

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию

Белова Михаила Николаевича

на тему «Стационарный управляемый накопитель энергии в системе тягового электроснабжения метрополитена», представленную на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности

2.4.2. Электротехнические комплексы и системы

Актуальность избранной темы.

Внимание к повышению энергоэффективности способствует необходимости разработки и внедрения энергосберегающих решений в городской инфраструктуре и её транспортных системах. Диссертационное исследование направлено на анализ эффективности внедрения управляемых накопителей энергии (УНЭ) для повышения эффективности работы систем тягового электроснабжения метрополитенов.

Сбережение электроэнергии выступает как ключевое направление развития энергетической отрасли, подтверждённое ежегодными докладами в Российской Федерации. Московский метрополитен, как один из крупнейших потребителей электроэнергии, особенно заинтересован в эффективных решениях для экономии энергии. Развитие технологий накопления электрической энергии и увеличение производства современных накопителей предоставляют новые возможности для улучшения энергоэффективности электрифицированного рельсового транспорта.

Применение УНЭ в системах тягового электроснабжения выступает как актуальное направление для повышения эффективности использования систем тягового электроснабжения (СТЭ), снижения капитальных затрат и повышения энергоэффективности. Таким образом, разработка и применение УНЭ представляют значимый вклад в устойчивое развитие городских транспортных инфраструктур.

Достоверность и научная новизна результатов, полученных в диссертационном исследовании.

Результаты теоретического анализа коррелируют с данными, полученными при помощи систематической обработки экспериментальных измерений электротехнических характеристик работы оборудования нескольких совмещённых тяговых подстанций Московского метрополитена.

Результаты диссертации опубликованы в 13 научных изданиях и журналах, в том числе 2 статьи, опубликованы в журналах, входящих в перечень ВАК России и 7 статей опубликованы в изданиях «Scopus».

Научная новизна результатов, полученных в диссертационном исследовании:

- Разработана методика определения мест установки управляемых накопителей энергии (УНЭ) в системах тягового электроснабжения (СТЭ) метрополитенов с применением матричного анализа для эквивалентных схем СТЭ.

- На основе качественного и количественного анализа подтверждена положительная роль интеграции УНЭ в СТЭ для повышения эффективности применения рекуперированной энергии на исследуемом объекте.

- Разработаны алгоритмы управления УНЭ, которые оптимизированы для работы в различных условиях эксплуатации.

- Предложен метод для оценки техникоэкономического эффекта от использования УНЭ в СТЭ метрополитена, адаптированный к специфике изучаемого объекта.

- Описаны математические модели функционирования накопителей различных типов, интегрированное в программное обеспечение для выполнения расчетов СТЭ метрополитенов.

Теоретическая и практическая ценность результатов исследования:

- Предложена конструкция УНЭ, отличающаяся модульностью, универсальностью и компактностью, адаптированная к специфическим условиям ограниченного пространства СТП метрополитена.

- Реализованы технические решения на базе УНЭ, направленные на оптимизацию качества электроснабжения и повышения энергоэффективности в системах тягового электроснабжения метрополитенов.

- Разработаны программные модули для симуляции работы электрохимических и суперконденсаторных накопителей энергии, которые были интегрированы в вычислительно-измерительный комплекс, разработанный на кафедре «Электроэнергетика транспорта» Российского университета транспорта (МИИТ).

- Получено подтверждение значительных электротехнических преимуществ использования УНЭ, а также выполнен анализ влияния локации установки УНЭ (включая размещение на тяговых подстанциях, в середине межподстанционных участков и в консольном исполнении) на электротехнические параметры системы.

- Рассмотрена перспектива внедрения УНЭ на СТП-817 Московского метрополитена, что представляет собой практическую реализацию теоретических разработок в условиях реальной эксплуатационной среды.

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

Научные положения, выводы и рекомендации, сформулированные в диссертации М.Н Белова, представляют собой ряд научно обоснованных подходов, методов и рекомендаций, направленных на повышение энергоэффективности системы тягового электроснабжения метрополитена.

Апробация результатов.

Основные положения и результаты работы рассматривались, докладывались и обсуждались:

на III Международной выставке-конференции «ИНТЕРМЕТРО», «Перспективы развития метрополитенов в условиях интенсивного внедрения новых технологий: инфраструктура и подвижной состав». МИИТ, 2019, 2021, 2023 гг;

на 10 Международном симпозиуме ElTrans, «Электрификация и развитие ж.д. транспорта России. Традиции, современность, перспективы», С- Петербург, 2019г;

на III международной выставке «INTERNATIONAL YOUTH CONFERENCE ON RADIO ELECTRONICS, ELECTRICAL AND POWER ENGINEERING», Москва, МЭИ, 2021 г;

на V Всероссийской научно-технической конференции с международным участием, «Приборы и методы измерений, контроля качества и диагностики в промышленности и на транспорте», Омск, 2022 г;

на заседаниях кафедры «Электроэнергетика транспорта» РУТ(МИИТ) 2020, 2021, 2022 гг.;

на объединённом научно-техническом семинаре (кафедра «Электроэнергетика транспорта» и кафедра «Электропоезда и локомотивы») РУТ (МИИТ) 2023.

Оценка содержания диссертации, ее завершенность.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, каждая из которых содержит итоговые выводы, заключения, библиографического списка из 151 наименований и 183 страниц машинописного текста, включая 129 рисунков, 15 таблиц.

Анализ содержания диссертации, ее завершенность.

Во введении диссертации акцентируется внимание на актуальности темы исследования, определяются научная новизна, теоретическая и практическая значимость результатов, формулируются цели и задачи работы. Подчеркивается степень достоверности результатов и научные положения, предложенные к защите.

Первая глава диссертации углубленно занимается анализом текущего состояния и перспектив развития систем накопления энергии, применяемых в системах тягового электроснабжения (СТЭ) для городского и пригородного

рельсового транспорта, в том числе метрополитена. Она начинается с классификации и обзора разнообразных типов накопителей энергии, включая их основные характеристики, принципы работы и области применения.

Далее автор представляет обзор критериев отбора накопителей энергии для использования в СТЭ, акцентируя внимание на удельной энергоемкости, мощности, величине саморазряда, цикличности, КПД цикла заряд/разряд и сроке службы. Эти параметры становятся ключевыми при выборе оптимальных решений для конкретных условий эксплуатации транспортных систем.

Важной частью главы является анализ российского и мирового опыта применения накопителей энергии в СТЭ, включая успешные примеры и проекты, реализованные в различных странах. Рассматриваются как традиционные, так и инновационные подходы к использованию накопительных систем для повышения эффективности и надежности электроснабжения, сокращения затрат и уменьшения воздействия на окружающую среду.

Анализ международного и российского опыта позволяет автору выявить наиболее перспективные направления для дальнейшего изучения и внедрения в СТЭ метрополитенов. В частности, акцентируется внимание на электрохимических аккумуляторах литий-ионной системы, суперконденсаторах и маховиковых накопителях как на наиболее подходящих вариантах для метрополитенов, учитывая их высокую удельную энергоемкость, эффективность и экологичность.

Во второй главе осуществляется разработка конструкции управляемых накопителей энергии, предназначенных для интеграции в систему тягового электроснабжения Московского метрополитена. Глава начинается с подробного описания принципиальной схемы УНЭ, включающей в себя накопительные элементы, DC-DC преобразователи, системы управления накопителями и блоки измерений. Рассматривается важность таких характеристик конструкции, как модульность, универсальность, обслуживаемость, унификация и компактность, обусловленная спецификой условий эксплуатации в подземных пространствах метрополитена.

Далее автор переходит к анализу возможных мест установки УНЭ в рамках СТЭ, выделяя варианты размещения внутри тяговых подстанций, на межподстанционных участках, а также консольное исполнение. Описывается методика для определения наиболее подходящих локаций для установки УНЭ, основанная на анализе электротехнических параметров, потребностей в энергии и возможностей для эффективного использования рекуперированной

энергии. Эта методика позволяет оптимизировать выбор места установки с точки зрения повышения эффективности и надежности работы СТЭ.

Автор подчеркивает значимость интеграции УНЭ в существующую инфраструктуру метрополитена для улучшения качества электроснабжения и повышения энергоэффективности. Рассматриваются различные функциональные возможности УНЭ, включая их использование в качестве резервных источников энергии, усиливающего оборудования для тяговой сети и средств для снижения пусковых токов и потерь энергии.

В завершение главы приводятся результаты обследования межподстанционных зон Арбатско-Покровской линии для оценки потенциальных мест установки УНЭ. Исследование подтверждает возможность использования нераспределенных пространств, в том числе канализационных камер, для размещения накопительных систем. Такой подход демонстрирует инновационное решение проблемы ограниченности пространства на тяговых подстанциях и способствует повышению эффективности энергоснабжения метрополитена.

Третья глава посвящена разработке математических моделей управляемого накопителя энергии и алгоритмов управления, адаптированных к различным условиям эксплуатации в системе тягового электроснабжения метрополитена. В этой части работы представлены результаты моделирования функционирования литий-ионных и суперконденсаторных накопителей, а также одно- и двухцепных DC-DC преобразователей.

Автор начинает с описания математической модели литий-ионного накопителя, акцентируя внимание на ключевых параметрах, влияющих на процесс заряда и разряда. Далее следует разработка программных компонентов для моделирования работы электрохимических и суперконденсаторных накопителей. Эти модели позволяют оценить эффективность использования различных типов накопителей в конкретных условиях эксплуатации метрополитена, а также определить оптимальные параметры их работы.

Особенностью разработанных алгоритмов управления УНЭ является возможность их адаптации к изменениям в режимах потребления энергии и в условиях работы СТЭ. Это достигается за счет использования данных о текущем состоянии электроэнергетической системы для контроля процесса работы накопителей в реальном времени. Таким образом, системы управления способны оптимально распределять нагрузку между различными источниками энергии, минимизируя потери и повышая общую эффективность системы.

В главе также представлены результаты имитационного моделирования

работы УНЭ с использованием разработанных математических моделей и алгоритмов управления. Эти результаты демонстрируют, как внедрение УНЭ позволяет улучшить параметры качества электроэнергии в СТЭ, снизить потребление энергии за счет более эффективного использования рекуперированной энергии и уменьшить нагрузку на основные элементы электросети.

Четвертая глава диссертации сфокусирована на имитационном моделировании работы управляемых накопителей энергии в системе тягового электроснабжения метрополитена. В этой части работы представлены результаты моделирования, демонстрирующие влияние УНЭ на эффективность работы СТЭ.

Исследование начинается с разработки детальной имитационной модели, которая включает в себя все ключевые аспекты работы СТЭ, такие как передача и распределение электроэнергии, а также процессы рекуперации энергии. Модель учитывает различные режимы работы метрополитена, изменения в потреблении энергии и возможности для улучшения эффективности энергопотребления с помощью УНЭ.

Важной частью главы является анализ влияния местоположения УНЭ на эффективность их работы. Рассматриваются различные варианты размещения УНЭ, включая установку на тяговых подстанциях, в середине межподстанционных участков и на конечных участках линии с консольным питанием. Автор подчеркивает, что выбор оптимального места для установки УНЭ имеет ключевое значение для максимизации преимуществ от их использования.

В главе также содержится раздел, посвященный верификации результатов моделирования. Автор описывает процесс проверки достоверности полученных данных путем сравнения с реальными показателями работы СТЭ метрополитена.

В пятой главе осуществлена оценка эффективности и экономической целесообразности реализации проекта по интеграции управляемых накопителей энергии в инфраструктуру тягового электроснабжения. В рамках анализа, с применением специально разработанного метода расчета периода окупаемости УНЭ, который включает в себя оценку начальных инвестиций и выгоды, получаемой за счет уменьшения потребления электроэнергии и операционных затрат, были определены основные экономические индикаторы проекта.

Исследование показало, что при выборе конфигурации, состоящей из 15 параллельно соединенных цепей накопления, период возврата инвестиций превышает предполагаемый срок эксплуатации установки, ставя под

сомнение рентабельность такого вложения средств. Тем не менее, учитывая вклад УНЭ в улучшение эффективности работы всей системы, а не только отдельных подстанций, период окупаемости значительно снижается до пяти лет, повышая привлекательность проекта в экономическом аспекте. Кроме того, была проведена оценка чистого дисконтированного дохода, принимая в расчет ожидаемое увеличение стоимости электроэнергии, что дополнительно подтверждает экономическую выгоду от внедрения проекта.

Замечания по диссертационной работе:

1. В главе 1 наряду с прочими типами накопителей энергии рассмотрены гидроаккумулирующие электростанции. Информация о них явно является избыточной.

2. В главе 2 предложены чертежи шкафа с накопителями энергии. Высота предложенного устройства составляет 1850 мм. В связи с экономией пространства, более целесообразным было бы увеличить высоту устройства.

3. Проводилось ли сравнение результатов моделирования накопителей энергии из главы 3 с результатами замеров показателей работы реальных накопителей энергии?

4. Из текста следует, что накопитель энергии рассчитан для работы на уровень напряжения 1000 В, что значительно превосходит допустимый уровень напряжения в тяговой сети метрополитена.

5. В работе не было проведено сравнение с иными способами использования энергии рекуперации, например с использованием выпрямительно-инверторных агрегатов.

6. В работе отсутствует подробное описание различных факторов, влияющих на результаты моделирования движения поезда. Были ли учтены в расчётах продольный и поперечный профиль участка и сопротивления собственных нужд подстанций и подвижного состава.

7. В тексте работы приведено моделирование как литий-ионного, так и суперконденсаторного накопителя энергии, однако неясно какая именно модель была использована в каждом из приведённых опытов.

8. Каким образом производился учёт роста стоимости электроэнергии для вычисления чистого дисконтированного дохода в главе 5?

9. В тексте работы присутствуют незначительные неточности редакционного характера.

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 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, содержат всю 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».

В соответствии с п. 11 «Положения о порядке присуждения учёных степеней» основные научные результаты диссертации опубликованы в 13 рецензируемых научных изданиях и журналах, в том числе 2 статьи, опубликованы в журналах, входящих в перечень ВАК России и 7 статей опубликованы в изданиях «Scopus».

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

Диссертация Белова Михаила Николаевича на соискание ученой

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию

Белова Михаила Николаевича

на тему «Стационарный управляемый накопитель энергии в системе тягового электроснабжения метрополитена», представленную на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности

2.4.2. Электротехнические комплексы и системы

Актуальность диссертационной работы

Разработка и внедрение инновационных решений в сфере энергосбережения играет критическую роль в оптимизации городской инфраструктуры и, в частности, метрополитенов, направленную на повышение их эффективности и минимизацию экологического воздействия.

В настоящее время перед системами электроснабжения метрополитена стоит задача внедрения передовых технологий для увеличения энергоэффективности и уменьшения отрицательного влияния на окружающую среду в условиях больших городов.

Внедрение систем управляемого аккумулирования энергии отвечает стратегическим целям повышения энергетической эффективности и сокращения углеродного следа в городских агломерациях, способствуя развитию экологически чистых и экономичных транспортных систем.

Цель проектирования и применения систем накопления энергии в контексте метрополитенов заключается в оптимизации потребления энергии и повышении их экологической и экономической эффективности. Таким образом, исследование возможностей применения управляемых накопителей энергии для улучшения энергоэффективности и снижения эксплуатационных затрат метрополитенов представляет собой значимый вклад в развитие устойчивых городских транспортных инфраструктур.

Достоверность и научная новизна результатов, полученных в диссертационном исследовании.

Результаты теоретических исследований находят подтверждение в данных, полученных в результате обработки экспериментальных системных измерений электротехнических показателей работы оборудования системы тягового электроснабжения на нескольких действующих совмещенных тяговых подстанциях (СТП) Московского метрополитена.

Результаты диссертации опубликованы в 13 научных изданиях и журналах, в том числе 2 статьи, опубликованы в журналах, входящих в перечень ВАК России и 7 статей опубликованы в изданиях «Scopus».

Научная новизна результатов, полученных в диссертационном исследовании:

- Разработан метод определения локаций установки управляемых накопителей энергии (УНЭ) в системах тягового электроснабжения (СТЭ) метрополитена с использованием матричного анализа эквивалентных схем СТЭ.

- Доказано на качественном и количественном уровнях, что интеграция УНЭ в СТЭ улучшает параметры качества электроэнергии, включая уровень напряжения, и повышает эффективность использования рекуперированной энергии для изучаемого объекта;

- Созданы алгоритмы управления УНЭ, адаптированные к различным сценариям их эксплуатации;

- Определен метод оценки технико-экономических преимуществ применения УНЭ в СТЭ метрополитена, специфичных для анализируемого объекта;

- Сформулированы математические модели функционирования накопителей энергии разных типов с возможностью их интеграции в программное обеспечение для расчетов СТЭ метрополитенов.

Теоретическая и практическая ценность результатов исследования:

- Создана новая конструкция управляемых накопителей энергии (УНЭ), которая характеризуется модульностью, универсальностью и компактностью, адаптированная к условиям ограниченных пространств объединенных тяговых подстанций (СТП).

- Внедрены технические решения, основанные на использовании УНЭ, для улучшения качества электроснабжения и повышения энергоэффективности систем тягового электроснабжения метрополитена.

- Разработаны программные компоненты для симуляции функционирования электрохимических и суперконденсаторных накопителей энергии, которые были интегрированы в вычислительный и измерительный комплекс, созданный на кафедре «Электроэнергетика транспорта» РУТ (МИИТ).

- Подтверждены значительные электротехнические преимущества от применения УНЭ и проанализировано влияние местоположения установки УНЭ (в тяговой подстанции, в середине межподстанционного участка, в консольном исполнении) на электротехнические характеристики.

- Разработан проект внедрения УНЭ на СТП-817 Московского метрополитена.

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

Научные положения, выводы и рекомендации, сформулированные в диссертации М.Н. Белова, представляют собой ряд научно обоснованных подходов, методов и рекомендаций, направленных на повышение энергоэффективности системы тягового электроснабжения метрополитена.

Апробация результатов.

Основные положения и результаты работы рассматривались, докладывались и обсуждались на:

- III Международной выставке-конференции «ИНТЕРМЕТРО», «Перспективы развития метрополитенов в условиях интенсивного внедрения новых технологий: инфраструктура и подвижной состав». МИИТ, 2019, 2021, 2023 гг;

- 10 Международном симпозиуме ElTrans, «Электрификация и развитие ж.д. транспорта России. Традиции, современность, перспективы», С- Петербург, 2019г;

- III международной выставке «International youth conference on radio electronics, electrical and power engineering», Москва, МЭИ, 2021 г;

- V Всероссийской научно-технической конференции с международным участием, «Приборы и методы измерений, контроля качества и диагностики в промышленности и на транспорте», Омск, 2022 г;

- заседаниях кафедры «Электроэнергетика транспорта» РУТ(МИИТ) 2020, 2021, 2022 гг.;

- объединённом научно-техническом семинаре (кафедра «Электроэнергетика транспорта» и кафедра «Электропоезда и локомотивы») РУТ (МИИТ) 2023.

Оценка содержания диссертации

Диссертация состоит из введения, пяти глав, каждая из которых содержит итоговые выводы, заключения, библиографического списка из 151 наименований и 183 страниц машинописного текста, включая 129 рисунков, 15 таблиц.

Анализ содержания диссертации

Во введении обосновывается актуальность исследования, научная новизна, теоретическая и практическая значимость научных результатов и научные положения, выносимые на защиту, степень достоверности результатов, также сформулированы цель и задачи исследования.

Первая глава посвящена анализу существующих решений в области накопителей энергии и российского и мирового опыта их применения в системах тягового электроснабжения различных видов городского и пригородного рельсового транспорта.

В данном разделе был проведен детальный сравнительный анализ разнообразных типов накопителей, на основе которого были сформулированы критерии для их отбора, способствующие оптимальному выбору накопительных систем. Определены шесть ключевых параметров, играющих решающую роль в выборе типа накопителя:

- Удельная энергоёмкость, отражающая количество энергии, которое накопитель может хранить относительно своего веса;

- Удельная мощность, указывающая на способность накопителя быстро отдавать энергию;
- Величина саморазряда, характеризующая потери заряда в состоянии покоя;
- Цикличность, обозначающая количество возможных циклов зарядки и разрядки без существенной потери емкости;
- Коэффициент полезного действия (КПД) цикла заряд/разряд, отражающий эффективность процессов зарядки и разрядки;
- Срок службы, указывающий на возможную продолжительность эффективного и безопасного использования накопителя.

Кроме того, были исследованы и проанализированы опыт и практики внедрения накопителей энергии в системы тягового электроснабжения городского транспорта на российском и международном уровнях. Этот анализ позволил выявить наиболее перспективные направления и технологии для применения в условиях специфики городских транспортных систем, учитывая как технические параметры накопителей, так и их экономическую эффективность.

Анализ международного и российского опыта показал, что наиболее перспективными типами накопителей для СТЭ метрополитенов являются электрохимические аккумуляторы литий-ионной системы, суперконденсаторы и маховиковые накопители кинетической энергии.

Вторая глава посвящена разработке схемы и конструкции управляемого накопителя энергии, специально адаптированной для использования в системе тягового электроснабжения Московского метрополитена. Были определены потенциальные точки для интеграции УНЭ в существующую сеть СТЭ, а также разработана методология для выявления подстанций, где внедрение УНЭ окажется наиболее выгодным с точки зрения повышения эффективности.

Принципиальная схема предложенного устройства включает в себя накопительный элемент, DC-DC преобразователь, систему управления накопителем и блок измерения. Подчеркивается важность модульности, универсальности, обслуживаемости, унификации и компактности в конструкции.

Автор демонстрирует положительные аспекты внедрения УНЭ в СТП, учитывая различные функции, которые может выполнять такое оборудование, и предлагает схему размещения УНЭ в составе СТП. В частности, рассмотрены сценарии использования УНЭ вне тяговых подстанций для усиления сети и снижения необходимости в дополнительных подстанциях, а также для облегчения пусковых режимов и снижения потерь в тяговой сети.

В контексте проблем, связанных с консольными режимами питания, предложено использование передвижных накопительных станций для предотвращения чрезмерных нагрузок на оборудование и увеличения его срока службы.

Разработана методика матрично-топологического анализа электрических цепей, которая позволяет комплексно учитывать взаимодействия электроустановок по всей линии, включая тяговые подстанции и находящееся на них оборудование, обеспечивая эффективный и быстрый расчет оптимального расположения УНЭ.

В рамках исследования было проведено обследование межподстанционных зон Арбатско-Покровской линии для оценки потенциала установки УНЭ, выявившие пригодные для этого площади, в том числе в канализационных камерах, что подчеркивает инновационный подход к использованию доступного пространства для повышения эффективности энергоснабжения метрополитена.

В третьей главе были разработаны и представлены математические модели ключевых элементов управляемого накопителя энергии. Моделирование охватило накопительные элементы двух типов: литий-ионные и суперконденсаторные батареи, а также одноцепные и двуцепные DC-DC преобразователи, управляемые как по напряжению, так и по току. Алгоритмы управления накопителем были разработаны для оптимизации процессов рекуперации энергии и регулирования мощности подстанций.

Накопители были представлены в моделях, управляемых по напряжению как источники тока и управляемых по току как источники напряжения, с подробным математическим описанием их работы в различных режимах. Эти модели помогли в анализе процессов заряда и разряда, выявлении оптимальных режимов работы и оценке эффективности накопителей в различных условиях эксплуатации.

Были разработаны системы управления для управляемых накопителей энергии, нацеленные на оптимизацию заряда, разряда и эффективного использования рекуперированной энергии. Используя адаптивные алгоритмы, эти системы способны гибко реагировать на изменения в режимах работы накопителя и требованиях энергосистемы, обеспечивая при этом высокую эффективность и надежность. Системы управления реализованы как конечные автоматы с переходами между состояниями в зависимости от условий работы.

Были предложены усовершенствованные схемы управления для DC-DC преобразователей, включая регулирование ширины управляющего импульса в зависимости от тока в цепи накопителя. Это позволило повысить точность и эффективность процессов заряда и разряда, сократить время заряда и улучшить общие характеристики системы накопления.

Результаты моделирования подчеркивают значительное улучшение работы накопителей при использовании разработанных методов управления, в том числе в условиях рекуперации энергии и адаптации к изменениям в энергосистеме.

В целом, данная глава предоставляет комплексный подход к моделированию, анализу и управлению ключевыми компонентами системы управляемых накопителей энергии, демонстрируя их эффективность и возможности оптимизации для использования в московском метрополитене.

Четвёртая глава исследования посвящена результатам имитационного моделирования УНЭ в СТЭ в различных конфигурациях. Основное внимание уделено оценке эффективности использования УНЭ разного объема на примере одной изучаемой подстанции, где было выявлено, что прирост экономии электроэнергии не является пропорциональным увеличению числа цепочек накопителей, что становится важным фактором при выборе объема накопителей для каждой конкретной установки.

Анализ показал, что, так как, межподстанционные зоны СТЭ метрополитенов связаны электрически через шины питающих тяговых подстанций, все элементы схемы находятся во взаимовлиянии. Это взаимодействие было учтено при анализе эффективности рекуперативного торможения и влияния внедрения УНЭ на различное количество подстанций линии. Выявлено, что внедрение УНЭ ведет к повышению напряжения в тяговой сети и снижению токов тяговых подстанций, что и стало основой для оценки эффективности.

Помимо этого, рассмотрено влияние УНЭ на участках с консольным питанием, где моделирование показало существенную экономию электроэнергии и значительное снижение пусковых токов.

Также была оценена разработанная методика выбора мест установки УНЭ, представленная во второй главе, с применением матричного анализа для определения влияния рекуперирующих составов на эффективность накопления энергии в разных зонах СТЭ. Полученные данные иллюстрируют зависимость эффективности накопления от количества тяговых подстанций, оснащенных УНЭ, и представлены в графической форме.

В пятой главе проведена технико-экономическая оценка внедрения управляемого накопителя энергии в систему тягового электроснабжения. Используя разработанную формулу для расчета срока окупаемости УНЭ, учитывающую как капитальные затраты, так и экономию от снижения энергопотребления и расходов на эксплуатацию, были выявлены ключевые финансовые показатели проекта.

Результаты расчетов показывают, что при оптимальной конфигурации из 15 параллельных цепочек накопителей, срок окупаемости превышает срок службы установки, что ставит под вопрос экономическую целесообразность таких инвестиций. Однако при рассмотрении влияния УНЭ на всю линию, а не только на одну подстанцию, срок окупаемости существенно сокращается до 5 лет, что делает проект более привлекательным с экономической точки зрения. Дополнительно был проанализирован чистый дисконтированный доход от

внедрения УНЭ, учитывая предполагаемый рост стоимости электроэнергии, что позволило более полно оценить финансовую выгоду от проекта.

Замечания по диссертационной работе:

1. В работе делается большой акцент на применении суперконденсаторных батарей в качестве накопительного элемента для предложенной установки. Можно ли без значительных изменений конструкции использовать другие виды накопителей энергии, включая рассмотренные в данной работе?

2. В целях и на протяжении всей работы неоднократно упоминается повышение качества электроэнергии. О каких показателях качества электроэнергии идёт речь?

3. Во всех приведённых схемах, разработанных в используемом программном комплексе для расчётов систем тягового электроснабжения между выпрямительными агрегатами и шинами + 825 В тяговых подстанций включены дополнительные элементы, не предусмотренные однолинейными схемами. С какой целью?

4. При анализе влияния расположения накопителей энергии на эффективность использования энергии рекуперации не приведено описания полученных результатов, представленных в графическом виде.

5. На рисунке 4.20 представленная зависимость исходит из нуля, однако в последующем описании отмечено, что график имеет логарифмический характер, что противоречит графическим данным.

6. В главе 4 указано, что «В качестве аккумулирующего элемента выступают суперконденсаторные батареи, параметры которых приближены к реальным». Суперконденсаторные батареи какого производителя использованы в качестве источника данных?

7. В главе 2 представлены результаты обследования межподстанционной зоны Т-26 – Т-14, которая, исходя из текста диссертации и представленных фото является преимущественно открытой. Однако, в названии подпункта 2.4.4 указано «Обследование тоннеля ...», что является неточным.

8. В диссертационной работе не приведено сравнение эффективности неуправляемых и управляемых накопителей энергии, оттого неясно, насколько предложенное решение более эффективно, чем более ранние разработки.

9. В тексте работы присутствуют незначительные неточности редакционного характера.

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 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, содержат всю 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».

В соответствии с п. 11 «Положения о порядке присуждения учёных степеней» основные научные результаты диссертации опубликованы в 13 рецензируемых научных изданиях и журналах, в том числе 2 статьи, опубликованы в журналах, входящих в перечень ВАК России и 7 статей и материалов конференций опубликованы 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 Белова Михаила Николаевича на соискание ученой степени кандидата технических наук на тему «Стационарный управляемый накопитель энергии в системе тягового электроснабжения метрополитена» является научно-квалификационной работой, в которой изложены новые научно обоснованные технические решения и разработки, позволяющие усовершенствовать

существующую систему электроснабжения метрополитена, обеспечив требуемую надежность и безопасность, имеющие существенное значение для развития страны, что соответствует требованиям п.9 «Положения о порядке присуждения учёных степеней».


В целом, представленная диссертация по актуальности, новизне и значимости полученных результатов отвечает представленным требованиям к кандидатским диссертациям, а её автор, Белов Михаил Николаевич 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 Белова Михаила Николаевича, и их дальнейшую обработку.
«18» марта 2024г.


_____ К.В. Суслов

Подписи Сулова К.В. удостоверяю



Заместитель начальника
Информационного центра
Л.И. ПОЛЕВАЯ