

На правах рукописи



ПЛЕТНЕВ Дмитрий Сергеевич

**БОРТОВОЙ НАКОПИТЕЛЬ ЭНЕРГИИ НА
ЭЛЕКТРОПОДВИЖНОМ СОСТАВЕ МЕТРОПОЛИТЕНА**

2.4.2. Электротехнические комплексы и системы

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2024

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Российский университет транспорта» РУТ (МИИТ)

Научный руководитель: доктор технических наук, доцент
Шевлюгин Максим Валерьевич.

Официальные оппоненты: **Суслов Константин Витальевич,**
доктор технических наук, доцент,
профессор кафедры «Гидроэнергетики и возобновляемых источников энергии» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ»;

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

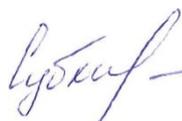
Ведущее предприятие: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I».

Защита диссертации состоится «17» апреля 2024 г. в 13:00 часов на заседании диссертационного совета 40.2.002.11 на базе федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Российский университет транспорта» по адресу: 127994, г. Москва, ул. Образцова, д. 9, стр.9., ауд. 2505.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте РУТ (МИИТ): www.rut-miit.ru

Автореферат разослан «__» февраля 2024 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Субханвердиев Камиль Субханвердиевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Все развитые государства и мудрые правительства соблюдают мировые соглашения о «зеленой» энергетике и способствуют бережному использованию природных ресурсов. Это выражается в принятии различных правительственных программ по ресурсо- и энергосбережению. Одной из отраслей экономики, где это явно выражается, является электроэнергетика, а в ней – электроснабжение электрического транспорта.

Известный принцип рекуперативного торможения на электрическом транспорте дает возможность повторного использования энергии торможения. Тенденции последних десятилетий показывают, что во всем мире активно развиваются технологии по созданию и производству накопителей электроэнергии. Это приводит к удешевлению их производства, уменьшению массогабаритных показателей, увеличению удельной энергоёмкости, повышению мощности. Здравый смысл подсказывает, что наиболее эффективно запастись и использовать электроэнергию в местах её выработки и потребления. Применительно к электрическому транспорту с рекуперативным торможением использование накопителей энергии наиболее актуально непосредственно на электроподвижном составе магистрального, городского наземного и подземного рельсового транспорта, что, как минимум, для систем тягового электроснабжения позволит не расходовать электроэнергию на нагрев кабелей питающих линий, линий обратного тока и тяговой сети.

Очевидно, что рекуперативное торможение и возможность повторного использования вырабатываемой при этом электроэнергии будет тем эффективнее, чем больше остановочных пунктов у подвижного состава. Это в прямую указывает на то, что местом применения технологий рекуперативного торможения и накопления электроэнергии может являться метрополитен, так как при движении по линии метрополитена электроподвижной состав останавливается 20-25 раз при среднем расстоянии между остановками 1.6-2.0 километра. Применение накопителей энергии в метрополитенах оправдывается еще больше из-за особенностей метрополитенов. В основном линии метрополитена проложены под землей, что обуславливается, в том числе, занятием меньшей полезной площади на поверхности, увеличением скорости передвижения по сравнению с наземными видами транспорта и т. д. Однако, подземное расположение линий и станций метрополитена предъявляет особые требования по обеспечению безопасности эвакуации пассажиров при критических ситуациях в связи с пропажей электроснабжения от тяговых подстанций. Функцию источников энергии для доставки пассажиров до ближайшей станции из тоннеля могут взять на себя накопители электроэнергии, расположенные на электроподвижном составе (ЭПС).

Московский метрополитен постоянно ведёт работу по усилению, модернизации, совершенствованию своего технического оснащения, надёжности и энергоэффективности системы электроснабжения. Частые пуско-тормозные режимы движения ЭПС, определяемые высокой плотностью расположения станций на маршруте следования поезда, сопровождается высоким энергопотреблением. Сохранение избытка энергии рекуперации и её использование при пуске электроподвижного состава метрополитена может способствовать повышению

надёжности системы электроснабжения, в виду снижения нагрузки на тяговое оборудование, улучшение климатических условий подземной части метро и т. д.

Таким образом, решение задач, связанных с энергосбережением, снижением эксплуатационных и капитальных затрат на силовое оборудование тяговых подстанций, улучшение тоннельной климатики, повышение комфортности и безопасности пассажиров в случае вывода ЭПС из тоннеля до близлежащей станции при аварийном отключении электроснабжения на метрополитенах, является актуальным.

Степень разработанности темы исследования. Проблемам энергосбережения, повышения надёжности электроснабжения и автономного вывода ЭПС метрополитенов из тоннелей до ближайших станций, в том числе с использованием бортовых накопителей энергии (БНЭ), уделялось особое внимание. Решениям проблем внедрения накопителей энергии на метрополитене вообще, и на ЭПС в частности, занимались на протяжении десятилетий. Отсутствие реальных решений на рельсовом электрифицированном транспорте говорит об отсутствии детально проработанных, научно обоснованных, готовых к внедрению решений.

Значительными исследованиями и продвижением решений в данном и смежных вопросах занимались многие отраслевые научные школы страны: ВНИИЖТ, ДВГУПС, МАИ, МЭИ, ОИВТ РАН, ПГУПС, РГУПС, РУТ (МИИТ), СамГУПС, СПбПУ и др. Известны решения и наработки ученых, которые внесли огромный вклад в развитие данной области: М.П. Бадёр, А.С. Бочев, А.Т. Бурков, Д.А. Бут, А.Л. Быкадоров, В.А. Гречишников, Л.А. Герман, Н.В. Гулиа, К.К. Деньщиков, Ю.И. Жарков, Ю.М. Иньков, В.Е. Кейлин, А.Б. Косарев, Б.И. Косарев, А.В. Котельников, В.А. Кучумов, А.Н. Марикин, К.Г. Марквардт, В.А. Матюшин, В.Н. Пупынин, Г.Г. Рябцев, А.Н. Савоськин, Э.В. Тер-Оганов, В.П. Феокистов, Е.П. Фигурнов, В.С. Хвостов, В.Т. Черемисин, Н.А. Черноплеков, М.В. Шевлюгин и другие.

Цель и задачи исследования. Целями диссертационной работы являются исследование эффективности внедрения накопителей энергии на электроподвижном составе метрополитена, разработка технических решений и поиск путей практической реализации БНЭ в составе электрооборудования ЭПС.

Для достижения поставленных целей в работе решены следующие задачи:

- на основе теоретически и экспериментально полученных данных о движении электроподвижного состава по линиям Московского метрополитена, включающих значения тока на токоприемнике ЭПС, напряжения в тяговой сети, скорости движения, тягового и тормозного усилий, энергопотребления ЭПС, решена задача формирования системы критериев, которые позволяют определить эффективность использования БНЭ от повторного использования избыточной энергии рекуперации, снижения токов тяговых подстанций при пусковых режимах ЭПС, автономного движения ЭПС и пр.;

- создания имитационной цифровой модели работы ЭПС с БНЭ в составе комплексной модели системы тягового электроснабжения (СТЭ) с учётом работы силового оборудования тяговых подстанций и тяговой сети Московского метрополитена, позволяющей определить основные характеристики бортового накопителя энергии;

- разработки структурной схемы и определения конструктивных особенностей БНЭ для использования на ЭПС Московского метрополитена;

– по расчёту технико-экономической оценки эффекта от применения БНЭ на ЭПС в условиях эксплуатации действующих линий Московского метрополитена.

Объектом исследования является современный ЭПС метрополитена с бортовым накопителем энергии, курсирующий в действующем графике движения, в составе системы тягового электроснабжения, в которую входят преобразовательные агрегаты, питающие линии, тяговая сеть, характерные для линии Московского метрополитена.

Предмет исследования: методы, модели и критерии оценки электрических параметров движения ЭПС с бортовым накопителем электрической энергии и учётом системы тягового электроснабжения напряжением 825 В.

Научная новизна результатов, полученных в диссертационном исследовании:

– 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;

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

– 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;

– разработана методика оценки электротехнической эффективности использования БНЭ на ЭПС метрополитена;

– 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;

– разработана методика оценки жизненного цикла БНЭ с учётом регрессионного эффекта аккумулялирующего элемента;

– определены электроэнергетические показатели автономного хода ЭПС с БНЭ при перевозке пассажиров из тупиков до ближайших станций в аварийном режиме работы системы тягового электроснабжения;

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

Теоретическая и практическая значимость работы. Определены основные критерии, определяющие эффективное использование бортовых накопителей электроэнергии на электропоездах метрополитена. Разработаны технические решения для бортовых накопителей энергии направленные на экономию электроэнергии, приходящуюся на тягу поездов, повышение энергоэффективности системы тягового электроснабжения, обеспечение комфортности и безопасности пассажиров при аварийной эвакуации из тоннеля при пропаже электропитания тяговой сети.

Разработана и верифицирована комплексная прикладная цифровая модель работы ЭПС с учётом работы тяговой сети, тяговых подстанций и смежных ЭПС, двигающихся в заданном графике движения поездов, на основе полученных данных в ходе практических и теоретических исследований. Разработана программа для расчёта параметров и экономического эффекта от внедрения БНЭ на основе статистической обработки данных экспериментальных замеров и результатов расчётов на имитационной модели.

Определён технико-экономический эффект от применения БНЭ в составе тягового оборудования ЭПС в отдельности и по системе тягового электроснабжения линии метрополитена в целом.

Методология и методы исследования. Достижение целей исследования и решение задач осуществлялось с использованием следующих методов:

- методы исследования основных электротехнических параметров движения поезда по линии метрополитена, полученных в результате экспериментальных замеров;
- методы математического анализа и математической статистики;
- методы построения математических моделей и построения алгоритмов;
- методы верификации теоретически полученных данных.

Положения, выносимые на защиту:

- система критериев оценки эффективности использования БНЭ в составе тягового оборудования ЭПС, учитывающая использование избыточной энергии рекуперации для снижения токопотребления тяговых подстанций при пусковых режимах ЭПС, расхода электроэнергии на тягу поездов, эффективность применения автономного хода ЭПС в аварийном режиме работы системы тягового электроснабжения;
- принципиальная схема подключения БНЭ к электрическим цепям силового оборудования ЭПС;
- цифровая модель ЭПС, позволяющая моделировать основные электромеханические процессы движения ЭПС в составе системы тягового электроснабжения и смежных ЭПС на линии метрополитена;
- основные электротехнические параметры бортового накопителя электроэнергии, которые были определены в результате экспериментальных замеров показателей движения поезда и цифрового моделирования;
- комплексный подход к определению мгновенных и интегральных показателей работы БНЭ в составе электрооборудования ЭПС с целью подтверждения расчётных данных;
- методы оценки технико-экономического эффекта от применения БНЭ на ЭПС метрополитена.

Степень достоверности результатов проведенных исследований. Достоверность результатов исследований подтверждается на основе сравнения результатов вероятностного анализа данных, полученных при имитационном моделировании движения поезда по заданному профилю пути с учётом СТЭ, с данными проведенных экспериментальных замеров движения поезда, прошедшего все станции Таганско-Краснопресненской линии Московского метрополитена.

Результаты теоретических исследований работы бортовых накопителей энергии и предложения по схемным и конструкционным решениям не противоречат

результатами системного анализа показателей работы схожих систем в смежных областях и в схожих условиях и режимах эксплуатации.

Апробация результатов. Основные положения и результаты работы рассматривались, докладывались и обсуждались:

- на 10 Международном симпозиуме ElTrans, «Электрификация и развитие ж. д. транспорта России. Традиции, современность, перспективы», С-Петербург, 2019 г.;
- на III, IV и V Международных выставках-конференциях «ИНТЕРМЕТРО», «Перспективы развития метрополитенов в условиях интенсивного внедрения новых технологий: инфраструктура и подвижной состав». МИИТ, 2019, 2021, 2023 гг.;
- на XXVII международной научно-технической конференции студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика» (The 3rd IEEE 2021 International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (IEEE REEPE 2021)), 2021 г.;
- на международной конференции: V Всероссийская научно-техническая конференция с международным участием «Приборы и методы измерений, контроля качества и диагностики в промышленности и на транспорте». Омск, 2022.;
- на международной научной конференции ITSI (AIP Conference Proceedings), 2023 г.;

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения и списка используемых источников. Общий объем диссертации составляет 176 страниц, включая 111 иллюстраций, 23 таблицы, список использованных источников из 167 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе описаны критерии, определяющие целесообразность использования накопителей энергии на борту электроподвижного состава.

К основным критериям целесообразного использования накопителей энергии на борту ЭПС относятся следующие:

- сохранение и повторное использование избыточной энергии рекуперации (экономия);
- вывод ЭПС из тоннеля метро в аварийной ситуации;
- автономный ход ЭПС в тупиках и ангарах депо;
- снижение потерь электроэнергии на тяговых подстанциях (ТП) и в тяговой сети (ТС).

Поезда с большим количеством остановок наиболее эффективно вырабатывают электрическую энергию, поскольку они часто используют рекуперативное торможение. По разным оценкам, использование рекуперации на подвижном составе пригородного сообщения России в настоящий момент позволяет сэкономить около 5-10 % энергии от затрачиваемой на тягу, а на наземных и подземных видах рельсового электротранспорта – до 10-30 %. Что касается Московского метрополитена, то экспериментальные оценки показали, что рекуперированная энергия на межпоездной обмен (МПО) может составлять до 35% от затрачиваемой электроэнергии на тягу.

Рассчитать общую суточную экономию энергии за счет использования БНЭ на ЭПС можно по следующей формуле:

$$A_{\text{эк.}}^{\text{сут.}} = A_{\text{эк.р}}^{\text{сут.}} + \Delta A_{\text{ТС}}^{\text{сут.}} + \Delta A_{\text{ТП}}^{\text{сут.}} + \Delta A_{\text{климат.}}^{\text{сут.}} \quad (1)$$

где:

$A_{\text{эк.}}^{\text{сут.}}$ – общая сэкономленная энергия за сутки; $A_{\text{эк.р}}^{\text{сут.}}$ – сэкономленная избыточная энергия рекуперации; $\Delta A_{\text{климат.}}^{\text{сут.}}$ – экономия энергии климатической составляющей; $\Delta A_{\text{ТС}}^{\text{сут.}}$ – экономия энергии потерь в ТС; $\Delta A_{\text{ТП}}^{\text{сут.}}$ – экономия энергии потерь в ТП.

Оценить сэкономленную избыточную энергию рекуперации за счет использования БНЭ можно по следующей формуле:

$$A_{\text{рек.}}^{\text{сут.}} = \sum_{i=1}^n A_{\text{НЭ}_i} \eta_{\text{НЭ}_i} = \sum_{i=1}^n \int_0^{T_{\text{разНЭ}_i}} i_{\text{НЭ}_i} u_{\text{р}_i} \eta_{\text{НЭ}_i} dt \quad (2)$$

где:

$A_{\text{НЭ}_i}$ – энергия, принятая БНЭ за одно (i -тое) торможение;

$\eta_{\text{НЭ}_i}$ – КПД БНЭ при данном (i -том) торможении ЭПС;

n – число торможений ЭПС в сутки;

$T_{\text{разНЭ}_i}$ – время разового (i -того) торможения ЭПС;

$i_{\text{НЭ}_i}$ – мгновенное значение тока БНЭ при (i -том) торможении ЭПС;

$u_{\text{р}_i}$ – мгновенное значение напряжения рекуперации при (i -том) торможении ЭПС.

Величину сэкономленных потерь в тяговой сети и на ТП можно оценить по формуле:

$$\Delta A_{\text{эк.}}^{\text{сут.}} = \Delta A_{\text{ТС}}^{\text{сут.}} + \Delta A_{\text{ТП}}^{\text{сут.}} = \sum_{i=1}^n \int_0^{T_{\text{рБНЭ}_i}} i_{\text{ТБНЭ}_i}^2 (R_{\text{ТС}_i} + R_{\text{ТП}_i}) dt \quad (3)$$

где:

$\Delta A_{\text{ТС}}^{\text{сут.}}$ – экономия потерь энергии в тяговой сети в течение суток; $\Delta A_{\text{ТП}}^{\text{сут.}}$ – экономия потерь энергии в тяговом оборудовании СТП в течение суток; $R_{\text{ТС}_i}$ – суммарное сопротивление участков тяговой сети, по которым протекает доля тока пуска ЭПС из БНЭ при (i -том) пуске; $R_{\text{ТП}_i}$ – суммарное сопротивление СТП, по которым протекает доля тока пуска ЭПС из БНЭ при (i -том) пуске; n – число пусков ЭПС за сутки; $i_{\text{ТБНЭ}_i}$ – мгновенное значение тока пуска ЭПС от БНЭ при (i -том) пуске.

По данным экспериментальных замеров и результатам имитационного моделирования стало известно, что до 24.42 % полезной энергии от энергии, приходящейся на тягу ЭПС, рассеивается в тормозных резисторах. Данную энергию или ее значительную часть необходимо сохранить в БНЭ.

Так как метрополитеном пользуется огромное количество человек (в Московском метрополитене до 10 млн человек в сутки), то необходим высокий уровень безопасности организации движения, поскольку его функционирование осуществляется при помощи электроэнергии, которая может быть опасна для жизни человека, а значительная часть тоннелей и станций находится под землей в замкнутом пространстве. Однако, несмотря на все предпринимаемые меры

предосторожности, возможность возникновения аварийных ситуаций полностью исключить нельзя.

Большинство аварийных случаев, которые происходят в системе тягового электроснабжения метрополитена, сопровождаются отключением электроэнергии. Эвакуация пассажиров из тоннелей практически всегда сопровождается с ущербом для здоровья и даже гибелью людей. Во избежание всевозможных неприятных последствий, неминуемых в принципе энергетических кризисов, и была предложена система накопления энергии, которая устанавливается прямо на борту ЭПС метро для того, чтобы поезд мог самостоятельно доехать до остановочного пункта без помощи тяговой сети.

Принимая во внимание, что среднее расстояние между станциями Московского метрополитена составляет около 1.7 км, заряда БНЭ для аварийного автономного хода должно хватить на преодоление половины данного расстояния, т. е. 850 м. Для снижения энергозатрат на сопротивление движению поезда разгонять ЭПС стоит до 8-10 км/ч и далее двигаться по инерции на выбеге. Подобных пусков может быть несколько. По расчетам, ЭПС со скоростью 8-10 км/ч проходит на выбеге около 260 метров. Таким образом, расстояние аварийного хода при нескольких пусках на энергии БНЭ можно оценить следующим выражением:

$$L_{AX} = \sum_{n=1}^m L_n = \sum_{n=1}^m \frac{mv_n^2}{2} \leq A_{\text{БНЭ}}^{\text{авар.}} = \frac{CU_{\text{min.a}}^2}{2} - \frac{CU_{\text{min.p}}^2}{2} \quad (4)$$

где:

m – масса ЭПС; v – скорость ЭПС; $A_{\text{БНЭ}}^{\text{авар.}}$ – остаток энергии БНЭ для аварийного хода; C – ёмкость БНЭ; $min. a$ – минимальное напряжение БНЭ в аварийном режиме (450-500 В); $min. p$ – минимальное напряжение БНЭ в рабочем режиме (600 В).

Как известно, подъезд и нахождение поезда в депо сопровождается различного рода трудностями, связанными с работами обслуживающего персонала вблизи высокого напряжения. Наличие НЭ на борту ЭПС позволяет полностью отказаться от тяговой сети к подъезду и в самом депо (контактный рельс на подъезде, медные шины +825 В над ремонтными канавами, так называемые «удочки» – устройства подключения временного питания для ЭПС, системы сигнализации и прочего).

Для питания подвесных шин +825 В над ремонтными каналами предусмотрена центральная система шин (+825 В) и отсоса, которая располагается перпендикулярно подвесным шинам и подключается к ним и рельсам через разъединители.

Использование НЭ на борту вагонов метро позволяет осуществлять автономный ход поезда в тупиках и ангарах депо без подвода тягового напряжения.

При возможности автономного хода поезда в пределах депо отпадает необходимость в дополнительном персонале, осуществляющем функции по включению и отключению «удочек» из вагона для возможности его перемещения в депо. Со всем процессом вывода ЭПС из депо теперь может справиться один машинист.

Немаловажным фактором является значительное увеличение оперативности осуществления маневровых работ.

Оценка запаса энергии БНЭ для маневрового хода должна основываться на расстоянии, которое ЭПС должен пройти от основной магистральной линии до конца ремонтной канавы. В данном случае многократные пуски ЭПС не допустимы.

При этом скорость маневрового хода ограничена до 30 км/ч. Таким образом, запас энергии БНЭ для маневрового хода можно оценить следующим выражением:

$$A_{\text{БНЭ}}^{\text{м.х.}} = \frac{CU_{\text{max}}^2}{2} - \frac{CU_{\text{min.р}}^2}{2} \geq \frac{mv_{\text{м.х.}}^2}{2} \quad (5)$$

где:

C – ёмкость БНЭ; U_{max} – максимальное напряжение БНЭ (925 В); $U_{\text{min.р}}$ – минимальное напряжение БНЭ в рабочем режиме (600 В); m – масса ЭПС; $v_{\text{м.х.}}^2$ – скорость ЭПС при маневровом ходе.

Во второй главе произведен анализ систем накопления энергии. Анализ НЭ для бортового исполнения проведен по следующим критериям: удельная мощность, удельная энергоёмкость, КПД цикла заряд/разряд, саморазряд, цикличность, срок службы.

После сравнения систем НЭ, что предпочтительным вариантом для накопления энергии на борту ЭПС, представляется гибридная установка с использованием суперконденсатора и литий-ионного аккумулятора. Так как суперконденсаторы обладают лучшими характеристиками, связанными с удельной мощностью, цикличностью и сроком службы, а Li-ion аккумуляторы лидируют по удельной энергоёмкости. Данные НЭ компенсируют слабые стороны друг друга. Но ограниченное пространство, химическая токсичность и взрывоопасность на подвижном составе может послужить препятствием для внедрения гибридной установки, что выгодно выделяет использование суперконденсаторных модулей.

Для определения основных характеристик бортового накопителя энергии необходимо произвести экспериментальные замеры работы ЭПС в реальных условиях эксплуатации на линии Московского метрополитена.

В третьей главе представлены результаты экспериментальных исследований электроэнергетических показателей работы ЭПС на московском метрополитене.

Для определения точного количества выработанной электроэнергии ЭПС при рекуперативном торможении и последующего анализа емкости бортового накопителя, который будет запасать и повторно использовать энергию торможения, необходимо не только создать цифровой двойник ЭПС, но и провести реальные экспериментальные замеры показателей работы ЭПС в составе СТЭ.

Анализ показателей работы ЭПС на Таганско-Краснопресненской линии Московского метрополитена:

ЭПС, состоящий вагонов метрополитена серии 81-765, 81-766, 81-767, который участвовал в практическом исследовании, обладал основной конфигурацией формирования из восьми вагонов.

Второго февраля 2022 г. в был запущен электроподвижной состав «Москва-2019» на Таганско-Краснопресненской линии Московского метрополитена с вышеупомянутыми характеристиками в штатном режиме с регистратором параметров движения поезда (РПДП) и состояния вагонного оборудования на борту. Данный самописец фактически является «черным ящиком», который записывает все основные физические и электрические параметры движения поезда, внутренние показатели функционирования систем и т. д.

Регистратор параметров записывает множество данных, а не только основные параметры ЭПС, такие как скорость движения, ток на токоприемнике, напряжение в контактной сети, направление движения, сила тяги и торможения, но и сотни отдельных показаний приборов и условия окружающей среды.

Практический эксперимент по запуску поезда с РПДП на борту начался близ станции метро «Котельники» и закончился полным проходом поезда по ТКЛ до ст. м. «Планерная». Поездом были пройдены все 23 станции за один час две минуты и 19 секунд.

В результате практического исследования по запуску целого электроподвижного состава было получено множество характеристик (рисунки 1 – 2), среди которых следующие основные характеристики его движения, требующиеся для оценки электро-энергетических потоков, а именно: отношение тока на токоприемнике, напряжения в контактной сети, скорости, силы тяги и торможения от времени.

В момент, когда ЭПС находится в режиме торможения двигателем, происходит выработка электроэнергии, которая потенциально может быть запасена в бортовых накопителях. Стоит отметить, что счетчик электрических параметров установлен в блок распределительного устройства (БРУ) каждого вагона. Через БРУ проходит весь силовой ток (в т. ч. и вспомогательных цепей высокого напряжения). Но если говорить конкретно об электрическом торможении, то счетчик может отследить только энергию рекуперации, приходящуюся на межпоездной обмен. При электрическом торможении будет создан замкнутый контур от двигателей к контактному рельсу как раз через БРУ. Если же будет осуществляться реостатное торможение, то линейный контактор, стоящий в цепи между БРУ и цепями двигателей, отключится и ток физически не сможет протекать через БРУ и как следствие, счетчик не будет регистрировать ток, протекающий через тормозные резисторы. Произведя обработку полученных данных в ходе эксперимента, была получена энергия, вырабатываемая поездом при торможении двигателем, которая была потреблена поездами, находящимися в режиме тяги и в одной питающей зоне (рисунок 3).

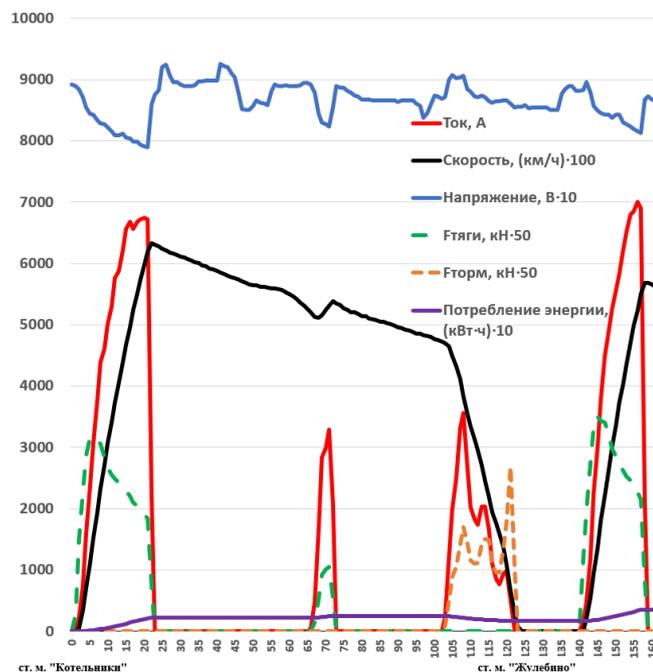


Рисунок 1 – Фрагмент результатов замеров показателей работы ЭПС на Таганско-Краснопресненской линии Московского метрополитена от станции м. «Котельники» до ст. м. «Жулебино»

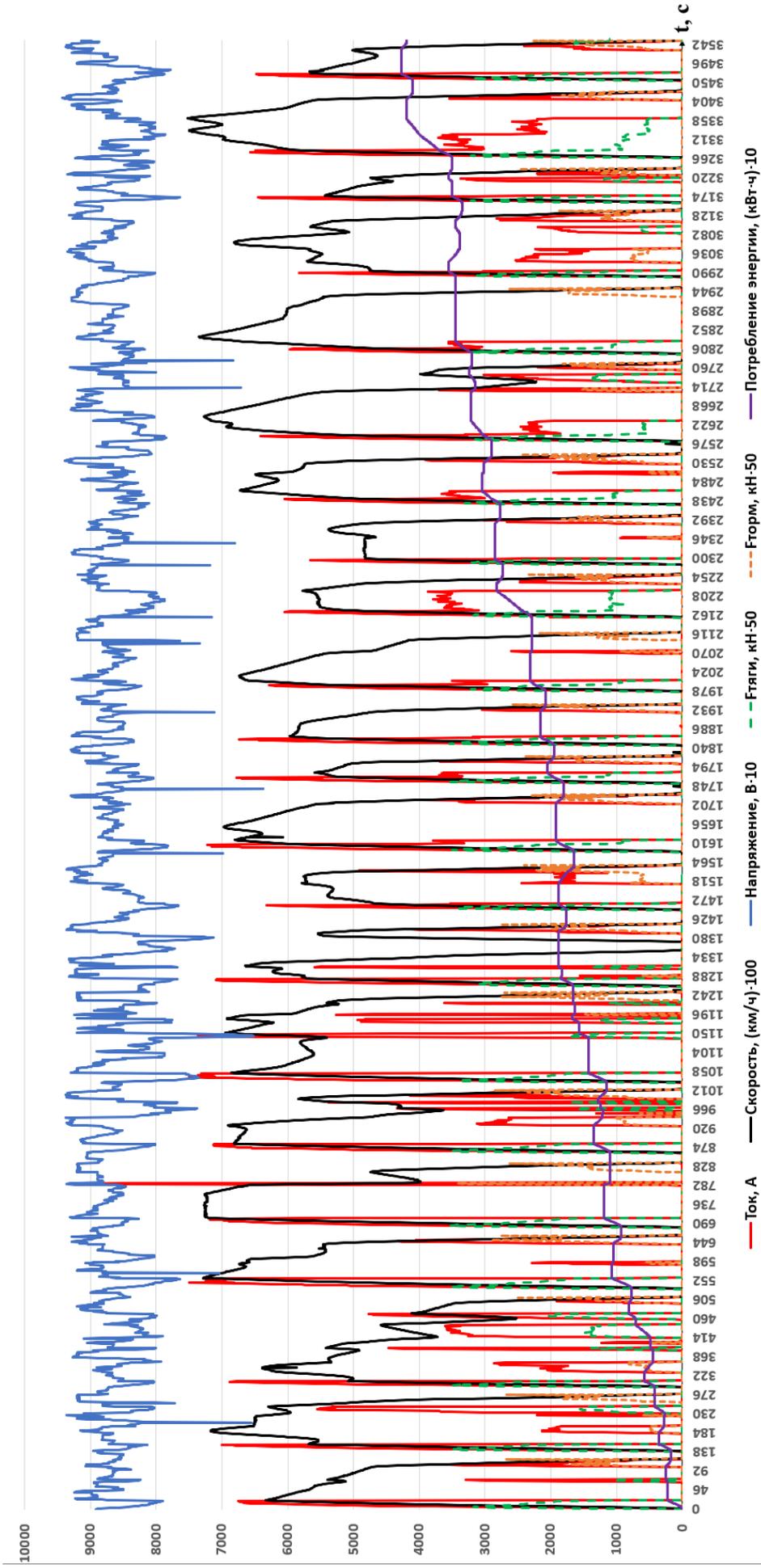


Рисунок 2 – Результаты замеров (обработанные) показателей работы ЭПС по второму пути Таганско-Краснопресненской линии Московского метрополитена от станции м. «Котельники» до ст. м. «Планерная»

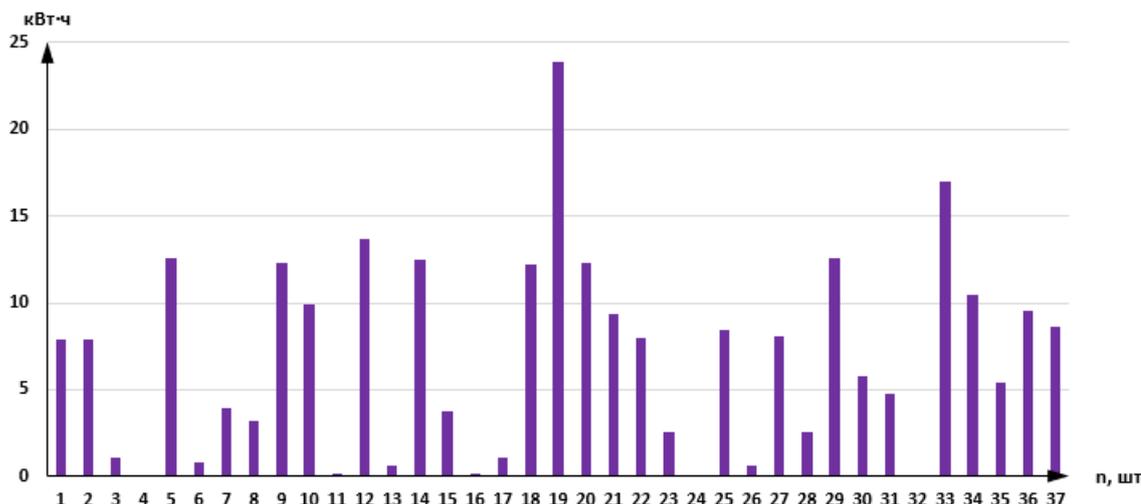


Рисунок 3 – Энергия, вырабатываемая двигателями ЭПС при торможении на ТКЛ

Для накопления опыта и анализа вырабатываемой электроэнергии ЭПС потребовалось провести дополнительное практическое исследование, а именно: проанализировать работу электроподвижного состава, курсирующего на Кольцевой ветке Московского метрополитена.

По сравнению с исследовательским экспериментом на Таганско-Краснопресненской линии, на КЛ для осуществления перевозок пассажиров используется составной поезд из вагонов типа 81-775/776/777 «Москва-2020». Который по силовой электрической части практически аналогичен предыдущей серии вагонов 81-765/766/767 «Москва».

10 июня 2023 года в 18:57:54 по Московскому времени был произведен запуск ЭПС «Москва-2020» со станции метро «Белорусская» в сторону станции «Новослободская». Поезд проследовал по всему маршруту рассматриваемой линии и преодолел 19.4 км пути за 27 минут и 12 секунд. При помощи системы регистрации параметров движения поезда удалось получить важные электрические и механические характеристики состава. Обработав данные характеристики, требующиеся для оценки емкости накопителя электроэнергии на подвижном составе, получил следующие основные графики зависимости тока на токоприемнике, величины силы тяги и торможения, скорости поезда, а также напряжения в контактном рельсе от времени (рисунок 4).

Из графика мы можем определить момент начала выработки электроэнергии двигателями. Рекуперация энергии происходит тогда, когда машинист ЭПС переводит состав в режим торможения тяговым электродвигателем. Поезду сообщается сила торможения, которая на графике обозначена коричневой пунктирной линией. Также в момент торможения мы можем наблюдать выработку электроэнергии двигателями поезда в виде повышения напряжения в контактной сети и повышения электрического тока. Эти параметры являются основными для оценки потенциальной электроэнергии, которая могла бы быть запасена в БНЭ.

Произведя обработку результатов, мы видим, что за 13 торможений двигателем, которые удалось зафиксировать регистратором параметров движения, поезд выработал на МПО 90.559 кВт·ч, что в среднем равняется 6.966 кВт·ч за одно торможение. Благодаря проведенному исследовательскому эксперименту, мы можем оценить, сколько электроэнергии потенциально может быть запасено в бортовой системе НЭ.

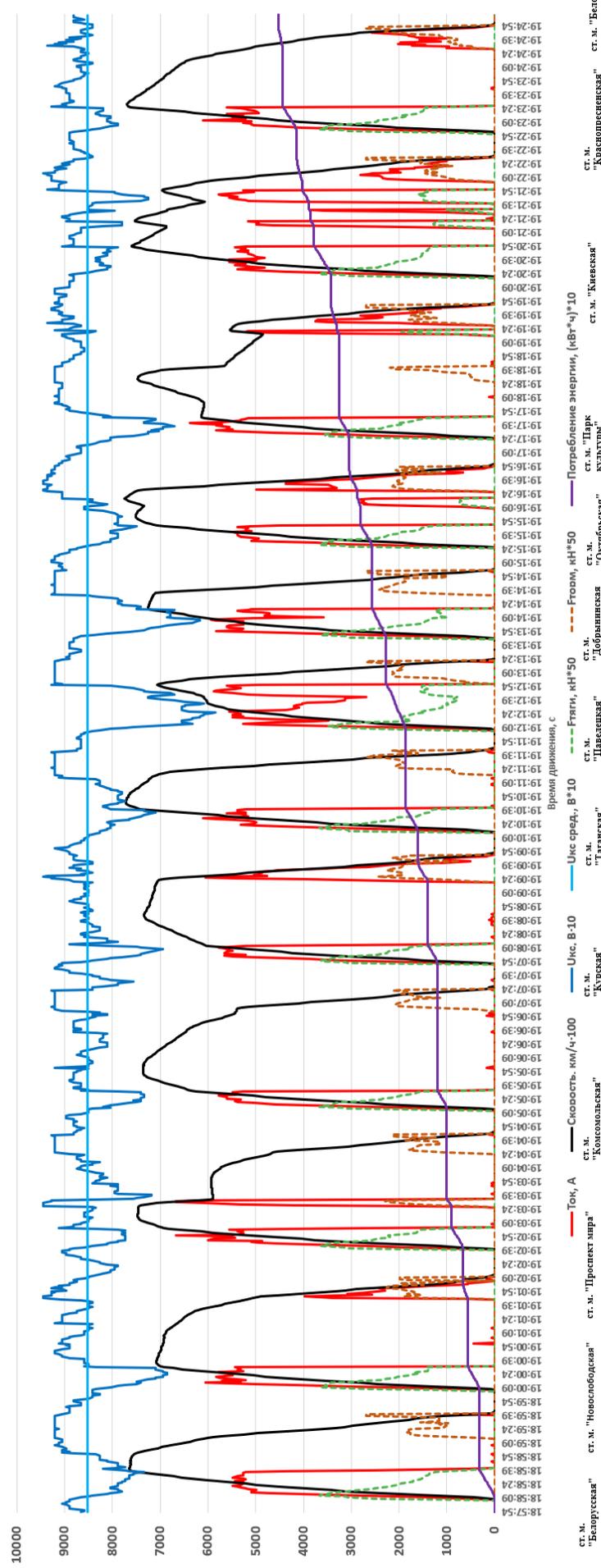


Рисунок 4 – Основные показатели движения поезда «Москва-2020» по Кольцевой линии Московского метрополитена

Из проведенных экспериментальных замеров наблюдается характерная зависимость по выработанной электроэнергии, приходящейся на межпоездной обмен. В среднем энергия рекуперации на МПО на Таганско-Краснопресненской линии составляет 6.816 кВт·ч, а на Кольцевой линии этот параметр достигает 6.966 кВт·ч из-за особенности кольцевой системы электроснабжения. Таким образом, можно предположить, что на любой линии Московского метрополитена в среднем на МПО за одно торможение поезда приходится 6.891 кВт·ч.

Проведя экспериментальные замеры на традиционной радиальной Таганско-Краснопресненской линии и Кольцевой линии с уникальной замкнутой системой электроснабжения были определены электрические параметры ЭПС, основные из которых: размер потребления электроэнергии на тягу, размер электроэнергии, приходящийся на МПО.

В четвертой главе представлена разработанная имитационная модель и результаты работы ЭПС в СТЭ метрополитена. Особенностью данной модели является то, что она в едином комплексе (ETAP eTraX) учитывает тяговую нагрузку в виде ЭПС, состоящих из вагонов моделей 81-765/766/767 «Москва», курсирующими в действующем графике движения, совместно с СТЭ, включающую тяговую сеть постоянного тока 825 В и тяговое оборудование тяговых подстанций, а также систему внешнего электроснабжения (вплоть до питающих центров).

Моделирование тяговых подстанций в составе системы тягового электроснабжения «Таганско-Краснопресненской» линии и ЭПС (рисунок 5).

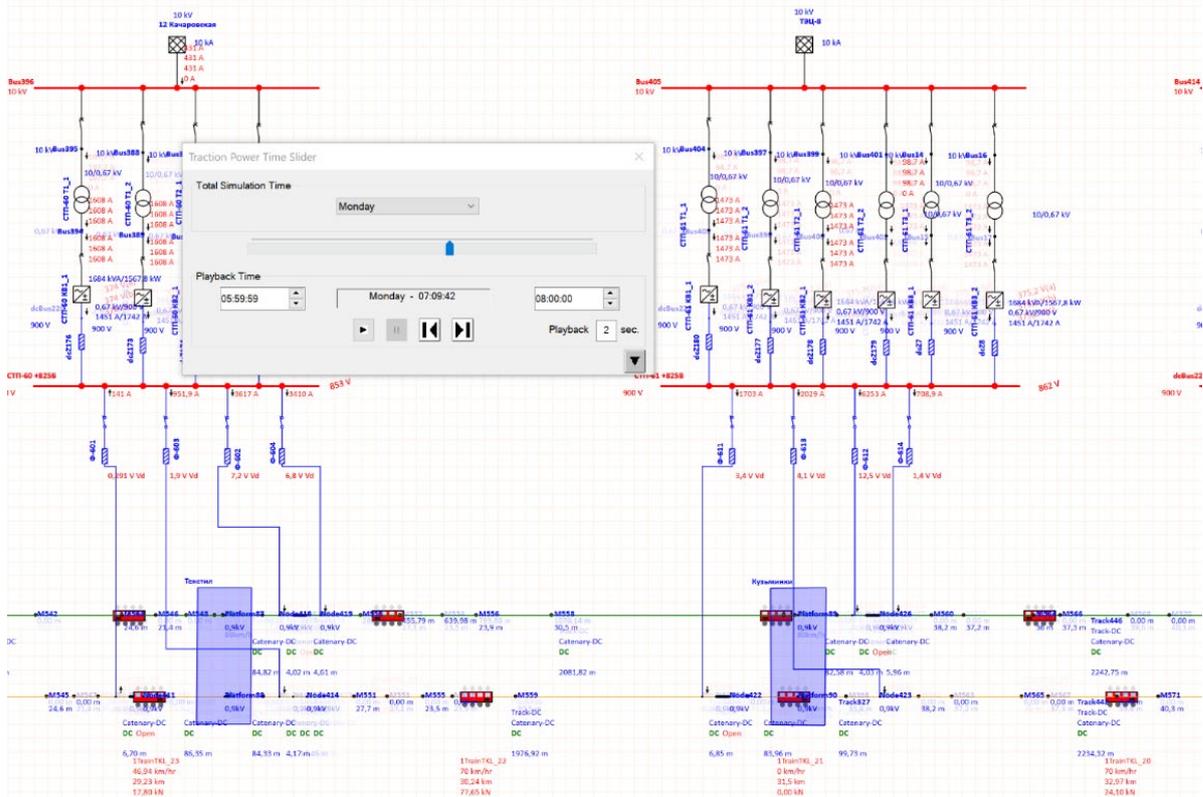


Рисунок 5 – Фрагмент модели СТЭ Таганско-Краснопресненской линии

Комплекс расчетов и анализа электрических параметров поезда (КРЭПП) – это программа для автоматического определения характеристик бортовой системы накопления энергии, как для ЭПС метрополитена, так и для грузовых и пассажирских поездов железной дороги, а также трамваев и троллейбусов. Программа обрабатывает электрические и механические параметры электроподвижного состава и с учетом свободного места на ЭПС выбирает

емкость бортового накопителя электроэнергии, которая необходима для конкретной модификации ЭПС, курсирующего по определённому маршруту.

Программный комплекс КРЭПП позволяет осуществить следующие функции:

- загрузка и обработка параметров движения поезда, полученных при моделировании, построение графиков (рисунок 6);
- загрузка и обработка параметров движения поезда, полученных при экспериментальных замерах, построение графиков;
- определение энергии, выработанной ЭПС при рекуперативном торможении и распределяющуюся на МПО и резисторы, построение гистограммы (рисунок 7);
- расчет энергии, рассеянной в тормозных резисторах;
- расчет срока окупаемости накопителя и экономии;
- расчет экономии в абсолютных единицах;
- определение интегральных показателей и сравнение результатов моделирования с результатами экспериментального замера (таблица 1).

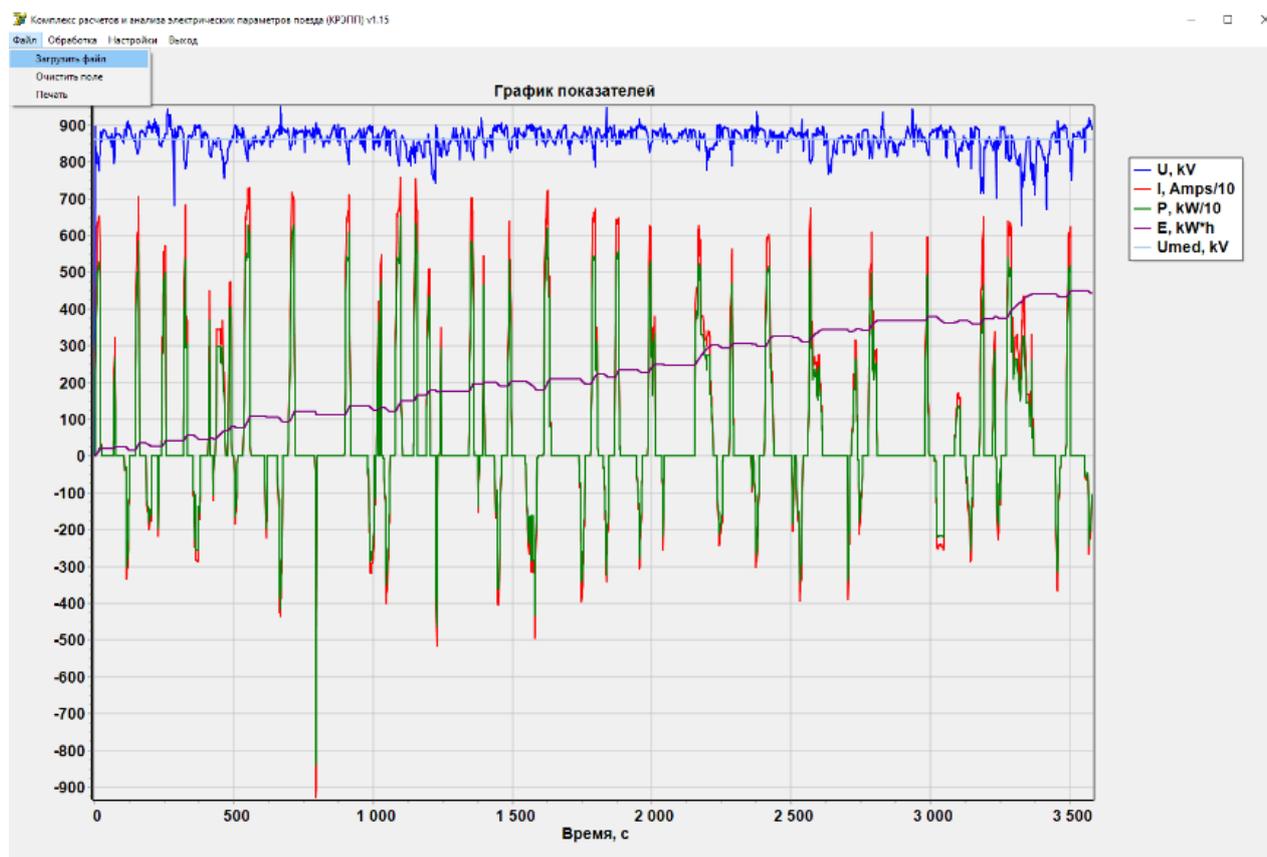


Рисунок 6 – Параметры движения поезда (рекуперация на МПО)

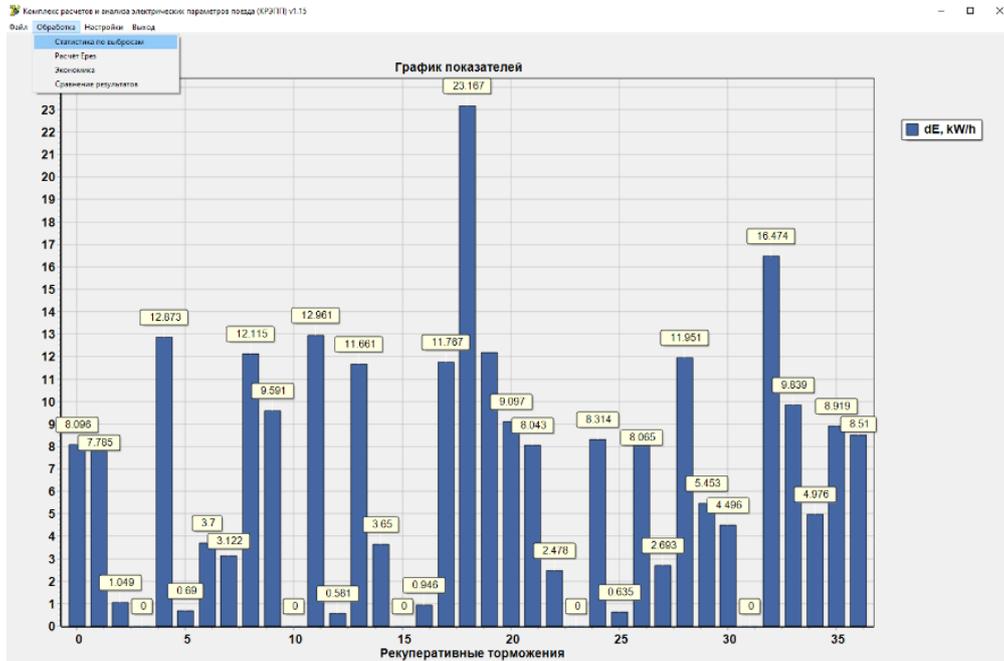


Рисунок 7 – Электроэнергия рекуперации, приходящаяся на МПО

Таблица 1 – Сравнение интегральных показателей

Тип данных	Энергия на тягу, кВт·ч	Энергия на МПО, кВт·ч	Средний ток на тягу, А	Средний ток на МПО, А	Среднее напряжение, В	Время движения, с	Максимальный ток потребления, А	Среднетехническая скорость, км/ч
Экспериментальный замер	671.5	252.2	3453.0	1804.9	859.7	3577.0	7500.8	41.9
Имитационное моделирование	688.4	245.9	3474.0	1767.8	862.6	3579.0	7581.2	42.6
Различие, %	2.5	2.5	0.6	2.1	0.3	0.1	1.1	1.6

По полученным данным в ходе проведенного экспериментального замера и имитационного моделирования можно утверждать, что характеристики движения поезда при цифровом эксперименте совпадают с натурным с незначительной разницей, составляющей по отдельным параметрам от 0.1 % до 2.5 %.

Создав комплексную цифровую модель и осуществив моделирование работы ЭПС в составе системы тягового электроснабжения, можно оценить потоки энергии электроподвижного состава при пуске и рекуперативном торможении.

Анализируя полученные данные в ходе цифрового моделирования, можно утверждать, что: 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.

Соотношение выработанной энергии на МПО и резисторы с потребленной составляет 60.13 %.

Далее необходимо сверить результаты данных, полученных в ходе имитационного моделирования движения поезда «Москва-2019» на Таганско-Краснопресненской линии Московского метрополитена с учетом всей системы

тягового электроснабжения с замерами электрических параметров, определенными при научном эксперименте.

Разработанная методика определения числа циклов перезаряда НЭ строится на опыте использования накопительных элементов конкретного производителя.

Для расчета числа циклов перезаряда полной сборки НЭ для конкретных условий эксплуатации была выведена следующая формула:

$$N_{ц.п.} = e^{\frac{\delta \cdot \sigma}{N_{э\text{э}} \cdot N_{посл.} \cdot U_{э\text{э}}(A_p)}} \quad (6)$$

где:

A_p – энергия, рассеянная в тормозных резисторах (или БНЭ); δ и σ – коэффициенты, определяющие электрохимические процессы в аккумуляторной сборке (имеют значения 8.6643 и 3.4657 соответственно для 50 % разряда и 9.3575, 3.4657 для 30 % разряда); $N_{э\text{э}}$ – количество элементарных элементов; $U_{э\text{э}}$ – напряжение элементарного элемента; A_p – рабочая энергия накопителя (рисунок 8); $N_{посл.}$ – количество последовательно соединенных элементов.

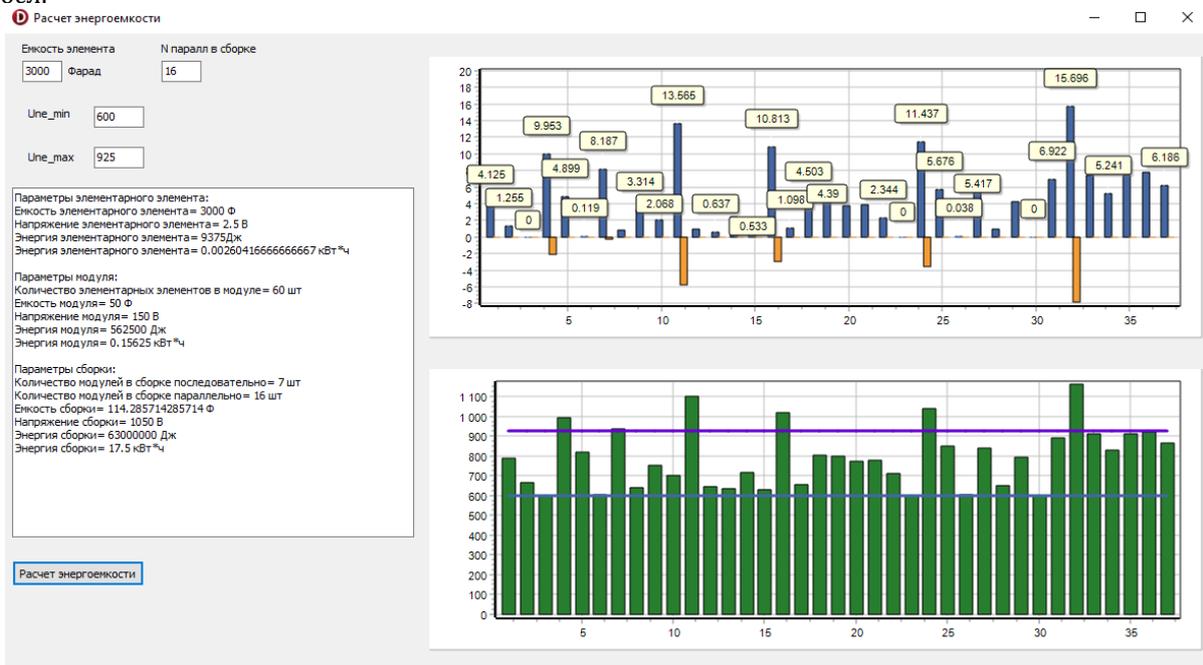


Рисунок 8 – Расчет энергоемкости

Имитационное моделирование и данные по опытному использованию накопительных элементов позволили определить зону работы полной сборки НЭ (рисунок 9). Из полученных расчётных и эмпирических данных следует, что для ТКЛ и в настоящих условиях количество циклов перезаряда БНЭ на ЭПС составит порядка 8 млн.

Время срока службы БНЭ рассчитывается по формуле:

$$T_{с.с.} = \frac{N_{ц.п.}}{N_{ц.п.}^{год}} = \frac{N_{ц.п.}}{m_{о.п.}^T \cdot n_M^D} = 31 \text{ год} \quad (7)$$

где:

$N_{ц.п.}$ – количество циклов перезаряда; $N_{ц.п.}^{год}$ – количество циклов перезаряда в год; $m_{о.п.}^T$ – количество торможений за один проезд ветки метро от начала до конца; n_M^D – количество совершенных маршрутов в день.

По оценочным расчётам время срока службы БНЭ на ЭПС на линии Московского метрополитена составляет 31 год.

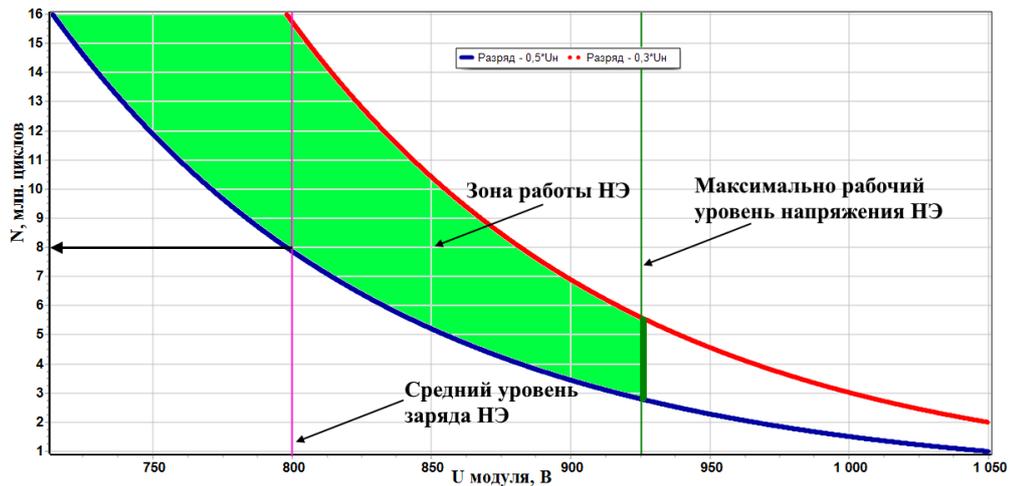


Рисунок 9 – Зависимость циклов перезаряда на сборку

В пятой главе приведена схема и конструкция бортового накопителя энергии для ЭПС метро.

Проанализировав систему электроснабжения электропоезда, можем сделать вывод о том, что бортовой накопитель энергии необходимо включить параллельно в цепь с тормозными резисторами, согласно схеме (рисунок 10) между выводом от «чѐпера» реостатного контура и силовым кабелем обратного тока к колѐсным парам.

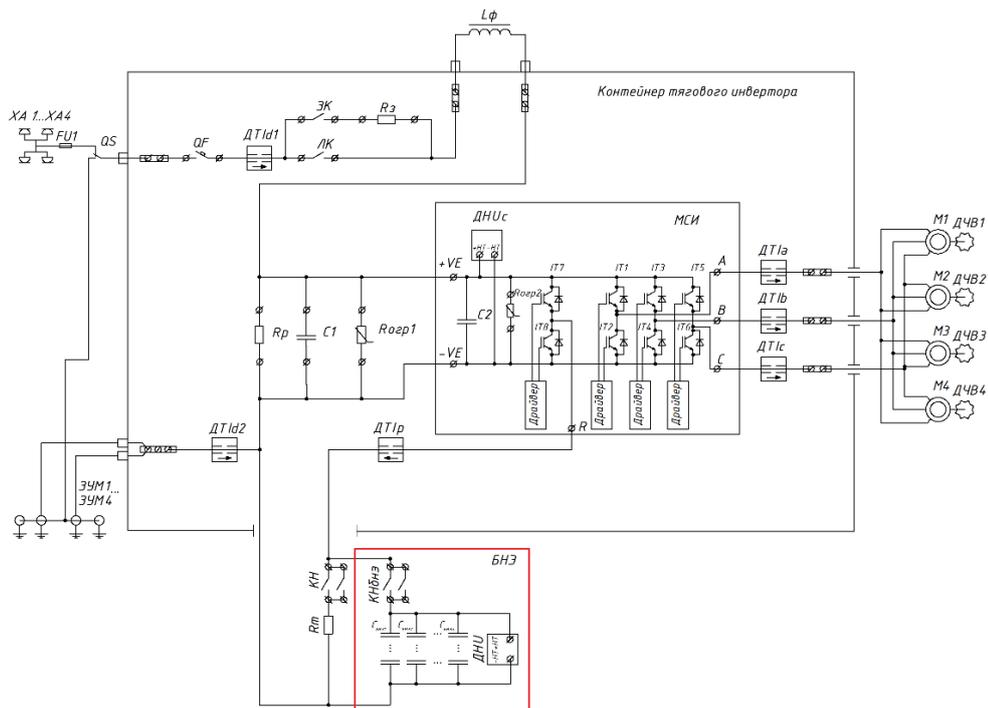


Рисунок 10 – Принципиальная схема подключения БНЭ в составе силового оборудования ЭПС

Проанализировав типы существующих накопителей, которые потенциально могут подходить для работы непосредственно на борту подвижного состава, было определено, что по массогабаритным, циклам заряда-разряда, мощности, энергоёмкости и пр. параметрам наиболее перспективными для данной задачи представляются НЭ на базе суперконденсаторных элементов.

При проведении экспериментальных замеров, производстве цифрового моделирования и экономического расчета были определены основные электрические параметры БНЭ, а именно:

- 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).

Наиболее подходящим модулем, по перечисленным выше характеристикам, является МО-150В50Ф-0-3 производства Российской компании «ТЭЭМП».

Бортовой накопитель энергии будет работать по следующему алгоритму (рисунок 11):

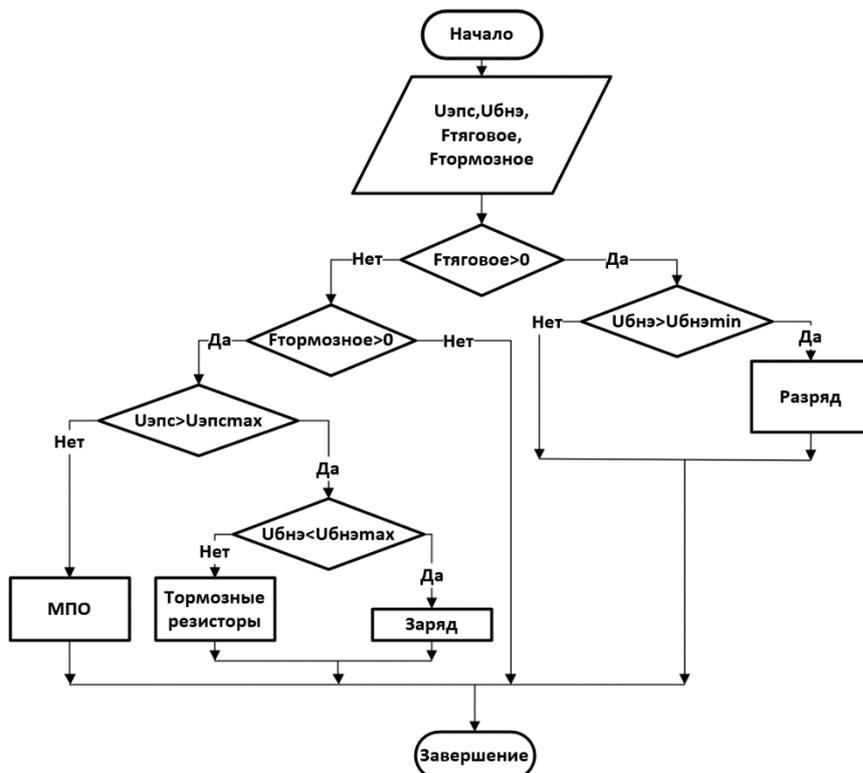


Рисунок 11 – Блок-схема алгоритма работы БНЭ

При проведении инструментального обследования вагонов типа 81-775/776/777 «Москва-2020» и 81-765/766/767 «Москва», было определено, что располагать накопители энергии следует в подвагонном пространстве немоторных вагонов (рисунки 12 – 13).



Рисунок 12 – Графический монтаж расположения БНЭ типа МО-150В50Ф-0-3 с соблюдением габаритных размеров

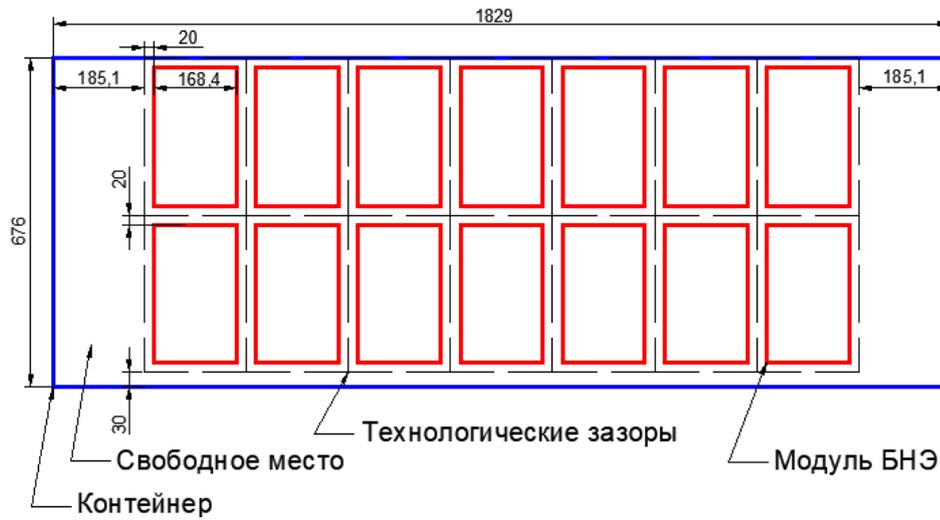


Рисунок 13 – Габаритный чертеж БНЭ и контейнера (Вид спереди).
Размеры в мм)

КПД работы БНЭ на ЭПС за суточный период рассчитывается по следующей формуле:

$$\eta_{\text{БНЭ}}^{\text{сут.}} = \frac{A_{\text{Рек}}^{\text{сут.}} - \Delta A_{\text{БНЭ}}^{\text{сут.}}}{A_{\text{Рек}}^{\text{сут.}}} = \frac{\sum_{i=1}^n \int_0^{T_{\text{рек},i}} I_{\text{рек},i} U_{\text{рек},i} dt - \sum_{k=1}^m \int_0^{T_{3-p_i}} I_{\text{БНЭ}k}^2 R_{\text{БНЭ}} dt}{\sum_{i=1}^n \int_0^{T_{\text{рек},i}} I_{\text{рек},i} U_{\text{рек},i} dt} \quad (8)$$

где: $A_{\text{Рек}}^{\text{сут.}}$ – энергия рекуперации (избыточная) в сутки на ЭПС; $\Delta A_{\text{БНЭ}}^{\text{сут.}}$ – потери энергии в БНЭ ЭПС за сутки; $T_{\text{рек},i}$ – время одного процесса рекуперации; $I_{\text{рек},i}$ – мгновенное значение тока рекуперации (избыточного); $U_{\text{рек},i}$ – мгновенное значение напряжения на ЭПС при рекуперации; m – количество зарядно-разрядных циклов БНЭ; n – количество процессов рекуперации за сутки; T_{3-p_i} – время зарядно-разрядных циклов БНЭ; $I_{\text{БНЭ}k}^2$ – мгновенное значение зарядно-разрядного тока БНЭ; $R_{\text{БНЭ}}$ – внутреннее сопротивление БНЭ.

По оценочным расчётам КПД БНЭ на ЭПС составляет от 93 до 95 %.

В шестой главе была произведена технико-экономическая оценка от внедрения управляемого накопителя энергии.

Срок окупаемости бортового накопителя энергии можно оценить по следующей формуле:

$$T_{\text{ок}} = \frac{K_{\text{НЭ}} - C_{\text{УМ}} - C_{\text{ОД}}}{\mathcal{E} - P_{\mathcal{E}}} = \frac{K_{\text{НЭ}} - \Delta P_{\text{УМ}} \cdot C_{\text{УМ}} - C_{\text{ОД}}}{(A_{\text{РекГод}} + A_{\text{Клим}} + \Delta A_{\text{потТП}} + \Delta A_{\text{потТС}}) \cdot C_{\mathcal{E}лЭн} - P_{\mathcal{E}НЭ} + P_{\mathcal{E}Д}} \quad (9)$$

где: $C_{\text{УМ}}$ – стоимость сниженной установленной мощности; $C_{\text{ОД}}$ – стоимость оборудования депо; $K_{\text{НЭ}}$ – капитальные затраты на БНЭ; $\Delta P_{\text{УМ}}$ – величина, на которую была снижена установленная мощность подстанций; $C_{\text{УМ}}$ – цена подводимой установленной мощности от питающего центра; $C_{\mathcal{E}лЭн}$ – цена электроэнергии; \mathcal{E} – экономия за счет снижения энергопотребления; $P_{\mathcal{E}НЭ}$ – расходы на эксплуатацию БНЭ; $P_{\mathcal{E}Д}$ – сэкономленные эксплуатационные затраты на обслуживание СТЭ в депо и тупиках; $A_{\text{РекГод}}$ – избыточная энергия рекуперации в год; $A_{\text{Клим}}$ – энергия, необходимая для отвода тепла реостатов из подземной части метрополитена; $\Delta A_{\text{потТП}}$ – потери энергии в ТП в год; $\Delta A_{\text{потТС}}$ – потери энергии в ТС в год.

Оценка срока окупаемости БНЭ с учетом цен на октябрь 2023 г. на существующих линиях Московского метрополитена представлена на рисунке 14.

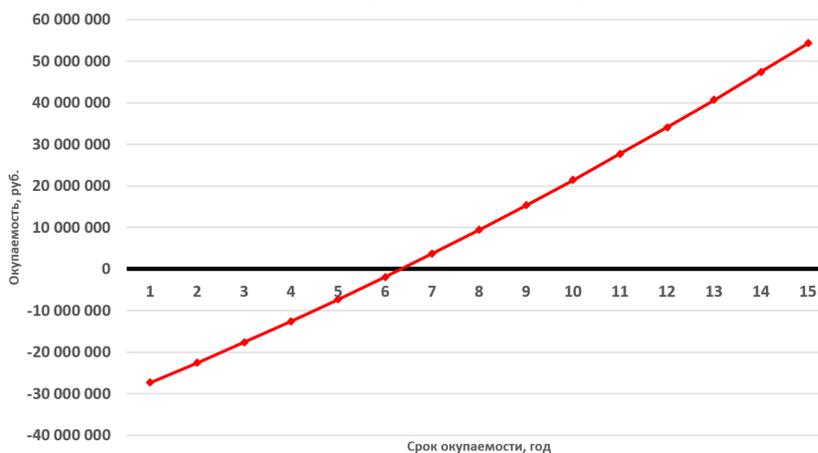


Рисунок 14 – Зависимость ЧДД от срока полезного использования БНЭ на ЭПС

Срок окупаемости БНЭ с учетом силовых линий и прочим оборудованием, необходимым для монтажа на ЭПС Московского метрополитена составляет 6.5 лет. Срок службы составляет 31 год.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам диссертационных исследований получены следующие итоги, рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы:

1) Определены основные критерии, позволяющие оценить эффективность использования накопителя энергии на борту электроподвижного состава метрополитена.

2) Выполнен анализ существующих типов накопителей энергии, среди которых определены наиболее подходящие для использования на ЭПС метрополитена.

3) Разработаны теоретические положения по обеспечению экономии энергии и повышению безопасности движения ЭПС, отличающиеся от существующих теоретических решений, за счет использования бортового накопителя на ЭПС.

4) Проведены экспериментальные замеры показателей работы ЭПС на двух линиях Московского метрополитена, за счет чего были получены реальные данные по расходу электроэнергии на межпоездной обмен и избыточной энергии рекуперации.

5) Создана цифровая модель работы электроподвижного состава в структуре системы тягового электроснабжения линии Московского метрополитена.

6) Разработана методика и выполнено сравнение результатов проведенного имитационного моделирования движения поезда с результатами экспериментальных замеров параметров движения ЭПС на линии Московского метрополитена по интегральным показателям, методом вероятностного анализа по логистическому закону распределения, по критерию Стьюдента. Доказана сходимость результатов.

7) Разработана программа для статистического анализа электрических параметров поезда. Разработан дополнительный модуль программы, предназначенный для определения числа циклов перезаряда и энергоемкости бортового накопителя электроэнергии.

8) Разработана структурная схема и конструкция накопителя энергии для использования на борту ЭПС. Определены основные характеристики бортового накопителя энергии. При инструментальном обследовании подвагонного

пространства было определено свободное место под размещение бортового накопителя энергии.

9) Определена энергоемкость накопителя электроэнергии на подвижном составе по технико-экономическим параметрам.

10) Разработана методика и произведена технико-электротехническая оценка эффекта от применения накопителя энергии на борт ЭПС метрополитена в современных условиях эксплуатации.

11) Рекомендуется внедрение бортовых накопителей энергии на электроподвижной состав метрополитенов для повышения энергоэффективности движения поездов, а также для обеспечения дополнительной безопасности пассажиров при аварийных остановках движения, связанных с прерыванием питания от системы тягового электроснабжения, за счет реализации функции автономного хода.

12) Перспективой дальнейшей работы по теме является разработка методов по автоматизированному выбору емкости бортового накопителя электроэнергии на электроподвижном составе метрополитена.

Список работ, опубликованных автором по теме диссертации

а) в рецензируемых научных изданиях:

1. Шевлюгин, М. В. Цифровое моделирование движения электроподвижного состава 81-775/776/777 «Москва-2020» с учетом рекуперативного торможения на линии Московского метрополитена / М. В. Шевлюгин, Д. С. Плетнев, М. Н. Белов, З. Е. Минаков // Электронный сетевой политематический журнал «Научные труды КубГТУ». – 2023. – № 1. – С. 119-129.

2. Шевлюгин, М. В. Применение накопителей энергии для усиления централизованного питания участка метрополитена в рамках одной межподстанционной зоны / М. В. Шевлюгин, А. Е. Голицына, М. Н. Белов, Д. С. Плетнев // Энергобезопасность и энергосбережение. – 2023. – № 1. – С. 93-98.

б) в отечественных изданиях, которые входят в международные реферативные базы данных и системы цитирования:

3. Shevlyugin, M.V. Electric stock digital twin in a subway traction power system / M.V Shevlyugin, A.A. Korolev, Golitsyna, D.S. Pletnev // Russian Electrical Engineering. – 2019. – 90(9). – P. 647 – 652.

4. Shevlyugin, M.V. Increasing Power Supply Reliability for Auxiliaries of Subway Traction Substations Using Energy Storage Devices / M.V Shevlyugin, M.N Belov, A.E. Golitsyna, D.S. Pletnev // Russian Electrical Engineering. – 2020. – 91(9). – P. 552 – 556.

5. Shevlyugin, M.V. An Experimental Study of the Autonomous Operation of Subway Electric Rolling Stock/ Shevlyugin, M.V., Zheltov, K.S., Pletnev, D.S., Glushchenko, M.D. // Russian Electrical Engineering. – 2021. – 92(9). – P. 485 – 487.

6. Shevlyugin, M.V. Experimental Estimation of the Quality of Electric Power in the Auxiliary Networks of a Combined Traction Substation of the Subway / M.V. Shevlyugin, A.E. Golitsyna, M.N. Belov, D.S. Pletnev // Russian Electrical Engineering. – 2022. – 93(9). – P. 616 – 620.

7. Grechishnikov, V.A. Selection of Locations for Deployment of Energy-Storage Facilities at Traction Substations of Subway Lines / Grechishnikov, V.A., Pletnev, D.S., Belov, M.N., Shevlyugin, M.V. // Russian Electrical Engineering. – 2023. – 94(9). – P. 665 – 670.

в) в других изданиях и материалах конференций

8. Шевлюгин, М. В. Силовая установка для автономного хода электроподвижного состава / М. В. Шевлюгин, Д. С. Плетнев, С. А. Михайлова //

Перспективы развития метрополитенов в условиях интенсивного внедрения новых технологий. Инфраструктура и подвижной состав метрополитена: Сборник трудов Международной выставки-конференции, Москва, 12–14 декабря 2019 года / ПОД ОБЩЕЙ РЕДАКЦИЕЙ Т.В. ШЕПИТЬКО, А.А. СИДРАКОВА. Том Выпуск 2. – Москва: Российский университет транспорта, 2019. – С. 39-42.

9. Korolev, A. Modeling of energy saving in substations feeding DC metro systems based on appropriate location of energy storage elements / Korolev, A., Shevlyugin, M., Belov, M., Pletnev, D., Murzintsev, A., Zhgun, K. // Proceedings of the 3rd 2021 International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering, REEPRE 2021. – 2021. – P. 020063-1 – 020063-7.

10. Плетнев, Д. С. Оценка емкости бортового накопителя электроподвижного состава 81-775/776/777 «Москва-2020» на Сокольнической линии Московского метрополитена / Д.С. Плетнев // Перспективы развития метрополитенов в условиях интенсивного внедрения новых, в том числе цифровых технологий: Сборник трудов Международной выставки-конференции, Москва, 16-18 декабря 2021 года ПОД ОБЩЕЙ РЕДАКЦИЕЙ Т.В. ШЕПИТЬКО, А.А. СИДРАКОВА. – Москва: 2021. – С. 46-52.

11. Шевлюгин, М.В. Оценка показателей качества электрической энергии на основе экспериментальных замеров в сетях совмещенной тяговой подстанции метрополитена [Текст] / М.В. Шевлюгин, А.Е. Голицына, М.Н. Белов, Д.С. Плетнев // Приборы и методы измерений, контроля качества и диагностики в промышленности и на транспорте. Материалы V всероссийской научно-технической конференции с международным участием. – Омск, 2022. – С. 263–270.

12. Королев, А.А. Анализ программного обеспечения для моделирования электрификации железных дорог / А. А. Королев, Д. С. Плетнев, М. Н. Белов [и др.] // Наукосфера. – 2022. – № 1-1. – С. 175-181.

13. Белов, М. Н. Принципиальная схема управляемой накопительной установки для метрополитенов / М. Н. Белов, Д. С. Плетнев, Е. В. Голицын [и др.] // Наукосфера. – 2022. – № 1-1. – С. 168-174.

14. Плетнев, Д. С. Оценка эффективности применения рекуперативного торможения на примере метрополитена с использованием цифрового моделирования / Д. С. Плетнев, М. Н. Белов, Е. В. Голицын [и др.] // Наукосфера. – 2022. – № 1-1. – С. 162-167.

15. Shevlyugin, M. Simulation of electric rolling stock movement 81-775/776/777 «moscow-2020» on the Sokolnicheskaya line of the Moscow metro, taking into account the modes of regenerative braking / Shevlyugin, M., Pletnev, D., Belov, M. // AIP Conference Proceedings. – 2023. 2476, 020063.

Плетнев Дмитрий Сергеевич

БОРТОВОЙ НАКОПИТЕЛЬ ЭНЕРГИИ НА ЭЛЕКТРОПОДВИЖНОМ СОСТАВЕ МЕТРОПОЛИТЕНА

2.4.2. Электротехнические комплексы и системы (технические науки)

Автореферат на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать – «__» _____ 2024 г.

Заказ №

Формат 60x90/16

Тираж – 80 экз.

Усл. печ. л. 1,5

РУТ (МИИТ), 127994, г. Москва, ул. Образцова, д.9, стр.9.