавшийся на ней облой удаляется (рисунок 4.5).



а



б

Рисунок 4.5 – Силиконовая оболочка после отверждения:

а – до удаления облоя, б – готовое изделие

Полученная оболочка снимается с остова и может быть использована для изготовления внутрипружинных пневмоэлементов, устанавливаемых в каретках токоприемников.

4.1.2 Оценка износостойкости оболочек внутрипружинных пневмоэлементов

Одним из важных аспектов выбора материала для эластичной оболочки внутрипружинного пневмоэлемента является его износостойкость, поскольку каретки токоприемников эксплуатируются в тяжелых условиях, в том числе на поверхность эластичной оболочки могут попадать продукты износа, образовавшиеся в результате трения контактных вставок токоприемника и контактного провода. Поэтому выбор материалов, обладающих высокой износостойкостью, является актуальной задачей при разработке внутрипружинных пневмоэлементов.

Полученные в результате статических, динамических и других исследований данные свидетельствуют о том, что наибольший износ испытывает гибкая оболочка внутрипружинного пневмоэлемента, тогда как другие элементы (фланцы и пружина) ему не подвержены. Это объясняется тем, что выполненные из полиамида фланцы неподвижно закреплены на каретке, а пружина значительно более износостойка чем остальные элементы ввиду использования стали.

При этом гибкая оболочка зона изнашивается не по всей её поверхности, а только в зонах крепления гибкой оболочки в фланцах. На рисунке 4.6 приведены зоны сосредоточения повреждений гибкой оболочки внутрипружинного пневмоэлемента в результате её взаимодействия с фланцами и проволокой пружины. Повышенный износ в данных зонах может быть объяснен что гибкая оболочка проскальзывает относительно витков пружины, вызывая повышенный износ. Тогда как остальная поверхность гибкой оболочки прилегает к проволоке пружины без проскальзывания. Таким образом, оценка износостойкости материалов гибкой оболочки внутрипружинного пневмоэлемента является главной задачей при выборе параметров износостойких внутрипружинных пневмоэлементов.

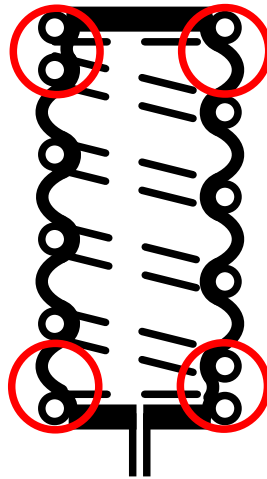


Рисунок 4.6 – Зоны сосредоточения повреждений гибкой оболочки пневмоэлемента

Исследование сопротивления резин к истиранию при скольжении выполняется по ГОСТ 426-77 «Резина. Метод определения сопротивления истиранию при скольжении» и заключается в истирании образцов, прижатых к абразивной по-

верхности вращающегося с постоянной скоростью диска, при постоянной нормальной силе и определении показателей сопротивления истиранию или истираемости [92].

Однако непосредственные данные об истираемости материала гибкой оболочки внутрипружинного пневмоэлемента, необходимые для выбора оптимального материала для ее изготовления, целесообразно получать при исследованиях не отдельного образца, а всего внутрипружинного пневмоэлемента.

Это связано с тем, что наличие пружины определяет локализацию и интенсивность истирания при механическом контакте оболочки упругого элемента с проволокой пружины и фланцами, к которым крепится оболочка. Поэтому для получения таких данных был проведен комплекс исследований на колебательном стенде ОмГУПСа.

Разработанная установка для определения (рисунок 4.7) представляет собой кривошипно-шатунный механизм, приводящийся в движение при помощи электропривода и обеспечивающий сжатие внутрипружинного пневмоэлемента каретки, неподвижно установленной на основании.

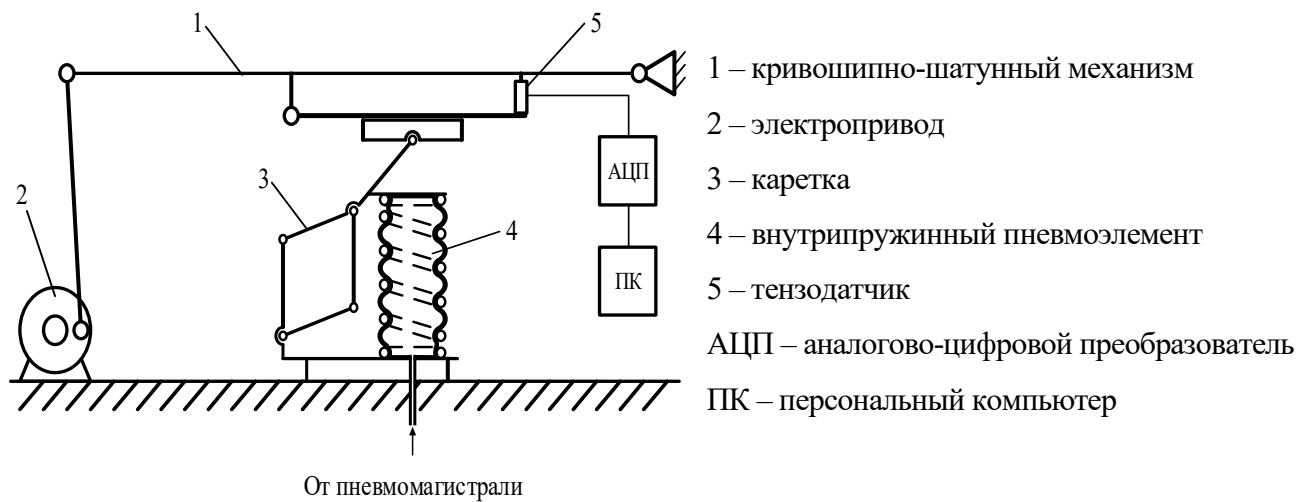


Рисунок 4.7 – Схема испытательной установки для определения износостойкости внутрипружинных пневмоэлементов

Тензодатчик, установленный на кривошипно-шатунном механизме и соединенный с подключенным к персональному компьютеру аналогово-цифровым преобразователем, служит для контроля работы внутрипружинного пневмоэлемента

и подсчета количества колебаний (рисунок 4.8). Снижение силы, создаваемой внутрипружинным пневмоэлементом, свидетельствует о появлении в гибкой оболочке проколов вследствие ее износа, приводящих к снижению в ней давления.



Рисунок 4.8 – Испытательной установки для определения износостойкости внутрипружинных пневмоэлементов: а – испытательное оборудование, б – процесс испытаний

Частота вертикальных колебаний испытательного стенда во время испытаний составляет 1 Гц, а амплитуда вертикальных соответствует полному рабочему ходу кареток (50 мм).

Гибкие оболочки внутрипружинных пневмоэлементов, выполненные из бутылкаучука имеют внешние повреждения, связанные с повышенным истиранием поверхности оболочки вблизи зон их соединения с фланцами при их взаимодействии с проволокой пружины. Указанные повреждения появлялись по прошествии 300 тыс. циклов сжатия-разжатия и приводят к разгерметизации внутрипружинного пневмоэлемента

В случае использования в качестве материала для изготовления гибких оболочек внутрипружинных кремнийорганической резины внутрипружинные пневмоэлементы обладают большей износостойкостью и после 500 тыс. циклов на поверхности оболочки не наблюдается значительных потертостей.

Кремнийорганическая резина не смотря на меньшую механическую прочность по сравнению с органическими каучуками ввиду большей износостойкости,

а также стойкости к ультрафиолету, химикатам, низким и высоким температурам обладает лучшими характеристиками в качестве материала для изготовления гибких оболочек внутрипружинных пневмоэлементов, устанавливаемых в каретках токоприемников.

Таким образом, оболочка гибкого пневмоэлемента подвергается повышенному износу вследствие её механического взаимодействия с проволокой пружины, на которой могут образовываться сколы, задиры, раковины и другие дефекты. Также краска, которой покрываются пружины, при многократных циклах скручивания проволоки пружины фрагментарно отслаивается, что приводит к появлению острых граней, приводящих к повышенному износу оболочки при их механическом взаимодействии. Это может привести к проколам оболочки пневмоэлемента, что, соответственно, приводит к выходу из строя каретки токоприемника электроподвижного состава.

Кроме того, отслоение краски также снижает защиту проволоки пружины от воздействия факторов окружающей среды, что приводит к коррозии и ржавлению проволоки пружины. Также в случае полного сжатия пружины витки смыкаются между собой, что приводит к повышенной нагрузке на материал оболочки пневмоэлемента, способной привести к её повреждениям.

Для защиты гибкой оболочки пневмоэлемента от указанных факторов проволока пружины может быть снабжена защитным покрытием, защищающим как оболочку пневмоэлемента от повышенного износа, так и проволоку пружины от воздействий внешней среды (получен патент № 227471 на полезную модель (РФ), МПК В60L 5/22. Каретка токоприемника электроподвижного состава / О. А. Сидоров, М. С. Михайлов (РФ). – № 2024109133; Заявлено 04.04.2024; Опубл. 22.07.2024. Бюл. № 21) [93].

Каретка токоприемника электроподвижного состава с защитной оболочкой пружин (рисунок 4.9) содержит токосъемные элементы 1, установленные на держателе 2, который с помощью тяг 3 шарнирно соединен с основанием 4, закрепленным на раме токоприемника 5, при этом между держателем 2 и основанием 4 установлена цилиндрическая проволочная пружина 6, работающая на сжатие,

с установленным внутри герметичным гибким пневмоэлементом 7 так, что при наличии давления воздуха в нем, его гибкая оболочка 8 прижимается к внутренним поверхностям витков пружины 6, располагаясь в межвитковом пространстве и охватывая часть окружности поперечного сечения проволоки пружины 6, при этом указанный пневмоэлемент выполнен с возможностью соединения его полости с пневмомагистралью через регулятор давления воздуха 9. Проволока указанной цилиндрической пружины 6 снабжена защитным покрытием 10, выполненным из износостойкого термостойкого эластичного материала.

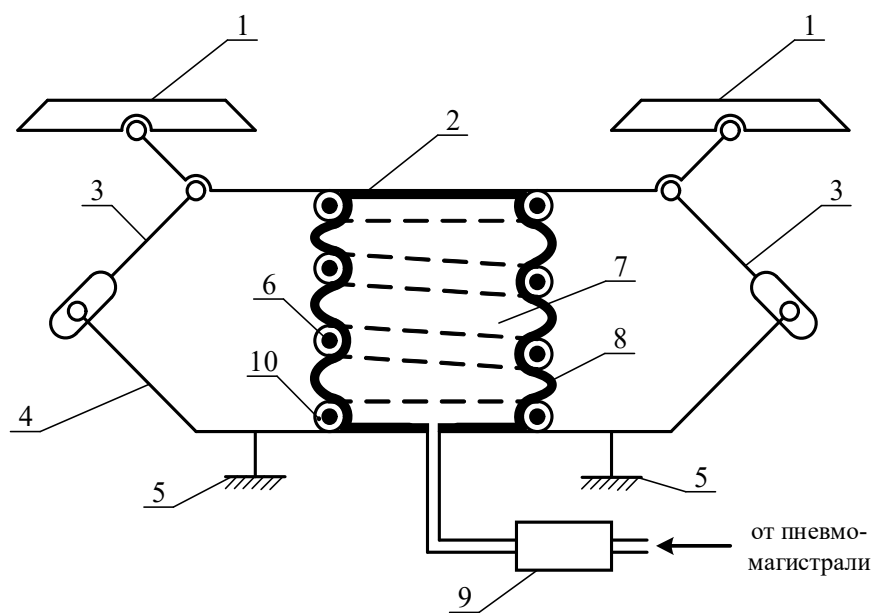


Рисунок 4.9 – Защитное покрытие пружины
внутрипружинного пневмоэлемента

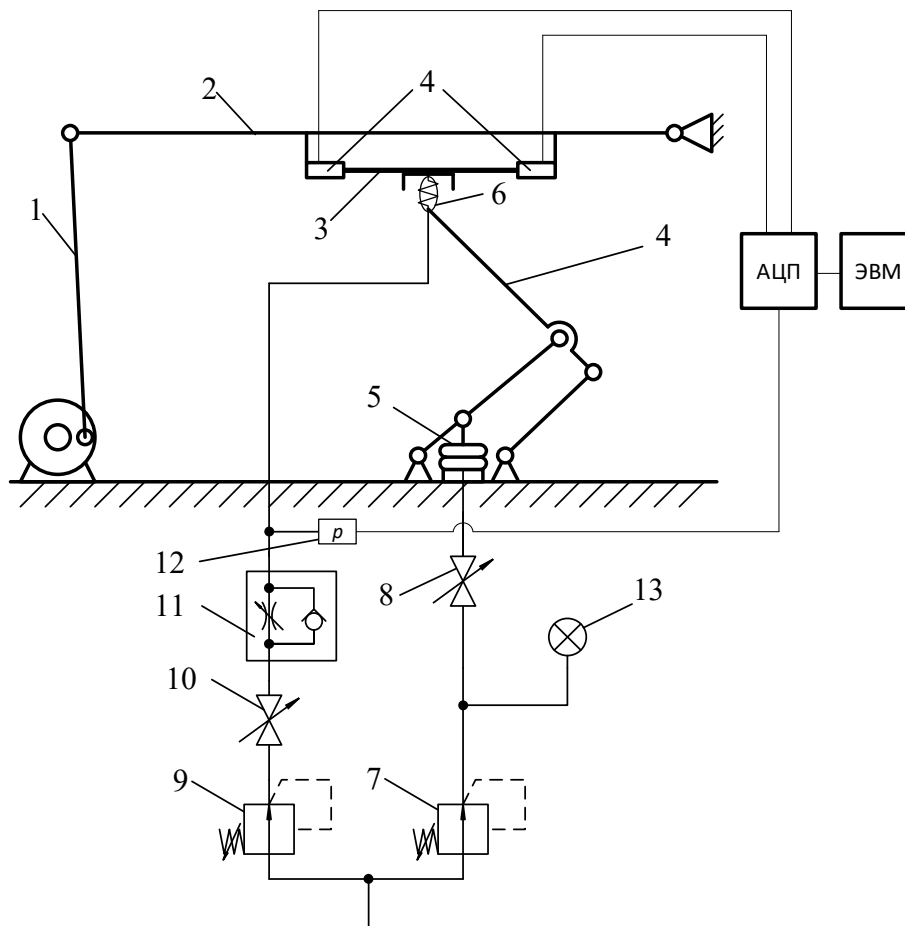
4.2 Экспериментальные исследования динамических характеристик токоприемников с управляемыми внутрипружинными пневмоэлементами в каретках

4.2.1 Колебательный стенд для исследования динамических характеристик токоприемников

Для имитации взаимодействия токоприемников с контактной подвеской в лабораторных условиях используются специальные испытательные стенды, чаще всего – колебательные и вращательные. Колебательные стенды, как более подходящие для изучения динамики взаимодействия токоприемников и контакт-

ной подвески, обычно основаны на кривошипно-шатунном механизме, обеспечивающем вертикальные колебания рамы с имитатором контактного провода.

В лаборатории ОмГУПС им. В. П. Михеева разработан ударно-колебательный стенд, включающий три блока: имитации колебаний подвески, колебаний корпуса подвижного состава и ударных воздействий [94 – 96]. Для испытаний упругих элементов использовался блок имитации колебаний подвески, модернизированный для управления давлением во внутрипружинных пневмоэлементах и оснащенный датчиками контактного нажатия. Схема установки представлена на рисунке 4.10.



1 – кривошипно-шатунный механизм, 2 – рама, 3 – имитатор контактного провода, 4 – токоприемник, 5 – РКЭ, 6 – ВПЭ, 7 – регулятор давления в РКЭ, 8 – кран ПМ, 9 – регулятор давления в ВПЭ, 10 – кран ВПЭ, 11 – дроссель с обратным клапаном ВПЭ, 12 – датчик давления воздуха 13 – манометр

Рисунок 4.10 – Колебательный стенд для исследования ВПЭ в каретках

Горизонтальная рама 2 приводится в движение кривошипно-шатунным механизмом 1, частота колебаний которого регулируется изменением скорости его вращения. Амплитуда вертикальных колебаний рамы может варьироваться посредством изменения длины кривошипа. На раме размещён имитатор контактного провода 3, под которым установлен исследуемый токоприемник 4. Контактное нажатие фиксируется балочными тензодатчиками 5, подключёнными к аналогово-цифровому преобразователю (АЦП), который передаёт данные на вычислительное устройство.

Пневматическая система состоит из двух контуров: один регулирует статическое нажатие токоприемника, другой – жёсткость упругого элемента 6 каретки. Давление в подъемном механизме 5 настраивается регулятором 7, а подача воздуха отключается краном 8. Жёсткость упругого элемента регулируется давлением через регулятор 9 и дроссель 11, с отключением подачи воздуха краном 10. Контроль давления осуществляется датчиком 13, подключённым к АЦП и ЭВМ.

Общий вид токоприемника с внутрипружинными пневмоэлементами в каретках, установленный на модернизированном колебательно стенде приведен на рисунке 4.11.



Рисунок 4.11 – Общий вид колебательного стенда для исследования динамических характеристик токоприемников

Частота вертикальных колебаний может быть связана со скоростью движения электроподвижного состава с помощью следующей формулы:

$$v = \frac{V}{l}, \quad (4.1)$$

где V – скорость движения электроподвижного состава, м/с;

l – длина пролета, м.

Этот испытательный стенд создан для моделирования ситуаций, где токоприемник взаимодействует с контактной подвеской в различных скоростных режимах. Это позволяет точно воссоздать ситуации с разными уровнями провеса контактного провода, что отражает разнообразные условия работы электроподвижного состава.

4.2.2 Методика планирования эксперимента по испытаниям токоприемников с управляемыми внутривибрационными пневмоэлементами в каретках

В экспериментах построение регрессионной модели и оценка дисперсий коэффициентов полинома не всегда являются главным приоритетом. Важным аспектом также является анализ функции отклика и её дисперсии в зависимости от изменения влияющих факторов. Для этого при разработке плана эксперимента стремятся к однородной дисперсии отклика при разных сочетаниях факторов, то есть к обеспечению ротатабельности [97], достигаемому равномерным размещением точек относительно центра плана.

Для этого используют ротатабельные центральные композиционные эксперименты второго порядка, включающие полный или дробный факторный план с измерениями в звездных точках и центре. Такие методы широко применяются, а параметры доступны в справочной литературе. Таблица 4.4 содержит ротатабельный план, состоящий из 8 полнофакторных, 6 звездных и 6 центральных опытов.

Таблица 4.4 – План ротатабельного центрального композиционного эксперимента второго порядка

План	№ опыта	x_0	x_1	x_2	x_3	$x_1 x_2$	$x_1 x_3$	$x_2 x_3$	x_1^2	x_2^2	x_3^2
Ядро (ПФЭ 2^3)	1	+1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	+1	+1	+1
	2	+1	+1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	+1	+1
	3	+1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	+1	+1	+1
	4	+1	+1	+1	-1	+1	-1	-1	+1	+1	+1
	5	+1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	+1	+1
	6	+1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	+1	+1	+1
	7	+1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	+1	+1	+1
	8	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1
«Звездный»	9	+1	$-\alpha$	0	0	0	0	0	$+\alpha^2$	0	0
	10	+1	$+\alpha$	0	0	0	0	0	$+\alpha^2$	0	0
	11	+1	0	$-\alpha$	0	0	0	0	0	$+\alpha^2$	0
	12	+1	0	$+\alpha$	0	0	0	0	0	$+\alpha^2$	0
	13	+1	0	0	$-\alpha$	0	0	0	0	0	$+\alpha^2$
	14	+1	0	0	$+\alpha$	0	0	0	0	0	$+\alpha^2$
Центр	15	+1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	16										
	17										
	18										
	19										
	20										

После выбора типа эксперимента определяется оптимизируемый параметр и ключевые переменные. При исследовании упругих элементов в каретках токоприемников целесообразно анализировать среднеквадратичное отклонение контактного давления – оно отражает стабильность токосъема и влияет на износ контактных элементов.

Следующим этапом после выбора типа эксперимента является определение оптимизируемого показателя и ключевых факторов. В задачах, связанных с исследованием управляемых упругих элементов в каретках токоприемников, в качестве критерия эффективности целесообразно использовать среднеквадратичное отклонение контактного давления. Этот параметр отражает стабильность вза-

имодействия с контактной подвеской и напрямую влияет на износ контактных элементов.

На процесс токосъема влияет множество переменных: характеристики токоприемника (включая статическое нажатие и массу), скорость движения, параметры подвески (длина пролета, её жёсткость, стрела провеса), а также внешние факторы – ветер, температура, гололёд и вибрации. Некоторые из них взаимосвязаны, другие – независимы.

Для моделирования были выбраны наиболее значимые переменные: статическое нажатие, частота вертикальных колебаний контактной точки и давление в пневмоэлементе каретки.

Диапазон статического нажатия задан в соответствии с ГОСТ 32204–2013: от 70 до 110 Н, где среднее значение принимается за нулевой уровень. Расчёт значений в звёздных точках производится с учётом стандартного плеча.

Максимальная скорость для высокоскоростных магистралей в России составляет 250 км/ч (70 м/с), при которой частота колебаний не превышает 1,17 Гц. Для эксперимента установлены следующие уровни частоты: низкий – 0,5 Гц (30 м/с), базовый – 0,75 Гц (45 м/с), высокий – 1 Гц (60 м/с).

Сила, создаваемая внутрипружинным пневмоэлементом, устанавливаемым в каретке, может быть приблизительно рассчитана исходя из зависимости:

$$P_{ВПЭ} = p_{ВПЭ} \cdot S_{ВПЭ}, \quad (4.2)$$

где $p_{ВПЭ}$ – давление во внутрипружинном пневмоэлементе каретки, Па;

$S_{ВПЭ}$ – сечение внутрипружинного пневмоэлемента каретки, м².

Площадь сечения пневматического упругого элемента каретки составляет около $500 \cdot 10^{-6}$ м², поэтому для получения усилия в 50 Н необходимо давление порядка 100 кПа, принятое за базовый (нулевой) уровень. Регулировка усилия осуществляется изменением давления в диапазоне ± 50 % от этого значения, что соответствует 50 и 150 кПа. Значения в звёздных точках определяются с учётом стандартного звёздного плеча. Уровни варьируемых параметров сведены в таблицу 4.5.

Таблица 4.5 – Интервал варьирования и уровни фактора

Интервал варьирования и уровни фактора	Факторы		
	$P_{ст}, Н$	$\nu, Гц$	$p, кПа$
Безразмерный фактор	x_1	x_2	x_3
Нулевой уровень, $z_{i0} (x_i = 0)$	90	0,75	100
Интервал варьирования, Δz_i	20	0,25	50
Низкий уровень $z_i (x_i = -1)$	70	0,5	50
Высокий уровень $z_i (x_i = +1)$	110	1	150
Звездные точки:			
$z_i^* (x_i = -\alpha)$	56	0,33	16
$z_i^* (x_i = +\alpha)$	124	1,17	184

Полученная зависимость среднего квадратичного отклонения контактного нажатия аппроксимируется в соответствии с полиномом второго порядка:

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i x_i + \sum_{i \neq j}^k b_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^k b_{ii} (x_i)^2 \quad (4.3)$$

Одна из кривых контактного нажатия, полученных при использовании в каретке токоприемника внутривибропружинного пневмоэлемента изображена на рисунке 4.12

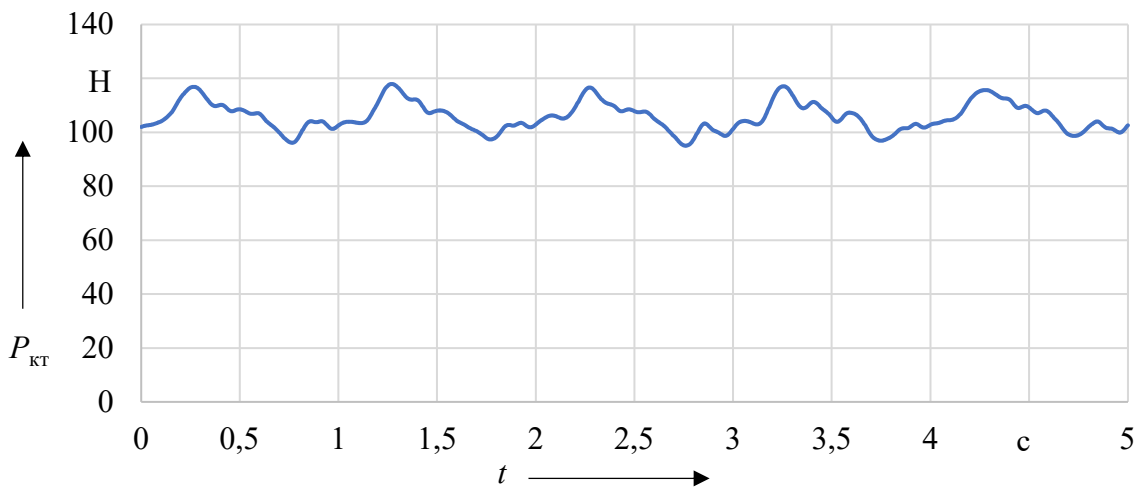


Рисунок 4.12 – Пример контактного нажатия, полученного в точке «4» плана

Результаты эксперимента, выполненного по описанному плану сведены в таблицу 4.6. Средние значения контактного нажатия в каждой экспериментальной точке соответствуют заданному статическому усилию, что подтверждает корректность полученных данных. Минимальные и максимальные значения также находятся в допустимых пределах, что указывает на безопасность эксплуатации токоприемника в исследуемых режимах.

Таблица 4.6 – Результаты ротатбельного центрального композиционного эксперимента второго порядка для мягких пружин ППЭ с давлением, установленные в каретке токоприемника

План	№ опыта	P_p , Н	v , м/с	p , кПа	σ , Н	$P_{кт. ср.}$, Н	$P_{кт. мин.}$, Н	$P_{кт. макс.}$, Н
Ядро (ПФЭ 2 ³)	1	70	0,5	50	1,8	68	45	92
	2	110	0,5	50	1,8	109	102	114
	3	70	1	50	5,7	68	58	80
	4	110	1	50	5,5	105	94	118
	5	70	0,5	150	1,9	68	63	73
	6	110	0,5	150	2,1	110	104	116
	7	70	1	150	5,8	68	57	81
	8	110	1	150	5,7	110	98	122
«Звездный»	9	56	0,75	100	3,1	55	48	63
	10	124	0,75	100	3,0	125	118	133
	11	90	0,33	100	1,8	89	83	93
	12	90	1,17	100	8,3	89	73	103
	13	90	0,75	16	3,0	93	86	100
	14	90	0,75	184	2,7	94	87	100
Центр	15 - 20	90	0,75	100	2,7	89	84	96

По полученным данным с помощью специализированного программного обеспечения составлено уравнение регрессии второго порядка:

$$\begin{aligned} \sigma = & 7,76 - 0,064P_p - 11,7v - 0,012p - 0,013P_p \cdot v + \\ & + 5,2 \cdot 10^{-5} P_p \cdot p + 1,73 \cdot 10^{-3} v \cdot p + 3,71 \cdot 10^{-3} P_p^2 + 13,7v^2 + 3,4 \cdot 10^{-5} p^2 \end{aligned} \quad (4.4)$$

Высокая степень соответствия между экспериментальными данными по среднеквадратичному отклонению контактного нажатия и построенной регрессионной моделью подтверждается уровнем коэффициента детерминации ($R^2 = 0,995$). Это свидетельствует о пригодности полученного уравнения регрессии для построения поверхности отклика и проведения анализа влияния варьируемых факторов.

Изменение давления во внутривибрирующем пневматическом элементе (рисунок 4.13) при варьировании влияющих факторов оказывает незначительное влияние на стабильность процесса токобъема. Таким образом, применение таких элементов в конструкции кареток токоприемников позволяет корректировать их статические характеристики без изменения общей жесткости системы. Это подтверждает эффективность использования управляемых пневмоэлементов и соответствует основной цели их внедрения – повышение адаптивности каретки при сохранении требуемых эксплуатационных параметров.

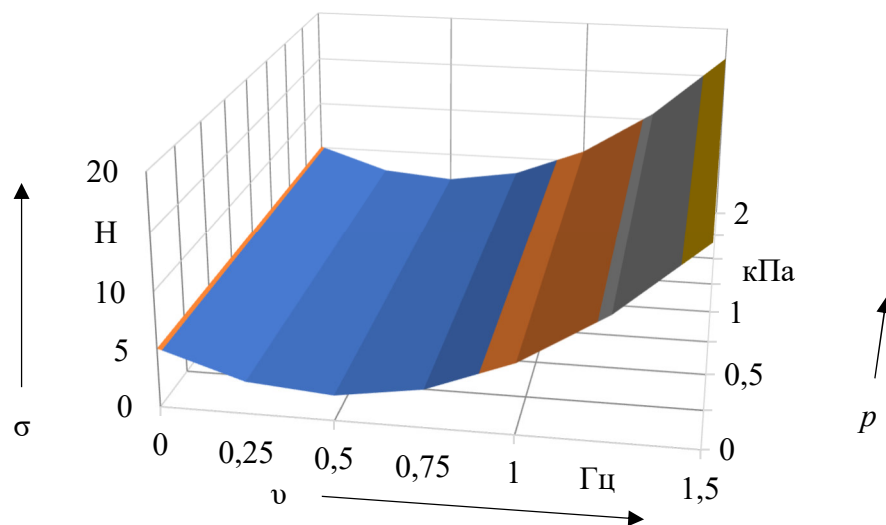


Рисунок 4.13 – СКО контактного нажатия в зависимости от частоты колебаний и давления в ВПЭ при постоянном статическом нажатии 100 Н

4.3 Анализ условий эксплуатации внутрипружинных пневмоэлементов

Климатические условия работы внутрипружинных пневмоэлементов соответствуют условиям работы токоприемников электроподвижного состава:

– колебаниях температуры:

1) от -55°C до $+40^{\circ}\text{C}$ – для дорог в районах с холодным климатом;

2) от -30°C до $+40^{\circ}\text{C}$ – для дорог в районах с умеренным климатом;

– относительной влажностью воздуха до 98 %;

– скорости ветра, действующего на токоприёмник в любом направлении 35 м/с;

– высоте над уровнем моря – не более 1200 м, в том числе, при дожде, снегопаде, изморози и гололёде.

Поскольку внутрипружинные пневмоэлементы устанавливаются внутри кареток, то они могут подвергаться воздействию повышенных температур от токоведущих частей и также на поверхность оболочки пневмоэлемента могут попадать искры, возникающие в результате токосъема.

Материалы, из которых предлагается изготавливать внутрипружинные пневмоэлементы: силикон для оболочки, полиамид для фланцев и конструкционная сталь для пружины и её держателей могут эксплуатироваться в интервале от -50°C до $+80^{\circ}\text{C}$. Данный интервал является достаточным для эксплуатации в каретках токоприемников. Поскольку каретки токоприемников не являются токоведущими частями, то они не подвергаются интенсивному нагреву. Для изготовления фланцев рекомендуется применять полиамид с добавками, обеспечивающими повышение его стойкости к ультрафиолету.

Кроме того, каретки токоприемников могут подвергаться ударным воздействиям при наезде на разрегулированные спецчасти контактной подвески (фиксаторы, секционные изоляторы и т.п.). При высоких скоростях движения на каретки и полоз токоприемника оказывает интенсивное воздействие набегающий аэродинамический поток.

4.3.1 Исследование работоспособности внутрипружинных пневмоэлементов в условиях низких температур

Современный электроподвижной состав в России эксплуатируется в различных климатических условиях, в том числе и при низких температурах, которые приводят к снижению эластичности пневмоэлементов, что оказывает негативное влияние на их работу, увеличивая силы сухого трения в слоях оболочки. Поэтому важной задачей является комплексное исследование работы ВПЭ в условиях низких температур.

Аналитическая оценка процессов теплообмена в управляемых пневмоэлементах является сложной задачей, поэтому целесообразно экспериментально оценить работоспособность ВПЭ при низких температурах [98].

Методика проведения экспериментальных исследований токоприемников, каретки которых оснащены ВПЭ, предусматривает выполнение следующих мероприятий:

- модернизацию действующих лабораторных установок для проведения измерений в условиях низких температур;
- снятие статических и динамических характеристик токоприемников;
- верификацию и обработку полученного массива данных.

Для оптимизации процесса выбран план ротатбельного эксперимента второго порядка, поскольку позволяет получить наиболее достоверные функции отклика. Необходимые для разработки плана эксперимента параметры приведены в справочной литературе и не требуют дополнительных вычислений.

Эксперимент проводился как при нормальных условиях (20 °С), так и при низких температурах, когда каретки токоприемника были охлаждены до минус 40 °С.

Первым этапом проведено снятие характеристики статического нажатия каретки, оснащенной управляемыми ВПЭ, которая необходима для оценки динамики взаимодействия токоприемника и контактной подвески.

В качестве варьируемых параметров были приняты давление в внутрипру-

жинном пневмоэлементе ($p_{ВПЭ}$) и сжатие упругих элементов кареток (Δh). Приближенное значение усилия, создаваемого одним ВПЭ, определяется по формуле (4.2).

При увеличении статического нажатия токоприемника на 50 Н (с 90 до 140 Н) требуется соответствующее повышение давления в пневмоэлементе на 50 кПа. Таким образом, верхний уровень составляет 75 кПа, а интервал варьирования – 25 кПа. Исходя из этого, значения давления в звёздных точках принимают значения 8 кПа и 92 кПа соответственно.

Уровни сжатия упругих элементов выбираются исходя из того, что полный рабочий ход каретки составляет 50 мм. За нулевой уровень целесообразно принять сжатие кареток, равное 25 мм, а интервал варьирования – 15 мм. Тогда низкий и высокий уровни будут 10 мм и 40 мм соответственно, а значения в звездных точках составят 5 и 45 мм.

В таблице 4.7 приведены значения уровней и интервалы варьирования влияющих параметров при исследовании характеристик сжатия кареток.

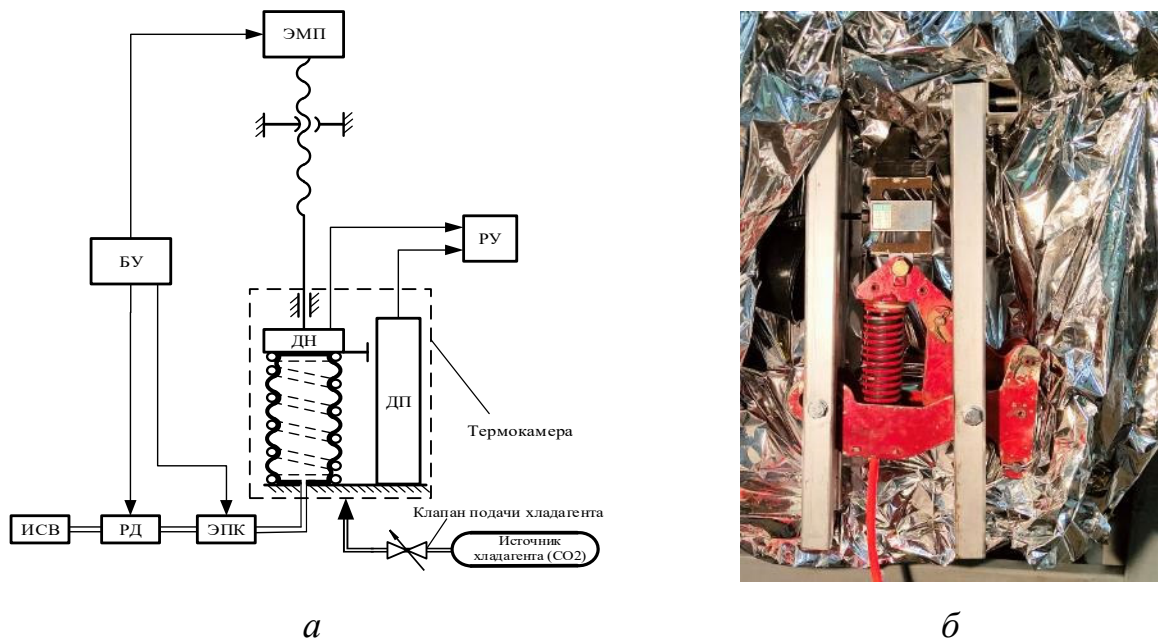
Таблица 4.7 – План эксперимента для исследования характеристики сжатия кареток с ВПЭ

Интервал варьирования и уровни фактора	Факторы	
	$p_{ВПЭ}$, кПа	Δh , мм
Безразмерный фактор	x_1	x_2
Нулевой уровень, z_{i0} ($x_i = 0$)	50	25
Интервал варьирования, Δz_i	25	15
Низкий уровень z_i ($x_i = -1$)	25	10
Высокий уровень z_i ($x_i = +1$)	75	40
Звездные точки:		
z_i^* ($x_i = -\alpha$)	8	5
z_i^* ($x_i = +\alpha$)	92	45

Исследование влияния низких температур на работу ВПЭ кареток проведено на стенде для изучения характеристик статического нажатия токоприемника (рисунок 4.14), прошедшем соответствующую модернизацию с целью обеспече-

ния возможности поддержания низких температур: оснащение термокамерой, охлаждаемой с помощью углекислоты до минус 40 °С, в которую помещается каретка.

Экспериментально полученные характеристики статического нажатия, создаваемые ВПЭ при давлении в его полости в 50 кПа, приведены на рисунке 4.15. Сила сухого трения (w) определяется как половина разности между активным и пассивным нажатием каретки. Средняя сила сухого трения при нормальных условиях ($t = 20$ °С) составила 2,25 Н, тогда как понижение температуры до минус 40 °С приводит к незначительному росту силы сухого трения примерно на 1 Н – до 3,2 Н.



БУ – блок управления, ЭМП – электромагнитный привод, ИСВ – источник сжатого воздуха, РД – регулятор давления, ЭПК – электропневматический клапан, РУ – регистрирующее устройство, ДП – датчик перемещения, ДН – датчик нажатия

Рисунок 4.14 – Схема (а) и общий вид (б) стенда для изучения характеристики статического нажатия каретки при низких температурах

Таким образом, низкие температуры приводят к снижению эластичности оболочки внутрипружинного пневмоэлемента и повышению сил сухого трения. Поскольку основную часть жесткости обеспечивает цилиндрическая пружина, то

влияние низких температур на итоговую характеристику статического нажатия каретки, оснащенной внутрипружинным пневмоэлементом, не превышает 10 % даже с учетом увеличения сил сухого трения.

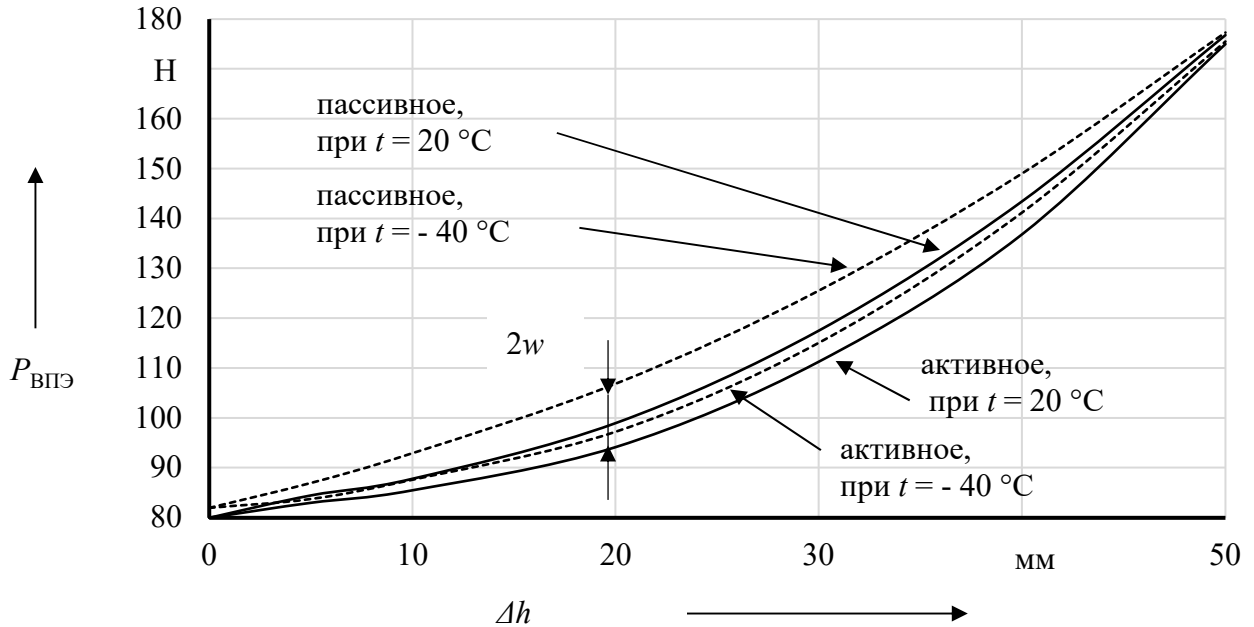


Рисунок 4.15 – Статические характеристики каретки, оснащенной внутрипружинным элементом

Для возможности использования при расчетах данных статической характеристики кривые были аппроксимированы с применением полинома второй степени:

$$P_{\text{ВПЭ норм.}} = 50,86 + 1,12 \cdot \Delta h + 0,01 \cdot p_{\text{ВПЭ}} - 0,007 \cdot \Delta h^2 + 0,03 \cdot p_{\text{ВПЭ}}^2 - 0,005 \cdot \Delta h \cdot p_{\text{ВПЭ}}; \quad (4.5)$$

$$P_{\text{ВПЭ низк. темп.}} = 65,73 + 0,49 \cdot \Delta h - 0,33 \cdot p_{\text{ВПЭ}} - 0,0005 \cdot \Delta h^2 + 0,004 \cdot p_{\text{ВПЭ}}^2 - 0,003 \cdot \Delta h \cdot p_{\text{ВПЭ}}. \quad (4.6)$$

Вместе с увеличением скорости движения растет и частота вертикальных колебаний полоза токоприемника, поэтому для обеспечения надежного безотрывного токосъема системы автоматического регулирования корректируют силу контактного нажатия, учитывая наличие искрения и других факторов. Предложенная конструкция поддерживает сжатие кареток в регламентированном интервале за счет увеличения давления в ВПЭ. В качестве варьируемых факторов выбраны статическое нажатие токоприемника ($P_{\text{ст}}$), давление в ВПЭ ($p_{\text{ВПЭ}}$), а также частота

вертикальных колебаний имитатора контактной подвески (v). Таким образом, для исследования динамики взаимодействия токоприемника и контактной подвески был выбран трехфакторный ротатбельный план второго порядка.

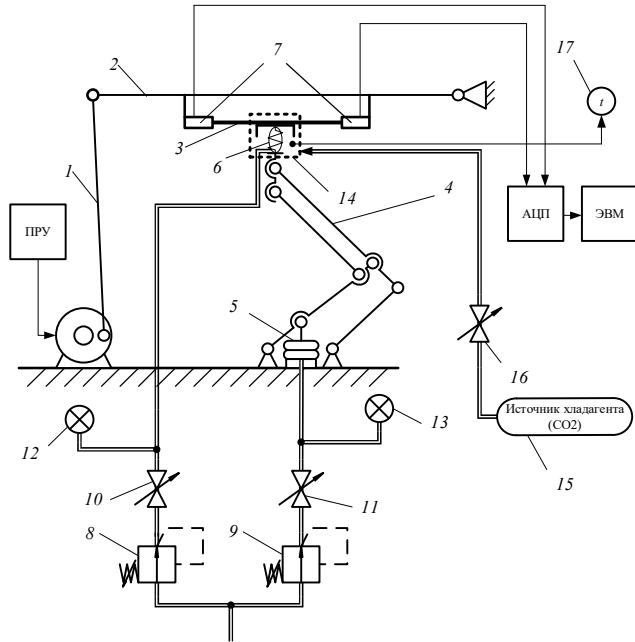
Уровни давления в ВПЭ принимаются аналогичными уровням при проведении эксперимента при исследовании характеристики статического нажатия каретки.

Частота вертикальных колебаний непосредственно связана со скоростью движения электроподвижного состава. Прохождение одного пролета, длина которого может быть принята равной 60 м, соответствует одному полному вертикальному колебанию полоза токоприемника и составляет 1 Гц (на скорости 60 м/с). Скорость современного скоростного электроподвижного состава России составляет около 200 км/ч, и в таком случае в качестве нулевого уровня целесообразно выбрать частоту колебания 1 Гц, что соответствует движению на такой скорости. При условии дальнейшего увеличения скорости до 300 км/ч и более интервал варьирования может быть принят равным 0,5 Гц, в этом случае высокий уровень составит 1,5 Гц, а низкий – 0,5 Гц. В звездных точках значения частоты вертикальных колебаний составят соответственно 0,16 Гц и 1,84 Гц. Амплитуда вертикальных колебаний точки контакта полоза и контактного провода обычно не превышает ± 25 мм.

Сила статического нажатия токоприемника легкого типа составляет 90 Н, что принимается за низкий уровень. Обычно за счет работы ступенчатых систем автоматического регулирования она увеличивается примерно в 1,5 раза, до 140 Н. Указанные значения – 90 Н и 140 Н – были приняты за низкий и высокий уровни соответственно. При этом средний уровень составит 115 Н при интервале варьирования 25 Н, а значения в звездных точках – 73 Н и 158 Н соответственно.

Колебательный стенд научно-исследовательского комплекса ОмГУПС также прошел модернизацию для обеспечения возможности исследования влияния низких температур (рисунок 4.16): 1 – кривошипно-шатунный механизм, 2 – рама, 3 – имитатор контактного провода, 4 – токоприемник, 5 – РКЭ, 6 – ВПЭ, 7 – регулятор давления в РКЭ, 8 – кран ПМ, 9 – регулятор давления в ВПЭ, 10 – кран ВПЭ, 11 – дроссель с обратным клапаном ВПЭ, 12 – датчик давления

воздуха 13 – манометр, 14 – термокамера, 15– источник хладагента (CO₂), 16 – клапан подачи хладагента, 17 – термометр с выносной термопарой. Для поддержания постоянной низкой температуры каретки токоприемника помещаются в термокамеры. Охлаждение осуществляется посредством подачи в полость термокамеры углекислоты из баллона с начальным давлением 1,6 МПа.



а



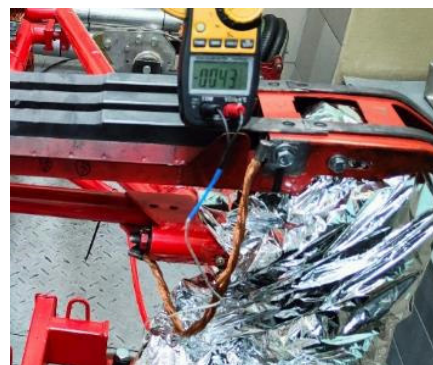
б

Рисунок 4.16 – Схема (а) и общий вид (б) колебательного испытательного стенда

В результате подачи хладагента в полости термокамер ВПЭ были охлаждены до температуры $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ (рисунок 4.17).



а



б

Рисунок 4.17 – Охлаждение кареток токоприемника на колебательном стенде:

а – общий вид термокамеры кареток токоприемника,

б – измерение температуры в термокамере

Кривые контактного нажатия, полученные для центра плана при нормальных условиях, а также при низких температурах, приведены на рисунке 4.18 (смещение по времени произведено для более простого визуального сравнения кривых). Измерения проведены при статическом нажатии токоприемника 115 Н, давлении во внутривибружинном элементе 50 кПа и частоте вертикальных колебаний 1 Гц.

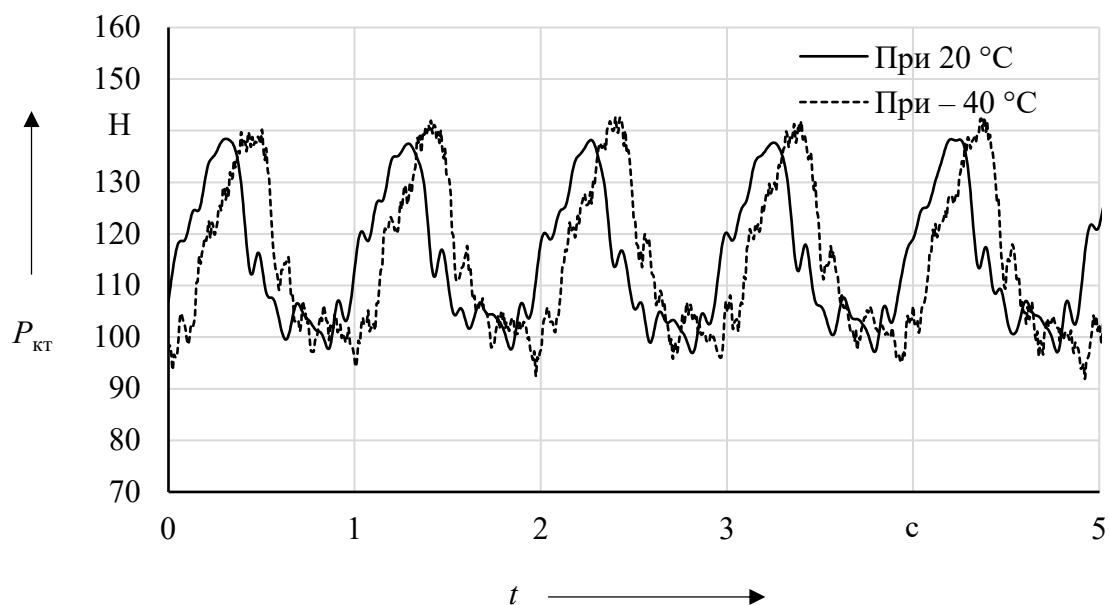


Рисунок 4.18 – Кривая контактного нажатия в центре плана

В начальный период времени диапазон изменения колебаний контактного нажатия больше, чем при нормальных условиях, на 10 – 15 %, со временем он снижается до 2 – 3 % (рисунок 4.19). Это объясняется тем, что оболочка ВПЭ разогревается за счет подачи в нее теплого воздуха от регулятора давления. Поэтому работоспособность внутривибружинного пневмоэлемента в условиях низких температур при проведении стендовых испытаний в помещении следует оценивать во временном интервале от 5 до 20 с с начала выполнения эксперимента.

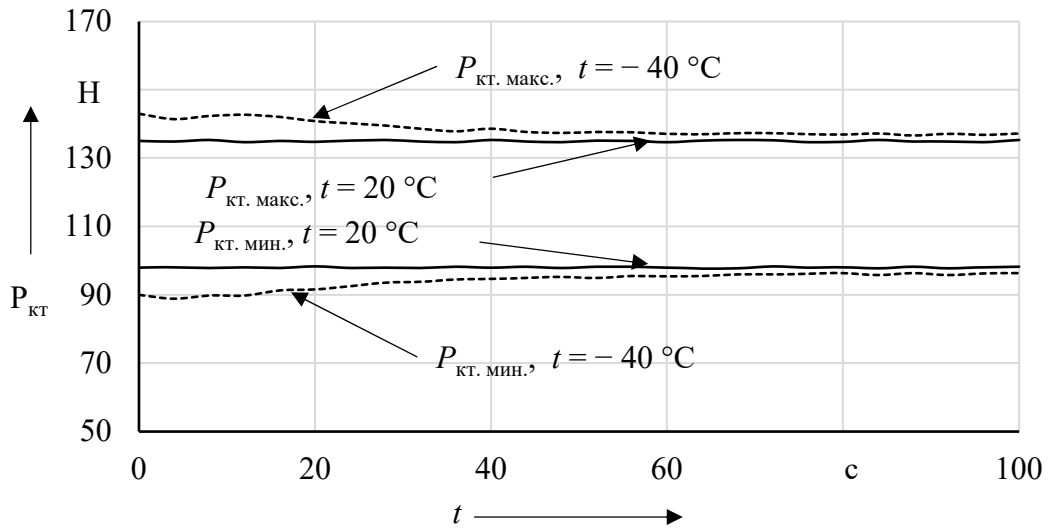


Рисунок 4.19 – Огибающие минимумов и максимумов кривых контактного нажатия

Для верификации полученных в ходе эксперимента данных проведены расчеты значений среднеквадратичного отклонения (σ), минимальный ($P_{\text{кт. мин.}}$), максимальный ($P_{\text{кт. макс.}}$) и средний ($P_{\text{кт. ср.}}$) уровни контактного нажатия. Средний уровень контактного нажатия соответствует установленному значению статического нажатия токоприемника, что подтверждает корректность проведенных измерений. Полученные данные были аппроксимированы полиномами второго порядка для возможности построения поверхностей и графиков. Высокая степень достоверности полученных полиномов подтверждена значениями R^2 , которые составили более 0,95.

На рисунке 4.20 представлены кривые, огибающие максимальные и минимальные значения контактного нажатия, полученные в течение первых 20 с от начала вертикальных колебаний токоприемника с ВПЭ на колебательном стенде при статическом нажатии 115 Н, давлении 25 кПа и шагом 0,2 Гц (до частоты 1,8 Гц, соответствующей максимальной скорости движения подвижного состава 390 км/ч) для нормальных условий и при температуре $-40\text{ }^\circ\text{C}$. При этом диапазон колебаний нажатия при низких температурах составил на 10 – 15 % больше аналогичного для нормальных условий.

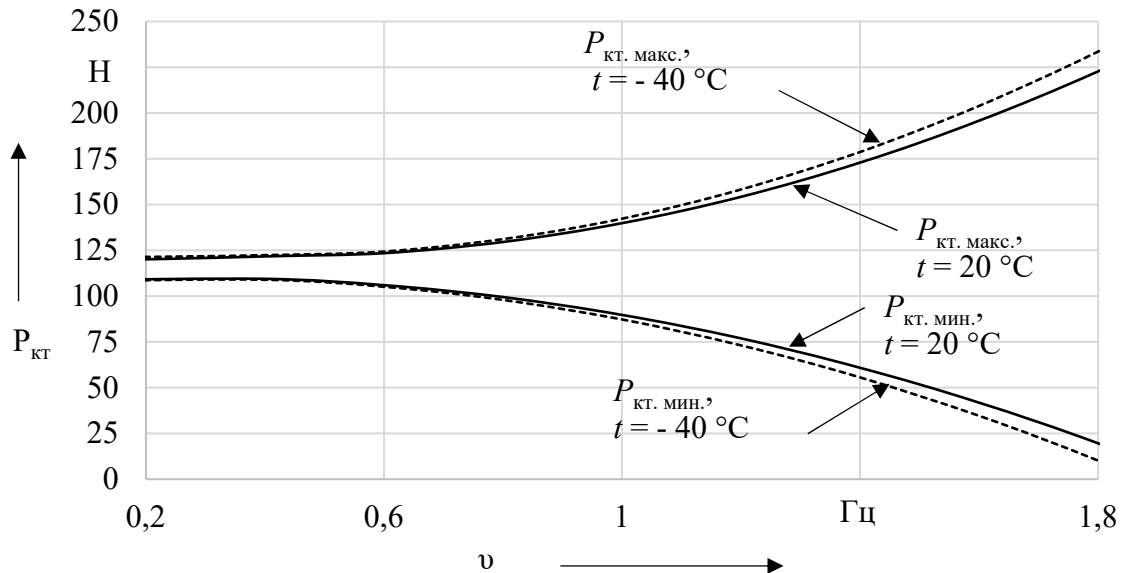


Рисунок 4.20 – Кривые минимумов и максимумов контактного нажатия в зависимости от частоты колебаний

4.3.2 Оценка работоспособности кареток оснащенных внутрипружинными пневмоэлементами с учетом ударов при наезде на препятствия на контактной подвеске

Особую опасность при работе токосъёмных устройств представляют возможные удары токоприёмника электроподвижного состава об элементы контактной сети: струны, зажимы, секционные изоляторы, фиксаторы. Такие удары могут привести к значительным повреждениям как токоприёмника, так и самой контактной сети. Поскольку величина ударного импульса в значительной степени зависит от скорости, вместе с ростом скоростей растёт и опасность, исходящая от таких ударов. Для предотвращения и снижения ущерба от возможных повреждений элементов конструкции токоприёмников и контактной сети разрабатываются различные предохранительные устройства [99].

Наиболее достоверные данные о работе указанных устройств можно получить при проведении линейных испытаний. Данные испытания проводятся в реальных условиях на действующем электроподвижном составе на специализированных полигонах или на действующих участках.

При проведении испытаний на контактной подвеске закрепляется препятствие (зажим, струна и др.). После чего производится серия ударов при различных скоростях, высоте подъёма токоприёмника и других параметрах. По завершении испытаний делается вывод о работоспособности предохранительных устройств.

Недостатками таких испытаний являются необходимость занятия действующих участков железных дорог и возможные повреждения инфраструктуры. Поэтому наиболее целесообразно проводить испытания на специализированных стендах.

Ударный стенд (рисунок 4.21) представляет собой физический маятник, состоящий из системы спиц 1, на которой закреплена дуга из контактного провода 2, центральный угол которой составляет β . На одной из спиц закреплён груз 3, а также боёк 4. Полз токоприёмника 5, находится в контакте с дугой из контактного провода [100, 101]. Данная конструкция защищена патентом РФ на полезную модель [102].

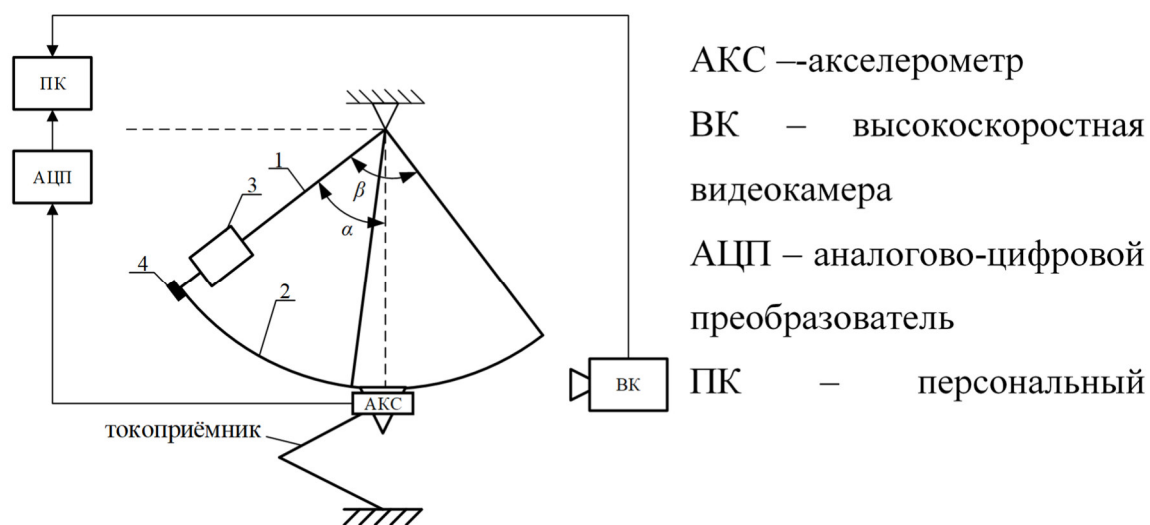


Рисунок 4.21 – Испытательная установка для оценки ударных воздействий на токоприёмник

Испытания проводятся следующим образом: маятник отводится в крайнее положение и фиксируется механической защёлкой (рисунок 4.22, а), после разблокирования защёлки маятник под тяжестью собственного веса поворачивается и происходит удар (рисунок 4.22, б). При ударе фиксируются перемещения и

ускорения элементов конструкции токоприёмника, анализируется процесс срабатывания предохранительных устройств, если таковые имеются [103].

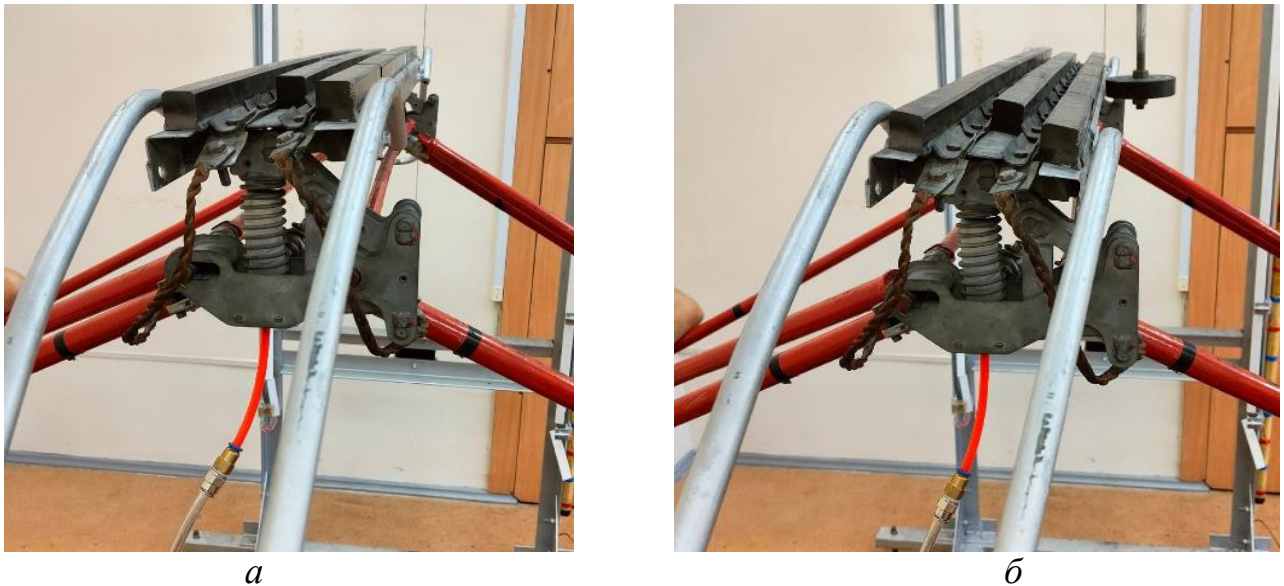


Рисунок 4.22 – Процесс испытания токоприёмника на ударные воздействия:
а – взведённое состояние маятника; б – момент удара по полозу

При проведении эксперимента в качестве измерительных приборов используются высокоскоростная камера JAI PULNiX TM-6740, которая позволяет определить скорость в момент удара, и акселерометр ADXL326, определяющий ускорение полоза токоприёмника в процессе удара. Информация, поступающая из акселерометра, обрабатывается в аналогово-цифровом преобразователе L-CARD-14-140M. Применяемое испытательное оборудование изображено на рисунке 4.23.



Рисунок 4.23 – Применяемое испытательное оборудование

Для определения скорости маятника в момент удара анализируются полученные высокоскоростной камерой кадры (рисунок 4.24). Скорость маятника в момент удара может быть рассчитана по формуле:

$$V = M \cdot f \cdot (x_2 - x_1), \quad (4.7)$$

где M – масштаб пикселей, который определяется по известным габаритам маятника, м/рх;

f – кадровая частота видеокамеры, к/с (для используемой видеокамеры $f = 200$ к/с);

x_1, x_2 – положение маятника до удара и в момент удара соответственно, рх.

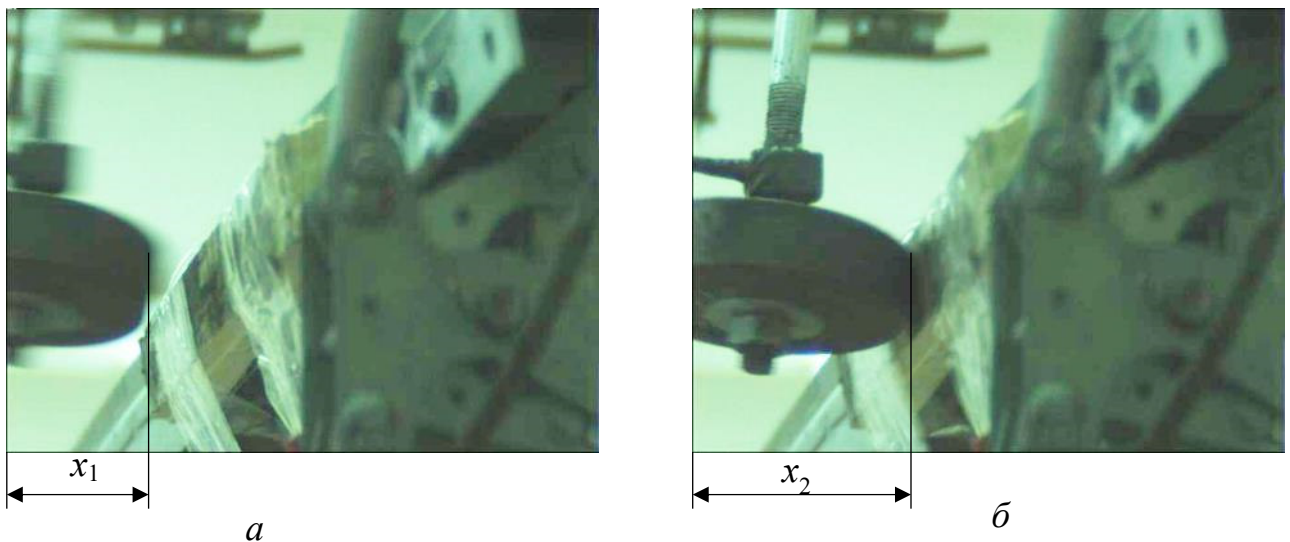


Рисунок 4.24 – Кадры, полученные высокоскоростной видеокамерой:

а – перед моментом удара, б – в момент удара

Значения ускорений, полученные с помощью акселерометра, позволяют определить усилия возникающие в элементах конструкции токоприёмника.

В результате анализа экспериментально полученных данных скорость маятника в момент удара составила 2,94 м/с. После чего определяется угловая скорость и рассчитывается величина ударного импульса, которая составила 51 кг·м/с, что соответствует значению, регламентированному ГОСТ 32204-2013.

Предложенная конструкция ударной стендовой установки с жёсткой телескопической штангой обладает более широкими функциональными возможностями и обеспечивает более высокую достоверность при проведении испытаний.

Масса полоза составляет $m_n = 10$ кг, масса системы подвижных рам составляет $m_p = 33$ кг и обладает силой нажатия подъёмных пружин токоприёмника, приведённой к верхнему шарниру токоприёмника равной $P_0 = 90$ Н. Продольная жёсткость токоприёмника составляет $\mathcal{J}_{\text{прод}} = 80$ кН/м. При проведении испытаний к токоприёмнику был приложен ударный импульс, регламентированный ГОСТом (51 кг·м/с). Полученная в результате испытаний зависимость ускорения верхних шарниров рамы от времени приведена на рисунке 4.25.

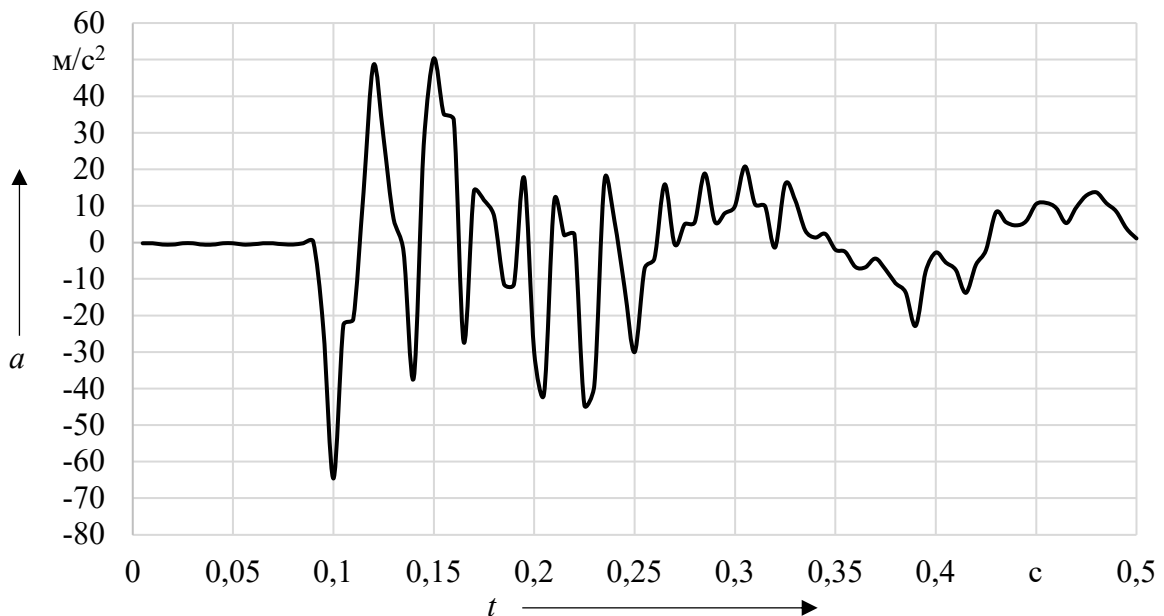


Рисунок 4.25 – Зависимость ускорения верхних шарниров рамы от времени

Первый отрицательный пик является ускорением, которое было придано полюзу токоприёмника в результате ударного воздействия, поэтому его значение при определении усилия, возникающего в раме, не учитывается. Для расчёта усилия, возникающего в раме, необходимо определить ускорение в верхнем шарнире рамы которое возникает в результате её упругого отклонения, которому соответствует максимальное значение ускорения в положительном направлении.

Действующая на полз токоприемник в результате удара продольная сила, полученная в результате эксперимента, может быть приблизительно определена исходя из второго закона Ньютона:

$$P_{\text{прод макс эксп}} = (m_n + m_p) a_{\text{макс}} = (33 + 10) \cdot 50,3 = 2162 \text{ Н.} \quad (4.8)$$

Максимальная величина ускорения составила $50,3 \text{ м/с}^2$. При этом каких-либо повреждений кареток, оснащенных внутрипружинными пневмоэлементами, не возникло.

4.3.3 Исследование влияния внутрипружинных пневмоэлементов на аэродинамические характеристики кареток токоприемников

Аэродинамические характеристики играют значительную роль во взаимодействии токоприемника и контактной подвески. При этом при высокоскоростном движении подъемная сила, возникающая в результате воздействия аэродинамических сил, становится сравнимым и может превышать силу статического нажатия токоприемника. Поэтому определение влияния внутрипружинных пневмоэлементов на аэродинамические характеристики кареток токоприемников является особенно важным при их возможном применении на скоростном и высокоскоростном подвижном составе [104, 105].

Аэродинамические силы на элементы электроподвижного состава и токоприемники зависят от их формы, скорости и направления воздушного потока. Их определение проводится экспериментальными и теоретическими методами.

CFD-расчеты (численная аэродинамика) дают гибкость в изменении параметров среды (температура, влажность, скорость ветра и др.), учитывают погодные условия и особенности конструкции. Они менее точны, но позволяют минимизировать ошибки на стадии проектирования и исследовать отдельные элементы токоприемников.

Для моделирование аэродинамических характеристик кареток токоприемников с внутрипружинными пневмоэлементами был использован ANSYS Fluent. Данное программное обеспечение используется для численного моделирования

гидро- и аэродинамических процессов с использованием методов вычислительной гидродинамики (CFD). Оно позволяет анализировать и оптимизировать движение жидкостей и газов, взаимодействие потоков с твердыми телами, а также учитывать теплообмен, химические реакции и турбулентность.

Основные возможности ANSYS Fluent заключаются в моделировании сложных геометрий, анализе различных физических процессов (турбулентность, горение, теплопередача) и визуализации и постобработке результатов. Благодаря этому он широко используется в инженерии, энергетике, транспорте и аэрокосмической отрасли для проектирования и оптимизации оборудования.

Габаритные размеры каретки составляют 0,16х0,06х0,19 м. В качестве расчетной области был выбран цилиндр с радиусом основания 2 м и высотой 8 м, в центре которого располагается каретка [106].

При моделировании аэродинамического воздействия на каретку токоприемника был применен метод поэлементного анализа, заключающийся в рассмотрении каретки как отдельного объекта, потоки которого не взаимодействуют с потоками, обтекающими другие элементы токоприемника и электроподвижного состава. Применение данного метода обусловлено тем, что на процесс обтекания значительное влияние оказывают тип применяемых токоприемника и электроподвижного состава, при этом моделирование процесса обтекания всего токоприемника требует значительных вычислительных ресурсов, а полученные результаты будут справедливы только для конкретных типов токоприемников и подвижного состава.

Трехмерная модель для оценки аэродинамических характеристик рычажно-плунжерной каретки токоприемника, содержащая внутрипружинный пневмоэлемент, приведена на рисунке 4.26 (направление движения, принятого в качестве движения вперед отмечено стрелкой). Чтобы улучшить сходимость и ускорить расчеты, модель упростили, исключив зазоры и мелкие геометрические элементы, такие как крепежные детали, которые оказывают незначительное влияние на аэродинамику. Эти элементы были удалены, поскольку их размеры невелики

по сравнению с основными компонентами, а площадь поверхности, подвергавшейся воздействию воздушного потока, при этом изменяется незначительно.

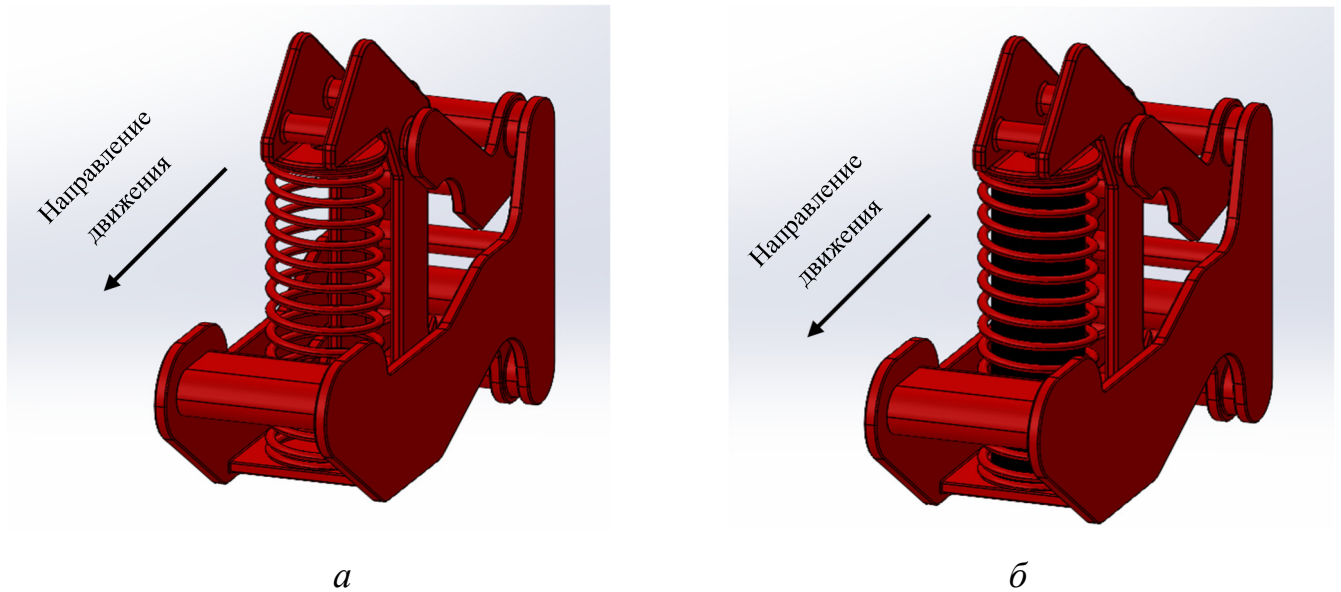


Рисунок 4.26 – Трехмерная модель каретки токоприемника: а – без внутрипружинного пневмоэлемента, б – с внутрипружинным пневмоэлементом

При моделировании обтекания каретки и оценке аэродинамических сил, воздействующих на каретку и на установленный внутрипружинный пневмоэлемент были приняты нормальные атмосферные условия (101,25 кПа, 0 °С). Угол атаки воздушного потока был принят равным 0°. Скорость воздушного потока изменялась от 0 до 75 м/с с шагом 25 м/с. Примеры получаемых в процессе моделирования картин обтекания при скорости 50 м/с приведены на рисунках 4.27, 4.28.

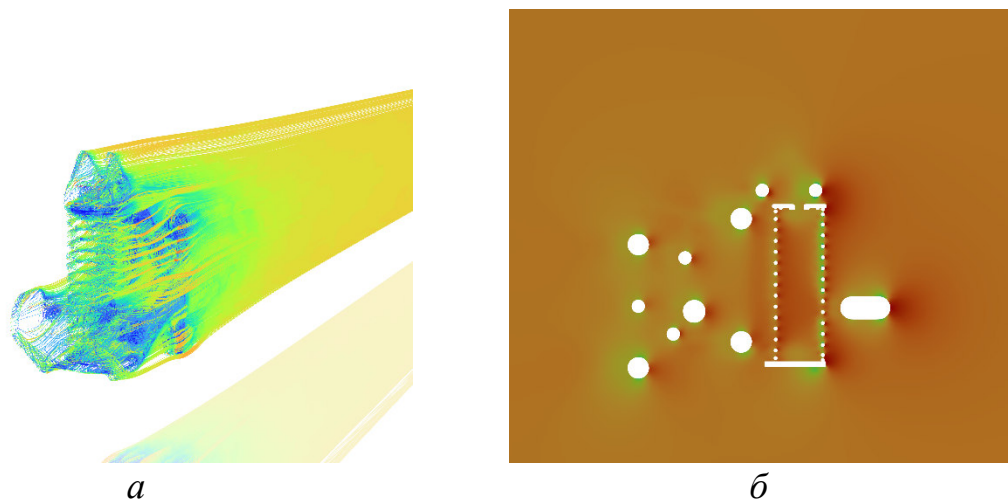


Рисунок 4.27 – Картины обтекания каретки без ВПЭ: а – общий вид движения воздушного потока; б – спектр давления

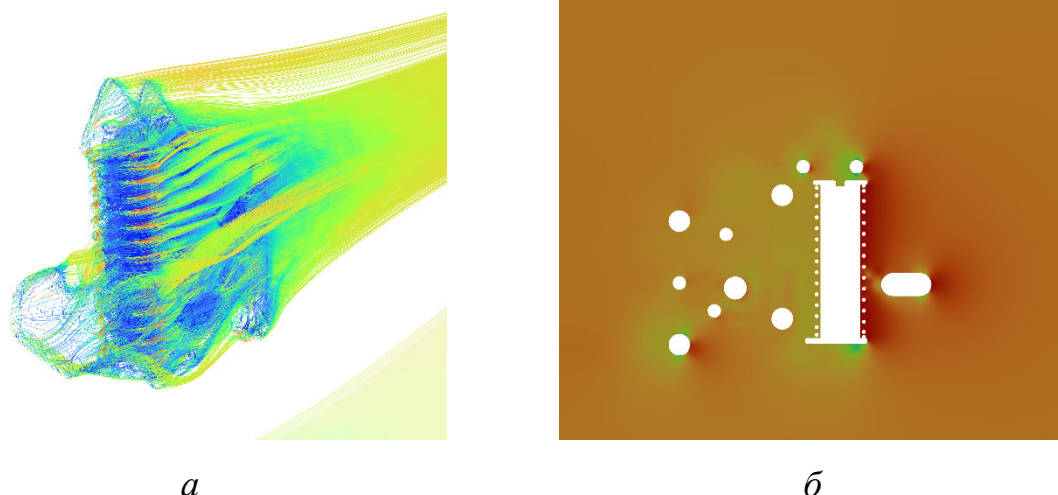


Рисунок 4.28 – Картины обтекания каретки, оснащенной ВПЭ: а – общий вид движения воздушного потока; б – спектр давления

Полученные в результате моделирования значения подъемной аэродинамической силы P_y (отрицательные значения соответствуют опускающей аэродинамической силе) и силы лобового сопротивления P_x , действующих на каретку токоприемника, сведены в таблицу 4.8.

Таблица 4.8 – Аэродинамические силы, действующие на каретку

$v, \text{ м/с}$	Без ВПЭ		С ВПЭ					
	$P_y, \text{ Н}$	$P_x, \text{ Н}$	$P_y, \text{ Н}$			$P_y, \text{ Н}$		
			ВПЭ	Каретка	Общая	ВПЭ	Каретка	Общая
Движение вперед								
25	-0,041	2,480	25	-0,041	2,480	25	-0,041	2,480
50	-0,162	6,73	50	-0,162	6,73	50	-0,162	6,73
75	-0,549	15,490	75	-0,549	15,490	75	-0,549	15,490
Движение назад								
25	-0,094	2,10	25	-0,094	2,10	25	-0,094	2,10
50	-0,334	6,15	50	-0,334	6,15	50	-0,334	6,15
75	-0,930	15,23	75	-0,930	15,23	75	-0,930	15,23

На рисунке 4.29 приведены кривые зависимостей аэродинамических сил от скорости воздушного потока (положительные значения скорости соответствуют движению вперед, отрицательные – назад).

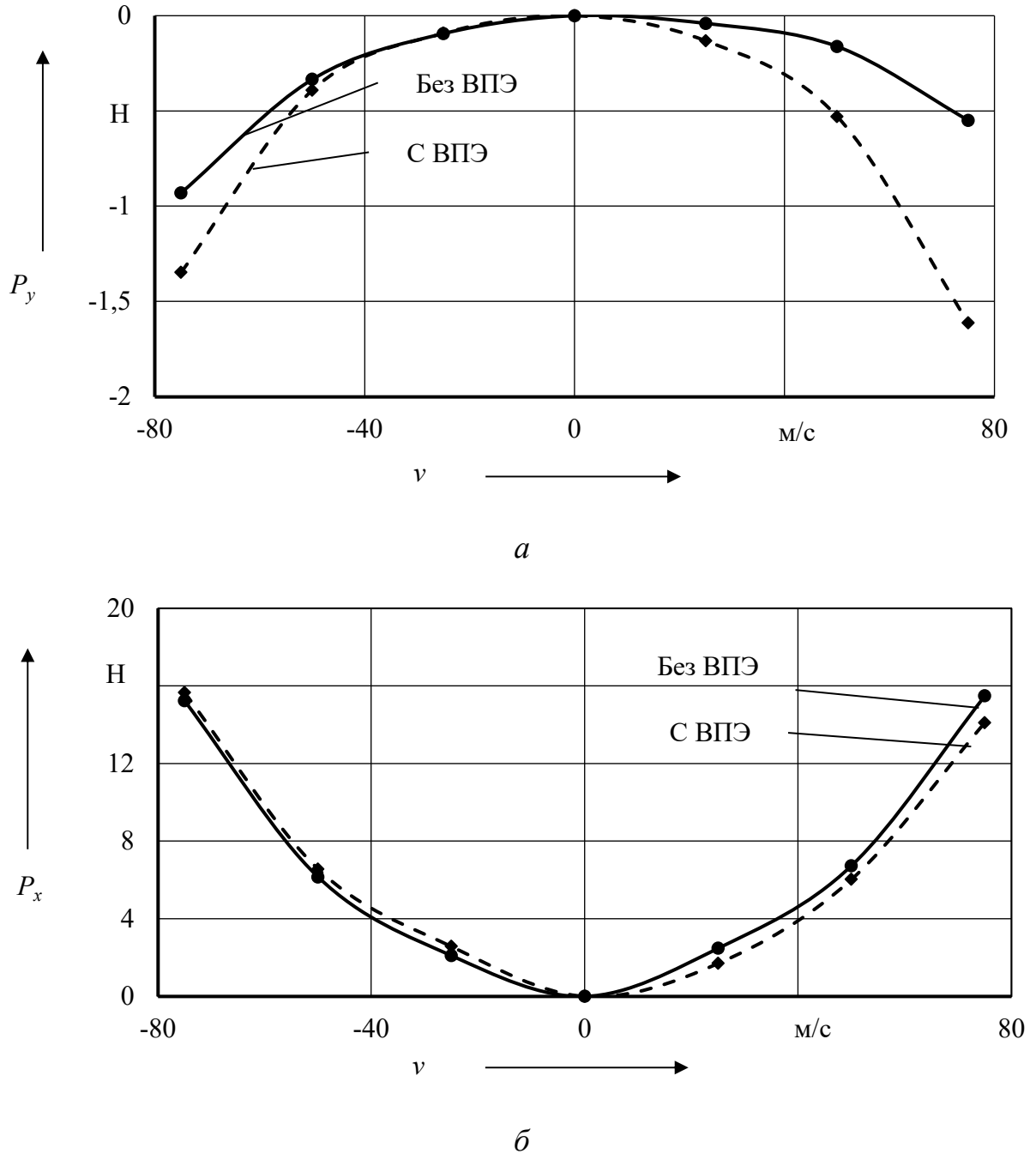


Рисунок 4.29 – Аэродинамические силы, действующие на каретку:

а – подъемная сила, б – лобовое сопротивление

Полученные результаты свидетельствуют о том, что применении внутрипружинных пневмоэлементов опускающая аэродинамическая сила на скорости 75 м/с увеличивается с 0,5 Н на 1,5 Н до 1,9 Н при движении вперед и с 0,9 Н на 0,5 Н до 1,5 Н при движении назад. Данное увеличение опускающей силы не окажет значительного влияния на процесс токосъема, поскольку оно значительно ниже величины среднего статического нажатия токоприемника (100 Н). Лобовое сопротивление при этом снижается при движении вперед на 1 Н с 16,3 Н до 15,3 Н, а при движении назад увеличивается на 0,6 Н с 16,7 Н до 17,3 Н.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что при применении внутрипружинных пневмоэлементов опускающая аэродинамическая сила на скорости 75 м/с увеличивается с 0,5 Н на 1,1 Н до 1,6 Н при движении вперед и с 0,9 Н на 0,4 Н до 1,3 Н при движении назад. Таким образом, применение внутрипружинных пневмоэлементов в конструкции кареток токоприемников приведет в наиболее негативном варианте к увеличению опускающей силы на 2 – 3 Н (поскольку в токоприемнике применяется 2 каретки). Данное увеличение опускающей силы не окажет значительного влияния на процесс токосъема, поскольку оно значительно ниже величины среднего статического нажатия токоприемника (100 Н).

Лобовое сопротивление при этом снижается при движении вперед на 1,4 Н с 15,5 Н до 14,1 Н, а при движении назад увеличивается на 0,4 Н с 15,2 Н до 15,6 Н. Это также не может оказать значимого влияния на процесс токосъема, поскольку силы, создаваемые остальными элементами токоприемника (полозом и системой подвижных рам) значительно превышают лобовое сопротивление, создаваемое каретками, поскольку сечение указанных элементов многократно больше площади сечения кареток.

Выводы по четвертому разделу:

1. Установлено, что в качестве материала для изготовления оболочки внутрипружинного пневмоэлемента целесообразно применить силикон.

2. Апробирована технология получения силиконовой оболочки для предварительного определения работоспособности ее в составе внутрипружинного пневмоэлемента.

3. Разработана методика и выполнена экспериментальная оценка износостойкости оболочки внутрипружинного пневмоэлемента на динамическом стенде ОмГУПСа, полученные результаты свидетельствуют о перспективности применения кремнийорганических резин в качестве внутрипружинных пневмоэлементов, устанавливаемых в каретки токоприёмников.

4. Разработан метод экспериментального определения характеристик и параметров токоприемников, оснащенных внутрипружинными элементами, с применением модернизированного колебательного стенда, позволяющего имитировать процесс взаимодействия токоприемника с контактной подвеской при скорости до 350 км/ч.

5. Разработана методика проведения стендовых испытаний токоприемников с внутрипружинными элементами в каретках на основе методов планирования эксперимента.

6. Выполнены предварительные испытания взаимодействия токоприемника, оснащенного внутрипружинным пневмоэлементом, с контактной подвеской, подтвердившие работоспособность предложенной методики экспериментальных исследований.

7. Результаты предварительных испытаний подтвердили перспективность применения внутрипружинных пневмоэлементов в каретках скоростных токоприемников.

8. Разработана и реализована методика проверки работоспособности внутрипружинных пневмоэлементов в условиях низких температур.

9. Установлено, что низкие температуры приводят к снижению эластичности оболочки внутрипружинного пневмоэлемента и повышению сил сухого трения. Поскольку основную часть жесткости обеспечивает цилиндрическая пружина, то влияние низких температур на итоговую характеристику статического

нажатия каретки, оснащенной внутривспружинным пневмоэлементом, не превышает 10 % даже с учетом увеличения сил сухого трения.

10. Разработана и реализована методика экспериментальной проверки работоспособности кареток токоприемника, оснащенных внутривспружинными пневмоэлементами, с учетом ударных воздействий. Потери работоспособности и нарушений герметичности оболочки не наблюдалось.

11. Разработана трехмерная модель каретки токоприемника электроподвижного состава, содержащая внутривспружинный пневмоэлемент, для исследования ее аэродинамических характеристик.

12. В программном комплексе ANSYS Fluent разработана имитационная модель обтекания каретки токоприемника, позволяющая определять силы, действующие на ее элементы в зависимости от параметров воздушного потока.

13. Увеличение опускающей аэродинамической силы от двух кареток на 2 – 3 Н не окажет значительного влияния на процесс токозъема, поскольку оно значительно меньше силы статического нажатия токоприемника (100 Н). Таким образом, нажатие токоприемника уменьшится на 3 %.

14. Применение внутривспружинных пневмоэлементов не окажет значительного влияния на лобовое сопротивление токоприемника, поскольку площадь их сечения значительно меньше площади сечения остальных элементов конструкции токоприемника (полоза и системы подвижных рам).

15. Внутривспружинные пневмоэлементы могут быть рекомендованы для установки в каретках токоприемниках скоростного электроподвижного состава, так как не оказывают ощутимого влияния на аэродинамические характеристики кареток и, следовательно, не ухудшают аэродинамические характеристики токоприемника в целом.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации изложены новые научно обоснованные технические решения и разработки, направленные на повышение качества токосъема и обеспечения надежной передачи электрической энергии на электроподвижной состав железных дорог в условиях высокоскоростного движения.

Применение предлагаемых новых технических решений позволит стабилизировать контактное нажатие за счет совершенствования конструкции кареток токоприемников, применяемых на современном электроподвижном составе России, путем внедрения в их конструкцию внутрипружинных пневмоэлементов, что позволит увеличить скорость движения скоростного подвижного состава, а также снизит износ контактных материалов (контактного провода и токосъемных вставок).

Основные научные и практические результаты диссертационной работы состоят в следующем:

1. Обоснована целесообразность применения и предложены новые схемные решения по использованию внутрипружинных пневмоэлементов в рычажных и рычажно-плунжерных каретках отечественных токоприемников для обеспечения надежного токосъема в условиях скоростного движения на железных дорогах Российской Федерации при скоростях до 200 км/ч.

2. Разработана усовершенствованная математическая модель взаимодействия токоприемника с контактной подвеской, отличающаяся тем, что в ней учитываются характеристики управляемых внутрипружинных пневмоэлементов кареток токоприемников с учетом переходных процессов при регулировании, а приведенная масса контактной подвески представлена в виде инертора. Установлено, что каретка должна быть оснащена датчиком сжатия пружины, а давление воздуха в полости внутрипружинного пневмоэлемента должно поддерживаться в диапазоне 0,025 – 0,075 Мпа в зависимости от режима работы токоприемника. Расхождение расчетных и экспериментальных данных не превышает 10 %.

3. Предложен алгоритм синхронного управления статическим нажатием токоприемника и статической характеристикой кареток, оснащенных управляемыми внутрипружинными пневмоэлементами, позволяющий в среднем на 20 % увеличить допустимую скорость движения электроподвижного состава за счет снижения вероятности отрывов токоприемника в процессе его взаимодействия с контактной подвеской на скоростных железнодорожных магистралях.

4. Разработаны методы экспериментальных исследований токоприемников, оснащенных внутрипружинными пневмоэлементами с учетом различных условий эксплуатации, включая динамические воздействия со стороны контактной подвески, низкие температуры окружающей среды и ударные воздействия на полз токоприемника. Установлено, что применение управляемых внутрипружинных пневмоэлементов обеспечивает надежный токосъем при скоростях движения до 200 км/ч, в том числе, в условиях низких температур (до $-45\text{ }^{\circ}\text{C}$), при воздействии на полз токоприемника ударных нагрузок, регламентированных ГОСТ 32204-2014, и не окажет значительного влияния на аэродинамические характеристики токоприемника. В качестве материала для изготовления оболочки внутрипружинного элемента следует применять кремнийорганическую резину (силикон), обладающий высокой термостойкостью (до $300\text{ }^{\circ}\text{C}$), морозостойкостью (до $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$) и износостойкостью.

В качестве рекомендаций и перспективы дальнейшей разработки темы предлагается исследование применения разработанных технических решений для формирования системы синхронного автоматического регулирования статических характеристик подъемного пневмоэлемента токоприемника и управляемых пневмоэлементов кареток в режиме предиктивного (упреждающего) управления для обеспечения надежного токосъема при высокоскоростном движении на выделенной магистрали (ВСМ) Москва – Санкт-Петербург при скоростях до 400 км/ч.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Распоряжение Правительства Российской Федерации от 27 ноября 2021 года № 3363-р (ред. от 06.11.2024) «Об утверждении Транспортной стратегии Российской Федерации до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года». – Текст : непосредственный.
2. Указ Президента РФ от 07.07.2011 № 899 (ред. от 16.12.2015) «Об утверждении приоритетных направлений развития науки, технологий и техники в Российской Федерации и перечня критических технологий Российской Федерации». – Текст : непосредственный.
3. Михеев, В. П. Контактные сети и линии электропередачи / В. П. Михеев. – М. : Маршрут, 2003. – 416 с. – Текст : непосредственный.
4. Сидоров, О. А. Исследования электромеханического изнашивания контактных пар устройств токосъема электрического транспорта / О. А. Сидоров, В. М. Филиппов, С. А. Ступаков. – Текст : непосредственный // Трение и износ. – 2015. – Т. 36. № 5. – С. 511–517.
5. Беляев, И. А. / Токосъем и токоприемники электроподвижного состава / И. А. Беляев, В. П. Михеев, В. А. Шиян. – М. : Транспорт, 1976. – 184 с. – Текст : непосредственный.
6. Tobbacq, P. European Union Agency for Railways. / P.Tobbacq, J. Hauben // Belgian : TUC RAIL. – 2013. – 117 p.
7. Токоприемники электроподвижного состава производства Софрино Электротранспорт // Софрино Электротранспорт : сайт. – URL : <http://seltrans.ru/ru/products/current-collectors> (дата обращения: 14.04.2025). – Текст : электронный.
8. Ларькин, И. В. Совершенствование систем автоматического регулирования нажатия токоприемников скоростного электроподвижного состава : специальность 05.22.07 «Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Ларькин Иван Валерьевич; Омский гос. ун-т путей сообщения. / Ларькин Иван Валерьевич – Омск, 2012. – 144 с. – Текст : непосредственный.

9. Сидоров, О. А. Совершенствование систем автоматического регулирования токоприемников для высоких скоростей движения / О. А. Сидоров, В. Н. Горюнов, А. С. Голубков. – Текст : непосредственный // Динамика систем, механизмов и машин. – 2017. – Т. 5. № 3. – С. 108–113.

10. Contact force control of an active pantograph for high speed trains / M. Ko, M. Yokoyama, Y. Yamashita, S. Kobayashi, T. Usuda – Text : unmediated // Journal of Physics: Conference Series – 2016. – №. 744. – P. 012151.

11. ГОСТ 32204–2013. Токоприемники железнодорожного электроподвижного состава. Общие технические условия. – Москва : Стандартинформ, 2014. – 24 с. – Текст : непосредственный.

12. Active displacement control of pantograph-catenary system for a half-body railway model / I. Munaliza, M. A. Abdullah, M. H. Harun [et al.] – Text : unmediated // Periodica Polytechnica Transportation Engineering. – 2024. – Vol. 52(2). – Pp. 166–172.

13. Massat, J.-P. Pantograph catenary dynamic optimisation based on advanced multibody and finite element co-simulation tools / J.-P. Massat, Ch. Laurent, J.-P. Bianchi, E. Balmes – Text : unmediated // Vehicle System Dynamics. – 2014. – №.: 52. – Pp. 338–354. – DOI: 10.1080/00423114.2014.898780.

14. Pappalardo, C. M. Multibody modeling and nonlinear control of the pantograph/catenary system / C. M. Pappalardo, M. C. De Simone, D. Guida – Text : unmediated // Archive of Applied Mechanics. – 2019. – Vol. 89. – Pp. 1589–1626.

15. Wang, B Research articleLQR active control of fractional-order pantograph-catenary system based on feedback linearization / B. Wang, Sh. Wen, Y. Shen – Text : unmediated // Mathematical Problems in Engineering. – 2022. – Vol. 2022. – №. 2213697.

16. Павлов, В. М. Совершенствование токоприемников электроподвижного состава / В. М. Павлов, В. Н. Финиченко. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2010. – № 1(1). – С. 32–38.

17. Yamashita, Y. Performance upgrade of pantograph using variable stiffness spring (improvement of variable stiffness spring) / Y. Yamashita, Sh. Kobayashi, M. Ikeda – Text : unmediated // Dynamics and Design Conference – 2012. – № 12. – Pp. 235–242.

18. Yamashita, Y. Upgrading Pantograph Performance Using Variable Stiffness Devices (2nd Report: Development of Variable Stiffness Device and Control of Dynamic Characteristics of Pantograph) / Y. Yamashita, M. Ikeda – Text : unmediated // Transactions of the Japan society of mechanical Engineers – 2012. – Part C. – № 78 (729). – Pp. 1831–1838.

19. Патент на полезную модель № 212297 Российская Федерация, МПК В60L 5/08. Каретка токоприемника электроподвижного состава : № 2022114479 : заявлено 27.05.2022 : опубликовано 14.07.2022 / Сидоров О. А., Михайлов М. С. Бюл № 20. – Текст : непосредственный.

20. Михайлов, М. С. Совершенствование конструкций кареток токоприемников скоростного электроподвижного состава / М. С. Михайлов, О. А. Сидоров. – Текст : непосредственный // Инновационные проекты и технологии в образовании, промышленности и на транспорте : материалы научной конференции. – Омск : Омский гос. ун-т путей сообщения, 2023. – С. 378–384.

21. Михайлов, М. С. О применении внутрипружинных пневмоэлементов в каретках токоприемников электроподвижного состава / М. С. Михайлов, О. А. Сидоров. – Текст : непосредственный // Актуальные проблемы проектирования и эксплуатации устройств электроснабжения электрического транспорта : материалы всероссийской научно-технической конференции с международным участием. – Омск : Омский гос. ун-т путей сообщения, 2023. – С. 53–59.

22. Михайлов, М. С. Оценка возможности применения управляемых упругих элементов в каретках токоприемников электроподвижного состава / М. С. Михайлов, О. А. Сидоров. – Текст : непосредственный // Инновационные проекты и технологии в образовании, промышленности и на транспорте : материалы научной конференции – Омск : Омский гос. ун-т путей сообщения, 2024. – С. 358–363.

23. Разработка кареток токоприемников электроподвижного состава, оснащенных управляемыми упругими элементами / О. А. Сидоров, А. Н. Смердин, М. С. Михайлов, В. М. Филиппов. – Текст : непосредственный // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2023. – Т. 66. № 3. – С. 16–21.

24. Паранин, А. В. Взаимодействие токоприемника высокоскоростного подвижного состава и контактной подвески в различных условиях эксплуатации / А. В. Паранин, Д. А. Ефимов, А. Б. Батрашов. – Текст : непосредственный // Транспорт Урала. – 2022. – № 3 (74). – С. 94–99.

25. Фрайфельд, А. В. Уточнения графо-аналитического метода построения траектории токоприемника / А. В. Фрайфельд, М. М. Ерофеева. – Текст : непосредственный // Труды Московского института инженеров железнодорожного транспорта. – Москва : Транспорт, 1970. – Вып. 125. – С. 102–106.

26. Geometry deviation effects of railway catenaries on pantograph–catenary interaction: a case study in Norwegian Railway System / Y. Song, T. Jiang, P. Navik, A. Ronnquist – Text : unmediated // Railway Engineering Science. – 2021. – Vol. 29. – Pp. 350–361.

27. Gil, J. Analytical model of the pantograph–catenary dynamic interaction and comparison with numerical simulations / J. Gil, S. Gregori, M. Tur, F. J. Fuenmayor – Text : unmediated // Vehicle System Dynamics. – 2020. – Vol. 60(1). – Pp. 132–155.

28. Shimanovsky, A. Modeling of the pantograph-catenary wire contact interaction / A. Shimanovsky, V. Yakubovich, I. Kapliuk – Text : unmediated // Procedia Engineering – 2016. – Vol. 134 – Pp. 284–290.

29. Wang, J. Effect of pantograph’s main structure on the contact quality in high-speed railway / J. Wang, G. Mei Text : unmediated // Shock and Vibration – 2021. – Vol. 2021. – № 4037999 – P. 16.

30. Литвинова, В. В. Стохастическая модель процесса токосъема с контактной сети токоприемника электроподвижного состава при высоких скоростях движения / В. В. Литвинова, В. В. Моисеев, Е. В. Рунёв. – Текст : непосредственный // CEUR Workshop Proceedings. – 2021. – Vol. 2803. – Pp. 84–91.

31. Surrogate modelling of railway pantograph-catenary interaction using deep Long-Short-Term-Memory neural networks / Y. Song, H. Wang, G. Froseth [et al.] – Text : unmediated // Mechanism and Machine Theory. – 2023. – Vol. 187. – №. 105386.

32. Pombo, J. A Method of predicting wear and damage of pantograph sliding strips based on artificial neural networks / M. Kuznar, A. Lorenc – Text : unmediated //

Materials. – 2022. – Vol. 15(1). – №. 98.

33. Ецков, Т. А. Разработка и исследование численной модели токоприемника / Т. А. Ецков, Б. Н. Лобов, П. В. Попов. – Текст : непосредственный // Известия вузов. Электромеханика. – 2016. – № 3 (545). – С. 30–34.

34. Rauter F. G. Flexible multibody modeling of pantographs for pantograph-catenary interaction / F. G. Rauter, J. Pombo, J. Ambrosio, M. Pereira – Text : unmediated // Solid Mechanics and its Applications. – 2007. – Vol. 1 – Pp. 205-226.

35. Pombo, J. Multiple Pantograph Interaction With Catenaries in High-Speed Trains / J. Pombo, J. Ambrosio – Text : unmediated // Journal of Computational and Nonlinear Dynamics. – 2012. – Vol. 7 – №. 041008.

36. Massat J.-P. Pantograph catenary dynamic optimisation based on advanced multibody and finite element co-simulation tools / J.-P. Massat, Ch. Laurent, J.-P. Bianchi, E. Balmes – Text : unmediated // Vehicle System Dynamic. – 2014. – Vol. 52 (sup1). – Pp. 338–354.

37. Авотин, Е. В. Численное моделирование динамики токоприемника при взаимодействии с контактной подвеской / Е.В. Авотин, Н.В. Миронос, И. Н. Титух, П. Г. Тюрнин – Текст: непосредственный // Вестник ВНИИЖТ. – 2008. – № 3. – С. 42–45.

38. Friction-induced, self-excited vibration of a pantograph-catenary system / W. Qian, G. Chen, W. Zhang [et al.] – Text : unmediated // Journal of Vibration and Acoustics. – 2013. – Vol. 135(5) – P. 051021.

39. Allotta, B An active suspension system for railway pantographs: the T2006 prototype / B. Allotta, L. Pugi, F. Bartolini – Text : unmediated // Journal of Rail and Rapid Transit. – 2009. – Vol. 223 – Pp. 15-19.

40. Nibler, H . Dynamisches Verhalten von Fahreitung und Stromabnehmer bei elektrischen Hauptbahnen / H. Nibler – Text : unmediated // Elektrische Bahnen, 1950. – No. 3. – Pp. 138 – 146.

41. Власов, И. И. Механические расчеты вертикальных цепных контактных подвесок / И. И. Власов. – Текст : непосредственный // Труды Всесоюзного научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. – Москва :

Трансжелдориздат, 1957. – С. 183–215.

42. Паскуччи, Л. Колебания контактной подвески электрифицированных железных дорог при высоких скоростях движения / Л. Паскуччи. – Текст : непосредственный // Ежемесячный бюллетень международной ассоциации железнодорожных конгрессов, 1969. – № 2. – С. 44–54.

43. Почаевец, Э. С. Выбор оптимальных параметров контактных подвесок с учетом случайных факторов / Э. С. Почаевец. – Текст : непосредственный // Вестник Всесоюзного научно-исследовательского института железнодорожного транспорта, 1974. – № 1. – С. 16–19.

44. Михеев, В. П. К расчету взаимодействия токоприемников с контактными подвесками с одновременным учетом ряда инерционных эффектов / В. П. Михеев, А. Н. Горбань. – Текст : непосредственный // Энергосбережение электрических железных дорог: научные труды Омского института инженеров железнодорожного транспорта. – Омск : Омский институт инженеров железнодорожного транспорта, 1974. – Т. 162. – С. 56–68.

45. Жарков, В. Т. Об учете эластичности верхнего узла при расчетах на ЭЦВМ траектории полоза токоприемника / В. Т. Жарков, В. П. Михеев. – Текст : непосредственный // Энергоснабжение электрических железных дорог: научные труды Омского института инженеров железнодорожного транспорта. – Омск : Омский институт инженеров железнодорожного транспорта, 1970. – Т. 104. – Ч. 2. – С. 54–58.

46. Тавровский, Л.Д. Приведение динамической системы токоприемник – контактный провод к эквивалентной системе с сосредоточенными параметрами / Л. Д. Тавровский. – Текст : непосредственный // Вопросы развития и эксплуатации жилищно-коммунального хозяйства: материалы научно-технической конференции – Москва, 1973. – С. 48–49.

47. Duan, H. A disturbance observer based lumped-mass catenary model for active pantograph design and validation / H. Duan, R. Dixon, E. Stewart // Vehicle System Dynamics. – 2022. – Vol. 61 – Is. 6. – P. 1565–1582.

48. Fink, B. Beitrag zur Dynamik der Stromabnehmers / B. Fink // Elektrische

Bahnen– 1931. – № 9. – Pp. 272–276.

49. Марквардт, Г. Г. Троллейбусная контактная сеть. Исследование работы провода при взаимодействии его с токоприемником и выбор оптимальных параметров подвески / Г. Г. Марквардт. – Текст : непосредственный // Отчет по научно-исследовательской работе научно-исследовательского института при Моссовете. – Москва : Научно-исследовательский институт при Моссовете, 1939.

50. Guilbert, G. Pantograph motion on nearly uniform railway overhead line / G. Guilbert, H. Davies – Text : unmediated // Proc. J.E.E. – 1966. – Vol. 113. – Pp. 485–492.

51. Ковалев, С. М. Аналитический метод расчета колебаний токоприемников скоростного электровоза : специальность 05.22.07 «Подвижной состав, тяга поездов и электрификация железных дорог» : диссертация на соискание кандидата технических наук / С. М. Ковалев; Ленинградский ин-т инженеров железнодорожного транспорта. – Санкт-Петербург, 1968. – С. 30–32. – Текст : непосредственный.

52. Gray, R. T. Effect of collection at high speed / R. T. Gray, S. Levy, J. A. Bein, E. J. Leclers – Text : unmediated // Paper Amer. Soc. Mech. Engrs. – 1968.

53. Кейн, П. П. Система простой контактной подвески для электрических железных дорог / П. П. Кейн, П. Р. Скотт. – Текст : непосредственный // Ежемесячные бюллетени международной ассоциации железнодорожных конгрессов. 1970. – № 7. – С. 3–9.

54. Ефимов, А. В. Расчет процесса взаимодействия токоприемников с контактной сетью при высоких скоростях движения / А. В. Ефимов, А. Г. Галкин, В. В. Веселов. – Текст : непосредственный // Инженер путей сообщения. – 1998. – № 3.

55. Кудряшов, Е. В. Модернизация контактных подвесок КС-200 на основе моделирования их взаимодействия с токоприемниками / Е. В. Кудряшов. – Текст : непосредственный // Вестник Института проблем естественных монополий: техника железных дорог. – 2014. – № 3 (27). – С. 48–53.

56. Pantograph–Catenary Interaction Prediction Model Based on SCSA-RBF Network / M. Wu., X. Xu, H. Zhang [et al.] – Text : unmediated // Appl. Sci. – 2024. – Vol. 14 – №. 449.

57. Кофман, Дж. Л. Влияние динамических характеристик подвижного состава на качество токосъема / Дж. Л. Кофман , Х. Л. Престон. – Текст : непосредственный // Конференция по электрификации Британских железных дорог – перевод №596/60. – 1960. – С. 3–8.

58. Манцо, М. Демпфирование колебаний токоприемников высокоскоростного подвижного состава / М. Манцо. – Текст : непосредственный // Ежемесячные бюллетени международной ассоциации железнодорожных конгрессов, 1969. – № 3. – С. 29–36.

59. Беляев, И. А. Взаимодействие токоприемников и контактной сети : учебник / И.А. Беляев , В.А. Вологин . – Москва.: Транспорт, 1982. – 190 с. – Текст : непосредственный.

60. Ецков, Т.А. Исследование аэродинамических характеристик скоростного токоприемника / Т.А. Ецков, П. В. Попов – Текст : непосредственный //Вестник ВЭЛНИИ. – 2014. – Ч. 2. – № 1 (67). С. 28–37.

61. Sliding mode control with pd sliding surface for high-speed railway pantograph-catenary contact force under strong stochastic wind field / Y. Song, Zh. Liu, H. Ouyang [et al.]– Text : unmediated // Shock and Vibration. – 2017. – Vol. 2017. – №. 4895321. – P. 16

62. Михайлов, М. С. Расчет характеристик токоприемника, оснащенного каретками с управляемыми пневмоэлементами / М. С. Михайлов. – Текст : непосредственный // Актуальные проблемы проектирования и эксплуатации устройств электроснабжения электрического транспорта : материалы всероссийской научно-технической конференции с международным участием. – Омск : Омский гос. ун-т путей сообщения, 2023. – С. 38–45.

63. Gregori, S. An approach to geometric optimisation of railway catenaries / S. Gregori, M. Tur, E. N. Soriano, J. F. Fuenmayor – Text : unmediated // Vehicle System Dynamics. – 2017. – № 56 (8), Pp. 1162–1186.

64. The results of the pantograph–catenary interaction benchmark / S. Bruni, J. Ambrosio, Carnicero A. [et al.] – Text : unmediated // *Vehicle System Dynamics*. – 2014 – № 53 (3). – Pp. 412–435.

65. Вологин, В. А. Взаимодействие токоприемников и контактной сети : труды научно-исследовательского института железнодорожного транспорта / В. А. Вологин. – Москва : Интекст, 2006. – 256 с. – Текст : непосредственный.

66. Coupled Models with Contact Kinematics for Pantograph-Catenary Systems / B.M. Abduraxman, C. Ward, W. Midgley, T. Harrison, R. Goodall – Text : unmediated // *Advances in Dynamics of Vehicles on Roads and Tracks II*. – 2022. – Pp. 168–178.

67. Spiroiu, M. A. Pantograph-Catenary Dynamics Simulation for High-Speed Trains / M. A. Spiroiu – Text : unmediated // *Applied mathematics, mechanics, and engineering* – 2024– № 67. – Pp. 779–786.

68. Михайлов, М. С. Совершенствование математической модели взаимодействия токоприемников с контактной подвеской / М. С. Михайлов, О. А. Сидоров, И. Л. Саля – Текст : непосредственный // *Известия Транссиба*. – 2025. – № 1(65). – С. 12-23.

69. Physical realizations of inerter and inerter-based vibration control / Y. Li, H. Neil, Y. Yang, Zh. Cheng, Zh. [et al.] – Text : unmediated // *Heliyon*. – 2024 – № 10 – Is. 16 – № E35870.

70. Михайлов, М. С. Исследование переходных процессов в системе автоматического регулирования нажатия скоростного токоприемника / М. С. Михайлов – Текст : непосредственный // *Инновационные проекты и технологии в образовании, промышленности и на транспорте : Материалы XVIII научной конференции, посвященной Дню Российской науки*. – Омск: Омский гос. ун-т путей сообщения, 2025. – С. 15-22.

71. Симою, М. П. Определение коэффициентов передаточных функций линеаризованных звеньев и систем авторегулирования / М. П. Симою. – Текст : непосредственный // *Автоматика и телемеханика* – 1957. – Т. 18. – № 6. – С. 514–528.

72. Shudong W., J. Guo G. Gao Research of the active control for high-speed train pantograph / W. Shudong, J. Guo G. Gao // *IEEE Conference on Cybernetics and*

Intelligent Systems. 2008. – Pp. 749-753. – DOI: 10.1109/ICCIS.2008.4670754.

73. Song, Y. Robust Adaptive Contact Force Control of Pantograph–Catenary System: An Accelerated Output Feedback Approach / Y. Song, L. Li – Text : unmediated // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2021 – vol. 68. – no. 8. – Pp. 7391–7399. – DOI: 10.1109/TIE.2020.3003547.

74. Ibrahim, M. Active Displacement Control of Pantograph-catenary System for a Half-body Railway Model / M. Ibrahim, M. A. Abdullah, M. H. Harun [et al.] – Text : unmediated // Periodica Polytechnica Transportation Engineering. – 2024. – Vol. 52(2). – Pp. 166–172. – DOI: 10.3311/PPtr.23285.

75. Pappalardo, C. M. Pantograph/Catenary Contact Force Control / C. M. Pappalardo, M. Patel, B. Tinsley, A. A. Shabana – Text : unmediated // ASME 2015 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference. – 2015. – Vol. DETC2015-46501 – № V006T10A028. – P. 11. – DOI: 10.1115/DETC2015-46501.

76. Active Control of Contact Force for a Pantograph-Catenary System / J. Wang – Text : unmediated // Shock and Vibration. – 2016. – №. 2735297. – P. 7. – DOI: 10.1155/2016/2735297.

77. Сидоров, О. А. Определение закона регулирования нажатия токоприемника электроподвижного состава / О. А. Сидоров, И. В. Ларькин, С. Ю. Сосновский. – Текст : непосредственный // Транспортная инфраструктура Сибирского региона: материалы межвузовской научно-практической конференции: в 2 томах. – Иркутск : Иркутский гос. ун-т. путей сообщения, 2011. – Т. 1. – С. 569–570.

78. Ларькин, И. В. Совершенствование устройств автоматического регулирования скоростных токоприемников / И.В. Ларькин, А.Е. Аркашев, С.Ю. Сосновский. – Текст : непосредственный // Инновации для транспорта: сборник научных статей с международным участием в трех частях. – Омск : Омский гос. ун-т путей сообщения, 2010. – Ч. 1 – С. 180–184.

79. Wang, B. LQR Active Control of Fractional-Order Pantograph-Catenary System Based on Feedback Linearization / B. Wang, W. Shaofang, Y. Shen – Text : unmediated // Mathematical Problems in Engineering. – 2022. – № 2213697. –

DOI 10.1155/2022/2213697.

80. Allota, B. Design and Experimental Results of an Active Suspension System for a High-Speed Pantograph / B. Allotta, L. Pugi, F. Bartolini – Text : unmediated // IEEE/ASME Transactions on Mechatronics. 2008. – No. 13(5). – Pp. 548–557.

81. Сидоров, О. А. Совершенствование систем автоматического регулирования токоприемников для высоких скоростей движения / О. А. Сидоров, В. Н. Горюнов, А. С. Голубков. – Текст : непосредственный // Динамика систем, механизмов и машин. – 2017. – Т. 5. – № 3. – С. 108–113.

82. Патент на изобретение № 2780681 С1 Российская Федерация, МПК В60L 5/26, В60L 5/32, G01L 5/04, G01M 17/08. Измерительный токоприемник электроподвижного состава : № 2022114488 : заявлено 27.05.2022 : опубликовано 29.09.2022 / О. А. Сидоров, М. С. Михайлов, И. Е. Чертков. – Текст : непосредственный.

83. Сидоров, О. А. Применение управляемых пневмоэлементов в конструкции измерительного токоприемника / О. А. Сидоров, М. С. Михайлов. – Текст : непосредственный // Научное обозрение: актуальные вопросы теории и практики : сборник статей международной научно-практической конференции – Пенза : Наука и просвещение, 2023. – Т. 1. – С. 83–85.

84. Сидоров, О. А. Исследование токоприемников электроподвижного состава, оснащенных внутрипружинными пневмоэлементами в каретках / О. А. Сидоров, М. С. Михайлов. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2024. – № 1 (57). – С. 10–22.

85. Система автоматического регулирования токоприемника, оснащенного внутрипружинными пневмоэлементами в каретках / О. А. Сидоров, А. Н. Смердин, М. С. Михайлов, В. М. Филиппов. – Текст : непосредственный // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2024. – Т. 67. № 1. – С. 75–81.

86. The use of PI-algorithm for high-speed electric rolling stock automatic control system / O. Sidorov, A. Smerdin, M. Mikhailov, V. Philippov, G. Ermachkov, E. Butenko – Text : unmediated // E3S Web of Conferences: International Scientific Conference Transport Technologies in the 21st Century. – 2024. – Vol. 515. – № 01024.

87. Патент на изобретение № 2832094 Российская Федерация, МПК В60L 5/08, В60L 3/12. Каретка токоприемника электроподвижного состава : № 2024109141 : заявлено 04.04.2024 : опубликовано 19.12.2024 / Сидоров О. А., Михайлов М. С. Бюл № 35. – Текст : непосредственный.

88. Гармонов, И. В. Синтетический каучук / И. В. Гармонов – Ленинград : Химия, 1983 г. – 560 с. – Текст : непосредственный.

89. ГОСТ 4750–89. Шины пневматические для велосипедов. Технические условия. – Москва : Стандартинформ, 1989. – 14 с. – Текст : непосредственный.

90. Sun, Y. Characterization of silicone rubber based soft pneumatic actuators / Y. Sun, Y. S. Song, J. Piak – Text : unmediated // International Conference on Intelligent Robots and Systems. – 2013. – Pp. 4446–4453.

91. Морозостойкий силикон // НЛС Силикон : сайт. – URL: <https://nls-company.ru/stati/morozostoykiy-silikon> (дата обращения: 20.03.2025). – Текст : электронный.

92. ГОСТ 426–77. Резина. Метод определения сопротивления истиранию при скольжении. – Москва : Стандартинформ, 2002. – 8 с. – Текст : непосредственный.

93. Патент на полезную модель № 227471 Российская Федерация, МПК В60L 5/22. Каретка токоприемника электроподвижного состава : № 2024109133 : заявлено 04.04.2024: опубликовано 22.07.2024 / Сидоров О. А., Михайлов М. С. Бюл № 21. – Текст : непосредственный.

94. Сидоров, О. А. Испытания магистрального токоприемника для применения на линиях с модернизированной инфраструктурой системы токосъема / О. А. Сидоров, А. Н. Смердин, С. В. Заренков. – Текст : непосредственный // Инновационный транспорт. – 2013. – № 1 (7). – С. 23–28.

95. Experimental studies of pantograph head suspension equipped with controlled pneumatic elements. / O. Sidorov, A. Smerdin, M. Mikhailov, G. Ermachkov – Text : unmediated // E3S Web of Conferences: International Scientific and Practical Conference Innovative Technologies in Environmental Science and Education Divnomorskoe village – 2023. – Vol. 431. – №. 08011.

96. Сидоров, О. А. Совершенствование методов испытаний предохранительных устройств токоприемников скоростного электрического транспорта / О. А. Сидоров, В. М. Филиппов, Б. М. Москалюк, М. С. Михайлов. – Текст : непосредственный // Наука и инновации – современные концепции : сборник научных статей по итогам работы международного научного форума. – Уфа : Инфинити, 2019. – С. 177–182.

97. Сидняев, Н. И. Теория планирования эксперимента и анализ статистических данных : учебник и практикум для вузов / Н. И. Сидняев. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва : Издательство Юрайт, 2025. – 495 с. – (Высшее образование). – ISBN 978-5-534-05070-7. – Текст : электронный // Образовательная платформа Юрайт [сайт].

98. Исследование влияния низких температур на работоспособность токоприемников электроподвижного состава, оснащенных каретками с управляемыми внутрипружинными пневмоэлементами / О. А. Сидоров, А. Н. Смердин, М. С. Михайлов [и др.]. – Текст : непосредственный // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2024. – Т. 67. № 3. – С. 99–106.

99. Заренков, С. В. Совершенствование предохранительных устройств скоростных токоприемников / С. В. Заренков, И. Е. Чертков. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2015. – № 4 (24). – С. 17–27.

100. Сидоров, О. А. Совершенствование методики испытаний токоприёмников электроподвижного состава с учётом ударных воздействий / О. А. Сидоров, М. С. Михайлов, Б. М. Москалюк. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2021. – № 1 (45). – С. 48–56.

101. Михайлов, М. С. Разработка стенда для оценки ударных воздействий на токоприёмник со стороны контактной подвески / М. С. Михайлов, О. А. Сидоров. – Текст : непосредственный // Инновационный путь развития как ответ на вызовы нового времени: сборник статей международной научно-практической конференции. – Уфа: Аэтерна, 2021. – С. 75–80.

102. Патент на полезную модель № 212475 Российская Федерация, МПК В60L5/00. Устройство для испытаний токоприемников электроподвижного состава :

№ 2022106979 : заявлено 16.03.2022 : опубликовано 25.07.2022 / О. А. Сидоров, М. С. Михайлов. Бюл № 21 – Текст : непосредственный.

103. Голубков, А. С. Совершенствование методики испытаний токоприемников современного электроподвижного состава / А. С. Голубков, А. Н. Смердин, В. М. Павлов. – Текст : непосредственный // Электрификация и развитие инфраструктуры энергообеспечения тяги поездов скоростного и высокоскоростного железнодорожного транспорта : тезисы международного симпозиума «Eltrans-2013» – Санкт-Петербург: Петербургский гос. ун-т путей сообщения, 2013. – С. 35–36.

104. Ецков, Т. А. Исследование аэродинамических характеристик скоростного токоприемника / Т. А. Ецков, И. О. Абрамчук, Б. Н. Лобов, П. В. Попов. – Текст : непосредственный // Вестник Всероссийского научно-исследовательского и проектно-конструкторского института электровозостроения. – 2018. – № 1 (79). – С. 95–105.

105. Смердин, А. Н. Особенности применения CFD-метода при расчете аэродинамических сил токоприемника электроподвижного состава / А. Н. Смердин, А. Е. Чепурко. – Текст : непосредственный // Транспорт Урала. – 2013. – № 3 (38). – С. 107–112.

106. Сидоров, О. А. Исследование влияния внутрипружинных пневмоэлементов на аэродинамические характеристики кареток токоприемников скоростного электроподвижного состава / О. А. Сидоров, А. Н. Смердин, М. С. Михайлов, В. М. Филиппов – Текст : непосредственный // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2025. – Т. 68, № 2. – С. 14-20.

ПРИЛОЖЕНИЯ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 212297

Каретка токоприемника электроподвижного состава

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Омский государственный университет путей сообщения" (RU)*

Авторы: *Сидоров Олег Алексеевич (RU), Михайлов Михаил Сергеевич (RU)*

Заявка № 2022114479

Приоритет полезной модели 27 мая 2022 г.

Дата государственной регистрации в Государственном реестре полезных моделей Российской Федерации 14 июля 2022 г.

Срок действия исключительного права на полезную модель истекает 27 мая 2032 г.

Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной собственности

Ю.С. Зубов



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 212475

**Устройство для испытаний токоприемников
электроподвижного состава**

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Омский государственный университет путей сообщения" (RU)*

Авторы: *Сидоров Олег Алексеевич (RU), Михайлов Михаил Сергеевич (RU)*

Заявка № 2022106979

Приоритет полезной модели 16 марта 2022 г.

Дата государственной регистрации
в Государственном реестре полезных
моделей Российской Федерации 25 июля 2022 г.

Срок действия исключительного права
на полезную модель истекает 16 марта 2032 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Ю.С. Зубов



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 227471

Каретка токоприемника электроподвижного состава

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Омский государственный университет путей сообщения" (RU)*

Авторы: *Сидоров Олег Алексеевич (RU), Михайлов Михаил Сергеевич (RU)*

Заявка № 2024109133

Приоритет полезной модели 04 апреля 2024 г.

Дата государственной регистрации в Государственном реестре полезных моделей Российской Федерации 22 июля 2024 г.

Срок действия исключительного права на полезную модель истекает 04 апреля 2034 г.

Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной собственности

Ю.С. Зубов



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2780681

Измерительный токоприемник электроподвижного
состава

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Омский государственный университет путей сообщения" (RU)*

Авторы: *Сидоров Олег Алексеевич (RU), Михайлов Михаил Сергеевич (RU), Чертков Иван Евгеньевич (RU)*

Заявка № 2022114488

Приоритет изобретения 27 мая 2022 г.

Дата государственной регистрации

в Государственном реестре изобретений

Российской Федерации 29 сентября 2022 г.

Срок действия исключительного права

на изобретение истекает 27 мая 2042 г.



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Ю.С. Зубов

ср. ант

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ
№ 2832094

Каретка токоприемника электроподвижного состава

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Омский государственный университет путей сообщения" (RU)*

Авторы: *Сидоров Олег Алексеевич (RU), Михайлов Михаил Сергеевич (RU)*

Заявка № 2024109141

Приоритет изобретения 04 апреля 2024 г.

Дата государственной регистрации

в Государственном реестре изобретений

Российской Федерации 19 декабря 2024 г.

Срок действия исключительного права

на изобретение истекает 04 апреля 2044 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Ю.С. Зубов



ПРИЛОЖЕНИЕ 2. Акты внедрения научно-технической продукции

«УТВЕРЖДАЮ»

Генеральный директор

АО «ИЦ ЖТ»

А. А. Кирейцев

«10» апреля 2025



АКТ

внедрения научно-технической продукции

Мы, нижеподписавшиеся, руководитель работ Смердин А. Н., с одной стороны, главный эксперт – начальник отдела интеграции тягового и высоковольтного оборудования АО «ИЦ ЖТ» Чекмарев А. Е., с другой стороны, составили настоящий акт о том, что математическая модель взаимодействия токоприемника с контактной подвеской, разработанная сотрудниками ОмГУПС (аспирант Михайлов М. С., профессор Сидоров О. А.), в которой ее приведенная масса представлена в виде инертора, использовалась при проведении вычислительного эксперимента по определению параметров токоприемника для скоростного электроподвижного состава в условиях эксплуатации на проектируемой скоростной магистрали Москва–Санкт-Петербург.

Краткое описание научно-технической продукции: математическая модель взаимодействия токоприемника с контактной подвеской представляет собой модель с сосредоточенными параметрами, в которой приведенная масса подвески представлена в виде инертора – виртуального элемента, учитывающего инерционные эффекты в реальной контактной подвеске при вертикальных перемещениях ее элементов (контактный провод, несущий трос, струны, зажимы и т.д.).

Предложенная математическая модель обеспечивает повышение достоверности расчетов взаимодействия токоприемников с контактной подвеской, что позволяет выбирать рациональные характеристики и параметры токоприемников для стабилизации нажатия в контакте и снижения износа контактных пар.

Технико-экономическая эффективность научно-технической продукции: заключается в снижении временных затрат на определение параметров и характеристик токоприемников электроподвижного состава на этапе их разработки, а также в снижении затрат на токосъемные элементы (контактный провод и токосъемные элементы токоприемника) благодаря обоснованному выбору характеристик и параметров системы токосъема, позволяющему оптимизировать нажатие в контакте и уменьшить износ контактных пар.

От ОмГУПС
руководитель работ,
д.т.н., доцент

А. Н. Смердин

От АО «ИЦ ЖТ»
Главный эксперт – начальник отдела
интеграции тягового и высоковольтного
оборудования, к.т.н.

А. Е. Чекмарев

«УТВЕРЖДАЮ»

Заместитель Генерального директора

АО «ВНИИЖТ»

Р.В. Мурзин

« 15 »



АКТ

внедрения научно-технической продукции

Мы, нижеподписавшиеся, руководитель работ Смердин А.Н., с одной стороны, и начальник отдела «Контактная сеть и токосъем» Царьков А.А., с другой стороны, составили настоящий акт о том, что алгоритм управления нажатием токоприемника с использованием внутрипружинных пневмоэлементов в каретке, разработанный сотрудниками ОмГУПС (аспирант Михайлов М.С., профессор Сидоров О.А.), используется при реализации необходимых режимов работы оборудования токоприемника при выполнении научно-исследовательской работы по теме "Исследовательские испытания оборудования для определения качества токосъема и аэродинамики токоприемников на электропоездах Сапсан и Ласточка".

Краткое описание научно-технической продукции: алгоритм управления нажатием токоприемника с использованием внутрипружинных пневмоэлементов в каретке позволяет осуществлять синхронное управление нажатием токоприемника и не допускать возможного полного сжатия упругих элементов кареток за счет регулирования давления воздуха в полости внутрипружинных пневмоэлементов.

Предложенный алгоритм управления нажатия токоприемником основывается на синхронном управлении подъемным резинокордным элементом и внутрипружинными пневмоэлементами, установленными в каретках токоприемников электроподвижного состава, что обеспечивает уменьшение влияния измерительного оборудования на оценку параметров качества токосъема при различных воздействиях факторов окружающей среды.

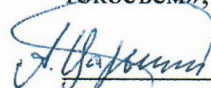
Технико-экономическая эффективность научно-технической продукции: заключается в снижении затрат на настройку и регулировку измерительного токоприемника при проведении испытаний, а также в снижении влияния измерительного оборудования на оценку параметров качества токосъема.

От ОмГУПС
руководитель работ,
д.т.н., доцент

 А.Н. Смердин

От АО «ВНИИЖТ»

Начальник отдела «Контактная сеть и
токосъем», к.т.н.

 А.А. Царьков



«УТВЕРЖДАЮ»

Генеральный директор

ООО «ИЦ «Привод-Н»

Киреев к.т.н. А. В. Киреев

«11» сентября 2025

АКТ

о внедрения научно-технической продукции

Мы, нижеподписавшиеся, руководитель работ Чертков И. Е, с одной стороны, технический директор ООО «ИЦ «Привод-Н» Кожемяка Н. М., с другой стороны, составили настоящий акт о том, что методика ОмГУПСа для экспериментального определения характеристик кареток токоприемника (аспирант Михайлов М. С., профессор Сидоров О. А.) использовалась при проведении испытаний токоприемника ТА 60-СЭТ 300 2400 в рамках договора № 536/24 от 17.03.2025.

Краткое описание научно-технической продукции: методика определения характеристик кареток токоприемника, в которой каретки токоприемника размещаются в термокамерах и охлаждаются путем подачи углекислоты, что позволяет имитировать условия работы токоприемника при низких температурах

Предложенная методика обеспечивает повышение достоверности экспериментального определения характеристик кареток токоприемника в условиях низких температур, что позволяет выбирать рациональную конструкцию кареток для стабилизации нажатия в контакте и снижения износа контактных пар.

Технико-экономическая эффективность научно-технической продукции: заключается в снижении временных затрат на определение параметров и характеристик токоприемников электроподвижного состава на этапе их разработки.

От ОмГУПСа
руководитель работ,
к.т.н., доцент

Чертков И. Е. Чертков

От ООО «ИЦ «Привод-Н»
Технический директор
к.т.н.

Кожемяка Н. М. Кожемяка