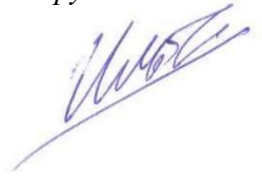


На правах рукописи



Харисов Ильдар Ришатович

**Адаптивная система управления тяговым электроприводом
магистрального электровоза с переменной структурой**

2.4.2. Электротехнические комплексы и системы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Екатеринбург – 2025

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Уральский государственный горный университет».

Научный руководитель: **Карякин Александр Ливиевич**, доктор технических наук, ст. науч. сотр.

Официальные оппоненты: **Захаров Алексей Вадимович**, доктор технических наук, технический директор – руководитель направления расчетов ООО "Инжиниринговый центр "Русэлпром", г. Владимир.

Колпахчян Павел Григорьевич, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Электрическая тяга» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I», г. Санкт-Петербург.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Национальный исследовательский университет "МЭИ", г. Москва.

Защита состоится «19» декабря 2025 г. в 15 час. 30 мин. на заседании диссертационного совета 24.2.324.05 на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова» по адресу: 455000, г. Магнитогорск, пр. Ленина 38, ауд. 233.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова» и на официальном сайте <http://magtu.ru/>.

Автореферат разослан «___» _____ 2025 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
24.2.324.05
канд. техн. наук, доцент



Одинцов Константин
Эдуардович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Железнодорожные грузоперевозки являются важной составляющей в производственных процессах страны. На электрифицированных участках железных дорог для перевозки используются магистральные электровозы. Особенностью эксплуатации электровозов являются часто изменяющиеся условия сцепления, связанные, в том числе, с изменениями погодных условий, наличием обильной растительности в зоне головки рельса, наличием масляных пятен на рельсе. Причем, если масляные пятна снижают величину коэффициента сцепления до малой величины, но при этом оказывают локальное влияние на изменение силы тяги электровоза, то выпадение осадков является глобальным фактором, влияющим на величину силы тяги электровоза на участке эксплуатации. Например, встречаются случаи, когда при выпадении осадков электровоз не может въехать в подъем по причине боксований колесных пар и останавливается. Боксованием называют режим избыточного скольжения колесной пары, при котором точка на кривой сцепления смещается вправо относительно точки максимального скольжения.

Эффективная реализация силы тяги по текущим условиям сцепления обеспечивает оптимальные кинематические параметры движения электровоза, что приводит к минимизации финансовых издержек и своевременной доставки грузов. На реализацию силы тяги в первую очередь влияет электрический привод магистрального электровоза, в том числе входящие в его состав системы управления. Системы управления магистральным электровозом включают: систему управления верхнего уровня, отвечающую за взаимодействие машиниста с остальными системами электровоза; систему управления электроприводом; систему управления тяговым усилием.

Система управления тяговым усилием предназначена для реализации силы тяги по текущим условиям сцепления. Основной задачей системы является поддержание эффективного скольжения колесной пары в случае возникновения боксований колёсных пар.

В обычных условиях эксплуатации тяговое усилие задает машинист на основании известных значений скоростей движения на участке пути. Однако при ухудшении условий сцепления машинист не может поддерживать эффективное скольжение и, следовательно, необходимое тяговое усилие. Поэтому необходимо автоматически регулировать тяговое усилие для поддержания оптимальной скорости скольжения колесных пар, обеспечивающей максимально возможный коэффициент сцепления по текущим условиям. Таким образом, актуальной является разработка системы автоматического управления тяговым электроприводом с переменной структурой, имеющей два автоматически переключаемых канала управления.

Целью диссертационной работы является реализация оптимальных кинематических режимов движения магистрального электровоза с асинхронным тяговым приводом в условиях изменения сцепления колесной пары и рельса, по критерию максимального ускорения состава, путем применения

новой адаптивной системы управления тяговым приводом с переменной структурой.

Задачи исследования:

- 1) исследование условий сцепления в зоне контакта колеса и рельса;
- 2) анализ структур тягового привода на современном подвижном составе;
- 3) анализ и классификация алгоритмов управления тяговым приводом подвижного состава;
- 4) математическое моделирование тягового электропривода со структурной схемой «преобразователь частоты – асинхронный двигатель»;
- 5) разработка структуры и закона управления тяговым электроприводом в режиме избыточного скольжения;
- 6) разработка компьютерной модели тягового электропривода магистрального электровоза в режимах с избыточным скольжением и без избыточного скольжения;
- 7) моделирование адаптивной системы управления тяговым усилием с переменной структурой в режимах избыточного скольжения и без избыточного скольжения на компьютерной модели;
- 8) разработка стенда полунатурного моделирования и моделирование адаптивной системы управления тяговым усилием с переменной структурой в режимах с избыточным скольжением и без избыточного скольжения;
- 9) проведение экспериментальных исследований на объекте в условиях промышленной эксплуатации с весом поезда не менее двух тысяч тонн.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Предложена классификация способов управления тяговым приводом в режимах предельных усилий, отличающаяся тем, что классификационными признаками являются функции, выполняемые системой управления тяговым усилием, что позволяет определять перспективные направления исследований в области тягового электропривода.

2. Разработан метод поиска оптимальной скорости скольжения колесной пары в режиме избыточного скольжения, отличающийся тем, что скорость скольжения колесной пары определяют по таблице зависимости скорости скольжения от момента сцепления, составленной по результатам испытаний при выпуске электровоза с производства.

3. Предложена комплексная математическая модель тягового электропривода позволяющая исследовать системы управления тяговым усилием в соответствии с классификацией систем управления тяговым усилием, отличающаяся наличием подсистемы определения эффективности скольжения колесной пары и блока, имитирующего задержку сигнала при передаче данных.

4. Разработан адаптивный пропорционально-интегральный регулятор, реализующий закон управления тяговым моментом электродвигателя, отличающийся тем, что на основании сигнала ошибки вычисляют корректирующий коэффициент пропорциональной части передаточной функции регулятора;

5. Предложен критерий оценки эффективности работы автоматической системы управления тяговым усилием в режиме избыточного скольжения при

моделировании системы управления тяговым усилием на компьютерной модели.

Для решения поставленных в диссертационной работе задач **использованы методы** теории автоматического управления, теории электропривода, теории электрической тяги и имитационного моделирования. Компьютерная математическая модель была разработана в пакете Matlab/Simulink. Экспериментальные исследования проведены на стенде полунатурного моделирования и непосредственно на объекте – электровозе ЗЭС8 в условиях промышленной эксплуатации с весами поезда более двух тысяч тонн.

Положения, выносимые на защиту:

1. Структурная схема и принцип работы адаптивной системы управления тяговым усилием с переменной структурой магистрального электровоза;
2. Нелинейный закон управления, реализуемый с помощью адаптивного пропорционально-интегрального регулятора;
3. Метод определения оптимальной скорости скольжения в режиме избыточного скольжения;
4. Методика косвенного измерения момента и коэффициента сцепления для применения в адаптивной системе управления тяговым электроприводом;
5. Результаты математического моделирования разработанной адаптивной системы управления тяговым усилием с переменной структурой магистрального электровоза;
6. Методика и результаты экспериментального исследования адаптивной системы управления тяговым усилием с переменной структурой магистрального электровоза на стенде полунатурного моделирования и в условиях промышленной эксплуатации.

Основные практические результаты работы заключаются в следующем:

1. Применение адаптивного пропорционально-интегрального регулятора позволяет компенсировать возмущающие воздействия от пути и механической части магистрального электровоза.
2. Применение метода поиска оптимальной скорости скольжения колесной пары в режиме избыточного скольжения позволяет определять текущее задание по скорости скольжения колесной пары при изменении коэффициента сцепления.
3. Предложена структура полунатурного стенда для проведения экспериментальных исследований законов управления тяговым электроприводом, в состав которого входят: одноплатные ЭВМ и персональный компьютер, связь между которыми осуществляется по интерфейсам Ethernet и CAN. Стенд позволяет проводить испытания в реальном масштабе времени и проводить исследования тягового привода в условиях изменения коэффициента сцепления.
4. Применение разработанной адаптивной системы тяговым приводом, позволяет определять и реализовывать эффективное скольжение

колесной пары и как следствие обеспечивать оптимальные кинематические режимы движения магистрального электровоза с асинхронным тяговым приводом.

Достоверность полученных результатов обеспечивается обоснованностью используемых теоретических зависимостей и принятых допущений, применением известных математических методов; подтверждается качественным и количественным согласованием результатов теоретических исследований с экспериментальными данными, полученными, в том числе, в промышленной эксплуатации на магистральных путях ОАО «РЖД» и внутренних путях откатки железной руды на железорудных карьерах.

Апробация работы. Результаты работы обсуждались и получили одобрение на международной научно-практической конференции «Уральская горная школа – регионам» в 2022 году и 2024 году, на семинаре «Актуальные вопросы электропривода – 95 лет кафедре АЭП МЭИ» в 2025 году и на XXII международном симпозиуме «Eltrans — 2025».

Реализация и внедрение результатов работы. Изложенные в диссертации методы, алгоритмы, программы, технические решения для адаптивного управления тяговым приводом магистрального электровоза с переменной структурой использованы в новой промышленной серии магистральных грузовых электровозов постоянного тока 3ЭС8. Магистральные электровозы серии 3ЭС8 прошли государственные испытания и эксплуатируются на железных дорогах Российской Федерации с 2024 года, что подтверждено актом, представленным в приложении к диссертации.

Публикации. Результаты опубликованы в 5 печатных работах, включая 3 статьи в научных журналах, входящих в перечень журналов ВАК России и/или Scopus, 2 работы в трудах научно-практических конференций. Получены 10 патентов, из которых 7 - изобретения, а 3 - полезные модели.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти разделов, заключения и списка литературы. Работа изложена на 166 страницах, в том числе: 102 рисунка, 23 таблицы и одно приложение. Список литературы содержит 119 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цели и задачи работы, её научная новизна, теоретическая и практическая значимость, приведены сведения о структуре диссертации.

В **первой главе** рассмотрен процесс сцепления в точке «колесная пара – рельс», приведены характеристики коэффициента сцепления и износа колёсной пары при ее скольжении. Представлена типовая тяговая характеристика магистрального электровоза, на основании ее формы приведены следующие требования к тяговому приводу подвижного состава: рабочие характеристики электропривода должны перекрывать всю область тяговой характеристики; система автоматического регулирования должна обеспечить работу в длительном режиме в любой точке тяговой области; система автоматического

регулирования должна обеспечить требуемую жесткость характеристики в случаях наличия боксования.

Приведена структурная схема специализированной системы автоматического управления тяговым приводом магистрального электровоза (рис. 1). Объектом управления является асинхронный тяговый электродвигатель и механическая часть электропривода, особенности которых рассмотрены в работе.



Рисунок 1 – Структурная схема системы автоматического управления тяговым приводом

На рис. 1 обозначено: БЗМ– блок задания момента; ШИМ– широтно-импульсная модуляция; АИН– автономный инвертор напряжения; ОУ– объект управления.

Рассмотрены и проанализированы системы управления тяговым двигателем. На основании анализа, установлено, что векторная система управления является наиболее предпочтительной для применения.

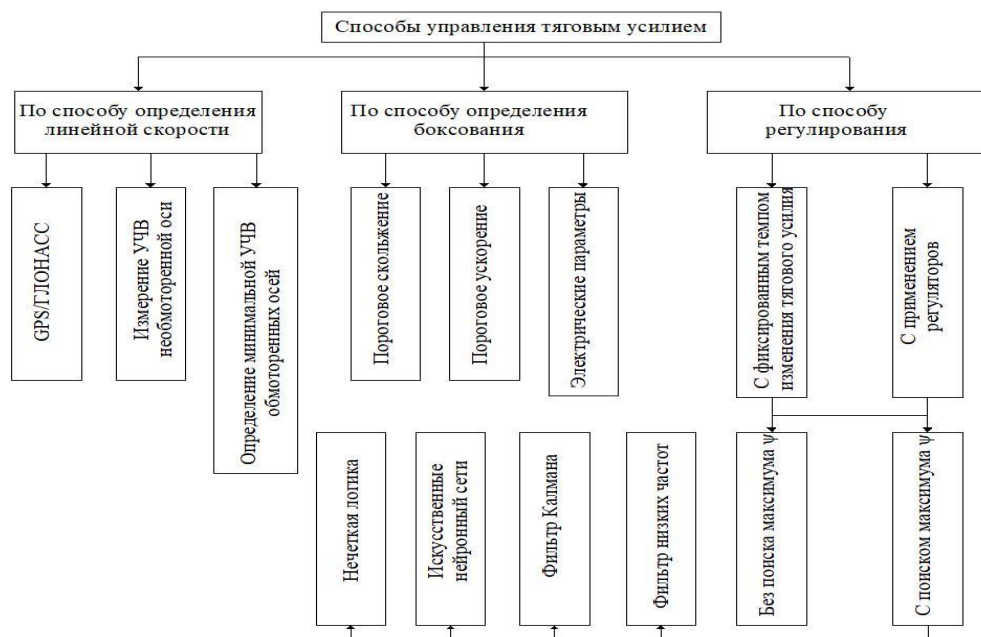


Рисунок 2 – Классификация способов управления тяговым приводом в режимах предельных усилий

Автором выполнена детальная классификация систем управления тяговым усилием по критерию функционирования в режимах предельных усилий (рис. 2).

Во **второй** главе приведено математическое описание асинхронного тягового двигателя. Построена математическая модель асинхронного двигателя, согласно известной структуре (рис. 3). Особенностью модели является векторно-матричная форма описания. Модель является более простой по сравнению с известными при одинаковой погрешности.

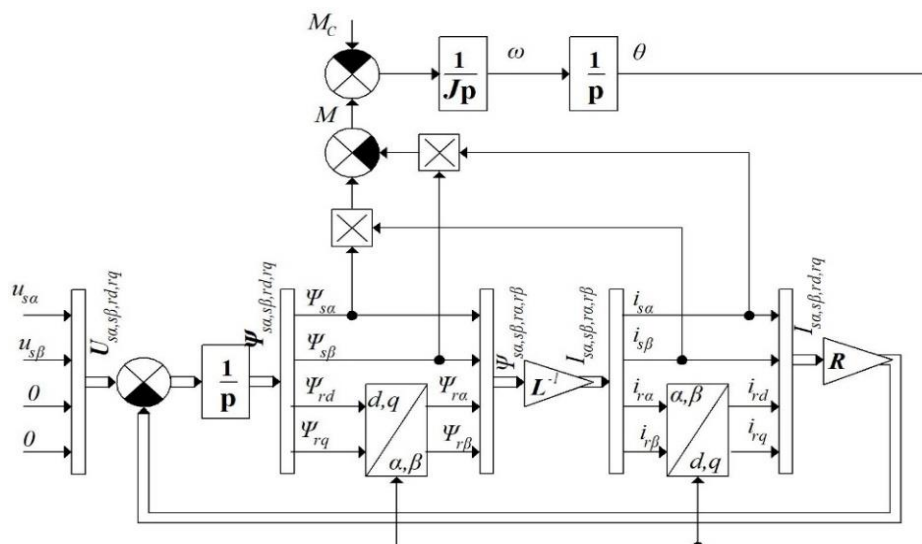


Рисунок 3 – Структурная схема асинхронного тягового двигателя

Для оценки адекватности модели асинхронного двигателя были проведены измерения тока электродвигателя при проведении стендовых испытаний двигателя по системе двигатель – генератор, с использованием способов регулирования питающего напряжения, с которыми двигатели будут эксплуатироваться на электровозе. Погрешность действующего значения фазных токов двигателя, полученных на модели, по отношению к данным стендовых испытаний двигателя, при моменте сил сопротивления 8200 Н·м, без учета погрешности в измерениях, составила $\delta I_{\phi} = 4,2\%$, с учетом погрешности в измерениях $\delta I_{\phi} = 4,2 \pm (0,4 + 0,3) = (4,2 \pm 0,7)\%$.

Построена модель векторного управления асинхронным тяговым двигателем с моделью автономного инвертора напряжения с широтно-импульсно модуляцией согласно минимаксному алгоритму (рис. 4).

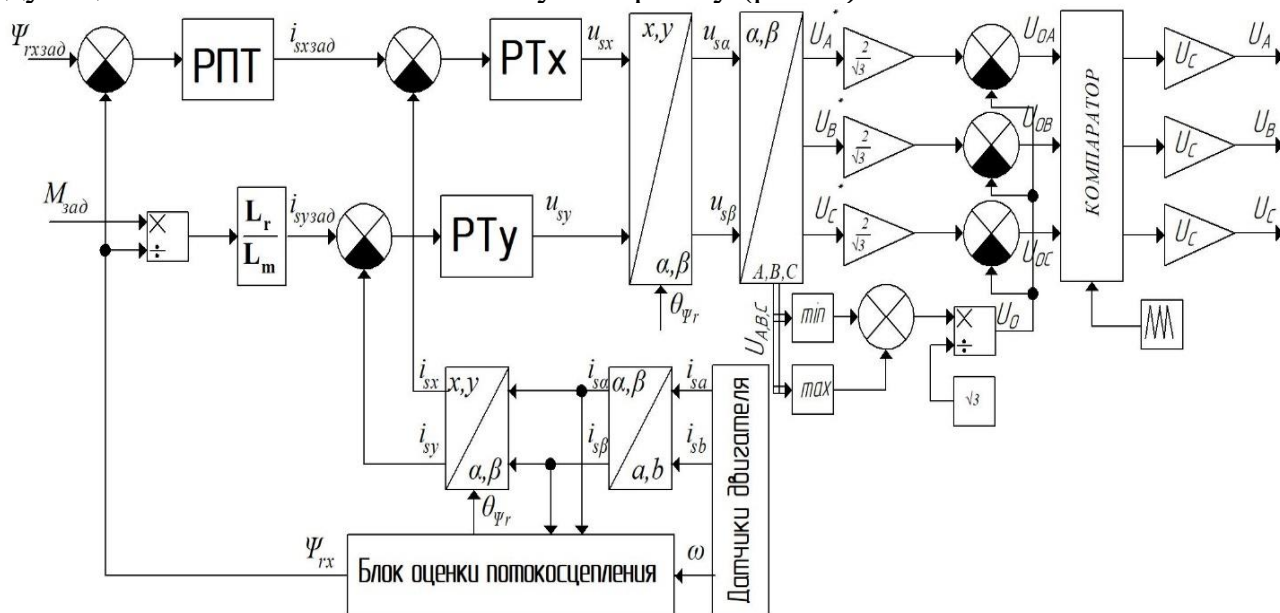


Рисунок 4 – Структура векторного управления и ШИМ

Был проведен синтез математических моделей асинхронного тягового двигателя, системы векторного управления и модели инвертора по структуре

«преобразователь частоты – асинхронный двигатель» (далее – модель привода). Проведено численное моделирование модели привода. Верификация проведена путем сравнения фазных токов статора, полученных в результате численного эксперимента, и осциллограмм промышленной эксплуатации электровоза ЗЭС8. Ошибка модели не превысила 5,8% при установившемся моменте асинхронного тягового двигателя.

С целью уменьшения времени моделирования был проведен численный эксперимент по замене электрического привода со структурой «преобразователь частоты – асинхронный двигатель» апериодическим звеном первого порядка. Эксперимент заключался в сравнении значения момента асинхронного тягового двигателя, полученного на модели привода, и момента на выходе апериодического звена первого порядка, являющимся аналогом модели электрического привода. Анализ результатов эксперимента показал, что в установившемся режиме работы электрического привода среднеквадратичная ошибка между детальной и упрощённой моделями не превышала 10 Н·м, а в частном случае – боксовании, или переходном процессе, не превышала 590 Н·м, при этом ошибка относительно номинального момента не превышала 8%. В силу допустимой величины ошибки, равной 8% и находящейся в пределах точности инженерных расчетов, определено, что замена модели привода на апериодическое звено первого порядка целесообразна.

Был произведен расчет механической части тягового электропривода согласно структурной схеме (рис. 5).

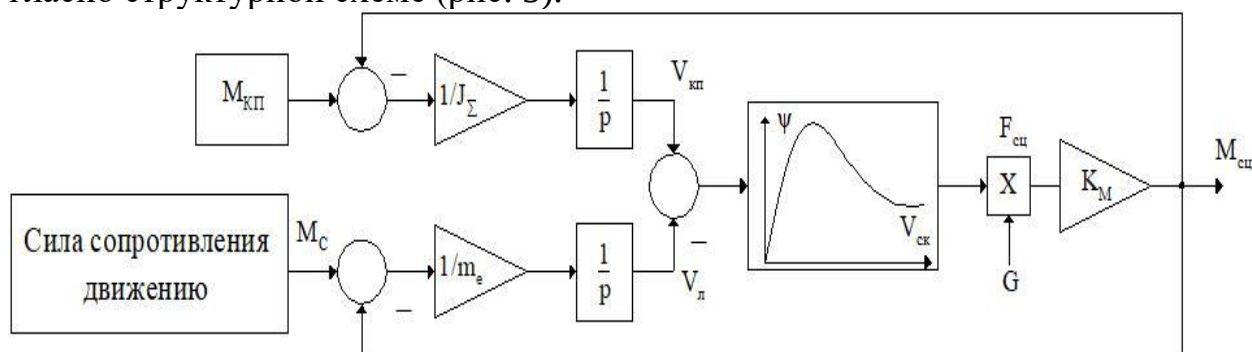


Рисунок 5 – Структурная схема математической модели механической части тягового электропривода

Также представлено выражение для косвенного расчета момента сцепления $\hat{M}_{сц}$. Для проверки данного выражения были проведены численный и натурные эксперименты, которые качественно подтвердили верность расчетов.

В третьей главе на основе анализа определена структурная схема тягового привода магистрального электровоза (рис. 6) и на основании структуры определены входные и выходные переменные системы управления тяговым электроприводом электровоза с поосным регулированием силы тяги. На основании входных и выходных переменных автором предложена следующая структура системы управления с переменной структурой (рис. 7).

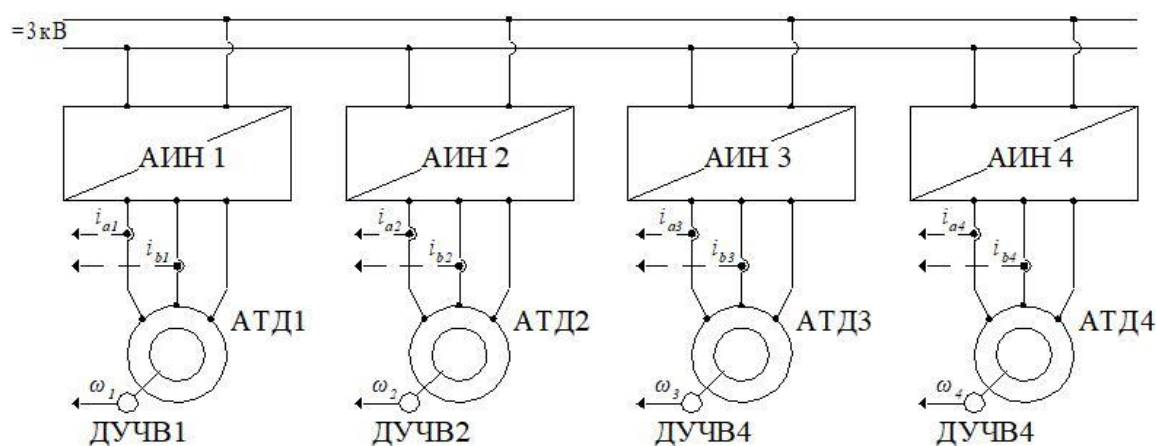


Рисунок 6 – структурная схема тягового привода электровоза

На рисунке 6 обозначено: АИН 1...4 – автономный инвертор напряжения, АТД 1...4 – асинхронный тяговый двигатель, ДУЧВ 1...4 – датчик угловой частоты вращения вала двигателя.

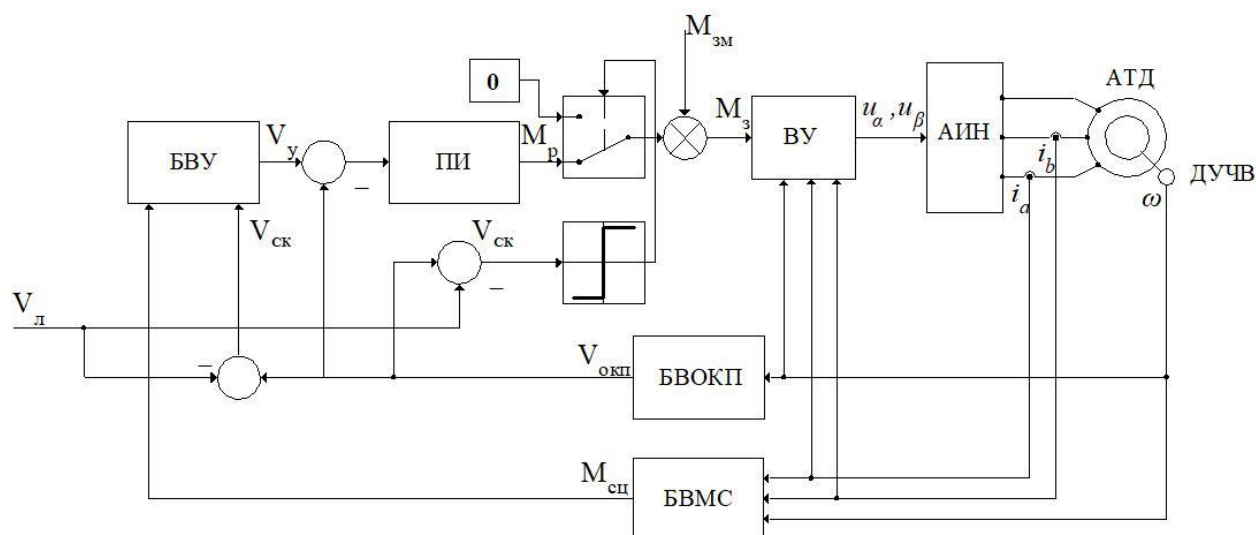


Рисунок 7 – Структурная схема системы управления тяговым усилием с переменной структурой

На рис. 7 обозначено: $M_{зм}$ – момент задания машиниста, V_y – скорость уставки задания, M_z – момент задания, БВУ – блок вычисления уставки, ПИ – блок адаптивного пропорционально-интегрального регулятора, БВОКП – блок вычисления окружной скорости колесной пары, БВМС – блок вычисления момента сцепления.

Приведено математическое описание структуры (рис. 7). Было отмечено, что применение в структуре (рис. 7) классического ПИ-регулятора приводит к колебаниям момента задания и зашумленности его выходного сигнала по следующим причинам: волнообразный износ рельс; неровности пути; проезды стыков; перемещение тележки относительно кузова; вращения двигателя относительно вала двигателя; задержкой передачи сигнала задания и сигнала обратной связи. Блок переключения контуров задания момента и автоматического регулирования автоматически определяет наличие боксования и включает контур автоматического регулирования тягового усилия.

Для устранения выявленных недостатков классического ПИ-регулятора, автором предложено использовать ПИ-регулятор с корректируемым пропорциональным коэффициентом, или адаптивный ПИ-регулятор (рис. 8).

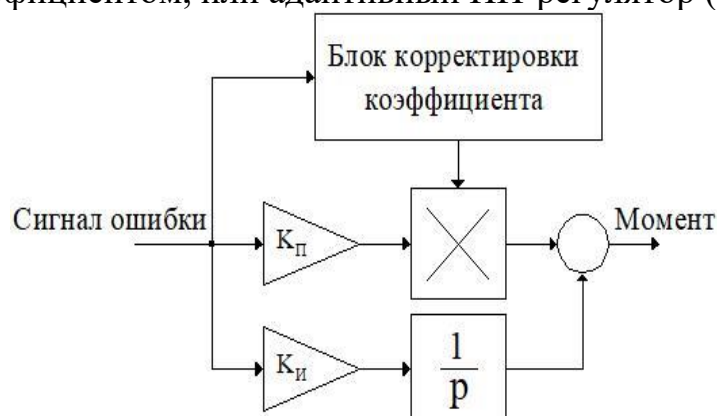


Рисунок 8 – Структура ПИ-регулятора с корректируемым коэффициентом пропорциональной части

Структура блока корректировки коэффициента приведена на (рис. 9).

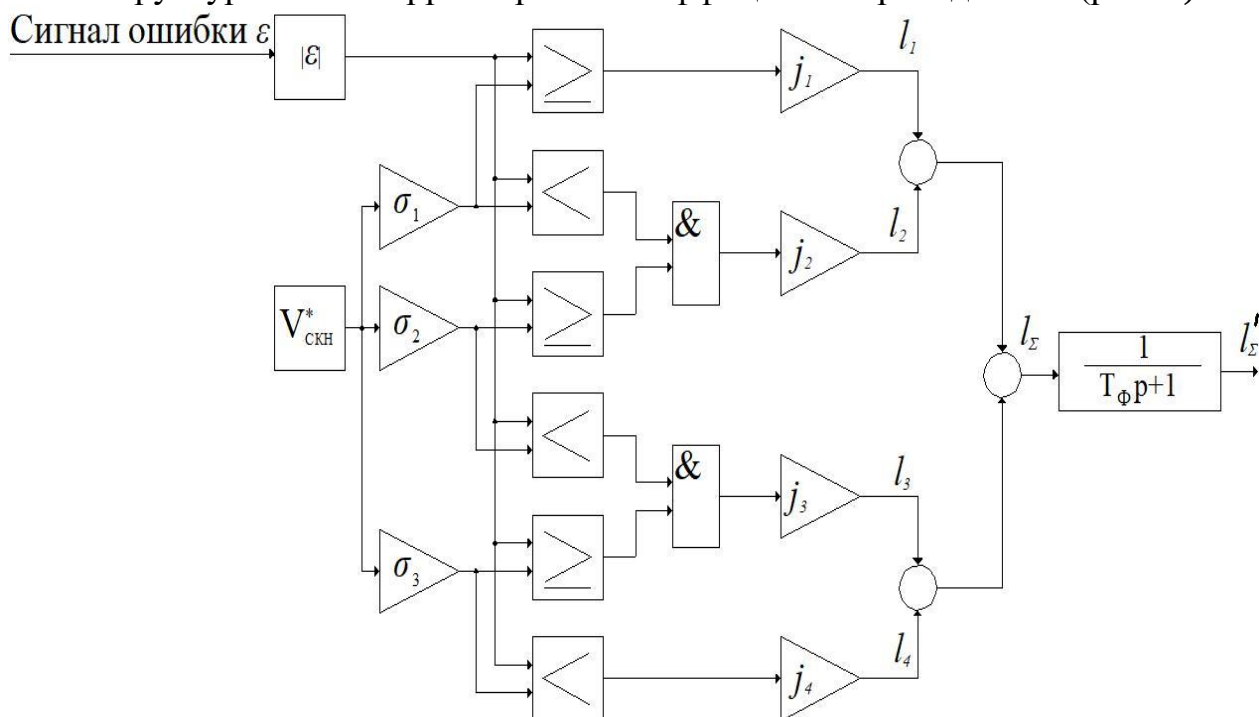


Рисунок 9 – Структура блока корректировки коэффициентов

На рис. 9 обозначено: $V_{\text{СКН}}^*$ – номинальное скольжение колесной пары; $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ – позонные уставки; j_1, j_2, j_3, j_4 – корректирующие коэффициенты.

Математически блок описывается следующим образом:

$$\frac{dl'_\Sigma}{dt} = (k \cdot x(t) - l_\Sigma(t)) / T. \quad (1)$$

$$l_\Sigma = l_1 + l_2 + l_3 + l_4, \quad (2)$$

$$\begin{aligned}
\text{где } l_1 &= j_1 \cdot \begin{cases} 0, \text{если } |\varepsilon| < V_{скн}^* \cdot \sigma_1; \\ 1, \text{если } |\varepsilon| \geq V_{скн}^* \cdot \sigma_1; \end{cases} \\
l_2 &= j_2 \cdot \begin{cases} 0, \text{если } (|\varepsilon| > V_{скн}^* \cdot \sigma_1) \text{ и } (|\varepsilon| \geq V_{скн}^* \cdot \sigma_2); \\ 0, \text{если } (|\varepsilon| < V_{скн}^* \cdot \sigma_1) \text{ и } (|\varepsilon| \leq V_{скн}^* \cdot \sigma_2); \\ 1, \text{если } (|\varepsilon| < V_{скн}^* \cdot \sigma_1) \text{ и } (|\varepsilon| \geq V_{скн}^* \cdot \sigma_2); \end{cases} \\
l_3 &= j_3 \cdot \begin{cases} 0, \text{если } (|\varepsilon| > V_{скн}^* \cdot \sigma_2) \text{ и } (|\varepsilon| \geq V_{скн}^* \cdot \sigma_3); \\ 0, \text{если } (|\varepsilon| < V_{скн}^* \cdot \sigma_2) \text{ и } (|\varepsilon| \leq V_{скн}^* \cdot \sigma_3); \\ 1, \text{если } (|\varepsilon| < V_{скн}^* \cdot \sigma_2) \text{ и } (|\varepsilon| \geq V_{скн}^* \cdot \sigma_3); \end{cases} \\
l_4 &= j_4 \cdot \begin{cases} 0, \text{если } |\varepsilon| > V_{скн}^* \cdot \sigma_3; \\ 1, \text{если } |\varepsilon| < V_{скн}^* \cdot \sigma_3. \end{cases}
\end{aligned}$$

Проведен анализ зависимости момента сцепления от скорости скольжения, на основании которого автором предложен метод с табличным выбором оптимальной скорости скольжения.

В четвертой главе представлена структурная схема модели (рис. 10) тягового электропривода и условий сцепления в точке «колесная пара – рельс» и приведено математическое описание основных блоков. Представлены результаты компьютерного моделирования в режиме отсутствия избыточного скольжения, модель верифицирована по критерию ускорения путем сравнения с осциллографическими данными результатов разгона компьютерной модели и реального поезда весом 3003 тонны.

Приведено сравнение работы классического ПИ-регулятора и адаптивного ПИ-регулятора. Анализ результатов численного эксперимента показал невозможность применения классического ПИ-регулятора по причинам колебаний момента двигателя и наличия шумов в его сигнале. В свою очередь адаптивный ПИ-регулятор лишен перечисленных недостатков классического ПИ-регулятора.

С целью оценки качества работы системы управления тяговым усилием в режимах избыточного скольжения автором был предложен критерий оценки, определяемый как:

$$X_{KO} = \int_{t_n}^{t_k} M_{cy}(t) \cdot k_m dt, \quad (3)$$

где M_{cy} – момент сцепления; t_n, t_k – время начала избыточного скольжения и время конца избыточного скольжения соответственно; k_m – масштабирующий коэффициент.

Рис. 10 – Структурная схема математической модели тягового электропривода и условий сцепления в точке «колесная пара – рельс»

Был проведен численный эксперимент по сравнению эффективности работы системы с постоянной и изменяемой уставками скольжения, который показал, что система с изменяемой уставкой скольжения является наиболее предпочтительной. Анализ результатов численного эксперимента показал, что средний показатель критерия оценки метода табличного выбора уставки скольжения превосходил на 0,66 единиц показатель оценки метода с постоянной уставкой скольжения.

В пятой главе приведено описание стенда полунатурного моделирования и приведена его структурная схема. Стенд содержит следующие аппаратные и программные подсистемы: персональный компьютер, одноплатные микро-ЭВМ, соединенные между собой интерфейсами связи CAN и Ethernet, на которых реализованы компьютерные модели движения электровоза, модели электропривода, модель системы верхнего уровня и адаптивной системы управления тяговым электроприводом.

Проведены численные эксперименты на стенде полунатурного моделирования. Результаты анализа показали, что разработанная система управления тяговым усилием с переменной структурой обеспечивает требуемый оптимальный закон формирования момента тягового электродвигателя, при котором согласно характеристике коэффициента сцепления, обеспечивается заданное скольжение колесной пары. При этом статическая ошибка поддержания заданной скорости не превышает 5%. Также из результатов опытов следует, что при изменении линейной скорости состава система увеличивает окружную скорость колесной пары на величину заданного скольжения.

Проведены натурные испытания системы управления тяговым усилием непосредственно на объекте на испытательном полигоне железнодорожной техники в г.о. Щербинка. Результаты опытов подтвердили качественную работоспособность системы. Однако характер изменения момента задания был признан неудовлетворительным вследствие недопустимых значений производных момента электродвигателя.

На модели и при проведении натурных экспериментов было выявлено, что при использовании в структуре классического ПИ-регулятора возникают колебания момента с частотой 2 Гц и амплитудой в 3000 Н·м (рис. 11), связанные с неровностями пути, наличием помех в сигнале обратной связи, особенностями настройки контура регулирования момента векторного управления. Для устранения колебаний момента был применен регулятор с корректируемым пропорциональным коэффициентом или адаптивный ПИ-регулятор.

Приведены результаты работы системы с адаптивным ПИ-регулятором в условиях эксплуатации с весами поезда от 6000 тонн до 12000 тонн (рис. 12, 13). Из анализа результатов эксплуатации следует, что процесс скольжения в условиях эксплуатации кратковременный и прерывистый. Прерывистость объясняется подачей песка и, следовательно, увеличением коэффициента сцепления. Колебания момента задания минимальны с применением в структуре адаптивного ПИ-регулятора, а автоколебания отсутствуют. Система реализует заданное скольжение с перерегулированием не более 20% и со

статической ошибкой, не превышающей 15%. Таким образом подтверждается работоспособность системы с переменной структурой для задачи управления тяговым электроприводом в режимах избыточного скольжения.

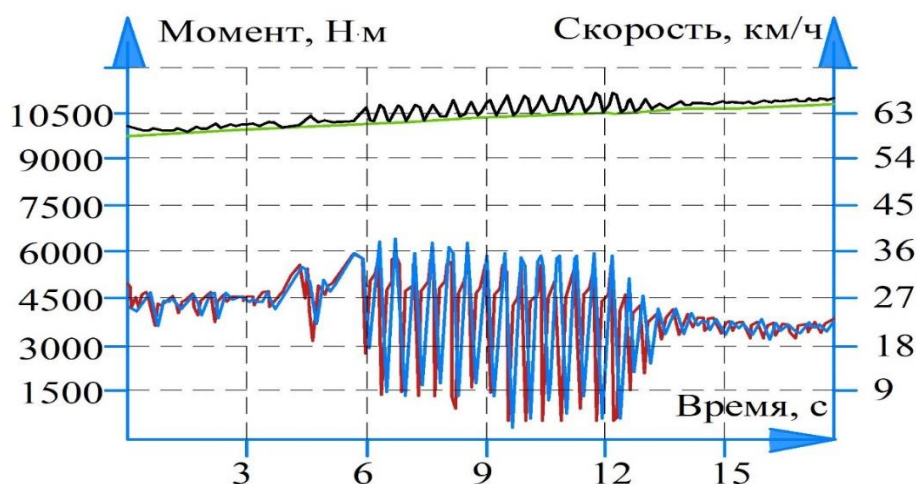


Рисунок 11 – График колебаний момента и скорости

На рис. 11 обозначено: красный – момент задания двигателя; синий – момент двигателя; зеленый – линейная скорость электровоза; черный – окружная скорость колесной пары.

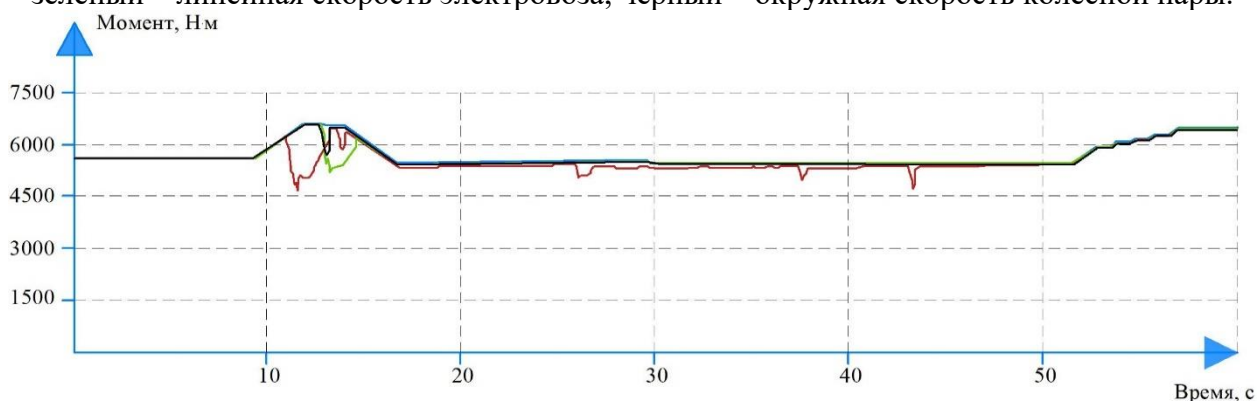


Рисунок 12 – Осциллограмма моментов при работе от адаптивной системы управления тяговым усилием с переменной структурой, в режиме тяги и условиях сцепления - вода после дождя: красный – момент первого тягового двигателя; черный – момент второго тягового двигателя; зеленый – момент третьего тягового двигателя; синий – момент четвертого тягового двигателя.

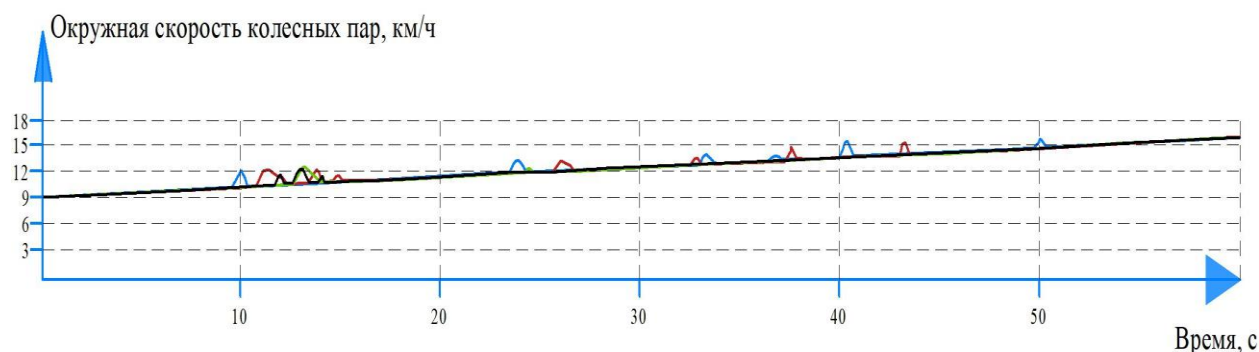


Рисунок 13 – Осциллограмма окружных скоростей колесных пар при работе от адаптивной системы управления тяговым усилием с переменной структурой, в режиме тяги и условиях сцепления - вода после дождя: красный – окружная скорость первой колесной пары; черный – окружная скорость второй колесной пары; зеленый – окружная скорость третьей колесной пары; синий – окружная скорость четвертой колесной пары.

Представлены результаты оценки экономической эффективности применения адаптивной системы управления тяговым электроприводом. Электровоз с адаптивной системой управления способен за год провести составы грузоподъемностью на 286880 тонн больше, чем аналогичный по мощности электровоз.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Проведен анализ условий сцепления в зоне контакта «колесная пара – рельс», тягового привода современного подвижного состава и алгоритмов управления тяговым усилием. Установлено, что в качестве электропривода магистрального электровоза целесообразно применять тяговый асинхронный двигатель и силовой полупроводниковый преобразователь с векторным управлением, а система управления тяговым усилием должна обеспечивать максимально возможную силу тяги по условиям сцепления.

2. Разработана классификация способов управления тяговым приводом в режимах предельных усилий, которая позволяет определять перспективные направления исследований в области тягового электропривода.

3. Приведено математическое описание асинхронного двигателя при работе от силового полупроводникового преобразователя с векторной системой управления и ШИМ с использованием сигнала напряжения нулевой последовательности. Проведен синтез системы управления. Приведены результаты моделирования. Проведена верификация по критерию сравнения фазных токов статора. Верификация проведена путем сравнения результатов численного эксперимента и осциллограмм промышленной эксплуатации. Ошибка модели не превысила 5,8%, при условиях равенства момента асинхронного тягового двигателя установившемуся значению.

4. С целью уменьшения времени моделирования был проведен численный эксперимент по замене модели электрического привода со структурой «преобразователь частоты – асинхронный двигатель» на апериодическое звено первого порядка. Эксперимент заключался в сравнении момента асинхронного тягового двигателя модели электрического привода и момента на выходе апериодического звена первого порядка, имитирующего электрический привод. Анализ результатов эксперимента показал, что в установившемся режиме работы электрического привода среднеквадратичная ошибка не превышала 10 Н·м, а в частном случае – боксовании или переходном процессе не превышала 590 Н·м, при этом ошибка относительно номинального момента не превышала 8%. Так как величина ошибки находится в пределах точности инженерных расчетов, замена электрического привода на апериодическое звено первого порядка не внесет существенной погрешности в результаты численных экспериментов на математической модели.

5. Разработано математическое описание модели механической части электропривода, включая ротор электродвигателя, редуктор, колесную пару, точку контакта колеса с рельсом, с учетом изменением нагрузки на оси. На основе основного уравнения движения электропривода представлено выражение для определения момента сцепления. Результаты расчетов по

представленному математическому описанию подтверждены результатами натурных испытаний.

6. Проведен структурный синтез адаптивной системы управления тяговым усилием с переменной структурой и представлено математическое описание основных блоков системы. Установлено, что применение классического регулятора в контуре управления скоростью недопустимо по причине возникновения автоколебаний момента задания, выявленных при натурных испытаниях электровоза ЗЭС8.

7. Разработана структура компьютерной модели тягового электропривода и условий сцепления в точке «колесная пара – рельс», приведено математическое описание основных блоков структуры. Проведен численный эксперимент по сравнению процессов в системе с классическим ПИ-регулятором и адаптивным ПИ-регулятором и установлено, что использование классического ПИ-регулятора вызывает колебания момента электропривода.

8. Проведен анализ методов определения оптимальной скорости скольжения колесной пары. Предложены и рассмотрены метод поиска максимума по кривой сцепления и табличный метод выбора скорости скольжения.

На основе анализа определено, что метод поиска максимума неработоспособен при существующих условиях эксплуатации магистральных электровозов. Табличный метод соответствует критерию робастности в условиях эксплуатации, но при этом требует предварительного определения параметров зависимости момента сцепления от скорости скольжения для каждой зоны на графике момента сцепления.

9. Разработан критерий оценки эффективности работы системы управления тяговым усилием, отличающийся тем, что вычисляется интеграл момента сцепления за время избыточного скольжения. Анализ результатов численного эксперимента показал, что средний показатель критерия оценки метода табличного выбора уставки скольжения превосходил на 0,66 единиц показатель оценки метода с постоянной уставкой скольжения.

10. Представлено описание стенда полунатурного моделирования и приведены результаты численных экспериментов. Установлено, что разработанная адаптивная система управления тяговым усилием с переменной структурой обеспечивает требуемый оптимальный закон формирования момента тягового электродвигателя, по критерию максимального ускорения состава, при котором обеспечивается заданное скольжение колесной пары. При этом статическая ошибка поддержания заданной скорости не превысила 5 %.

11. Получены экспериментальные результаты непосредственно на объекте. Анализ результатов эксперимента показал неработоспособность классического ПИ-регулятора вследствие возникновения автоколебаний момента задания.

12. Приведены осциллограммы эксплуатационных поездок с весами поезда от 6000 до 12000 тонн. Анализ осциллографических результатов показал, что процесс скольжения в условиях эксплуатации кратковременный (не более 3-х секунд) и прерывистый. Колебания момента задания минимальны с

применением в структуре адаптивного ПИ-регулятора, а автоколебания отсутствуют. Система реализует заданное скольжение со статической ошибкой, не превышающей 15%. Таким образом подтверждается работоспособность адаптивной системы с переменной структурой для задачи управления тяговым электроприводом в режимах избыточного скольжения.

13. Представлены результаты оценки экономической эффективности применения адаптивной системы управления тяговым электроприводом. Электровоз с адаптивной системой управления способен за год провести составы грузоподъемностью на 286880 тонн больше, чем аналогичный по мощности электровоз.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

а) в рецензируемых научных изданиях:

1. Харисов И.Р. Законы и способы управления тяговым приводом магистрального электровоза / И.Р. Харисов, А.Л. Карякин // Электротехнические системы и комплексы. – 2022. – № 4(57). – С. 60–68. DOI: 10.18503/2311_8318_2022_4(57)_60_68.

2. Харисов И. Р. Компьютерное моделирование и исследование адаптивной системы регулирования момента тягового электропривода магистрального электровоза в предельных режимах / И. Р. Харисов, А. Л. Карякин // Электротехнические системы и комплексы. – 2025. – № 1(66). – С. 62–38. DOI: 10.18503/2311_8318_2025_1(66)_32_38.

б) издания, включенные в международные базы цитирования Scopus:

3. Харисов И.Р. Исследование условий сцепления колесной пары тягового электропривода рудничных и магистральных электровозов / И.Р. Харисов, А.Л. Карякин // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2024. – № 1. – С. 59–73. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_011_0_59.

в) объекты интеллектуальной собственности:

4. Патент № RU 189637 U1 Российская Федерация, В60L 9/02 (2019.02), В61С 3/00 (2019.02). Силовая электрическая схема электропоезда постоянного тока : № 2019105138 : заявл. 22.02.2019 : опубл. 29.05.2019 / Голубев Г.А., Лимонов Д.Э., Шатравин К.М., Вахрушев К.А., Харисов И.Р.; заявитель ООО "Уральские локомотивы". – 6 с.

5. Патент № RU 196636 U1 Российская Федерация, В60L 3/10 (2020.01), В61С 15/12 (2020.01). Устройство защиты от боксования колесных пар электроподвижного состава с асинхронными тяговыми двигателями: № 2019132746 : заявл. 14.10.2019: опубл. 11.03.2020 / Харисов И.Р., Лимонов Д.Э., Шатравин К.М., Коробицын К.Р.; заявитель ООО "Уральские локомотивы". – 7 с.

6. Патент № RU 2720864 C1 Российская Федерация, В60L 3/106 (2020.02), В61С 15/08 (2020.02), В60L 2200/26 (2020.02). Способ защиты от

боксования колесных пар электроподвижного состава с асинхронными тяговыми двигателями: № 2019126855 : заявл. 22.08.2019 : опубл. 13.05.2020 / Харисов И.Р., Лимонов Д.Э., Шатравин К.М., Коробицын К.Р.; заявитель ООО "Уральские локомотивы". – 9 с.

7. Патент № RU 209092 U1 Российская Федерация, В60L 3/106 (2021.08). Устройство защиты от боксования колесных пар электроподвижного состава с асинхронными тяговыми двигателями: № 2021127835 : заявл. 21.09.2021: опубл. 01.02.2022 / Харисов И.Р., Лимонов Д.Э., Шатравин К.М., Коробицын К.Р.; заявитель ООО "Уральские локомотивы". – 8 с.

8. Патент № RU 2741851 C1 Российская Федерация, В60L 3/10 (2020.08), В61С 15/08 (2020.08), G06N 3/02 (2020.08), В60L 2200/26 (2020.08). Способ защиты от боксования колесных пар электроподвижного состава с асинхронными тяговыми двигателями: № 2020127263 : заявл. 13.08.2020: опубл. 29.01.2021 / Харисов И.Р., Брексон В.В., Лимонов Д.Э., Шатравин К.М., Коробицын К.Р.; заявитель ООО "Уральские локомотивы". – 10 с.

9. Патент № RU 2758797 C1 Российская Федерация, В60L 3/10 (2021.08), В61С 15/08 (2021.08), G06N 3/02 (2021.08); В60L 2200/26 (2021.08). Способ защиты от боксования колесных пар электроподвижного состава с асинхронными тяговыми двигателями: № 2021113265 : заявл. 07.05.2021 : опубл. 01.11.2021 / Харисов И.Р., Брексон В.В., Лимонов Д.Э., Шатравин К.М., Коробицын К.Р.; заявитель ООО "Уральские локомотивы". – 12 с.

10. Патент № RU 2811618 C1 Российская Федерация, В60L 3/106 (2023.08); В60L 15/20 (2023.08), В61С 15/08 (2023.08), В60L2200/26 (2023.08), В60L2240/421 (2023.08), В60L2240/423 (2023.08). Способ защиты от боксования колесных пар электроподвижного состава с асинхронными тяговыми двигателями : № 2022130451 : заявл. 23.11.2022: опубл. 15.01.2024 / Харисов И.Р., Лимонов Д.Э., Шатравин К.М., Коробицын К.Р.; заявитель ООО "Уральские локомотивы". – 5 с.

11. Патент № RU 2821345 C1 Российская Федерация, В60L 3/106 (2024.01); В60L 15/20 (2024.01), В61С 15/08 (2024.01), В60L2200/26 (2024.01), В60L2240/421 (2024.01). Способ защиты от боксования колесных пар электроподвижного состава с асинхронными тяговыми двигателями: № 2023121060 : заявл. 10.08.2023 : опубл. 21.06.2024 / Харисов И.Р., Лимонов Д.Э., Шатравин К.М., Коробицын К.Р.; заявитель ООО "Уральские локомотивы". – 5 с.

12. Патент № RU 2844206 C1 Российская Федерация, В60L 3/106 (2025.05); В60L 15/20 (2025.05), В61С 15/08 (2025.05), В60L2200/26 (2025.05), В60L2240/421 (2025.05). Способ защиты от боксования колесных пар

электроподвижного состава с асинхронными тяговыми двигателями: № 2024130716 : заявл. 08.10.2024: опубл. 8.07.2025 / Харисов И.Р., Лимонов Д.Э., Шатравин К.М., Коробицын К.Р.; заявитель ООО "Уральские локомотивы". – 5 с.

13. Патент № RU 2844203 C1 Российская Федерация, B60L 3/106 (2025.05), B60L 15/20 (2025.05), B61C 15/08 (2025.05), B60L2200/26 (2025.05), B60L2240/421 (2025.05). Способ защиты от боксования колесных пар электроподвижного состава с асинхронными тяговыми двигателями: № 2024140260 : заявл. 24.12.2024: опубл. 28.07.2025 / Харисов И.Р., Брексон В.В., Лимонов Д.Э., Шатравин К.М., Коробицын К.Р.; заявитель ООО "Уральские локомотивы". – 5 с.

г) в других изданиях и материалах конференций:

14. Харисов И.Р. К вопросу об улучшении технических характеристик электропривода локомотива с целью предупреждения скольжения колесных пар / И.Р. Харисов, А.Л. Карякин // Материалы международной научно-практической конференции «Уральская горная школа – регионам». – 2022. – С. 169–171.

15. Харисов И.Р. К вопросу о формировании задания момента тягового электропривода с учетом нагрузки на ось подвижного состава/ И.Р. Харисов, А.Л. Карякин // Материалы международной научно-практической конференции «Уральская горная школа – регионам». – 2024. – С. 184–186.