

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию

Плетнева Дмитрия Сергеевича

на тему «Бортовой накопитель энергии на электроподвижном составе метрополитена»,

представленную на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы

Актуальность избранной темы.

Метрополитен является центральным элементом транспортной системы крупных городов, где расширение сети и увеличение пассажиропотока требуют не только увеличения парка электроподвижного состава, но и повышения его энергетической эффективности и безопасности. С учетом растущей частоты движения поездов, особенно в утренние и вечерние периоды, а также высокого энергопотребления из-за пуско-тормозных операций всё более актуальным становится вопрос совершенствования энергоэффективности и надежности электроподвижного состава (ЭПС). Внедрение на борту поездов накопителей энергии, позволяющих использовать избыточную энергию рекуперации, представляется перспективным решением для снижения энергопотребления и осуществления функции автономности движения, что может способствовать повышению безопасности пассажиров и обслуживающего персонала.

Актуальность диссертационной работы Д.С. Плетнева обуславливают: во-первых, нацеленность на сохранение и повторное использование избыточной энергии рекуперативного торможения посредством использования бортового накопителя энергии (БНЭ); во-вторых, на решение ряда задач по оценке эффективности размещения бортового накопителя электроэнергии в энергосистеме электроподвижного состава; в-третьих, тенденцией повышения безопасности электроподвижного состава при аварийном и эксплуатационном отключении электропитания тяговой сети.

Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации.

Основываясь на анализе опубликованных данных, соискатель: определил целесообразность использования накопителей энергии на борту

электроподвижного состава и провел сравнительный анализ накопителей бортовых систем. В рамках диссертационной работы Д.С. Плетнев предложил и обосновал комплексную имитационную модель системы тягового электроснабжения с системой внешнего электроснабжения и не тяговыми потребителями. Другая составляющая обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций состоит в непротиворечивых результатах сопоставления данных полученных при имитационном моделировании движения поезда с результатами, полученными при экспериментальных исследованиях параметров движения ЭПС на Таганско-Краснопресненской линии Московского метрополитена. Верификация результатов моделирования и оценка результатов по критерию Стьюдента позволяет сделать вывод об адекватности и правомерности предлагаемых решений.

Достоверность и новизна, полученных результатов.

Достоверность результатов исследований обусловлена корректностью постановки задач, рациональным применением математического аппарата, что подтверждается сходимостью результатов, полученных при анализе данных, имитационного моделирования работы электроподвижного состава в действующем графике движения поездов на линии Московского метрополитена, с данными экспериментальных замеров движения ЭПС на такой же линии метрополитена в схожих условиях.

Основные результаты диссертации опубликованы в 15 работах, в том числе в двух статьях рецензируемых изданий, входящих в перечень ВАК и семи статьях и материалах конференций, входящих в перечень Scopus. Результаты исследования неоднократно обсуждались на различных международных конференциях и симпозиумах.

Научная новизна, полученных в диссертационной работе научно обоснованных результатов, определяется:

– анализом электроэнергетических процессов в контексте тягового электроснабжения метрополитена, который учитывает динамику энергообмена между электропоездами при рекуперативном торможении, что способствовало разработке алгоритмов функционирования и методов определения электротехнических характеристик бортового накопителя энергии ЭПС;

- разработкой цифрового двойника, позволяющего воспроизвести работу ЭПС метрополитена в действующем графике движения на линии Московского метрополитена с БНЭ;
- созданной имитационной моделью работы электроподвижного состава, учитывающей систему тягового электроснабжения вплоть до питающих центров, и которая была верифицирована по результатам экспериментальных измерений электроподвижного состава Московского метрополитена в условиях реальной эксплуатации;
- разработанным подходом к оценке электротехнической эффективности применения бортового аккумулятора энергии на электроподвижном составе метрополитена;
- разработанным подходом к анализу эффективности использования бортовых аккумуляторов энергии, выполненных в едином цифровом формате и учитывающих компенсацию потерь избыточной энергии рекуперации, потерь в тяговой сети и на тяговых подстанциях, а также учёт затрат на обслуживание и замену оборудования;
- сформулированным методом оценки жизненного цикла бортового накопителя энергии с принятием во внимание регрессивного воздействия аккумулирующих элементов;
- формулировкой ключевых энергетических показателей для обеспечения автономного движения электроподвижного состава с использованием бортового накопителя энергии для транспортировки пассажиров из тоннеля до ближайших станций при аварийных ситуациях в системе тягового электроснабжения;
- созданным методом анализа технико-экономических преимуществ от использования бортового аккумулятора энергии на электроподвижном составе метрополитена.

Теоретическая и практическая значимость полученных автором результатов.

Определены основные критерии для анализа эффективности использования бортовых систем накопления электроэнергии на ЭПС метрополитена. Разработаны

инженерные решения, целью которых является минимизация потребления электрической энергии от питающих центров, необходимой для движения поездов, улучшение работы системы тягового электроснабжения, а также повышение уровня комфорта и безопасности пассажиров при необходимости аварийной эвакуации из тоннеля в случае отключения электроснабжения.

Разработана и апробирована комплексная прикладная цифровая модель работы электроподвижного состава, учитывающая СТЭ метрополитена, куда входят тяговые подстанции, тяговая сеть и другими компонентами системы, функционирующими согласно установленному расписанию движения поездов. Данная модель базируется на анализе данных, собранных в ходе как практических, так и теоретических исследований. Разработанное программное обеспечение для определения параметров и расчета экономической эффективности внедрения бортовых накопителей основано на статистической обработке экспериментально измеренных данных и результатах моделирования.

Технико-экономический анализ выявил значительные преимущества от применения бортовых накопителей энергии на ЭПС, как с точки зрения отдельно взятого электроподвижного состава, так и в масштабе системы тягового электроснабжения метрополитена.

Оценка содержания диссертации, ее завершенность.

Диссертационная работа структурирована следующим образом: включает введение, шесть основных глав и заключение. Библиографический список охватывает 167 источников. Основной текст диссертации представлен на 176 страницах, включает 111 иллюстраций и 23 таблицы.

Во введении диссертации изложены актуальность исследуемой проблематики и уровень её предварительного изучения, сформулированы цели и задачи работы. Изложена научная новизна, а также теоретическая и практическая значимость полученных результатов. Изложены методологический подход и методы исследования, применённые для достижения поставленных целей. Определены основные положения, подлежащие защите, обоснована достоверность результатов и охарактеризована степень их апробации.

Первая глава диссертации посвящена определению основных критериев для оценки эффективности использования бортовых систем накопления энергии в электроподвижном составе. Эти критерии включают экономические выгоды от использования избыточной энергии рекуперации, возможность осуществления функции автономного движения в чрезвычайных ситуациях, а также уменьшение энергетических потерь в системе тягового электроснабжения.

Вторая глава ориентирована на изучение систем сохранения энергии. Был выполнен детальный анализ параметров для оценки эффективности накопителей энергии, предназначенных для интеграции в состав силового оборудования ЭПС. Рассмотрены критерии, такие как удельная мощность, удельная энергоёмкость, эффективность цикла зарядки и разрядки, степень саморазряда, количество возможных циклов перезарядки и продолжительность эксплуатации.

В результате сравнения разнообразных систем аккумулирования энергии для применения на борту электроподвижного состава было определено, что наиболее подходящим решением является гибридная система, сочетающая в себе характеристики суперконденсаторов и литий-ионных батарей. Такое сочетание позволяет взаимно компенсировать ограничения каждого из типов накопителей. Тем не менее, проблемы, связанные с ограниченным пространством для установки, химической токсичностью и потенциальным риском взрыва, могут затруднить интеграцию гибридных систем в электроподвижной состав, акцентируя внимание на предпочтении использования исключительно суперконденсаторов.

В третьей главе представлены результаты экспериментального анализа электроэнергетических характеристик электроподвижного состава в реальных условиях работы Московского метрополитена. Проведён детальный разбор системы тягового электроснабжения метрополитена и анализ электрической схемы моторного вагона современного типа.

В рамках главы также представлены результаты двух экспериментов, проведенных на Таганско-Краснопресненской и Кольцевой линиях Московского метрополитена, направленных на измерение энергетических показателей ЭПС в условиях реальной эксплуатации. Целью данных экспериментов было определение

объёма энергии, задействованной в процессе межпоездного обмена во время рекуперативного торможения.

Четвёртая глава диссертационного исследования охватывает имитационное моделирование электроподвижного состава в рамках системы тягового электроснабжения метрополитена. Основная цель моделирования заключалась в определении объёма энергии, рассеянных в тепловую энергию в тормозных резисторах во время рекуперативного торможения. В ходе движения поезда по Таганско-Краснопресненской линии Московского метрополитена было зафиксировано 413.98 кВт·ч энергии рекуперации, из которых 245.884 кВт·ч были использованы для межпоездного обмена, а 168.097 кВт·ч рассеяны в тормозных резисторах.

Анализ расчётных и экспериментальных данных показал, что при применении бортового накопителя энергии количество циклов его перезарядки может достигать около 8 миллионов. Прогнозируемый срок службы таких накопителей энергии на электропоездах, функционирующих в условиях Московского метрополитена, оценён в 31 год.

Также в данной главе приводится описание разработанного специализированного программного комплекса расчетов и анализа электрических параметров поезда. Этот программный инструментарий предназначен для автоматизированного определения параметров системы накопления энергии на борту, применимых к различным типам электроподвижного состава, включая метрополитен, грузовые и пассажирские железнодорожные поезда, а также трамваи и троллейбусы. Программа проводит анализ электрических и механических параметров электроподвижного состава, определяя требуемую ёмкость бортового аккумулятора электроэнергии для конкретной модификации, эксплуатируемой на определённом маршруте.

В дополнение, была проведена верификация и доказана аналогичность результатов экспериментального исследования движения электроподвижного состава по Таганско-Краснопресненской линии с результатами имитационного моделирования для аналогичных условий.

В пятой главе основываясь на данных, полученных при имитационном моделировании и экспериментальные измерения, представлена схема и конструкция бортового накопителя энергии для электроподвижного состава метрополитена. Был сформулирован алгоритм работы БНЭ для использования в электроподвижном составе.

Определены ключевые электрические характеристики БНЭ, включая обратимую энергоёмкость на уровне 6 кВт·ч, время цикла зарядки и разрядки 10-20 секунд, рабочий диапазон напряжений от 600 до 925 В и диапазон напряжений для аварийного режима работы от 450-500 до 600 В.

В процессе выбора места установки БНЭ на электроподвижном составе были проведены инструментальные исследования вагонов типов 81-765/766/767 и 81-775/776/777. Результаты показали, что наиболее подходящей областью для размещения накопителей является подвагонное пространство не моторных промежуточных вагонов моделей 81-767 и 81-777.

Кроме того, была оценена эффективность работы БНЭ в составе силового оборудования электроподвижного состава, коэффициент полезного действия которого находится в пределах от 93 до 95 процентов.

Шестая глава исследования посвящена анализу технико-экономических аспектов внедрения бортовых накопителей энергии в состав силового оборудования электроподвижного состава Московского метрополитена. Оценка экономической эффективности БНЭ была произведена, учитывая широкий спектр параметров.

Исследование показывает, что срок окупаемости инвестиций в БНЭ, с учетом всех сопутствующих затрат на интеграцию и установку на ЭПС, составляет 6,5 лет, при этом срок службы таких систем достигает 31 года.

Автор выявил проблематику в существующей системе тягового электроснабжения, связанную с неэффективным распределением избыточной энергии рекуперации, которая в значительной степени теряется в тормозных резисторах ЭПС. Предложенная система накопления энергии позволяет эффективно аккумулировать и при необходимости использовать избыточную энергию, давая возможность осуществления функции автономного хода ЭПС при

аварийных отключениях в системе тягового электроснабжения и повышая безопасность перемещения пассажиров. Кроме того, использование БНЭ для обеспечения автономного движения ЭПС в депо и на тупиковых участках способствует повышению безопасности обслуживания.

В результате автором разработана принципиальная схема подключения БНЭ в составе силового оборудования ЭПС метрополитена, определены основные характеристики накопителя энергии, описаны новые возможности в виду осуществления функции автономного хода, разработана программа для автоматической обработки параметров движения поезда с целью подбора оптимального объема накопителя энергии. Показан технико-экономический эффект от использования БНЭ в составе силового электрического оборудования ЭПС. Автором предлагается реализация разработанной системы БНЭ, что способствует существенному улучшению энергоэффективности работы электроподвижного состава, увеличению уровня безопасности функционирования ЭПС в случаях аварий в системе тягового электроснабжения, от которых напрямую зависят жизнь и здоровье пассажиров.

Достоинства и недостатки в содержании и оформлении диссертации, влияние отмеченных недостатков на качество исследования.

Оформление диссертационного исследования соответствует требованиям ГОСТ Р 7.0.11. – 2011 «Система стандартов по информации и библиотечному издательскому делу». К достоинствам можно отнести актуальность темы, научную новизну и практическую значимость. Плетнев Д.С. грамотно и последовательно изложил материал и обосновал технические решения и разработки.

Наряду с достоинствами следует отметить следующее:

1. В разделе «Научная новизна» отмечается: «создана имитационная модель, позволяющая воспроизвести работу ЭПС метрополитена с БНЭ». Подобные имитационные модели уже существуют.
2. При оценке срока окупаемости не затронут вопрос особенностей эксплуатации и утилизации накопителей энергии на базе суперконденсаторов, а они требуют специальных мер по экологической безопасности, что повлияет на экономическую составляющую.

3. В разработанной математической модели недостаточно четко сформулированы принятые допущения.
4. В работе отсутствуют ссылки следующие рисунки 24, 25, 32, 37.
5. При моделировании системы тягового электроснабжения была ли учтена длина питающих линий?
6. При описании системы электроснабжения электропоезда, был использован термин «чөпер», однако в литературе используется термин «чоппер» – модуль из последовательно включенных транзистора и диода.
7. На рисунке 85 изображена схема включения транзисторов «полумост», а не «чоппер». Известна схема двунаправленного преобразователя напряжения, в которой нижний транзистор используется для работы в режиме повышения напряжения, однако для этого в цепь между БНЭ и преобразователем напряжения должна быть включена индуктивность, без индуктивного элемента при коммутации транзистора IT8 будет режим короткого замыкания БНЭ.
8. В диссертации и автореферате встречаются опечатки, некоторые рисунки и подписи к ним плохо читаемы имеются и другие замечания редакционного характера.

Отмеченные недостатки не снижают качество исследований и не влияют на главные теоретические и практические результаты диссертации.

Соответствие автореферата основному содержанию диссертации.

Автореферат диссертации полностью отражает ее содержание и содержит краткое описание глав диссертационной работы, содержащее основные положения и результаты диссертационного исследования.

Соответствие содержания диссертации заявленной специальности.

Содержание диссертации соответствует паспорту специальности научных работников 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы (п.1. Развитие общей теории электротехнических комплексов и систем, анализ системных свойств и связей, физическое, математическое, имитационное и компьютерное моделирование компонентов электротехнических комплексов и систем, включая

электромеханические, электромагнитные преобразователи энергии и электрические аппараты, системы электропривода, электроснабжения и электрооборудования. п.3. Разработка, структурный и параметрический синтез, оптимизация электротехнических комплексов, систем и их компонентов, разработка алгоритмов эффективного управления, п.4. Исследование работоспособности и качества функционирования электротехнических комплексов, систем и их компонентов в различных режимах, при разнообразных внешних воздействиях, диагностика электротехнических комплексов).

Соответствие диссертации и автореферата требованиям ГОСТ Р 7.0.11-2011.

Диссертация и автореферат соответствуют требованиям ГОСТ Р 7.0.11-2011, имеют регламентированную структуру и правильно оформленный список литературы.

Заключение о соответствии диссертации критериям, установленным «Положение о присуждении ученых степеней» по пунктам 10, 11 и 14.

В соответствии с п. 10 «Положение о присуждении ученых степеней» диссертация написана автором самостоятельно, обладает внутренним единством, содержит новые научные результаты и положения, что свидетельствует о личном вкладе автора в науку.

Согласно п. 11 «Положения о присуждении ученых степеней» основные научные результаты диссертации опубликованы в 15 рецензируемых научных изданиях, в том числе 2 статьи, опубликованы в журналах, входящих в перечень ВАК России и 7 статья и материалах конференций опубликованных в изданиях «Scopus».

В соответствии с п. 14 «Положения о порядке присуждения учёных степеней» в диссертации автором приведены ссылки на источники заимствования материалов и отдельных работ, а также на результаты научных работ, выполненных лично соискателем ученой степени и в соавторстве, что

соответствует требованиям п.14 «Положения о порядке присуждения учёных степеней».

Диссертация Плетнева Дмитрия Сергеевича на соискание ученой степени кандидата технических наук является научно-квалификационной работой, в которой изложены новые научно обоснованные технические решение задач по рациональному применению избыточной энергии рекуперации, имеющие существенное значение для развития страны, что соответствует требованиям п. 9 Положения о присуждении ученых степеней, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы.

Официальный оппонент,
Грищенко Александр Геннадьевич,
кандидат технических наук
(05.09.03 – Электротехнические
комплексы и системы),
доцент, заведующий лабораторией
кафедры «Электротехника и
электрооборудование» федерального
государственного бюджетного
образовательного учреждения высшего
образования «Московский
автомобильно-дорожный государственный
технический университет (МАДИ)»

 А.Г. Грищенко

« 12 » 03 2024

Адрес: 125319, г. Москва, Ленинградский проспект, дом 64.


Телефон: 8 (916) 508-90-03

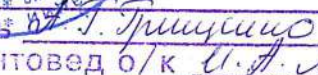

Электронная почта: Alex.gl82@yandex.ru

Я, Грищенко Александр Геннадьевич, даю согласие на включение своих персональных данных, содержащихся в настоящем отзыве, в документы, связанные с защитой диссертации Плетнева Дмитрия Сергеевича, и их дальнейшую обработку.



03 2024

 А.Г. Грищенко

Подпись:  удостоверяю
документовед о/к 

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию

Плетнева Дмитрия Сергеевича

на тему «Бортовой накопитель энергии на электроподвижном составе метрополитена»,

представленную на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы

Актуальность темы диссертации

Представленное в диссертации исследование направлено на поиск решений в области энергосбережения на электроподвижном составе метрополитена и повышения уровня безопасности и комфортности пассажиров городского подземного электрического транспорта. В диссертации большое внимание уделяется внедрению технологий по сохранению и повторному использованию избыточной энергии рекуперации на электроподвижном составе метрополитена с помощью бортового накопителя энергии (БНЭ).

В настоящее время метрополитен представляет собой один из ключевых элементов транспортной инфраструктуры мегаполисов. В контексте непрерывного увеличения протяженности линий Московского метрополитена и роста объема пассажирских перевозок возникает необходимость в расширении парка электроподвижного состава и повышении его энергетической эффективности. Достижение требуемого уровня пропускной способности тесно связано с увеличением частоты движения поездов, что, в свою очередь, обуславливает необходимость в совершенствовании технических характеристик, надежности и энергоэффективности электроподвижного состава.

Высокая частота движения поездов, особенно в периоды пиковых нагрузок, характеризуется интенсивным использованием пуско-тормозных операций, что приводит к значительному потреблению электроэнергии и оказывает отрицательное воздействие на систему электроснабжения. Одним из перспективных способов решения данной проблемы является интеграция накопителей энергии непосредственно на борту электроподвижного состава. Это позволяет эффективно использовать энергию рекуперации, сокращая потери, связанные с преодолением сопротивления в подводящих кабелях и контактной сети, а также обеспечивает возможность автономного движения, повышая тем самым безопасность как пассажиров, так и обслуживающего персонала.

Таким образом, внедрение бортового накопителя энергии, позволяющего сохранить избыточную энергию рекуперации, повышает надежность системы электроснабжения и способствует созданию более благоприятных климатических условий в подземной части метрополитена, а реализация данной технологии является важнейшей задачей в области энергосбережения и повышения

безопасности на метрополитенах, что обладает высокой актуальностью в современных условиях.

В этой связи диссертационное исследование Плетнева Дмитрия Сергеевича обладает несомненной актуальностью, теоретической и практической значимостью.

Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации

Научные положения, выводы и рекомендации, представленные в диссертационном исследовании Плетнева Д.С., представляют собой ряд научно-аргументированных и логически непротиворечивых подходов, методов и предложений, направленных на повышение энергоэффективности работы электроподвижного состава (ЭПС), надежности системы тягового электроснабжения (СТЭ), осуществление функции автономного хода при аварийных ситуациях в СТЭ.

Достоверность и новизна, полученных результатов

Результаты теоретических исследований подтверждаются результатами обработки экспериментальных системных измерений работы ЭПС в действующем графике движения на линии Московского метрополитена.

Результаты диссертации опубликованы в 15 работах, в том числе в 2 статьях рецензируемых изданий, входящих в перечень ВАК, и 7 статьях и материалах конференций, входящих в перечень Scopus.

Научная новизна результатов, полученных в диссертационном исследовании:

1. исследованы электроэнергетические процессы в СТЭ метрополитена с учётом процессов энергообмена между ЭПС при использовании рекуперативного торможения, что позволило разработать алгоритмы работы и методику определения электротехнических параметров БНЭ;

2. создана имитационная модель, позволяющая воспроизвести работу ЭПС метрополитена с БНЭ;

3. проведена актуализация имитационной модели для моделирования работы ЭПС в составе СТЭ по данным произведённых экспериментальных замеров показателей работы ЭПС Московского метрополитена в реальных условиях эксплуатации;

4. разработана методика оценки электротехнической эффективности использования БНЭ на ЭПС метрополитена;

5. предложен комплексный метод оценки эффективности использования бортовых накопителей энергии в системе тягового электроснабжения, реализованный в единой цифровой среде с учётом компенсации потерь части избыточной энергии рекуперации, потерь энергии в тяговой сети и на тяговых подстанциях, а также компенсации затрат на обслуживание и замену оборудования СТЭ;

6. разработана методика оценки жизненного цикла БНЭ с учётом регрессионного эффекта аккумулирующего элемента;

7. определены электроэнергетические показатели автономного хода ЭПС с БНЭ при перевозке пассажиров из тоннеля до ближайших станций в аварийном режиме работы системы тягового электроснабжения и автономного хода в тупиках и ангарах депо;

8. разработана методика оценки технико-экономического эффекта от применения БНЭ на ЭПС метрополитена.

Теоретическая и практическая значимость полученных автором результатов

Были установлены ключевые критерии для оценки эффективности применения бортовых систем аккумулирования электроэнергии в электропоездах метрополитена. Разработаны технические решения, направленные на снижение потребления электроэнергии от питающих центров, необходимой для тяги поездов, повышение эффективности системы тягового электроснабжения, а также на обеспечение комфорта и безопасности пассажиров в случае аварийной эвакуации из тоннеля при отключении электропитания в тяговой сети.

Была создана и подтверждена валидность комплексной прикладной цифровой модели функционирования электроподвижного состава, включая взаимодействие с тяговой сетью, тяговыми подстанциями и другими элементами системы, движущимися согласно расписанию. Модель основана на анализе данных, полученных в результате как практических, так и теоретических исследований. Была разработана программа для определения параметров и расчета экономической выгоды от внедрения бортовых аккумуляторов энергии, основываясь на статистической обработке данных экспериментальных измерений и результатов моделирования.

Технико-экономический анализ показал значимый эффект от использования бортовых систем аккумулирования электроэнергии как в контексте отдельного электроподвижного состава, так и для системы тягового электроснабжения линий метрополитена в целом.

Оценка содержания диссертации, её завершенность.

Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, списка литературы, включающего в себя 167 наименований. Работа изложена на 176 страницах основного текста, содержит 111 иллюстраций, 23 таблицы.

Во введении представлены актуальность и степень разработанности темы, определены цели и задачи, изложена научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, описаны методология и методы проведения исследований, приведены основные положения, достоверность и степень апробации результатов.

В первой главе определены ключевые критерии для оценки целесообразности применения бортовых накопителей энергии в

электроподвижном составе, включая экономию за счет избыточной энергии рекуперации, обеспечение автономного хода при аварийных ситуациях и снижение потерь энергии в системе тягового электроснабжения. Выведены формулы по расчету общей суточной экономии энергии за счет использования БНЭ на ЭПС, по оценке сэкономленной избыточной энергии рекуперации за счет использования БНЭ, по расчету сэкономленных потерь в тяговой сети и на тяговых подстанциях, по оценке расстояния аварийного хода, по запасу энергии накопителя для аварийного хода.

Акцент на автономном ходе ЭПС сделан не спроста, а потому как:

– процесс эвакуации пассажиров из тоннелей зачастую ассоциируется с риском для здоровья и потенциальными летальными исходами. В качестве меры предотвращения подобных последствий, связанных с энергетическими кризисами, было предложено внедрение системы аккумулирования энергии непосредственно на борту электроподвижного состава. Это обеспечивает возможность самостоятельного движения поезда к остановочному пункту в случае аварийного отключения тяговой сети, гарантируя безопасность пассажиров при любых сбоях в электроснабжении за счет использования бортового накопителя энергии для достижения ближайшей станции с места аварийной остановки.

– Интеграция систем аккумулирования энергии на борту вагонов метрополитена обеспечивает возможность автономного маневрирования поездов в зоне депо и на тупиковых путях без необходимости подачи тягового напряжения. Это позволяет существенно уменьшить зависимость от дополнительного обслуживающего персонала, задействованного для подключения и отключения электропитания для перемещения поездов внутри депо, сокращая требования к численности персонала до одного машиниста за счет автономной работы поезда. Важным аспектом является также повышение эффективности маневровых операций за счет ускорения процессов. Однако основным преимуществом внедрения данной технологии выступает повышение безопасности для персонала, осуществляющего работу в пределах депо. Учитывая, что каждый год фиксируется до двух летальных случаев, связанных с электрообеспечением в депо, значительное снижение риска для жизни и здоровья персонала становится ключевым фактором при рассмотрении преимуществ использования бортовых накопителей энергии.

Во второй главе, посвященной анализу систем накопления энергии, был проведен обзор критериев для оценки накопителей энергии, предназначенных для установки на борту электроподвижного состава. Эти критерии включают в себя удельную мощность, удельную энергоемкость, коэффициент полезного действия цикла заряд/разряд, саморазряд, цикличность и срок службы.

После сравнительного анализа различных систем накопления энергии для установки на борту электроподвижного состава было выявлено, что

предпочтительным вариантом является гибридная установка, объединяющая суперконденсатор и литий-ионный аккумулятор. Такая гибридная система позволяет компенсировать недостатки одного типа накопителя энергии другим. Однако ограниченное пространство, химическая токсичность и потенциальная взрывоопасность могут осложнить внедрение гибридной установки на подвижном составе, что делает привлекательным использование исключительно суперконденсаторных модулей.

Третья глава посвящена экспериментальному исследованию электроэнергетических показателей работы ЭПС на московском метрополитене. Была разобрана СТЭ метрополитена и схема силового электрооборудования современного моторного вагона Московского метрополитена, где было выяснено следующее: в режиме рекуперативного торможения электродвигатели М1...М4 электроподвижного состава функционируют в режиме генератора, производя электрическую энергию. Этот ток направляется в силовой инвертор, который осуществляет преобразование в постоянный ток с напряжением, превышающим напряжение сети. Это увеличение напряжения необходимо для эффективной передачи энергии обратно в тяговую сеть. Далее, полученная энергия может двигаться по двум путям: либо возвращается в сеть через ЛК и Lф, либо направляется на тормозной резистор, предназначенный для диссипации избыточной электрической энергии в виде тепла. Это происходит в случае, когда тяговая сеть не в состоянии поглотить всю переданную энергию, что возможно при отсутствии потребителей или когда напряжение в точке подвижного состава превышает максимально допустимое значение для инвертора (хотя такие ситуации в настоящее время встречаются редко).

Также в данной главе были описаны два произведенных эксперимента по запуску ЭПС на Таганско-Краснопресненской линии Московского метрополитена и Кольцевой линии Московского метрополитена. Целью которых было определение энергетических показателей ЭПС при движении в реальных условиях. При помощи данных экспериментальных замеров было определено количество энергии, которое распределяется на межпоездной обмен (МПО) при рекуперативном торможении электроподвижного состава.

Четвертая глава посвящена имитационному моделированию работы ЭПС в СТЭ метрополитена. Целью данного моделирования было определение количества энергии, которое рассеивалось в тормозных резисторах при рекуперативном торможении. Поезд при движении по Таганско-Краснопресненской линии Московского метрополитена выработал 413.98 кВт·ч, из них выработанная энергия с помощью рекуперации на МПО составляет 245.884 кВт·ч, в тормозных резисторах было рассеяно в виде тепла 168.097 кВт·ч.

Из проведенного анализа расчетных и экспериментальных данных следует, что при текущих условиях использования БНЭ количество циклов перезарядки

бортового накопителя энергии на электроподвижном составе составит приблизительно 8 миллионов.

Согласно предварительным вычислениям, прогнозируемый срок службы накопителей энергии, установленных на электропоездах, эксплуатируемых в рамках Московского метрополитена, оценивается в тридцать один год.

Был разработан программный комплекс расчетов и анализа электрических параметров поезда (КРЭПП). Данное программное обеспечение предназначено для автоматизированного определения характеристик системы накопления энергии на борту, применимо как к электропоездам метрополитена, так и к грузовым и пассажирским поездам железнодорожного транспорта, а также к трамваям и троллейбусам. Программа анализирует электрические и механические параметры электроподвижного состава и, учитывая доступное пространство на электроподвижном составе, определяет необходимую емкость бортового аккумулятора электроэнергии для специфической модификации электроподвижного состава, эксплуатируемого на заданном маршруте.

Также были верифицированы результаты экспериментального замера движения ЭПС по Таганско-Краснопресненской линии Московского метрополитена с результатами имитационного моделирования движения ЭПС в схожих условиях.

В пятой главе была разработана схема и конструкция бортового накопителя на электроподвижном составе на основе результатов имитационного моделирования и экспериментальных замеров. Разработан наиболее вероятный алгоритм работы БНЭ в составе ЭПС.

Были определены основные электрические параметры БНЭ: обратимая энергоемкость 6 кВт·ч; длительность заряда-разряда 10-20 секунд; диапазон напряжений 600...925 В (рабочий ход); диапазон напряжений 450-500...600 В (аварийный ход). Для выбора наиболее подходящего места для размещения БНЭ были проведены инструментальные обследования вагонов типа 81-765/766/767 и 81-775/776/777. Исследования показали, что оптимальная локализация для монтажа указанных устройств представлена подвагонным пространством не моторных промежуточных вагонов моделей 81-767 и 81-777. Также была произведена оценка КПД работы БНЭ в составе ЭПС, который составляет от 93 до 95 %.

Шестая глава посвящена технико-экономической оценке использования БНЭ в составе ЭПС Московского метрополитена.

При оценке технико-экономического эффекта от использования бортового накопителя энергии метрополитена автор учитывал следующие показатели: затраты на коммутационную аппаратуру; стоимость сниженной установленной мощности тяговых подстанций; стоимость оборудования депо; капитальные затраты на БНЭ; величина, на которую была снижена установленная мощность подстанций; цена подводимой установленной мощности от питающего центра;

цена электроэнергии; экономия за счет снижения энергопотребления; расходы на эксплуатацию БНЭ; сэкономленные эксплуатационные затраты на обслуживание СТЭ в депо и тупиках; избыточная энергия рекуперации в год; энергия, необходимая для отвода тепла реостатов из подземной части метрополитена; потери энергии в ТП в год; потери энергии в ТС в год.

Исходя из проведенных исследований, период возврата инвестиций в бортовой аккумулятор энергии, с учетом интеграции силовых линий и прочего оборудования, требуемого для установки на электроподвижном составе Московского метрополитена, составляет 6,5 лет, а срок службы установки составляет 31 год.

В существующей системе тягового электроснабжения и распределения энергии рекуперации на электроподвижном составе метрополитена автором продемонстрированы проблемы распределения избыточной энергии рекуперации. На основе экспериментальных замеров и имитационного моделирования определено количество избыточной энергии рекуперации, которое бесполезно рассеивается в тормозных резисторах электроподвижного состава. Была предложена система накопления энергии в составе электрооборудования ЭПС, которая может полностью или частично сохранять избыточную энергию рекуперации, а также при аварийных ситуациях в СТЭ метрополитена служить источником электроэнергии для автономного хода ЭПС, что повысит безопасность транспортировки людей из тоннеля до близлежащей станции. Также было показано, что БНЭ может использоваться для автономного хода ЭПС в тупиках и ангарах депо, что повысит безопасность обслуживания электропоездов.

Разработка Плетнева Д.С. и представленные результаты, доказывающие необходимость внедрения накопителей энергии в состав электрооборудования электроподвижного состава, делают эту работу без сомнения значимой, актуальной и достойной присуждения степени кандидата технических наук ее автору.

Достоинство и недостатки в содержании и оформлении диссертации, влияние отмеченных недостатков на качество исследования.

К достоинствам диссертационного исследования можно отнести актуальность темы, научную новизну и практическую значимость. Автором грамотно и последовательно изложен материал диссертации, в которой изложены новые, научные и обоснованные технические решения и разработки.

Замечания по диссертационной работе:

1. В диссертации указывается, что бортовой накопитель энергии может устанавливаться на ЭПС типа 81-765/766/767 и 81-775/776/777, однако цифровое моделирование и экспериментальные замеры были проведены с использованием вагонов 81-765/766/767. Неясно следующее: для ЭПС типа 81-775/776/777 достаточно ли будет объема энергии накопителя, рассчитанного для 81-765/766/767?

2. Из текста диссертации не ясно, была ли учтена электроэнергия, предназначенная для собственных нужд при расчете параметров бортового накопителя энергии электроподвижного состава?

3. Для сравнения полученных результатов моделирования в программном комплексе Etar необходимо было использовать еще один программный продукт.

4. Почему при проведении экспериментального замера был выбран ЭПС типа 81-765/766/767, а не более новый 81-775/776/777 тип ЭПС?

5. На рисунке 34 диссертации, где указаны результаты замеров показателей работы ЭПС на Таганско-Краснопресненской линии Московского метрополитена и рисунке 73, где указаны результаты цифрового моделирования ЭПС на Таганско-Краснопресненской линии Московского метрополитена, ток рекуперации имеет разные значения. При экспериментальном замере ток рекуперации имеет положительные значения, а при моделировании – отрицательное, что вводит в заблуждение.

6. В пункте 1.1 диссертации указывается формула для расчета величины сэкономленных потерь в тяговой сети, однако сама величина сэкономленных потерь не приводится.

7. Экспериментальные замеры работы ЭПС были произведены для двух линий Московского метрополитена: Таганско-Краснопресненская и Кольцевая, однако моделирование производилось лишь для Таганско-Краснопресненской линии. Почему не было произведено моделирование Кольцевой линии метрополитена?

8. В тексте автореферата на стр. 23 имеется опечатка: «Разработана методика и произведена технико-электротехническая оценка эффекта от применения накопителя энергии на борт ЭПС метрополитена в современных условиях эксплуатации». Скорее всего, речь идет о «технико-экономической оценке».

Отмеченные недостатки не снижают научную и практическую ценность диссертационной работы.

Соответствие автореферата основному содержанию диссертации

Автореферат полностью и корректно отражает основное содержание диссертации в кратком изложении.

Соответствие содержания диссертации заявленной специальности

Содержание диссертации соответствует заявленной научной специальности 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы (п.1. Развитие общей теории электротехнических комплексов и систем, анализ системных свойств и связей, физическое, математическое, имитационное и компьютерное моделирование компонентов электротехнических комплексов и систем, включая электромеханические, электромагнитные преобразователи энергии и электрические аппараты, системы электропривода, электроснабжения и электрооборудования. п.3. Разработка, структурный и параметрический синтез,

оптимизация электротехнических комплексов, систем и их компонентов, разработка алгоритмов эффективного управления, п.4. Исследование работоспособности и качества функционирования электротехнических комплексов, систем и их компонентов в различных режимах, при разнообразных внешних воздействиях, диагностика электротехнических комплексов).

В диссертации выявлены причины неэффективного использования избыточной энергии рекуперации. В рамках анализа существующей системы тягового электроснабжения и эффективности рекуперативного торможения на электроподвижном составе метрополитена исследователь выявил проблематику эффективного распределения излишней рекуперированной энергии. Путем проведения экспериментальных измерений и имитационного моделирования было установлено, что значительная часть избыточной энергии рекуперации неэффективно теряется, рассеиваясь в тормозных резисторах электроподвижного состава. В качестве решения проблемы предложена интеграция системы аккумулирования энергии в комплект электрооборудования электроподвижного состава, способная полностью или частично накапливать эту избыточную энергию.

Соответствие диссертации и автореферата требованиям ГОСТ Р 7.011-2011.

Диссертация и автореферат соответствуют требованиям ГОСТ Р 7.0.11-2011, содержат все необходимую структуру и верно оформленный список литературы.

Заключение по диссертации о соответствии её требованиям «Положения о порядке присуждения учёных степеней» по пунктам 10, 11 и 14.

Диссертация написана автором самостоятельно, обладает внутренним единством, содержит новые научные результаты и положения, выдвигаемые для публичной защиты, содержит рекомендации по использованию научных выводов, имеет практическое применение, и свидетельствует о личном вкладе автора в науку, что соответствует требованиям п.10 «Положения о порядке присуждения учёных степеней».

Согласно п. 11 «Положения о присуждении ученых степеней» основные научные результаты диссертации опубликованы в 15 рецензируемых научных изданиях, в том числе 2 статьи, опубликованы в журналах, входящих в перечень ВАК России и 7 статья и материалах конференций опубликованных в изданиях, индексируемых наукометрической базой Scopus.


В рассматриваемой диссертации имеются ссылки на авторов и источники заимствованных материалов, что соответствует требованиям п.14 «Положения о порядке присуждения учёных степеней».

Диссертация Плетнева Дмитрия Сергеевича на соискание ученой степени кандидата технических наук на тему «Бортовой накопитель энергии на

электроподвижном составе метрополитена» является научно-квалификационной работой, в которой изложены новые научно обоснованные технические решения и разработки, имеющие существенное значение для системы тягового электроснабжения по эффективному использованию избыточной энергии рекуперации ЭПС, имеющие существенное значение для развития страны, что соответствует требованиям п.9 «Положения о порядке присуждения учёных степеней».

В целом, представленная диссертация на тему «Бортовой накопитель энергии на электроподвижном составе метрополитена» по актуальности, новизне и значимости полученных результатов отвечает представленным требованиям к кандидатским диссертациям, а её автор, Плетнев Дмитрий Сергеевич достоин присуждения учёной степени кандидата технических наук по специальности 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы (технические науки).


Официальный оппонент,
Суслов Константин Витальевич,
доктор технических наук (05.14.02), доцент,
профессор кафедры «Гидроэнергетики
и возобновляемых источников энергии»
федерального государственного
бюджетного образовательного учреждения
высшего образования «Национальный
исследовательский университет «МЭИ»


К. В. Суслов
«18» марта 2024 г.

Адрес: 111250, Россия, г. Москва, вн.тер.г. муниципальный округ Лефортово,
ул. Красноказарменная, д. 14, стр. 1
Телефон: +7 495 362-75-60
Электронная почта: universe@mpei.ac.ru

Я, Суслов Константин Витальевич, даю согласие на включение своих персональных данных, содержащихся в настоящем отзыве, в документы, связанные с защитой диссертации Плетнева Дмитрия Сергеевича, и их дальнейшую обработку.

«18» марта 2024г.


К.В. Суслов

Подписи Суслова К.В. удостоверяю



ЗАМЕСТИТЕЛЬ НАЧАЛЬНИКА
ОТДЕЛА РАБОТЫ С ПЕРСОНАЛОМ
Л.И. ПОЛЕВАЯ