

На правах рукописи



КОРСУН Антон Александрович

**УЛУЧШЕНИЕ ТОРМОЗНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПАССАЖИРСКОГО
ПОДВИЖНОГО СОСТАВА ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ**

2.9.3. Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация
(технические науки)

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Иркутск – 2024

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Иркутский государственный университет путей сообщения».

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент
Иванов Павел Юрьевич

Официальные оппоненты: **Буйносов Александр Петрович**
доктор технических наук, профессор,
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уральский государственный университет путей сообщения», кафедра «Электрическая тяга», профессор

Воробьев Александр Алфеевич
доктор технических наук, профессор,
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I», кафедра «Наземные транспортно-технологические комплексы», заведующий кафедрой

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Омский государственный университет путей сообщения», г. Омск

Защита диссертации состоится «13» февраля 2025 г. в 15:00 на заседании диссертационного совета 40.2.002.07 на базе федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Российский университет транспорта» РУТ (МИИТ) по адресу: 127994, г. Москва, ул. Образцова, д. 9, стр. 9, ауд. 2505.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте РУТ (МИИТ) www.miiit.ru.

Автореферат разослан «__» декабря 2024 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Воронин Николай Николаевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. В современном мире развитие железнодорожной инфраструктуры является неотъемлемой составляющей устойчивого транспортного сектора государства. Пассажирские поезда и электропоезда, как ключевые объекты общественного транспорта, играют важную роль в обеспечении комфортных и безопасных перевозок для миллионов пассажиров. Однако с ростом городского населения и увеличением потока пассажиров возникает необходимость в постоянном совершенствовании и современном подходе к обеспечению высокой эффективности торможения, чтобы соответствовать строгим требованиям безопасности, повышенной скорости движения и обеспечению удовлетворения потребностей клиентов.

В эксплуатации железнодорожного транспорта одним из наиболее важных режимов является торможение. Однако существующие способы и средства торможения, хотя и доказали свою надежность, все же имеют большой потенциал для совершенствования с целью повышения эффективности торможения. Тормозная система пассажирского подвижного состава не претерпевала существенной модернизации уже более 60 лет, является наиболее отстающей по техническому развитию, в отличие от других частей и систем подвижного состава. Эффективность тормозных средств является ключевым фактором в обеспечении безопасности движения поездов, который также значительно влияет на максимально допустимую и участковую скорости движения поездов.

В связи с этим актуальность данного исследования состоит в поиске новых подходов к оптимизации алгоритма торможения, позволяющего улучшить тормозные характеристики пассажирского подвижного состава.

Степень разработанности темы исследования. Теоретическая и методологическая основа диссертации в части работы тормозной системы подвижного состава и исследования работы фрикционных тормозов базируется на трудах известных отечественных и зарубежных ученых: Абашкин И. В.,

Албегов Н. А., Анисимов П. С., Богатков М. Ю., Буйносов А. П., Воробьев А. А., Галай Э. И., Головнин В. И., Демушкин П. Т., Донской А. Л., Ефремов В. Н., Завьялов Е. Е., Иноземцев В. Г., Капустин М. Ю., Карвацкий Б. Л., Карпычев В. А., Крылов В. В., Крылов В. И., Лобов В. Н., Лосев В. В., Николаев В. А., Попов В. И., Рабинович М. Д., Савоськин А. Н., Удальцов А. Б., Фокин М. Д., Шаронов С. В., Ярковский Ф. В., Ясенцев В. Ф. и других специалистов.

Также были рассмотрены работы зарубежных ученых, таких как Balotin J. G., Cantone L., Cristol-Bulthé A.-L., Desplanques Y., Evtushenko O. O., Ferreira N. F., Neis P. D., Degallaix G., Hamdaoui A., Jaddi E. H., Jalalifar S., Matteo F., Milojevic A. P., Milosevic M. S., Ottati A., Stamenkovic D. S., Talati F., Tomic M. M., Wasilewski P.

Целью диссертационной работы является повышение тормозной эффективности и снижение вероятности заклинивания колесных пар за счет применения адаптивного управления тормозным нажатием и электропневматического экстренного торможения.

Для достижения указанной цели в работе были поставлены следующие **задачи**:

– выполнить анализ существующих систем управления торможением пассажирского подвижного состава;

– провести оценку влияния различных факторов на тормозную силу в процессе торможения;

– разработать алгоритм функционирования системы адаптивного управления тормозным нажатием с учетом элементной базы современных локомотивов;

– разработать математическую модель тормозной системы поезда в процессе торможения с учетом динамики коэффициента трения колодки о колесо и сцепления колеса с рельсом в компьютерной среде, для оценки

влияния нового алгоритма на тормозные характеристики, величину замедления и комфорт пассажиров при торможении;

– провести экспериментальные исследования характеристик тормозных приборов на реальном подвижном составе для определения особенностей конструкции тормозной системы при реализации предложенного алгоритма управления тормозным нажатием;

– спроектировать систему для реализации алгоритма адаптивного управления тормозным нажатием в режиме служебного и экстренного торможений на основе математического моделирования и экспериментально полученных характеристик тормозных приборов;

– провести экспериментальную проверку эффективности адаптивного торможения на реальном подвижном составе.

Объект исследования – тормозная система пассажирского подвижного состава.

Предмет исследования – алгоритм управления электропневматическими тормозами.

Научная новизна диссертационной работы заключается в следующем:

– предложен новый параметр для подбора оптимального давления в тормозном цилиндре – коэффициент запаса по нажатию, позволяющий при известной скорости движения поезда определять допустимую величину тормозной силы;

– разработан алгоритм адаптивного управления тормозным нажатием, отличающийся тем, что служебное и экстренное торможения происходят с учетом коэффициента запаса по нажатию и скорости движения поезда;

– разработана математическая модель в компьютерной среде Matlab/Simulink, позволяющая на основании уравнения движения моделировать торможение пассажирского поезда с колодочными и дисковыми тормозами при различных алгоритмах управления;

– проведено обоснование эффективности электропневматического торможения с предложенным алгоритмом адаптивного нажатия в сравнении с экстренным пневматическим торможением;

– разработан новый способ экстренного торможения, отличающийся тем, что экстренное торможение реализуется электропневматическими тормозами с использованием алгоритма адаптивного управления тормозным нажатием, а также возможностью прерывания экстренного торможения.

Теоретическая и практическая значимость работы. Разработаны научно обоснованные технические и технологические решения, позволяющие за счет эффективного использования имеющихся резервов тормозной системы сокращать длину тормозного пути. Проведены теоретические исследования изменения тормозной силы и силы сцепления в процессе торможения пассажирских поездов. Предложен новый параметр – коэффициент запаса по нажатию, позволяющий реализовать принцип адаптивного управления тормозным нажатием, снижающий вероятность заклинивания колесных пар при одновременном полном использовании резервов тормозной системы по нажатию. Определены значения величины задержки срабатывания электропневматических тормозов, связанные с электромагнитными и пневматическими процессами, необходимые для построения алгоритмов функционирования систем управления тормозным нажатием.

Доказана более высокая эффективность электропневматического служебного торможения по сравнению с экстренным пневматическим торможением.

Выявлено, что при электропневматическом торможении из-за разрядки тормозной магистрали (ТМ) в положении Vэ ручки крана машиниста усл. № 395 и срабатывания пневматического воздухораспределителя, электровоздухораспределитель (ЭВР) и запасный резервуар отключаются от тормозной магистрали, что делает ЭВР усл. № 305 непрямодействующим.

Причиной является комбинированные положения ручки крана машиниста V_a и $V_э$, что можно считать его недостатком.

Предложенный алгоритм адаптивного управления тормозным нажатием с учетом коэффициента запаса по нажатию позволяет сократить длину тормозного пути, снизить вероятность образования ползунов и повысить комфорт пассажиров.

Разработанная математическая модель в компьютерной среде Matlab/Simulink позволяет на основании уравнения движения поезда определять длину его тормозного пути, вероятность возникновения юза колесных пар и величину замедления, характеризующую комфорт пассажиров при различных способах торможения.

Спроектирована система адаптивного управления тормозным нажатием, позволяющая реализовать предложенный алгоритм на пассажирских поездах и моторвагонном подвижном составе, оборудованных электропневматическими тормозами, в режимах служебного и экстренного торможений.

Методология и методы исследования. Методы, использованные в диссертационных исследованиях, базируются на математическом моделировании, теории тяги поездов, а также теоретических основах тормозной техники. Для построения математических зависимостей и их анализа применялись лицензионные программные продукты: программное обеспечение Mathcad и электронные таблицы Microsoft Excel. Аналитически теоретические исследования проводились на математической модели в среде MatLab/Simulink, а экспериментальные исследования на электропоезде ЭД9М моторвагонного депо «Иркутск-Сортировочный».

Положения, выносимые на защиту:

– алгоритм адаптивного управления тормозным нажатием, в основе которого лежит коэффициент запаса по нажатию колодки на колесо, учитывающий изменение коэффициента трения и коэффициента сцепления в процессе торможения;

- система адаптивного управления тормозным нажатием и электропневматического экстренного торможения;
- математическая модель торможения пассажирского поезда в среде MatLab/Simulink со штатным алгоритмом и новым адаптивным торможением;
- результаты экспериментальных исследований характеристик электропневматических тормозов в переходных режимах;
- результаты поездного эксперимента на электропоезде ЭД9М на участке «Военный Городок – Слюдянка I» по подтверждению эффективности предлагаемого алгоритма торможения.

Степень достоверности. Достоверность теоретических представлений подтверждается результатами, полученными при математическом моделировании в среде MatLab/Simulink, совпадением их с результатами экспериментальных исследований на электропоезде ЭД9М моторвагонного депо «Иркутск-Сортировочный», погрешность не превышает 5 %.

Апробация результатов работы. Основные положения, результаты и выводы работы докладывались и обсуждались на всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Наука и молодежь» (Иркутск, 2021 г.; международной научно-практической конференции «Транспортная инфраструктура сибирского региона» (Иркутск, 2021, 2023 гг.); международной научно-практической конференции «Разработка и эксплуатация электротехнических комплексов и систем энергетики и наземного транспорта» (Омск, 2020 г.); всероссийской научно-практической конференции «Инновационные технологии на железнодорожном транспорте» (Красноярск, 2022 г.).

Диссертация доложена и рекомендована к защите на расширенном заседании кафедры «Электроподвижной состав» Иркутского государственного университета путей сообщения (ИрГУПС, г. Иркутск), протокол № 1 от 17.05.2024 г.

Диссертация доложена и рекомендована к защите на заседании кафедры «Электропоезда и локомотивы» Российского университета транспорта (РУТ (МИИТ), г. Москва), протокол № 7 от 22.05.2024 г.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 5 разделов, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы (109 наименований) и содержит 157 страниц машинописного текста, 66 рисунков, 2 таблицы и 1 приложение.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, дана ее краткая характеристика.

В первом разделе проведен анализ статистических данных, который позволил сделать вывод о том, что существует взаимосвязь между эффективностью тормозов, участковой скоростью движения поездов и прибылью компании ОАО «РЖД». Согласно статистике, прослеживается снижение участковой скорости движения поездов за последние годы.

Рассмотрены труды предшественников, работающих над созданием систем торможения с повышенной эффективностью. Общим недостатком является то, что управление тормозами происходит без учета изменения коэффициента трения колодки о колесо и коэффициента сцепления колеса с рельсом в процессе торможения. По этой причине тормозной путь на высоких скоростях увеличивается, а на низких скоростях возникает опасность образования ползунов, т. к. коэффициент трения колодки о колесо резко возрастает по мере снижения скорости. Рассмотренные способы и устройства обеспечивают лишь плавность торможения, однако не обеспечивают использование полного потенциала эффективности тормозов, не поддерживают баланс силы сцепления колеса с рельсом и тормозной силы.

Один из предшественников разработал концепцию экстренного торможения, которая предполагала полное использование тормозной силы

относительно силы сцепления колеса с рельсом. Однако, ввиду того, что на коэффициент сцепления колеса с рельсом влияет большое количество внешних факторов (погодные условия, качество рельсового пути и др.), такой подход к реализации процесса торможения имеет существенную вероятность заклинивания колесных пар. Подход был предложен для экстренного торможения электропоездов.

Во втором разделе рассмотрены особенности образования тормозной силы. Также отмечено, что при заклинивании колесной пары происходит значительное увеличение тормозного пути, т.е. тормозная сила снижается.

В ходе исследования факторов, влияющих на коэффициент трения колодки о колесо, были выделены следующие: сила нажатия колодки на колесо; материал колодки; форма колодки; степень влажности колодки; износ колодки; начальная продолжительность трения; температура колодки и поверхности катания колеса.

Рассмотрены конструктивные особенности тормозной системы пассажирских поездов и электропоездов, исходя из которых очевидно, что наиболее перспективной тормозной системой для реализации многоступенчатого торможения по критерию управляемости и быстродействия являются электропневматические тормоза (ЭПТ). Также целесообразно применение ЭПТ при осуществлении экстренного торможения ввиду снижения продольно-динамических реакций и исключения истощения тормозной системы поезда.

В третьем разделе предложен новый параметр – коэффициент запаса по нажатию (приведен для чугунных колодок)

$$k_{\text{зап}} = \frac{F_{\text{сц}}}{B_{\text{т}}} = \frac{q_0 \cdot 0,21 \cdot \frac{V + 200}{3V + 200} \cdot \frac{0,1q_0 + 100}{0,4q_0 + 100}}{K \cdot 0,6 \cdot \frac{1,6K + 100}{8K + 100} \cdot \frac{V + 100}{5V + 100}},$$

где $F_{\text{сц}}$ – сила сцепления колеса с рельсом, кН;

K – сила нажатия колодки на колесо, кН;

q_0 – нагрузка колеса на рельс, кН;

B_T – сила торможения, кН;

V – скорость движения поезда, км/ч.

Данный параметр позволяет подбирать оптимальное давление в тормозном цилиндре для наиболее полной реализации потенциала тормозной системы с обеспечением низкой вероятности заклинивания колесной пары.

Построена зависимость коэффициента запаса по нажатию от скорости движения поезда (рисунок 1), а также проведен анализ работы штатной тормозной системы (рисунок 2 а).

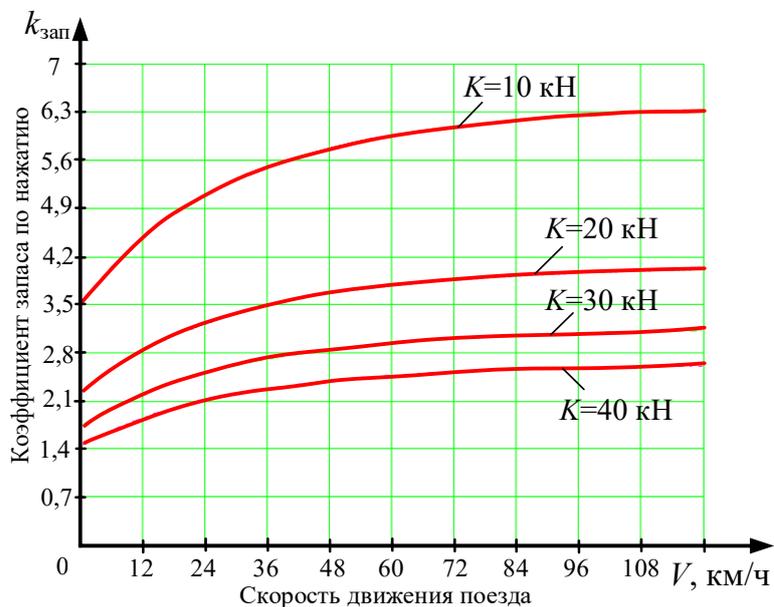


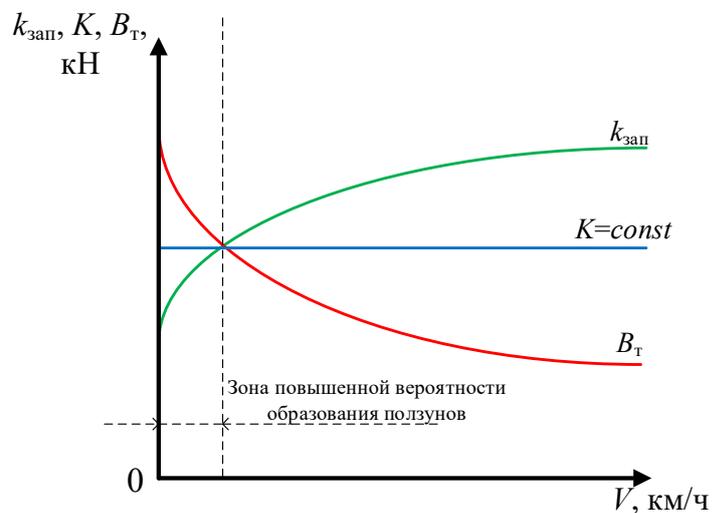
Рисунок 1 – Зависимость коэффициента запаса по нажатию от скорости движения поезда

В ходе исследований выявлено, что эффективность торможения имеет переменный характер в зависимости от скорости. Коэффициент запаса по нажатию минимален при низких скоростях и увеличивается по мере увеличения скорости. При высоких скоростях резко сокращается эффективность фрикционных тормозов и имеется резерв на увеличение нажатия без риска заклинивания колесной пары и образования ползунов. На интервале скорости 0–40 км/ч приращение тормозной эффективности равно по значению

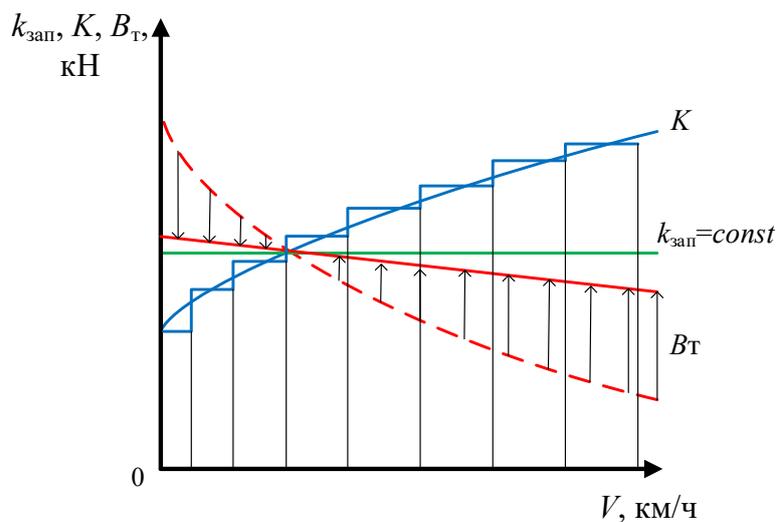
приращению на интервале 40–120 км/ч, следовательно, диапазон скорости 0–40 км/ч является зоной повышенной вероятности возникновения ползунов.

В результате анализа изменения коэффициента запаса по нажатию разработан и предложен принцип адаптивного управления тормозным нажатием, предусматривающий ступенчатый отпуск по мере снижения скорости, обеспечивающий поддержание коэффициента на уровне близком к постоянному (рисунок 2 б).

а)



б)



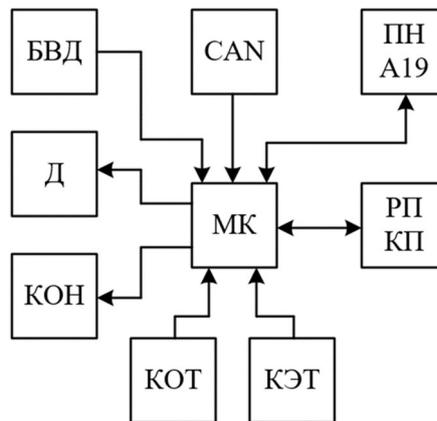
а – штатное торможение; б – адаптивное торможение

Рисунок 2 – Принцип реализации торможения

Разработана структурная схема системы адаптивного торможения, представленная в виде блок-схемы на рисунке 3.

Предложена модернизированная электрическая схема ЭПТ, в которую интегрирован блок адаптивного торможения в разрыв проводов между краном машиниста и блоком управления ЭПТ (преобразователем напряжения А19).

Разработан алгоритм работы системы в режиме служебного и экстренного торможений. Предлагается осуществлять три режима работы системы адаптивного управления тормозным нажатием в процессе служебного торможения: режим информирования; полуавтоматический режим; автоматический режим.



*МК – микроконтроллер; CAN – модуль, подключаемый в CAN шину системы УСАВП;
Д – дисплей; БВД – блок ввода данных; ПН А19 – преобразователь напряжения;
РП КП – рабочий и контрольный провод ЭПТ; КОН – блок контроля несанкционированного отключения электропневматического клапана ключом;
КОТ – кнопка отпуска тормозов; КЭТ – кнопка экстренного торможения*

Рисунок 3 – Блок схема системы адаптивного управления тормозным нажатием

Выполнено математическое моделирование торможения поезда, оснащенного колодочным тормозом (со скорости 100 км/ч) и оснащенного дисковым тормозом (со скорости 200 км/ч). В первом случае исследования показали, что при давлении в тормозном цилиндре (ТЦ) $P=0,2$ МПа тормозной путь составляет 850 м. При $P=0,3$ МПа тормозной путь 640 м, но на конечном этапе торможения существенно возрастает риск развития юза колес, в силу

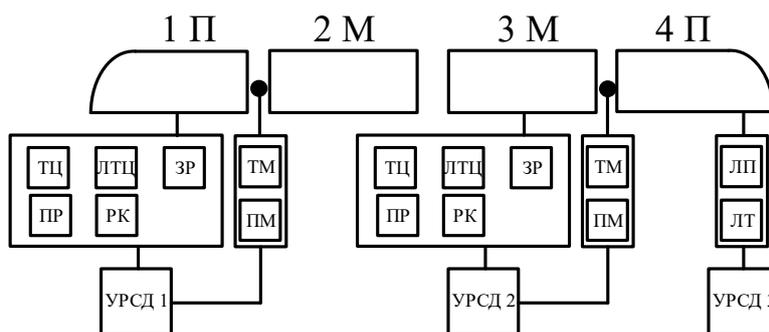
того, что $k_{\text{зап}} \rightarrow 1$. При адаптивном торможении ($k_{\text{зап зад}} = 1.6$) тормозной путь равен 615 м.

В случае поезда с дисковым тормозом, система адаптивного торможения сокращает тормозной путь поезда в меньшей степени, однако выполняет функцию предотвращения ошибки машиниста в процессе торможения, минимизируется вероятность заклинивания колесных пар. В обоих случаях выявлено, что система адаптивного торможения позволяет повысить комфорт пассажиров, что можно проследить по снижению максимального значения замедления.

В четвертом разделе проведены экспериментальные исследования характеристик электропневматических тормозов в переходных режимах на электропоезде ЭД9М. В ходе эксперимента устанавливались датчики давления в точки тормозной системы согласно схемы, приведенной на рисунке 4. В результате выявлены задержки, возникающие между подачей управляющего воздействия краном машиниста и изменением давления в тормозном цилиндре. Задержки учтены в алгоритме адаптивного торможения по их средним значениям.

Кроме того, обнаружена негативная особенность работы электропневматического тормоза, из-за которого ожидаемое свойство «прямодействующий» от исполнительных органов при применении ЭПТ не обеспечивается.

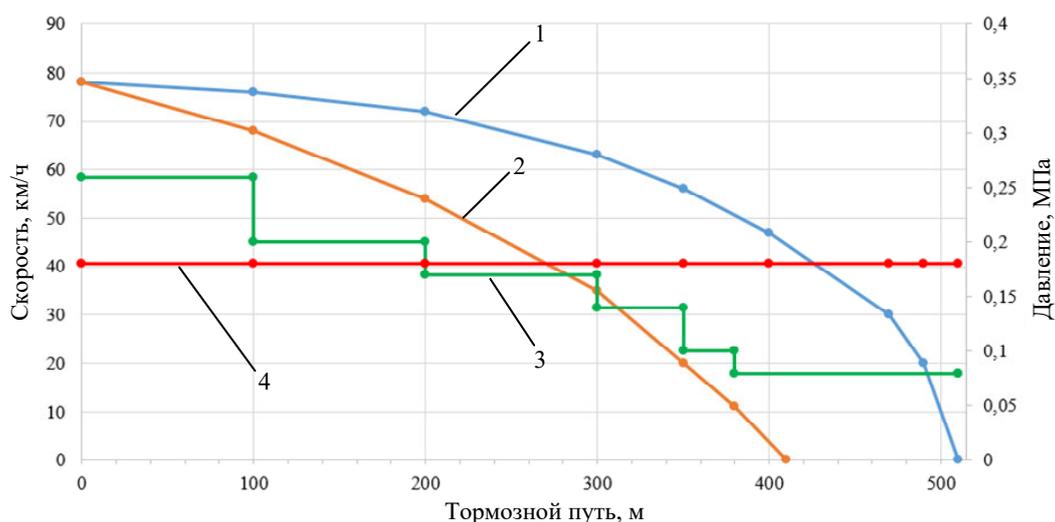
В ходе эксперимента выполнено сравнение скорости наполнения цилиндров сжатым воздухом при экстренном пневматическом и полном служебном электропневматическом торможениях. Скорость наполнения ТЦ в среднем быстрее на 0,25 с при электропневматическом торможении, а также нет необходимости откачки тормозной системы сжатым воздухом. Таким образом, обоснована целесообразность электропневматического экстренного торможения.



П – прицепной вагон; М – моторный вагон; УРСД – устройство регистрации и сохранения данных; ЛП – лампа «Перекрыши»; ЛТ – лампа «Торможение»;
ЛТЦ – ложный тормозной цилиндр; ПР – питательный резервуар; РК – рабочая камера;
ЗР – запасный резервуар; 1, 2, 3, 4 – порядковый номер вагона электропоезда

Рисунок 4 – Схема установки датчиков на электропоезд

Проведен поездной эксперимент по подтверждению эффективности алгоритма адаптивного торможения на электропоезде ЭД9М № 009 на участке следования «Военный Городок – Слюдянка I». В результате применения адаптивного торможения тормозной путь со скорости 78 км/ч сократился на 21 % (рисунок 5), а со скорости 70 км/ч на 16 % по сравнению со штатным торможением.



1 – тормозной путь при штатном торможении; 2 – тормозной путь при адаптивном торможении; 3 – давление в ТЦ при реализации адаптивного торможения; 4 – давление в ТЦ при реализации штатного электропневматического служебного торможения

Рисунок 5 – Штатное и адаптивное торможение со скорости 78 км/ч

В пятом разделе представлено технико-экономическое обоснование внедрения системы адаптивного торможения. Срок окупаемости разработанной системы адаптивного управления тормозным нажатием составил 1,04 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1 В результате анализа существующих математических моделей, представленных в ПТР и научной литературе, предложен параметр для подбора оптимального давления в тормозном цилиндре с целью снижения вероятности образования ползунов и повышения эффективности тормозов поезда – коэффициент запаса по нажатию $k_{\text{зап}}$.

2 Разработан алгоритм адаптивного управления тормозным нажатием, в основе которого лежит поддержание коэффициента запаса по нажатию $k_{\text{зап}}$ на постоянном, заданном машинистом в зависимости от условий эксплуатации, уровне. Адаптивное торможение позволяет осуществлять замедление поезда наиболее эффективно и значительно минимизировать вероятность заклинивания колесных пар пассажирского подвижного состава.

3 Разработана математическая модель и выполнено математическое моделирование торможения поезда, оснащенного как колодочным, так и дисковым тормозом в компьютерной среде Matlab/Simulink. Тормозной путь пассажирского поезда с колодочным тормозом со скорости 100 км/ч при штатном и адаптивном торможении составил 850 м и 615 м соответственно. В случае штатного и адаптивного торможения пассажирского поезда с дисковыми тормозами остановка со скорости 200 км/ч происходит за 84.2 секунды и 80.7 секунд соответственно. Незначительное сокращение тормозного пути по сравнению с пассажирским поездом, оборудованным колодочным тормозом, обуславливается относительно стабильным коэффициентом трения накладки о диск в процессе торможения. При адаптивном торможении значительно снижается вероятность заклинивания колесной пары, ввиду исключения

ошибки машиниста в процессе торможения, связанной с перенаполнением тормозного цилиндра выше допустимых значений.

4 В ходе математического моделирования выявлено, что адаптивное торможение повышает не только тормозную эффективность, но и комфорт пассажиров. Это прослеживается по более плавному нарастанию кривых замедления и тормозной силы, пиковые значения которых уменьшаются и не превышают допустимые. Так, в случае колодочного тормоза при штатном торможении замедление достигает $1,3 \text{ м/с}^2$, при адаптивном не превышает 1 м/с^2 . В случае дискового тормоза пиковое значение замедления при адаптивном торможении также не превышает 1 м/с^2 .

5 Разработан новый способ экстренного торможения, который заключается в его реализации электропневматическими тормозами, т.е. исключается срабатывание пневматических воздухораспределителей усл. № 292 либо усл. № 242. Это позволяет реализовать алгоритм адаптивного торможения, тем самым сократить тормозной путь и снизить вероятность заклинивания колесных пар. Более того, исключается истощение тормозной магистрали, продольно-динамические реакции и электропневматическое экстренное торможение позволяет реализовать повышенное давление на уровне $\approx 0,4 \text{ МПа}$ в тормозных цилиндрах электропоезда, что возможно, поскольку электропневматические воздухораспределители усл. № 305 являются прямодействующими. Также, благодаря тому, что тормозная система не истощается и продольно-динамические реакции минимальны, становится возможным добавить функцию отпуска тормозов, т.е. прервать экстренное торможение.

6 Проведен эксперимент на электропоезде ЭД9М по исследованию характеристик ЭПТ в переходных режимах. По результатам экспериментальных исследований, средняя величина задержки времени с момента перевода крана машиниста с положения IV в положение II составила $0,7\text{--}0,9 \text{ с}$, при переводе со II в IV положение, задержка составила $0,25\text{--}0,35 \text{ с}$.

Параметры задержки срабатывания для процесса торможения несколько отличаются от параметров отпуска, так среднее время задержки при переходе ЭПТ из режима «Зарядка и отпуск» или «Перекрыша» в режим «Торможение» составило 0,7 с. При этом задержка при переходе из режима «Торможение» в режим «Перекрыша» составила от 0,3 до 1 секунды, в среднем 0,77 с. В ходе эксперимента выполнялось в том числе экстренное торможение. При включенных электропневматических тормозах во время реализации экстренного торможения срабатывают воздухораспределители усл. № 292, то есть осуществляется пневматическое торможение, которое вызывает истощение тормозной магистрали и продольно-динамические реакции в поезде. После остановки поезда машинист вынужден откачивать тормозную систему, восстанавливая давление в ней. Этот процесс в случае электропоезда, согласно полученным данным, занимает не менее 16 секунд, что относительно быстро, благодаря конструктивным особенностям электропоезда и небольшой его длине. Однако, в случае пассажирского поезда, согласно статистике, этот процесс может занимать более 3 минут. Также в ходе эксперимента выполнено сравнение скорости наполнения ТЦ сжатым воздухом при экстренном пневматическом и полном служебном электропневматическом торможениях. Скорость наполнения ТЦ быстрее на 0,2 с при электропневматическом полном служебном торможении, что в этой связи полностью обуславливает целесообразность применения электропневматического экстренного торможения.

7 В ходе экспериментальных исследований была выявлена негативная особенность работы электропневматического тормоза. Максимальное давление в ТЦ при переводе ручки крана машиниста в положение Vэ составляет 0,34 МПа, в то время как при замыкании контактов контроллера крана машиниста, после уравнивания давления в ЗР и ТЦ, давление в ТЦ начинает расти медленным темпом вплоть до уровня 0,44 МПа. В данном случае давление в ЗР стремится до уровня ТМ посредством калиброванных отверстий малого

диаметра. Ограничение максимального давления в ТЦ при переводе ручки крана машиниста вызвано тем, что положения V_a и $V_э$ являются комбинированными. Вследствие этого происходит снижение давления в ТМ (в среднем с уровня 0,47 МПа до $\approx 0,44$ МПа), чего достаточно для срабатывания воздухораспределителей усл. № 292 (либо усл. № 242), которые являются непрямодействующими, истощимыми, т.е. давление в ТЦ ограничено давлением в ЗР и в последнем давление не восполняется. Таким образом, комбинированные положения V_a и $V_э$ можно считать конструктивным несовершенством крана машиниста, из-за которого ожидаемое свойство от исполнительных органов «прямодействующий» при применении ЭПТ не обеспечивается.

8 В ходе диссертационного исследования был проведен эксперимент на электропоезде ЭД9М на участке «Военный Городок – Слюдянка I». Машинистом осуществлялись ряд штатных и адаптивных торможений в ручном режиме со скорости 78 км/ч и 70 км/ч на прямом участке пути с нулевым уклоном. В результате применения адаптивного торможения тормозной путь со скорости 78 км/ч сократился на 21 %, а со скорости 70 км/ч тормозной путь сократился на 16 % по сравнению со штатным торможением.

9 Выполнен расчет экономического эффекта от внедрения разработанной системы для Восточно-Сибирской железной дороги. Эффектообразующая складывалась от минимизации ущерба при столкновении и уменьшения количества ДТП, от уменьшения случаев образования ползунов на колесных парах и от повышения участковой скорости. Годовой экономический эффект составит 43,4 млн. руб., при капитальных вложениях 45,2 млн. руб., срок окупаемости 1,04 г.

10 Полученные зависимости давления в тормозном цилиндре от заданного значения коэффициента запаса по нажатию требуют уточнения для конкретного типа пассажирской подвижной единицы, параметров тормозной системы, что является достаточно трудоемким процессом. В связи с этим

перспективой дальнейших исследований по данной тематике является построение системы управления с алгоритмом текущей параметрической идентификации, неявной эталонной моделью. Также перспективным будет разработка устройства для замера коэффициента сцепления колеса с рельсом на первой по ходу движения пассажирской подвижной единице. Тогда станет возможным комбинация программной и текущей адаптации тормозного нажатия. Таким образом, при существенном отклонении коэффициента сцепления колеса с рельсом от расчетного значения система скорректирует алгоритм управления торможением под текущую ситуацию.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В рецензируемых научных изданиях:

1 **Иванов, П. Ю.** Алгоритм адаптивного управления тормозным нажатием пассажирского подвижного состава / П. Ю. Иванов, Е. Ю. Дульский, А. А. Корсун, Д. В. Осипов // Научный информационный сборник «Транспорт: наука, техника, управление». – 2022. – № 5. – С. 60–64. – Текст : непосредственный.

2 **Иванов, П. Ю.** Теоретические исследования особенностей моделирования процесса фрикционного торможения поездов / П. Ю. Иванов, Е. Ю. Дульский, А. А. Хамнаева, А. А. Корсун // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2020. – № 4 (68). – С. 150–158. – DOI: 10.26731/1813-9108.2020.4(68).150-158. – Текст : непосредственный.

3 **Исследование температуры тормозных колодок с разной степенью износа в процессе фрикционного торможения** / П. Ю. Иванов, А. М. Худоногов, Е. Ю. Дульский [и др.] // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. – 2020. – № 3 (47). – С. 27–34. – Текст : непосредственный.

4 **Корсун, А. А.** Анализ факторов, влияющих на коэффициент трения тормозной колодки подвижного состава / А. А. Корсун, П. Ю. Иванов, Д. В.

Осипов, Д. А. Тихонов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2022. – № 2 (74). – С. 91–100. – DOI: 10.26731/1813-9108.2022.2(74).91-100. – Текст : непосредственный.

5 **Корсун, А. А.** Исследование газодинамических процессов в электропневматических тормозах на электропоезде ЭД9М / А. А. Корсун // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2023. – № 4 (80). – С. 123–133. – DOI 10.26731/1813-9108.2023.4(80).123-133. – Текст : непосредственный.

6 **Корсун, А. А.** Математическое моделирование адаптивного торможения высокоскоростного поезда с дисковым тормозом / А. А. Корсун // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. – 2024. – № 2 (62). – С. 102–110. – DOI 10.20291/2079-0392-2024-2-102-110. – Текст : непосредственный.

7 **Математическая модель работы тормозной системы поезда в процессе торможения с учетом динамики коэффициента трения колодки о колесо и сцепления с рельсом в компьютерной среде** / А. А. Корсун, П. Ю. Иванов, С. П. Круглов [и др.] // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2022. – № 2 (86). – С. 104–113. – DOI: 10.46973/0201-727X_2022_2_104. – Текст : непосредственный.

8 **Повышение эффективности работы тормозной системы пассажирских поездов** / П. Ю. Иванов, А. И. Романовский, А. А. Хамнаева [и др.] // Научный информационный сборник «Транспорт: наука, техника, управление». – 2020. – № 3. – С. 39–43. – DOI: 10.36535/0236-1914-2020-03-6. – Текст : непосредственный.

9 **Круглов, С. П.** Математическое обоснование эффективности торможения с постоянным значением коэффициента запаса по нажатию / С. П. Круглов, П. Ю. Иванов, А. А. Корсун // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2023. – № 3. – С. 159–168. – DOI: 10.46973/0201-727X_2023_3_159. – Текст : непосредственный.

В изданиях, входящих в международную систему цитирования Scopus:

10 Analysis of the factors influencing the friction coefficient of the train brake pad / P. Yu. Ivanov, E. Yu. Dulskiy, S. P. Kruglov [et al.] // Proceedings of the IV international scientific conference on advanced technologies in aerospace, mechanical and automation engineering : (MIST: Aerospace-IV 2021, Krasnoyarsk, 10–11 December 2021). – Krasnoyarsk : AIP Conference Proceedings, 2023. – Vol. 2700. – № 1. – Art. 020036. – DOI: 10.1063/5.0125594. – Текст : непосредственный.

11 Automatic target adjusting braking of a shunting stock with an adaptive control law / S. P. Kruglov, S. V. Kovyrshin, P. Yu. Ivanov [et al.] // Journal of Physics : Conference Series, Krasnoyarsk, Russia, 24 September 2021. – Krasnoyarsk : IOP Publishing Ltd. – 2021. – Vol. 2094. – Art. 52069. – DOI: 10.1088/1742-6596/2094/5/052069. – Текст : непосредственный.

12 Ivanov, P. Study of the influence of the brake shoe temperature and wheel tread on braking effectiveness / P. Ivanov, A. Khudonogov, E. Dulskiy [et al.] // Journal of Physics : Conference Series, Voronezh, 10–13 December 2019. – Voronezh, 2020. – Art. 012086. – DOI: 10.1088/1742-6596/1614/1/012086. – Текст : непосредственный.

13 The adaptive brake pressure control system for passenger trains / P. Yu. Ivanov, E. Yu. Dulskiy, A. A. Khamnaeva [et al.] // International scientific conference “International transport scientific innovation”: ITSI-2021, Moscow, 29 June 2021 / AIP Conference Proceedings. – 2023. – Vol. 2476. – № 1. – DOI: 10.1063/5.0103053. – Текст : непосредственный.

14 The method of determining the coefficient of friction in the “Pad-wheel” system / P. Yu. Ivanov, E. Yu. Dulskiy, S. P. Kruglov [et al.] // Proceedings of the IV international scientific conference on advanced technologies in aerospace, mechanical and automation engineering: (MIST: Aerospace-IV 2021), Krasnoyarsk, 10–11 December 2021. – Krasnoyarsk : AIP Conference Proceedings, 2023. – Vol.

2700. – № 1. – Art. 020038. – DOI: 10.1063/5.0125593. – Текст : непосредственный.

В других изданиях и материалах конференции:

15 **Дульский, Е. Ю.** Существующие способы управления тормозным нажатием пассажирского подвижного состава / Е. Ю. Дульский, А. А. Корсун, Д. О. Емельянов // Научные междисциплинарные исследования : сборник статей XV Международной научно-практической конференции, (Саратов, 10 июня 2021 г.). – Москва : Добросвет, 2021. – С. 20–27. – Текст : непосредственный.

16 **Зарубежный опыт повышения эффективности пневматических тормозов** / П. Ю. Иванов, Е. Ю. Дульский, Н. И. Мануилов [и др.] // Локомотив. – 2020. – № 11 (767). – С. 36–37. – Текст : непосредственный.

17 **Иванов, П. Ю.** Существующие способы управления тормозным нажатием с повышенной эффективностью / П. Ю. Иванов, А. А. Корсун, Д. О. Емельянов // Научные междисциплинарные исследования : сборник статей XV Международной научно-практической конференции, (Саратов, 10 июня 2021 г.). – Москва : Добросвет, 2021. – С. 28–36. – Текст : непосредственный.

КОРСУН Антон Александрович

**УЛУЧШЕНИЕ ТОРМОЗНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПАССАЖИРСКОГО
ПОДВИЖНОГО СОСТАВА ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ**

2.9.3. Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация
(технические науки)

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Подписано в печать «__»_____ 2024 г. Формат бумаги 60x90/16

Объем 1.5 усл.п.л Тираж 80 экз. Заказ №_____

664074, Россия, г. Иркутск, ул. Чернышевского, д. 15