

Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Российский университет транспорта»  
РУТ (МИИТ)

На правах рукописи



Плетнев Дмитрий Сергеевич

**БОРТОВОЙ НАКОПИТЕЛЬ ЭНЕРГИИ НА  
ЭЛЕКТРОПОДВИЖНОМ СОСТАВЕ МЕТРОПОЛИТЕНА**

2.4.2. Электротехнические комплексы и системы

Диссертация на соискание ученой степени кандидата  
технических наук

Научный руководитель  
доктор технических наук, доцент  
Шевлюгин Максим Валерьевич

Москва – 2024

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1 КРИТЕРИИ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ НАКОПИТЕЛЕЙ ЭНЕРГИИ НА БОРТУ ЭЛЕКТРОПОДВИЖНОГО СОСТАВА.....	12
1.1 Использование энергии рекуперации, вырабатываемой ЭПС .....	14
1.2 Вывод ЭПС из тоннеля метро в аварийной ситуации.....	18
1.3 Автономный ход ЭПС в тупиках и ангарах депо .....	23
2 АНАЛИЗ СИСТЕМ НАКОПЛЕНИЯ ЭНЕРГИИ .....	27
2.1 Основные аккумулирующие элементы для бортовых систем НЭ.....	28
2.1.1 Аккумуляторные батареи.....	29
2.1.1.1 Свинцово-кислотные аккумуляторы.....	29
2.1.1.2 Никель-кадмиевые аккумуляторы.....	30
2.1.1.3 Натриевые аккумуляторы .....	30
2.1.1.4 Литий-ионные аккумуляторы .....	31
2.1.1.5 Проточные окислительно-восстановительные батареи.....	32
2.1.2 Суперконденсаторы .....	33
2.1.3 Гибридные системы накопления энергии .....	35
2.2 Опыт использования бортовых систем накопления энергии .....	36
2.3 Сравнительный анализ бортовых систем накопления энергии .....	39
3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ РАБОТЫ ЭПС НА МОСКОВСКОМ МЕТРОПОЛИТЕНЕ .....	43
3.1 Анализ потенциала использования энергии рекуперации.....	43
3.1.1 Электроснабжение ЭПС .....	43
3.1.2 Силовая схема ЭПС .....	47
3.2 Эксперимент автономного хода ЭПС с БНЭ .....	49
3.3 Анализ показателей работы ЭПС на Таганско-Краснопресненской линии Московского метрополитена.....	51
3.4 Анализ показателей работы ЭПС на Кольцевой линии Московского метрополитена .....	64
4 ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ ЭПС В СТЭ МЕТРОПОЛИТЕНА .....	70
4.1 Формирование баз исходных данных для имитационного моделирования .	70
4.1.1 Профиль пути .....	70

4.1.2	Координаты расположения элементов на профиле пути.....	71
4.1.3	Формирование графика движения поездов.....	77
4.2	Алгоритм расчета и общий подход к моделированию.....	81
4.3	Моделирование тяговых подстанций в составе системы тягового электроснабжения «Таганско-Краснопресненской» линии.....	90
4.4	Моделирование движения ЭПС «Москва-2019».....	93
4.5	Разработка программы статистического анализа.....	99
4.6	Анализ результатов моделирования ЭПС.....	105
4.7	Сравнение результатов имитационного моделирования движения поезда с результатами экспериментальных замеров параметров движения ЭПС на Таганско-Краснопресненской линии Московского метрополитена.....	109
4.8	Верификация результатов моделирования.....	112
4.9	Оценка результатов по критерию Стьюдента.....	120
4.10	Модуль программы, предназначенный для определения энергоемкости накопителя электроэнергии, числа циклов перезаряда и срока службы.....	123
5	СХЕМА И КОНСТРУКЦИЯ БОРТОВОГО НАКОПИТЕЛЯ ЭНЕРГИИ ДЛЯ ЭПС МЕТРО.....	127
5.1	Электрическая силовая схема ЭПС с бортовым НЭ.....	127
5.2	Описание конструктивной части бортового накопителя энергии.....	130
5.3	Размещение БНЭ в подвагонном пространстве ЭПС.....	133
5.4	Проверка параметров БНЭ для автономного хода ЭПС.....	138
5.5	Оценка КПД БНЭ.....	145
6	ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ БНЭ НА ЭПС.....	147
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	153
	СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ.....	155
	СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	156

## ВВЕДЕНИЕ

### **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. Феоктистов, 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 конструкционных 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:

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 тупиков до ближайших станций в аварийном режиме работы системы тягового электроснабжения;

8. 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 результатам 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 ITSИ (AIP Conference Proceedings), 2023 г.

# 1 КРИТЕРИИ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ НАКОПИТЕЛЕЙ ЭНЕРГИИ НА БОРТУ ЭЛЕКТРОПОДВИЖНОГО СОСТАВА

Тормозной процесс ЭПС (рисунок 1) с фактической скорости движения до 7-3 км/ч осуществляется при работе рекуперативно-реостатного (электрического) торможения электродвигателями, далее с 7-3 км/ч до полной остановки состава применяется электропневматический (механический) режим торможения блоками тормозных колодок. Выработанная энергия в процессе электрического торможения (рисунок 2) может традиционно распределяться как на тормозные реостаты или межпоездной обмен (МПО), так и на потенциальные накопители энергии, расположенные на борту ЭПС.

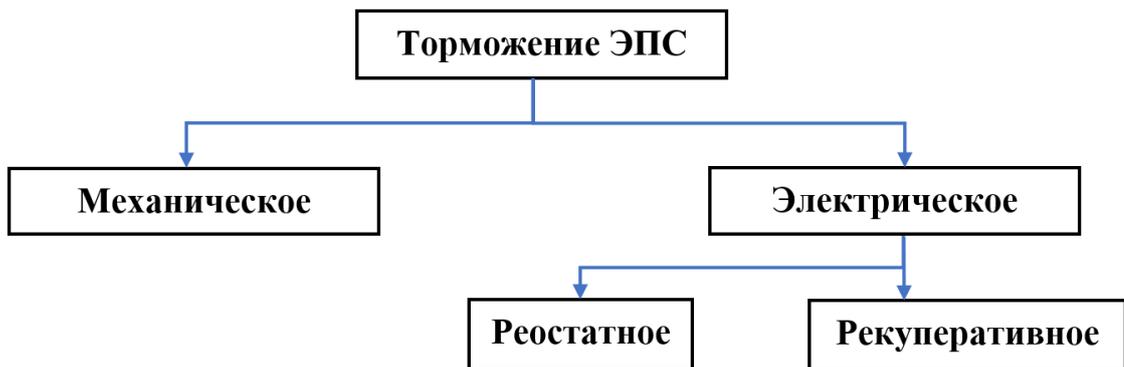


Рисунок 1 – Режимы торможения ЭПС



Рисунок 2 – Распределение энергии рекуперации

К основным критериям целесообразного использования накопителей энергии на борту ЭПС относятся следующие (рисунок 3):

- 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) [157].



Рисунок 3 – Сценарии целесообразного использования накопителей энергии на борту электроподвижного состава

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.

## 1.1 Использование энергии рекуперации, вырабатываемой ЭПС

Рекуперативное торможение на электрифицированном транспорте – это процесс преобразования кинетической энергии в электрическую энергию за счет перевода электродвигателей в генераторный режим при торможении любого электрического транспортного средства и ЭПС, в частности. Рекуперативное торможение используется для ограничения чрезмерной скорости на спусках и в других случаях, когда использование пневматической тормозной системы нецелесообразно. Еще 15 лет назад до начала рекуперативного торможения в вышеупомянутых случаях, использовалось реостатное торможение, которое заставляло потенциально полезную электроэнергию переводить в тепловую и нагревать воздух в тоннелях и станциях метро [101, 103, 105].

Система рекуперативного торможения (рисунки 4 – 5, где СУДП – система управления движением поезда) является развитием и полнофункциональным аналогом реостатного торможения, которое позволяло снижать скорость поезда без использования системы пневматического торможения (для экономии ресурсов поезда: колодки и колесные пары), но имеет преимущество ввиду использования части выработанной электроэнергии двигателями для электроснабжения ЭПС, находящихся на одной фидерной зоне и в режиме потребления энергии для разгона [131]. Однако, избыток электроэнергии, который не участвовал в межпоездном обмене, так или иначе должен быть рассеян в резисторах. При этом тепло, вырабатываемое в тормозных резисторах, имеет негативный эффект (как на оборудование внутри ЭПС, так и на пассажиров). Поэтому избыточную электроэнергию рекуперации, которая фактически тратится впустую, необходимо сохранять в бортовых накопителях.

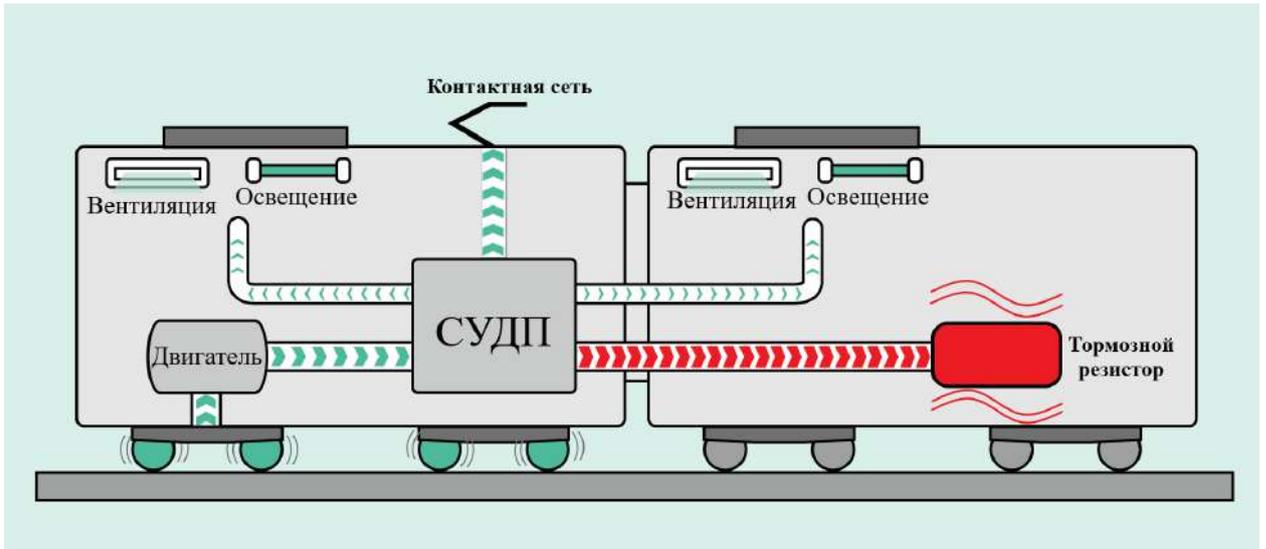


Рисунок 4 – Принципиальная схема распределения энергии в процессе торможения на тормозные резисторы

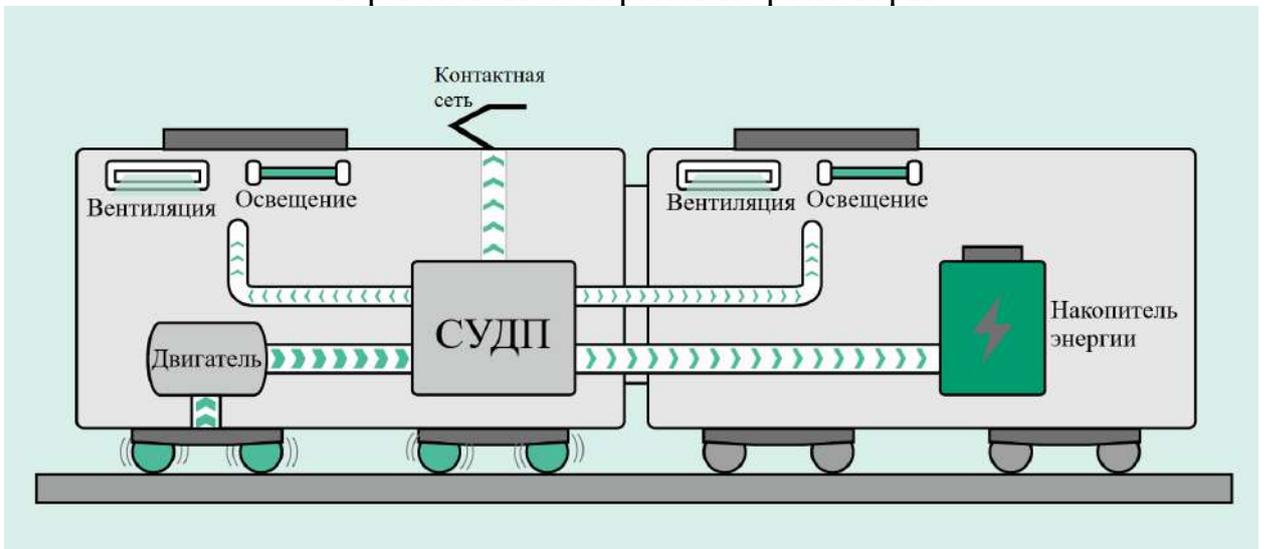


Рисунок 5 – Принципиальная схема распределения энергии в процессе рекуперативного торможения с БНЭ

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

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

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;

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

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

Помимо экономии энергии за счет принятия избыточной энергии рекуперации, экономия происходит и за счет снижения потерь при пуске ЭПС. В данном случае в первые секунды пуска ЭПС будет питаться от собственного источника в виде БНЭ, что позволит в данный момент времени сэкономить на потерях в тяговой сети и на ТП, если бы питание ЭПС осуществлялось традиционным образом. Величину сэкономленных потерь в тяговой сети и на ТП можно оценить по формуле:

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

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.

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 МПО может составлять до 35% от затрачиваемой электроэнергии на тягу.

Предполагается, что бортовой накопитель будет использовать электроэнергию (рисунок 6), рекуперированной составом [128], непосредственно для облегчения следующего запуска того же состава. Преимущество по сравнению с другими способами реализации использования рекуперативной энергии заключается в снижении общих потерь, возникающих при передаче энергии через тяговую сеть к приемнику. В этом случае приемник (аккумулятор) располагается в непосредственной близости от тягового двигателя, на борту подвижного состава. Современные разработки накопителей энергии значительно увеличили их удельную энергоемкость и упростили их размещение и обслуживание, что позволяет устанавливать их в более сложных условиях без существенных препятствий и угроз безопасности транспорта.

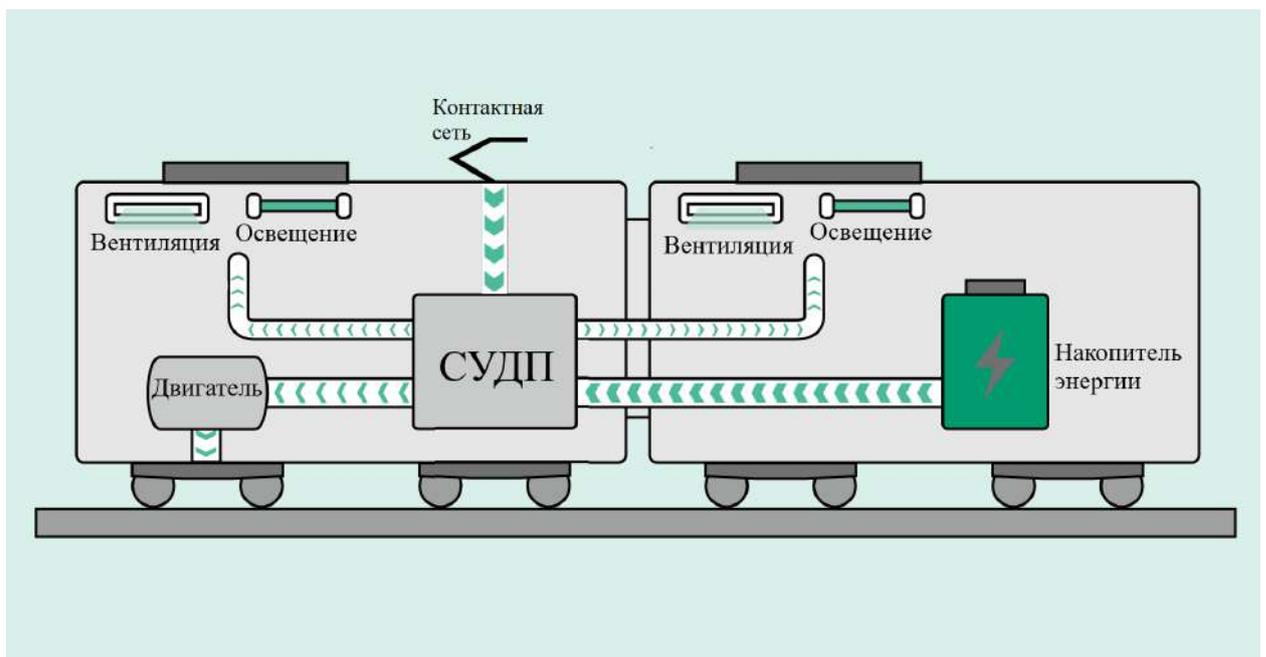


Рисунок 6 – Принципиальная схема распределения накопленной энергии в БНЭ

Применение мощных аккумуляторов энергии на ЭПС позволит наиболее эффективно использовать электрическую энергию рекуперативного торможения для облегчения запуска каждого конкретного поезда, независимо от соседних поездов на линии. Их использование позволяет увеличить пропускную способность линии и облегчить работу кабельных линий и оборудования ТП.

НЭ на борту ЭПС должны обладать высокой емкостью и способностью выдавать большую мощность (то есть обеспечивать высокие токи заряда/разряда) [84 – 85].

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.

Более подробно о работе БНЭ с целью утилизации избыточной энергии рекуперации будет описано в главе № 4.

## **1.2 Вывод ЭПС из тоннеля метро в аварийной ситуации**

Метро – это главный транспортный узел любого мегаполиса [15]. Так как этим видом транспорта пользуется огромное количество человек (в Московском метрополитене до 10 млн человек в сутки [77]), 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 [70]. Однако, несмотря на все предпринимаемые меры предосторожности, возможность возникновения аварийных ситуаций полностью исключить нельзя [125].

Так, в результате техногенной катастрофы 25 мая 2005 года в Москве на энергоподстанции 500/220/110 кВ № 510 «Чагино» (рисунок 7), расположенной в столичном районе на юго-востоке Люблино, и входящей в состав московского энергокольца, которое питает несколько районов Москвы, 25 городов Подмосковья, а также Смоленскую, Рязанскую, Тверскую, Калужскую и Тульскую области, произошло масштабное отключение электроэнергии [68].



Рисунок 7 – Авария на подстанции «Чагино»

Чрезвычайное происшествие ознаменовалось самым значительным в истории Москвы энергетическим кризисом, оно затронуло около 7 млн человек. Данная катастрофа является результатом череды неблагоприятных событий, произошедших в период с 23 по 25 мая.

Остановить каскадное отключение и восстановить электроснабжение социально значимых объектов и объектов жизнеобеспечения Москвы удалось только к 18:00 25 мая. Электроснабжение Московской транспортной системы было восстановлено к 21:00 25 мая. Переподключение всех обесточенных в результате аварии потребителей было завершено только к 16:00 26 мая.

В результате данного энергетического коллапса полностью остановлено движение около сотни поездов метрополитена на Бутовской, Серпуховско-Тимирязевской, Калужско-Рижской, Калининской, Люблинской, Сокольнической, Таганско-Краснопресненской, Замоскворецкой линии. Таким образом, эвакуация свыше 20 тысяч пассажиров осуществлялась прямо по тоннелю метро в течение нескольких часов (рисунки 8 – 9);



Рисунок 8 – Эвакуация людей из тоннелей метрополитена в связи с остановкой поездов из-за аварии на подстанции «Чагино»



Рисунок 9 – Эвакуация чрезвычайно большого скопления людей из метро на поверхность из-за неработающих эскалаторов

Крупные аварии в метрополитене происходили и позже: в 2016 году 8 июля на станции «Выхино» из-за короткого замыкания, которое не было ликвидировано аппаратом защиты, произошло возгорание силового кабеля. Площадь пожара составила свыше 100 кв. м. Данная авария в энергетической системе парализовала работу поездов между станциями метро «Текстильщики» и «Котельники». В течение трех дней на данном участке поезда работали с увеличенным интервалом [71 – 72].

Крупные аварии известны также и за рубежом [48]:

- в результате отключения электроэнергии в многочисленных районах энергосистемы, которая располагается в Бонневилле (США) на северо-западном тихоокеанском побережье, 6 июня 1950 года нанесло серьезный ущерб многим электростанциям по всей территории США, начинавшейся от Вашингтона и Британской Колумбии до Юты, Орегона, Айдахо и Монтаны;

- в Нью-Йорке 13 июня 1961 года были выведены из строя одновременно четыре энергосистемы. Самый сильный ущерб был в Манхэттене;

- в Западной части США, а именно: в Айове и пяти ближайших штатах, 28 января 1965 г. на несколько часов была прекращена подача электроэнергии, в результате этого инцидента 2 миллиона человек и большое количество заводов остались без электричества;

– в Канаде в провинции Онтарио 9 ноября 1965 года из-за ошибочного отключения линий электропередачи от электростанции сработал «каскадный эффект», в связи с этим происшествием прекратилась подача электроэнергии. Площадь отключения превысила 200 тысяч квадратных километров и затронула весь северо-восток США, а также большую часть Канады. Около тридцати миллионов человек и многие производственные предприятия остались без электроэнергии. Восстановили электропитание спустя 14 часов;

– нередко молнии попадают и в высоковольтные линии электропередач. И именно из-за такого инцидента в июле 1977 г. в Нью-Йорке произошло отключение электричества. Данная авария нанесла ущерб городу примерно в 300 млн. долларов. А также в ночное время, из-за отсутствия света, в мегаполисе начались массовые беспорядки: люди со злым умыслом пользовались тем, что город был обесточен, и начали грабить магазины. В результате этого арестовали около 3.8 тысячи человек. Город оставался без света более чем 24 часа;

– 31 мая 1979 года в Курчатове (СССР) из-за нескольких неблагоприятных факторов: высокой нагрузки, большой температуры окружающей среды, провисла воздушная линия, и она начала касаться дерева, подросшего в весенний период на 1.5-2 метра и которое не успели срубить, вышла из строя Курская АЭС;

– 15 ноября 1994 года одновременно произошла авария на Ингурской и Тбилисской ГЭС (Грузия). Это повлекло за собой отключение всех производственных мощностей и многие люди остались без света;

– следом за аварией на той же самой Тбилисской ГЭС в Грузии, практически через год произошла еще одна 18 января 1995 года. Из-за этого вся территория Восточной Грузии была обесточена;

– на территории Северной Америки 14 августа 2003 года произошло каскадное отключение перегруженных линий электропередач. Оно привело к возникновению лавины напряжений, и подстанция начала сбрасывать нагрузку вместе с нагрузкой собственных нужд. В результате этого возникло обесточивание

нескольких регионов США. А именно, отключениями электроэнергии были затронуты следующие мегаполисы в Северо-Восточной части США: в штатах Нью-Йорк, Нью-Джерси, Огайо, Мичиган, Пенсильвания и Коннектикут, а также Канады – Оттава и Торонто. По оценкам экспертов, в процессе этой страшной аварии отключились более 260 электростанций (531 энергоблок), включая около 10 автономных электростанций (большая часть в США, а оставшиеся 3 - в Канаде). Подача электричества была восстановлена более чем за сутки в США, и лишь спустя 44 часа электропитание было полностью восстановлено. В результате этой крупной аварии пострадали около 50 миллионов человек. Также был нанесен ущерб экономике, по некоторым оценкам он составляет порядка 6 миллиардов долларов;

– при проведении плановых работ по замене кабеля 110 кВ, 23 августа 2003 года подали напряжение на заземляющее устройство. И в результате этой ошибки возникла авария в распределительных сетях города Хельсинки (Финляндия);

– в Швеции 23 сентября 2003 года в после отключения реактора на атомной электростанции Oskarshamn-3 и повреждения подстанции недалеко от атомной электростанции Ringhals, работу которой пришлось остановить, началась достаточно серьезная авария, приведшая к потере подачи энергии на восточной стороне Дании и в Копенгагене на 7 часов. На данный момент эта авария для южной Швеции считается самой крупной. Так как она затронула около 4-х миллионов человек;

– 30 августа 2007 года – произошло масштабное отключение электроэнергии в Санкт-Петербурге, что повлекло за собой остановку поездов в метрополитене.

Все аварийные случаи, которые описывались выше, сопровождались отключением электроэнергии на транспорте, в том числе и в метро. 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. Таким образом, при любом сбое в электроснабжении, люди могут оставаться в безопасности, так как поезд сможет при помощи БНЭ проехать от места аварийной остановки до ближайшей станции.

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:

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

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).

Подробные данные будут исследования будут описаны в разделе 5.

### 1.3 Автономный ход ЭПС в тупиках и ангарах депо

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 (рисунок 10).

Следует особо отметить тот факт, что обслуживание СТЭ 825 В депо является частым и довольно ответственным процессом, а именно:

- токосъем с подвесной шины через гибкий подвод напряжения, так называемую «удочку», осуществляется с помощью мобильного роликового устройства, который, с одной стороны, должен обеспечивать надежный контакт, а с другой – должен быть хорошо смазанным для возможности легкого перемещения;

- при обеспечении временного питания ЭПС в депо гибкие подводы тягового напряжения +825 В – «удочки» подключаются обслуживающим персоналом вручную. Ввиду этого изоляция устройства должна быть надежной, а сама «удочка» довольно часто должна периодически проходить поверку по допустимым нормам.

Использование НЭ на борту вагонов метро позволяет осуществлять автономный маневровый ход поезда в тупиках и ангарах депо без подвода тягового напряжения. Если принять, что в среднем на одно депо приходится около тридцати «каналов», по 160 м (8·20) каждая, а в одной канаве имеется восемь удочек, то можно будет отказаться от использования на каждом электродепо по 4800 м токоведущих шин и, соответственно, от периодического обслуживания данной системы временного питания.

На рисунке 11 показаны навесные шины с отходящими гибкими подводами напряжения («удочками»), расположенными над ремонтными канавами.



Рисунок 10 – Центральная система шин +825 В в депо



Рисунок 11 – Навесные шины с гибкими подводами напряжения в депо

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. Если считать, что количество персонала, входящего в состав маневровой бригады, колеблется от четырех до восьми человек, половина которого выполняет функции так называемых «следающих» за обеспечением электропитания поездов в депо, то сокращение штата в таком случае составит от двух до четырех человек, то есть равносильно числу «следающих».

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;

$U_{\text{max}}$  – 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.

Подробное исследование маневрового хода ЭПС на заряде БНЭ описаны в разделе № 5.

Принимая во внимание все перечисленные выгоды установки НЭ на борту вагона метро, самым главным и важным преимуществом является безопасность персонала, работающего в пределах депо. Несмотря на все меры предосторожности, предпринимаемыми работниками, до двух летальных исходов в год происходит из-за опасной системы электроснабжения в электродепо.

## 2 АНАЛИЗ СИСТЕМ НАКОПЛЕНИЯ ЭНЕРГИИ

С повсеместным использованием электрической тяги применяют энергосберегающие технологии, такие как рекуперативное торможение и системы сохранения и накопления энергии [16].

Технические решения для сохранения энергии следует разделять на две области применения [41 – 45]: первая - так называемые «бортовые» установки [139], то есть накопители энергии на железнодорожном электроподвижном составе, ЭПС метро, трамвае [50 – 51, 132]. Бортовая система НЭ может обслуживать только транспортное средство, на котором она установлена. Такая система может работать в любом месте, где она необходима, например для автономного хода без контактной сети [39 – 40]. Однако, поскольку бортовая система НЭ перемещается вместе с железнодорожным транспортным средством, то у нее есть ограничения по ее габариту, весу и безопасности. НЭ в рельсовых транспортных системах можно сгруппировать в три категории в зависимости от их функциональности, а именно: принятие избыточной энергии рекуперации, выравнивание нагрузок на линии и работа без контактной сети, то есть обеспечение автономного хода [96, 98].

Вторая область применения [148] – стационарная установка, например, на подстанции метрополитена или в тоннеле в середине межподстанционной зоны [3, 5, 6, 23, 106].

В данной диссертационной работе рассмотрена первая область применения накопителей, а именно: бортовые накопители энергии [131] на рельсовом транспорте (рисунок 12).

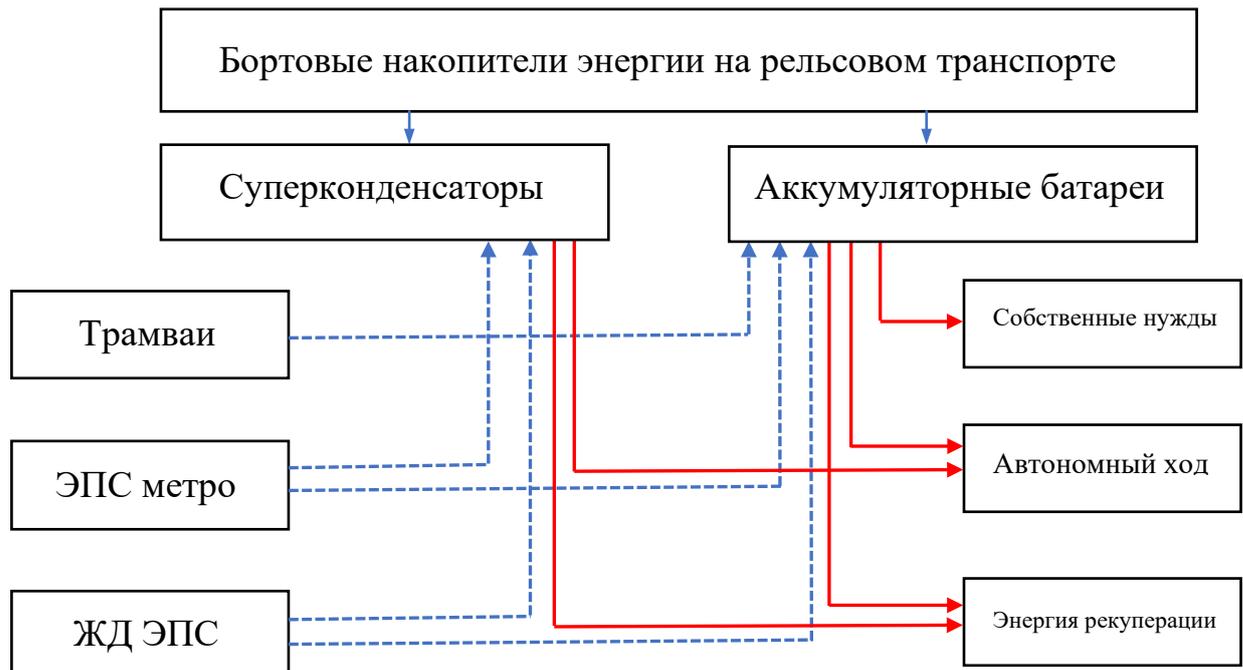


Рисунок 12 – Бортовые накопители энергии на рельсовом транспорте

Безусловно, в качестве бортовых систем накопления энергии, помимо суперконденсаторов и аккумуляторов, есть примеры использования достаточно перспективных технологий: маховики и сверхпроводниковые индуктивные накопители энергии (СПИНЭ) [123, 150]. Но на данный момент у них есть ряд существенных недостатков ввиду гироскопического эффекта у маховиков [151] и громоздкости у СПИНЭ [78, 80], которые не позволяют эффективно использовать весь потенциал данных технологий на борту малых и средних транспортных средств.

## 2.1 Основные аккумулирующие элементы для бортовых систем НЭ

Сегодня существует множество различных видов аккумуляторных батарей и суперконденсаторов. У каждого вида есть свои преимущества и недостатки, поэтому необходимо четкое понимание принципа работы и основных возможностей этих накопителей энергии [99, 100, 154].

## 2.1.1 Аккумуляторные батареи

Как одно из наиболее часто используемых устройств для хранения энергии, аккумуляторы хранят электричество в форме химической энергии. Как правило, батарея состоит из трех основных компонентов: анода, катода и электролита. В зависимости от химического материала, используемого в электродах, существует широкий спектр батарей. Рассмотрим НЭ, такие как свинцово-кислотные аккумуляторы, никелевые аккумуляторы, натриевые аккумуляторы, литий-ионные аккумуляторы и окислительно-восстановительные аккумуляторы.

### 2.1.1.1 Свинцово-кислотные аккумуляторы

Свинцово-кислотный аккумулятор (рисунок 13) известен как самый старый тип аккумуляторных батарей, он широко используется в чувствительных системах для поддержания уровня напряжения [140 – 149]. Так как его технология производства одна из самых хорошо отработанных, а материалы легко доступны, что значительно снижает его конечную стоимость. Типичная свинцово-кислотная батарея содержит два электрода: анод из диоксида свинца  $PbO_2$  и катод из губчатого свинца  $Pb$ . Два электрода разделены микропористой мембраной или абсорбирующим стекломатом для предотвращения короткого замыкания. Электроды и сепаратор погружены в разбавленный электролит на основе серной кислоты. На этапе разряда анод и катод реагируют с электролитом с образованием сульфата свинца и при этом выделяется электроэнергия [76].

Основные показатели:

- 1) Удельная энергоемкость (Вт·ч/кг): 30–50;
- 2) Удельная мощность (Вт/кг): 75–300;
- 3) Коэффициент полезного действия (КПД) цикла заряд/разряд (%): 80–90;
- 4) Цикличность (циклы): 500 – 2000;
- 5) Срок службы (год): 5–15;

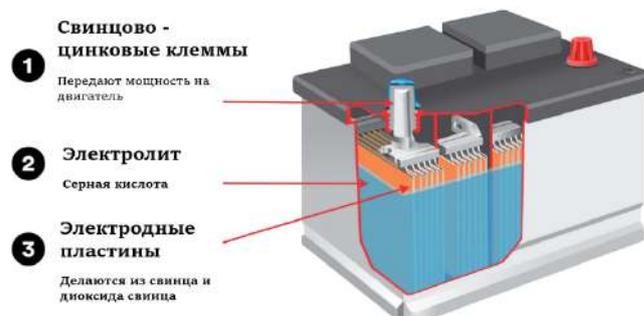


Рисунок 13 – Устройство свинцово-кислотной батареи

б) Саморазряд (потеря % заряда за сутки): 0.05–0.3.

### 2.1.1.2 Никель-кадмиевые аккумуляторы

Аккумуляторная батарея Ni-Cd (рисунок 14) пользовалась высоким спросом до появления никель-металлогидридных (Ni-MH) и литий-ионных батарей [167]. Положительный и отрицательный электроды типичной никель-кадмиевой батареи изготовлены из гидроксида никеля и кадмия соответственно, а электролит – из щелочного гидроксида калия. Никель-кадмиевые батареи имеют низкое внутреннее сопротивление и превосходную способность выдерживать высокие скорости заряда и разряда.

Основные показатели:

- 1) Удельная энергоемкость (Вт·ч/кг): 50 – 75;
- 2) Удельная мощность (Вт/кг): 150 – 300;
- 3) КПД цикла заряд/разряд (%): 60 – 83;
- 4) Цикличность (циклы): 1500 – 3000;
- 5) Срок службы (год): 15 – 20;
- 6) Саморазряд (потеря % заряда за сутки): 0.2 – 0.6.

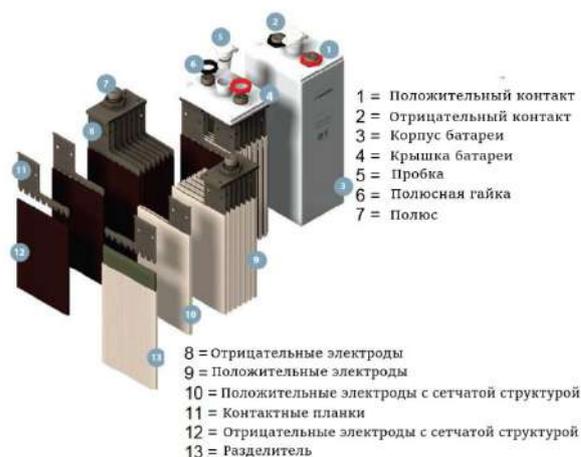


Рисунок 14 – Устройство никель-кадмиевой батареи

### 2.1.1.3 Натриевые аккумуляторы

Аккумуляторы на основе натрия (рисунок 15) работают за счет движения ионов натрия между положительным и отрицательным электродами [134, 146].

Обычно отрицательные электроды натриевых батарей изготавливаются из расплавленного натрия. Были разработаны различные производные натриевых батарей с использованием различных материалов в положительных электродах и электролитах. Среди всех разнообразных видов наиболее распространенными

элементами являются натрий-серные (NaS) и натрий-никель-хлоридные (NaNiCl<sub>2</sub>) батареи. Положительный электрод и электролит NaS-батареи изготовлены из расплавленной серы и твердой керамики на основе бета-оксида алюминия соответственно.

Основные показатели:

- 1) Удельная энергоемкость (Вт·ч/кг): 150–240;
- 2) Удельная мощность (Вт/кг): 150–230;
- 3) КПД цикла заряд/разряд (%): 75–90;
- 4) Цикличность (циклы): 2000–4500;
- 5) Срок службы (год): 10–20;
- 6) Саморазряд (потеря % заряда за сутки): 15–20.

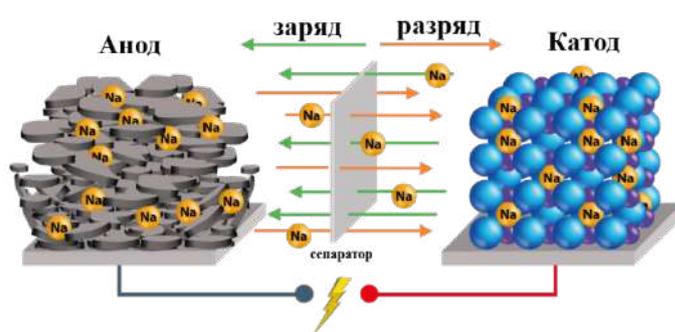


Рисунок 15 – Принципиальное устройство аккумулятора на основе натрия

#### 2.1.1.4 Литий-ионные аккумуляторы

Механизм работы литий-ионных аккумуляторов (рисунок 16) основан на движении ионов лития. Ионы лития перемещаются от положительного электрода к отрицательному в процессе зарядки и возвращаются обратно в процессе разрядки [136, 143].

В зависимости от химических материалов, используемых в электродах, были разработаны различные литий-ионные батареи: оксид лития-кобальта, оксид лития-марганца, оксид литий-никель-марганца-кобальта, оксид литий-никель-кобальт-алюминий, литий-фосфатные и литий-титанатные батареи.

Батареи оксид литий-никель-марганца-кобальта и оксид литий-никель-кобальт-алюминий – это типичные литий-ионные батареи на никелевой основе. По сравнению с литий-фосфатными аккумуляторами и оксид лития-марганца, батареи оксид литий-никель-марганца-кобальта и оксид литий-никель-кобальт-алюминий имеют более высокую удельную энергию.

Литий-титанатные батареи (LTO) – это один из видов Li-ion аккумуляторов. Они характеризуются высокой мощностью и довольно большого срока службы (по состоянию на 2021 год, срок эксплуатации LTO батарей составляет 25 лет и более) стали многообещающим типом литий-ионных аккумуляторов.

Литий-ионные аккумуляторы обладают высокой энергоёмкостью (110-243 Вт/кг), глубиной разряда до 70–80 %, при этом у них нет эффекта памяти. Ресурс и стоимость подобных систем очень многогранна и зависит от электрохимических свойств катода и анода, а также температурных условий.

Основные показатели:

- 1) Удельная энергоёмкость (Вт·ч/кг): 150–250;
- 2) Удельная мощность (Вт/кг): 500–2000;
- 3) КПД цикла заряд/разряд (%): 90–98;
- 4) Цикличность (циклы): 1000–35 000;
- 5) Срок службы (год): 8–25;
- 6) Саморазряд (потеря % заряда за сутки): 0.1–0.3.

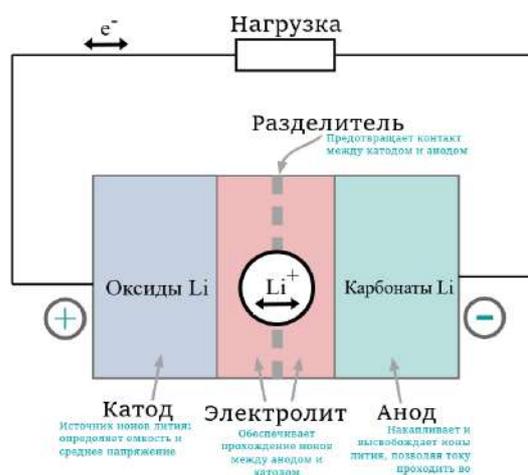


Рисунок 16 – Базовая структура литий-ионного аккумулятора

### 2.1.1.5 Проточные окислительно-восстановительные батареи

Проточная окислительно-восстановительная батарея (ПОВБ) (рисунок 17) представляет собой электрохимическое устройство хранения энергии, которое вырабатывает электрическую энергию с использованием двух активных материалов в жидкой форме [129, 133, 163]. Два активных материала обычно разделены ионообменной мембраной; реакции восстановления и окисления происходят на обеих сторонах ионообменной мембраны при перекачивании жидкости.

Полностью ванадиевые проточные окислительно-восстановительные батареи, проточные батареи из полисульфида/брома и проточные батареи цинка/брома являются наиболее распространенными и относительно дешевыми

проточными батареями. По сравнению с другими типами батарей, основными преимуществами ПОВБ являются их превосходная масштабируемость, длительный срок службы и независимый выбор размеров по энергии и мощности. Более того, поскольку электролиты ПОВБ хранятся в отдельных резервуарах, в ПОВБ практически отсутствует явление саморазряда. Благодаря особой конструкции, температуру ячейки можно легко регулировать с помощью регулирования расхода электролита. Однако неподходящая рабочая температура вызывает осаждение раствора, которое снижает производительность ПОВБ и ускоряет деградацию. Поэтому рабочая температура ПОВБ обычно ограничивается 15–35 °С. НЭ на основе ПОВБ сталкиваются с большими проблемами при их использовании в транспортных средствах из-за их низкой плотности энергии и мощности. Такой тип накопления энергии является перспективным, однако использование на транспортных средствах ввиду массогабаритных характеристик и большого влияния вибрации на безопасность эксплуатации недопустимо.

Основные показатели:

- 1) Удельная энергоемкость (Вт·ч/кг): 10–30;
- 2) Удельная мощность (Вт/кг): 166;
- 3) КПД цикла заряд/разряд (%): 75–80;
- 4) Цикличность (циклы): >16 000;
- 5) Срок службы (год): 10–20;
- 6) Саморазряд (потеря % заряда за сутки): 0–10.

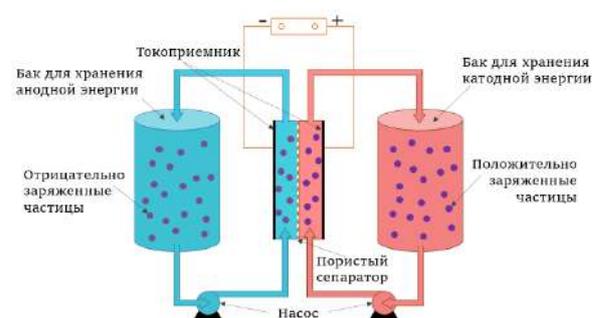


Рисунок 17 – Базовая структура проточного окислительно-восстановительного аккумулятора

## 2.1.2 Суперконденсаторы

Суперконденсатор содержит два электрода, изолированные ионопроводящим сепаратором. В отличие от обычных конденсаторов, электроды суперконденсатора пропитаны электролитом, и емкость формируется накопленным электростатическим зарядом на границе раздела между электродом и электролитом, который называется двойным электрическим слоем [7 – 14].

Когда суперконденсатор работает в фазе зарядки, электроны перемещаются от положительного электрода к отрицательному через цепь нагрузки – это заставляет катионы и анионы в электролите собираться на отрицательном и положительном электродах соответственно [87, 88].

В фазе разряда электроны переходят от отрицательного электрода к положительному через цепь нагрузки, и анионы и катионы снова начинают смешиваться [18].

Благодаря своей высокой мощности суперконденсаторы (рисунок 18) – это отличный выбор для использования в качестве вторичного источника энергии на борту электропоездов [26, 27, 135, 141, 142, 156, 158, 162]. Высокая мощность позволяет поезду сохранять большую часть рекуперативной энергии.

Также благодаря высокой цикличности [20] снижается стоимость этих устройств. Экспериментальные результаты применения суперконденсаторов на борту легкорельсового транспорта в Германии показывают экономию энергии до 30 %.

Эти устройства хранят энергию в двойном электрохимическом слое. По сравнению с батареями, их удельная мощность намного выше (500 – 10000 Вт/кг), но их энергоемкость значительно ниже (0,2 – 5 Вт·ч/кг). На транспорте они в основном используются для облегчения пуска ЭПС и подъема на холм, а также для накопления энергии при рекуперативном торможении. В гибридных системах суперконденсаторы используются вместе с другими устройствами хранения электроэнергии (например, литий-ионными) для обеспечения высокой удельной мощности и высокой удельной энергоемкости [65 – 67].

Как правило, электроды суперконденсаторов обычно изготавливаются из материалов на основе углерода, поскольку он легко доступен и имеет относительно низкую стоимость. Среди различных типов материалов на основе углерода, используемых в суперконденсаторах, наиболее широко используется активированный уголь [34 – 36].

Основные показатели:

- 1) Удельная энергоемкость (Вт·ч/кг): 5–15;
- 2) Удельная мощность (Вт/кг): 5000–10 000;
- 3) КПД цикла заряд/разряд (%): 90–97;
- 4) Цикличность (циклы): >500 000;
- 5) Срок службы (год): 10–30;
- 6) Саморазряд (потеря % заряда за сутки): 10–20.

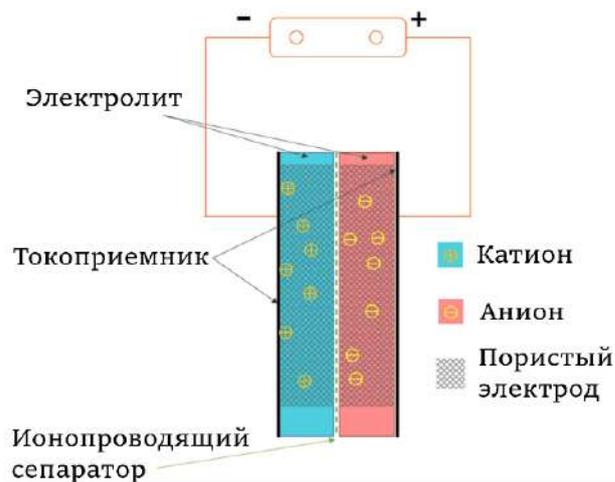


Рисунок 18 – Базовая структура суперконденсатора

### 2.1.3 Гибридные системы накопления энергии

Ключевая идея гибридной системы накопления энергии (ГСНЭ) заключается в том, что гибридные НЭ объединяют сильные стороны каждого НЭ [25, 144, 147, 159, 161, 164], и минимизируют слабые стороны для обеспечения лучшей производительности. На электрическом рельсовом транспорте ГСНЭ, как правило, представляет собой интеграцию по крайней мере двух типов устройств НЭ: один должен обладать высокой энергоемкостью, а другой высокой входной и выходной мощностью.

Существуют различные конфигурации ГСНЭ [74] для объединения двух НЭ в качестве одного источника питания. Обычно их можно разделить на три категории: пассивные параллельные (рисунок 19, а), каскадные (рисунок 19, б) и активные (рисунок 19, в).

В пассивной параллельной конфигурации два устройства НЭ подключаются без каких-либо силовых электронных устройств. Хотя эта архитектура проста и удобна в реализации, выходное напряжение изменяется на стадиях заряда и разряда.

Каскадная конфигурация более эффективна, чем пассивная параллельная, но более дорогостоящая в реализации и использует дополнительный преобразователь между НЭ. Таким образом, устройства НЭ не связаны между собой, благодаря

этому можно осуществить управление запасаемой энергией. Однако, в такой конфигурации управление энергией может осуществляться только в одном варианте. Также в каскадной системе присутствует проблема ограничения масштабируемости.

В свою очередь, активная параллельная конфигурация лучше каскадной, благодаря гибкости настройки: каждое устройство НЭ подключено к своему преобразователю мощности. Следовательно, каждое устройство НЭ может работать с максимальной эффективностью.

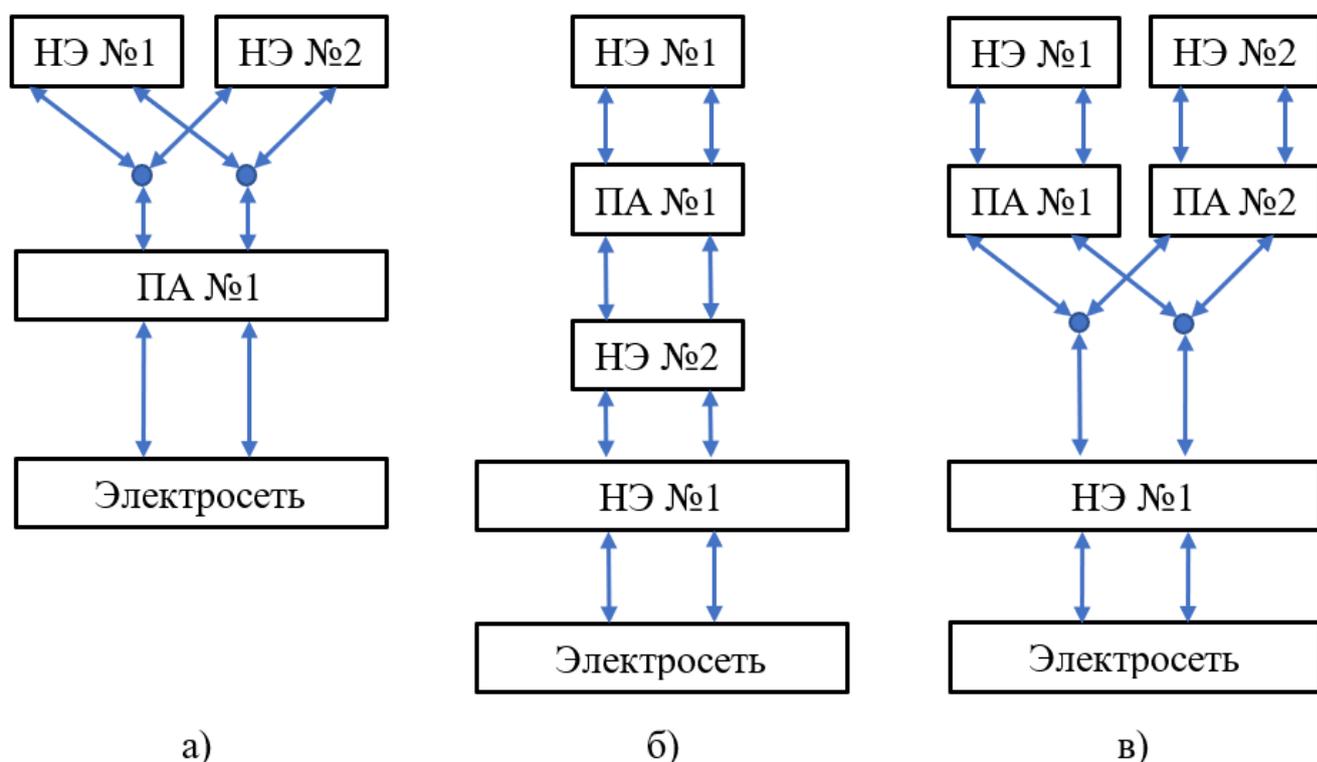


Рисунок 19 – Принципиальные схемы подключения гибридных накопителей (ПА–преобразовательный агрегат): пассивная параллельная (а), каскадная (б), активная параллельная (в)

## 2.2 Опыт использования бортовых систем накопления энергии

**Опыт применения никель-металлгидридных аккумуляторов на борту подвижного состава:**

Транспортная компания Alstom установила систему НЭ на базе никель-металлгидридных аккумуляторов на крышах трамваев Citadis в Ницце [153], Франция. Каждый блок системы НЭ содержал 408 никель-металлгидридных

элементов, соединенных последовательно, и номинальная емкость и номинальное напряжение каждой ячейки составляли 34 А\*ч и 1.2 В соответственно.

Трамвай, оснащенный этой системой НЭ, мог проехать участок 485 м. без контактной сети с максимальной скоростью 30 км/ч.

#### **Применение литий-ионного аккумулятора на борту подвижного состава:**

1) Hitachi в сотрудничестве с Восточно-Японской железнодорожной компанией JR East [83] в 2001 году работала над технологией для подвижного состава, который перемещается по неэлектрифицированным участкам. Они разработали гибридную систему привода, которая объединяет двигатель-генератор и литий-ионные батареи, и в 2007 году ввела ее в производство для KiHa E200 [138].

2) Hitachi также сотрудничает с железнодорожной компанией Кюсю (JR Kyushu) для разработки технологии, позволяющей курсировать по неэлектрифицированным линиям с использованием только аккумуляторов.

Этот проект привел к разработке поезда с батарейным питанием, который может работать на неэлектрифицированных участках пути за счет энергии, накопленной в батареях, которые заряжаются от воздушных линий переменного тока, и был коммерциализирован в серии ВЕС819 [145].

Hitachi смогла в короткие сроки снабдить эти железнодорожные вагоны высоконадежными системами аккумуляторных приводов, выбрав оптимальные батареи для каждого применения из литий-ионных аккумуляторов автомобильного промышленного назначения, разработанных или выпущенных Hitachi Group.

3) Трамваи Bombardier Flexity 2 с интегрированной литий-ионной системой НЭ ходят в китайском мегаполисе Нанкин с 2014 года. Около 90% маршрута осуществляется без контактной сети, а самый длинный участок без контактной сети достигает 1.38 км. Кроме того, было проведено испытание на работу без контактной сети на большом расстоянии. Результаты показали, что без контактной сети можно проехать 41.6 км при средней скорости 24.7 км/ч.

#### **Опыт применения суперконденсаторов на борту подвижного состава:**

1) В 2005 году Центральная японская железнодорожная компания установила две системы НЭ на базе суперконденсаторов под полом подвижного

состава серии 313. Каждый бортовой блок суперконденсатора имел энергоемкость 0.28 кВт·ч, и он состоял из 570 последовательно соединенных элементов. Для каждой ячейки суперконденсатора рабочее напряжение, емкость и вес составляли 2.5 В, 800 Ф и 190 г. соответственно. Результаты испытаний показали, что с установленной на борту одной системы НЭ на базе суперконденсаторов мощностью 0.28 кВт·ч, было накоплено и отдано обратно в сеть 8% рекуперативной энергии.

2) Система НЭ на базе суперконденсаторов была установлена на крыше трамвая RATP Citadis на линии RATP T3 в Париже. Эта система НЭ содержала 48 суперконденсаторов, емкость и номинальное напряжение каждого модуля составляли 130 Ф и 54 В соответственно. Результаты испытаний показали, что при использовании бортовой системы НЭ мощностью 1.6 кВт·ч можно успешно обеспечить работу без контактной сети длиной 300 м.

3) В Московском метрополитене так же проводились опыты по автономному ходу ЭПС на запасе энергии в бортовом накопителе. В 2005 году на вагоне-лаборатории [120] была создана экспериментальная установка накопителя энергии [91] (рисунки 20 – 21). В качестве аккумулирующего элемента использовалась батарея суперконденсаторов объемом порядка 2.5 м<sup>2</sup>. Показатели эксперимента [111]:

- 1) составность ЭПС: 5 вагонов;
- 2) масса: 160000 кг;
- 3) максимальная скорость: 8 км/ч;
- 4) максимальный ток: 530 А;
- 5) пройденный путь: 800 м.



Рисунок 20 – Вагон-лаборатория в депо «Выхино» с экспериментальной силовой установкой для автономного хода ЭПС [91]



Рисунок 21 – Силовая установка на базе суперконденсаторов [91]

### **Опыт применения гибридной системы НЭ на борту подвижного состава:**

В 2016 году 19 трамваев Avenio были введены в эксплуатацию в Education City, Доха, Катар. Сеть насчитывает 25 остановок на трассе длиной 11.5 км без прокладки воздушных линий. В трамваях использовалась система Sitras HES производства Siemens. Система Sitras HES – это гибридная система накопления энергии для рельсовых транспортных средств, сочетающая суперконденсаторы и литий-ионные батареи.

Суперконденсаторы можно было заряжать при каждой остановке током 1000 А, и для полного процесса зарядки требовалось всего 20 секунд.

### **2.3 Сравнительный анализ бортовых систем накопления энергии**

Анализ НЭ для бортового исполнения проведен по следующим критериям:

- удельная мощность;
- удельная энергоемкость;
- КПД цикла заряд/разряд;
- саморазряд;
- цикличность;
- срок службы.

Удельная энергоёмкость и удельная мощность используются для представления количества энергии, которые НЭ может удерживать на единицу массы, и скорости этого процесса. НЭ с высокой удельной энергоёмкостью может хранить большее количество энергии на единицу массы. А чем больше мощность НЭ, тем больше его токи заряда/разряда. Следовательно, устройства накопления энергии с высокой плотностью энергии и удельной мощностью подходят для использования, где вес и размер являются одними из основных критериев. Эта особенность более важна для бортовых систем, чем для стационарных. Например, вес транспортного средства увеличивается, если установлена бортовая система НЭ, и поэтому транспортному средству требуется больше мощности для обеспечения тяги. Неправильный выбор НЭ (например, низкая энергоёмкость) приводит к низкой энергоэффективности.

С другой стороны, размер бортового НЭ ограничен из-за требований по безопасности и экономических соображений. Суперконденсаторы имеют очень высокую удельную мощность, только они могут настолько быстро запасать и отдавать энергию (таблица 1). Маховики, никель-металлогидридные батареи, литий-ионные аккумуляторы также имеют относительно высокую удельную мощность и широко используются в системах энергоснабжения. Вообще говоря, НЭ на аккумуляторных батареях имеют более высокую плотность энергии, чем другие НЭ. В зависимости от используемых химических материалов литий-ионные аккумуляторы могут быть сконструированы либо как изделия с высокой плотностью энергии, либо как изделия с высокой удельной мощностью.

КПД цикла заряд/разряд представляет собой отношение выходной электрической энергии к входной электрической энергии в процентах в течение полного цикла зарядки/разрядки. Это ключевой показатель энергоэффективности. КПД цикла НЭ можно разделить на три уровня: очень высокий КПД (более 90%), высокий КПД (от 60% до 90%) и низкий КПД (менее 60%). Аккумуляторные батареи, суперконденсаторы, и литий-ионные аккумуляторы относятся к очень высокоэффективным НЭ. Практически все аккумуляторы (кроме литий-ионных) относятся к высокоэффективным НЭ.

Саморазряд – это отношение рассеиваемой энергии к общему количеству накопленной энергии за определенный период хранения этой же энергии. Это важный фактор при определении продолжительности хранения НЭ. Как правило, максимальная продолжительность хранения увеличивается с уменьшением скорости саморазряда. В зависимости от частоты эксплуатации железнодорожные системы предъявляют различные требования к длительности хранения накопленной энергии. Таблица 1 иллюстрирует суточную саморазрядку и типичную продолжительность хранения энергии железнодорожных систем НЭ. Видно, что маховики имеют самую высокую скорость саморазряда, что приводит к очень короткому сроку хранения энергии. Суперконденсаторы, батареи Na-S (Натриевые) также имеют высокую скорость саморазряда, с обычным сроком хранения менее одного дня [73]. Следует отметить, что поскольку некоторые НЭ, такие как батареи Na-S, работают при очень высоких или низких уровнях температуры, использование накопленной энергии для поддержания рабочей температуры является основной причиной их высокого саморазряда. Батареи (кроме батарей Na-S) обычно имеют более низкую скорость саморазряда и больше подходят для долговременного хранения энергии.

Срок службы НЭ обычно определяется двумя факторами, а именно цикличностью и процессами старения.

Срок службы является основным фактором, который следует учитывать в случаях, где замена НЭ затруднена или отсутствует. НЭ с коротким сроком службы увеличивает затраты из-за необходимости их частой замены.

Суперконденсаторы обладают высоким сроком службы. Но НЭ, которые запасают энергию в химической и электрохимической форме, такие как водородные топливные элементы и батареи, обычно имеют ограниченный срок службы. Кроме того, ухудшение химических свойств химических и электрохимических НЭ, также отрицательно влияет на их жизненный цикл.

В таблице 1 приведены основные характеристики различных бортовых систем НЭ.

Таблица 1 – Сравнение типов НЭ

Тип исполнения НЭ	Удельная энергоёмкость (Вт·ч/кг)	Удельная мощность (Вт/кг)	КПД цикла заряд/разряд (%)	Цикличность (Циклы)	Срок службы (Год)	Саморазряд (потеря % заряда за сутки)
Свинцово-кислотные аккумуляторы	30–50	75–300	80–90	500–2000	5–15	0.05–0.3
Никель-кадмиевые аккумуляторы	50–75	150–300	60–83	1500–3000	15–20	0.2–0.6
Натриевые аккумуляторы	150–240	150–230	75–90	2000–4500	10–20	15–20
Литий-ионные аккумуляторы	150–250	500–2000	90–98	1000–20 000	8–25	0.1–0.3
Проточные окислительно-восстановительные аккумуляторы	10–30	166	75–80	>16 000	10–20	0–10
Суперконденсаторы компании «ТЭЭМП»	10–15	5000 – 10 000	>93	>1 000 000	10–30	<8
Суперконденсаторы компании «ЭКОНД»	8–12	2349– 10 000	>91	>1 000 000	10–20	<10
Суперконденсаторы компании «ЭЛТОН (ТехноКор)»	10–12	1058.8–10 000	>92	>1 000 000	10–20	<10

Из таблицы сравнения систем НЭ видно, 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.

### **3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ РАБОТЫ ЭПС НА МОСКОВСКОМ МЕТРОПОЛИТЕНЕ**

#### **3.1 Анализ потенциала использования энергии рекуперации**

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 [55].

##### **3.1.1 Электроснабжение ЭПС**

В метрополитене межпоездной обмен является одной из самых важных мер по энергосбережению [49]. Источниками питания для ЭПС Московского метрополитена служат тяговые (ТП) и совмещенные тягово-понижительные (СТП) подстанции постоянного тока, где на шинах номинальное напряжение составляет 825 В. Электроснабжение подстанций Московского метрополитена осуществляется от сети внешнего электроснабжения (Мосэнерго), предоставляемого на каждую подстанцию ветки по вводам, приходящим на две взаиморезервирующие секции. Оборудование тяговых подстанций (рисунок 22) преобразует трехфазный переменный ток, полученный с вводов внешней энергосети напряжением 6, 10 и 20 кВ, в однофазный постоянный ток напряжением 825 В для питания электроподвижного состава [17].

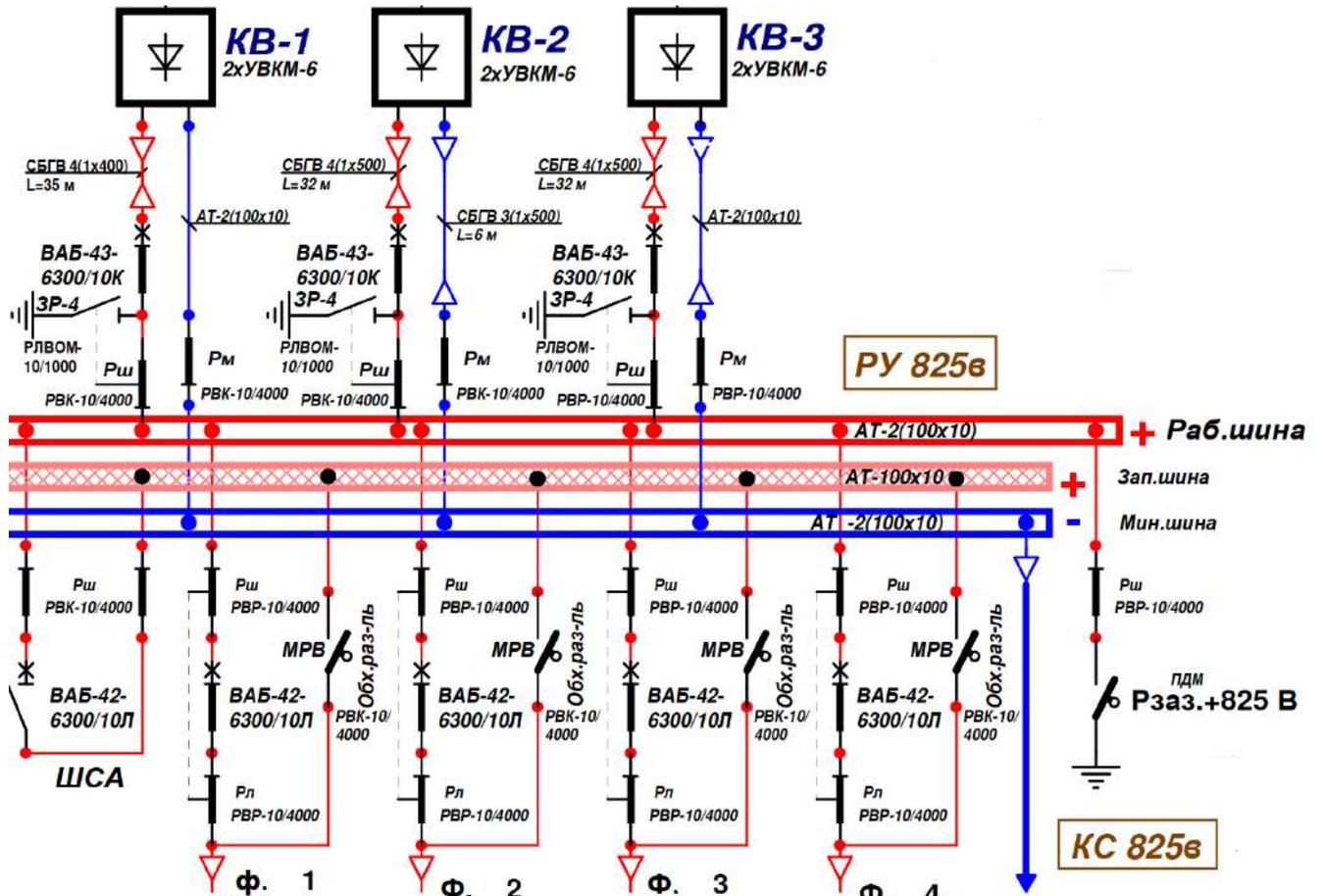


Рисунок 22 – Фрагмент однолинейной схемы ТП Таганско-Краснопресненской линии

Подстанции Московского метрополитена располагаются на расстоянии, в среднем, 1.7 километров друг от друга, а питающие линии в непосредственной близости от границы фидерной зоны для достижения минимальных электрических потерь и более удобного обслуживания.

С питающих шин подстанции постоянного тока электроэнергия передается в тяговую сеть, состоящую из стального контактного рельса бокового расположения по системе «третий рельс» (рисунок 23).

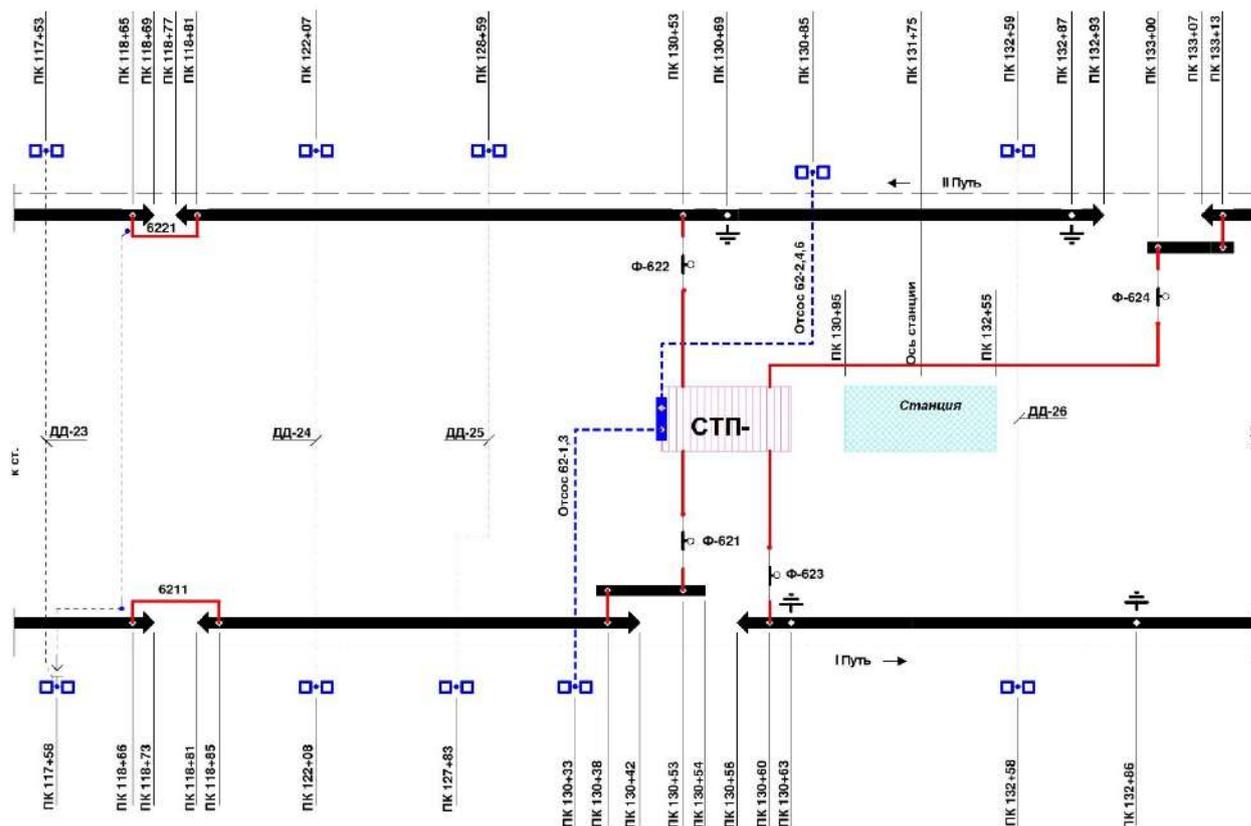


Рисунок 23 – Схема питания электроэнергией контактного рельса

Токоcъём осуществляется токоприёмником, размещенным под кузовом моторного вагона на специальных тележках. Контактный рельс для метро изготавливают из мягкой стали с высокой электропроводимостью. По форме он имеет мало отличий от ходового рельса. Удельное сопротивление не более  $0.120 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м}$  при температуре  $+15^\circ \text{ C}$ , или  $0.0182 \text{ Ом}/\text{км}$ . Сопротивление пары ходовых рельсов Р-50 одного пути равняется  $0.017 \text{ Ом}/\text{км}$ , для Р-65 –  $0.015 \text{ Ом}/\text{км}$ .

Также устройствами положительной полярности тяговой сети являются питающие кабельные линии  $+825 \text{ В}$  (фидеров), которые соединяют контактный рельс с шинами положительной полярности, расположенными на подстанции, и кабельные перемычки, соединяющие между собой участки контактных рельсов в местах его конструктивных разрывов. Подключение фидеров к контактному рельсу осуществляется через разъединитель с электроприводом (рисунок 24).

К устройствам отрицательной полярности относятся отсасывающие кабели, которые соединяют ходовые рельсы с минусовыми шинами тяговых подстанций, и кабельные перемычки, соединяющие ходовые рельсы обоих главных путей,

которые нужны для уменьшения сопротивления отсасывающей сети. Присоединяются кабели к ходовым рельсам через путевые дроссели, являющиеся секционирующими элементами устройств СЦБ (рисунок 25).



Рисунок 24 – Шкаф с  
разъединителем



Рисунок 25 – Присоединение  
отсасывающего кабеля через  
дроссель-трансформатор

Контактный рельс главных путей разделен по всей длине на отдельные секции. Деление выполняется у каждой тяговой подстанции так, что образуются четыре секции. Каждая зона запитывается от двух соседних тяговых подстанций по параллельно работающим линиям. Таким образом, тяговые подстанции работают на тяговую сеть параллельно.

Друг от друга секции контактного рельса отделяют промежутками 14 м. Каждый вагон с обеих сторон оборудован токоприемниками на расстоянии 12.5 м друг от друга электрически связанных между собой. Это делается для того, чтобы разделенные между собой секции не замыкались и не шла передача напряжения с одной секции на другую. Именно для этого был спроектирован, так называемый, неперекрываемый разрыв (при движении поезда длина между секциями должна быть больше, чем расстояние между токоприемниками).

По контактному рельсу, фидерам и шинам постоянного тока часть энергии рекуперации распределяется на межпоездной обмен.

В последствии все элементы СТП и тоннельные устройства будут учтены в имитационной модели работы СТЭ с БНЭ на ЭПС.

### 3.1.2 Силовая схема ЭПС

В режиме тяги ЭПС (рисунок 26, [127]) принимает электроэнергию от контактной сети через токоприемник (коллекторная щетка), который находится на тележке моторного вагона, затем ток проходит через сетевой фильтр  $L_{\phi}$  (линейный фильтр), предназначенный для защиты тягового оборудования от бросков тока и сглаживания высших гармоник. Далее через систему распределения энергии ток поступает на линейный контактор (ЛК), служащий для: подачи питания 750 В от токоприемников на силовой инвертор в штатном режиме, отключения силовой схемы от контактной сети в аварийных режимах; отключения силовой схемы от контактной сети при реостатном электрическом торможении без рекуперации энергии в тяговую сеть; для отключения силового инвертора от контактной сети при снижении напряжения в сети до минимального уровня. А после ЛК энергия поступает к силовому инвертору напряжения МСИ (модуль силового инвертора) на силовых IGBT транзисторах, который преобразует постоянный однофазный ток в переменный трехфазный ток. Преобразованный ток в свою очередь питает четыре асинхронных тяговых электродвигателя вагона М1...4, которые создают тяговое усилие (передают крутящий момент к колесным парам).

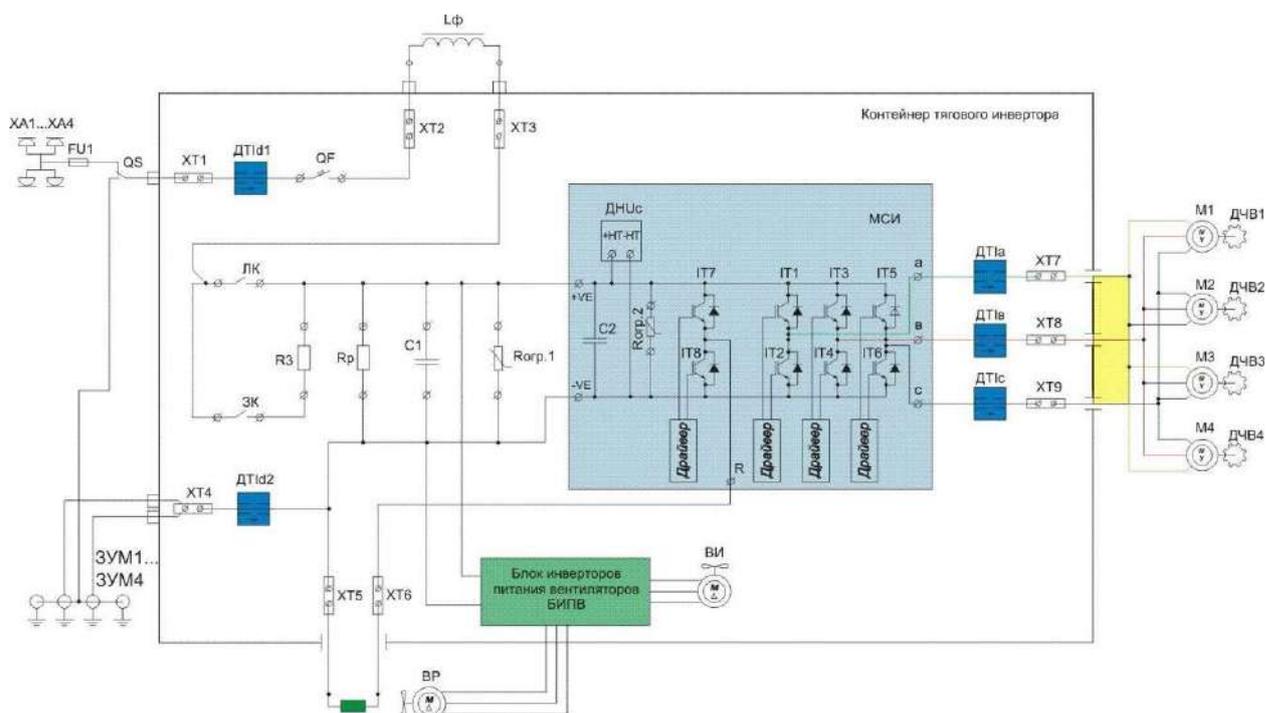


Рисунок 26 – Схема силового электрооборудования современного моторного вагона Московского метрополитена

В режиме рекуперативного электрического торможения двигатели ЭПС М1...М4 начинают работать в генераторном режиме и вырабатывают электрическую энергию. Ток от двигателя поступает в силовой инвертор МСИ, который преобразовывает его в постоянный с напряжением выше напряжения сети. Завышение напряжения необходимо для обеспечения возвращения энергии в тяговую сеть. Далее энергия имеет два пути:

- 1) возвращается в сеть, проходя через ЛК и  $L_{\phi}$ .
- 2) поступает на тормозной резистор, предназначенный для рассеивания электрической энергии торможения в виде тепла. Это происходит, когда тяговая сеть не может принять всю энергию (в двух случаях: когда нет потребителей и, когда напряжение в точке, где находится состав, выше, чем может поднять преобразователь (на данный момент эта проблема встречается редко). Тормозной резистор подвешивается к раме вагона и имеет собственную систему охлаждения в виде вентилятора (ВР).

### 3.2 Эксперимент автономного хода ЭПС с БНЭ

В процессе эксперимента на Московском заводе (рисунок 27) удалось разогнать 5-вагонный состав (из вагонов типа 81-717/714) массой  $m_1 = 180$  т. до 8 км/ч [113, 114, 116]. При этом за  $T = 1$  минуту 30 секунд поезд прошел  $L_1 = 0.8$  км и потребил энергию, запасенную суперконденсаторами, равную:

$$E_1 = \frac{\int_0^T U \cdot I \cdot dt}{3600} = 0.25 \text{ кВт}\cdot\text{ч} \quad (6)$$

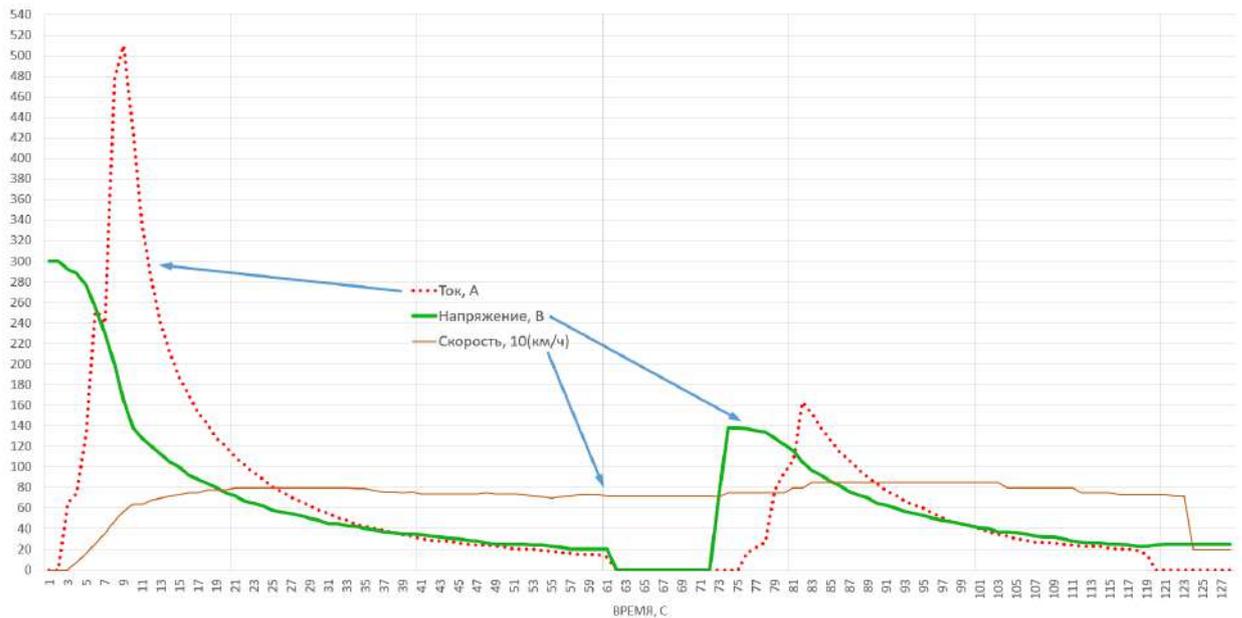


Рисунок 27 – Результаты, полученные в ходе эксперимента на Московском заводе

Коллекторные двигатели данного состава подключены последовательно-параллельно (сериес-параллельное соединение) (рисунок 28, [111]). Их напряжение составляет 375 В. Питание двигателей может осуществляться, как от контактной сети, так и от батареи. ОВ1 и ОВ3 служат, как обмотки возбуждения первого и третьего двигателя. Реостатные контроллеры  $R_1$  и  $R_2$  служат для регулировки напряжения двигателей. Но по такой схеме подключения сама батарея не может заряжаться, так как стоит диод, который не пропускает ток рекуперации [120 – 122].

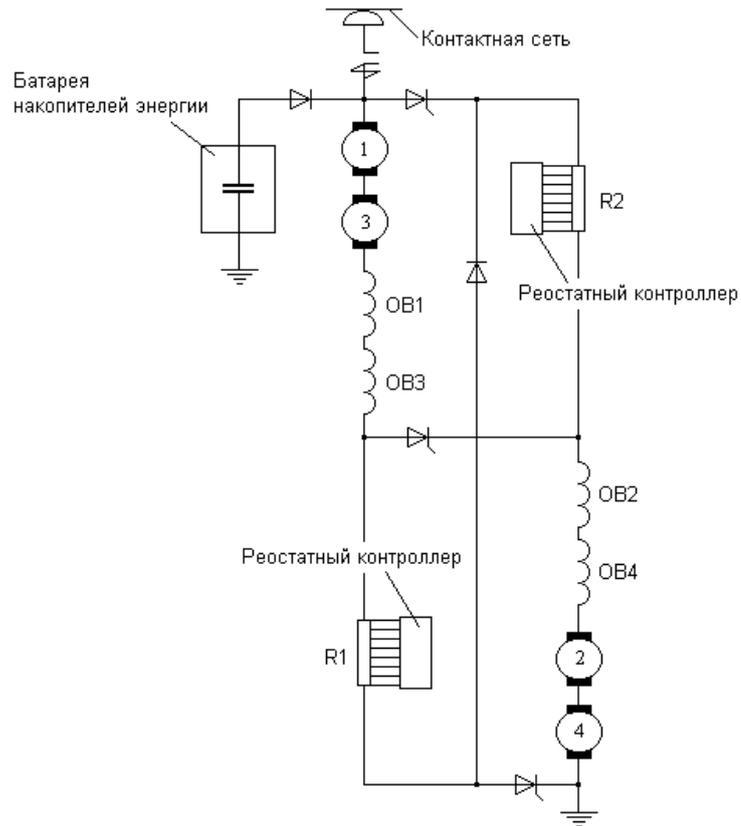


Рисунок 28 – Принципиальная схема питания ЭПС с батареей на базе суперконденсаторов

По второй схеме включения суперконденсаторных батарей (рисунок 29, [112]) в цепь питания коллекторных двигателей происходит управление напряжением пи помощи самих батарей. В случае, когда напряжение проседает, тиристоры на выходе батареи открываются и происходит подпитка двигателей при помощи накопителя энергии.

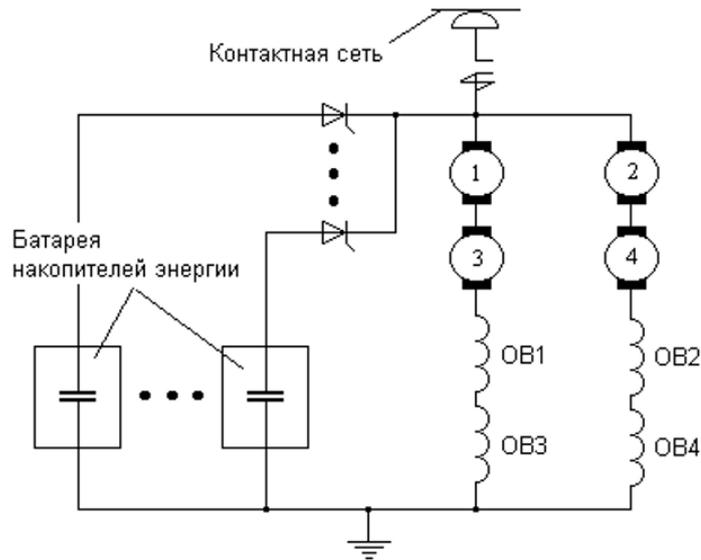


Рисунок 29 – Регулирование тока тяговых электродвигателей (ТЭД) при помощи переключения групп батареи накопителей энергии

Благодаря полученным данным в ходе реального масштабного эксперимента на Московском заводе можем спрогнозировать потребление энергии, требуемое для самостоятельного хода современных ЭПС.

Итак, для автономного (аварийного) хода 8-ми вагонного состава 81-765/766/767 «Москва-2019»  $m_2 = 475.1$  на расстояние  $L_2 = 2$  км, потребуется энергия равная:

$$E_2 = \frac{E_1 \cdot m_2}{L_1} \cdot L_2 = 1.65 \text{ кВт}\cdot\text{ч.} \quad (7)$$

Безусловно, современные мощные суперконденсаторные установки могут запастись такое количество энергии, что делает возможным применение данных накопителей энергии на современных ЭПС.

### 3.3 Анализ показателей работы ЭПС на Таганско-Краснопресненской линии Московского метрополитена

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

ЭПС, состоящий из вагонов метрополитена серии 81-765, 81-766, 81-767, который участвовал в практическом исследовании, обладал следующей основной конфигурацией формирования из восьми вагонов: МГ–МП–НП–МП–МП–НП–МП–МГ, где: МГ - вагон головной моторный с кабиной управления модели 81-765; МП - вагон промежуточный моторный модели 81-766; НП - вагон промежуточный (прицепной) немоторный модели 81-767.

При формировании вагоны модели 81-765 располагаются в голове и конце состава. Промежуточные вагоны и прицепные немоторные располагаются между головными вагонами. Эксплуатация указанных вагонов в составе с вагонами других моделей не допускается.

Предусмотренные в конструкции вагона модели 81-765 органы управления и системы безопасности движения обеспечивают управление движением состава из кабины головного вагона одним машинистом.

Основные технические характеристики ЭПС «Москва» приведены на рисунках 30 – 31 и таблицах 2 – 5 [28, 29]:

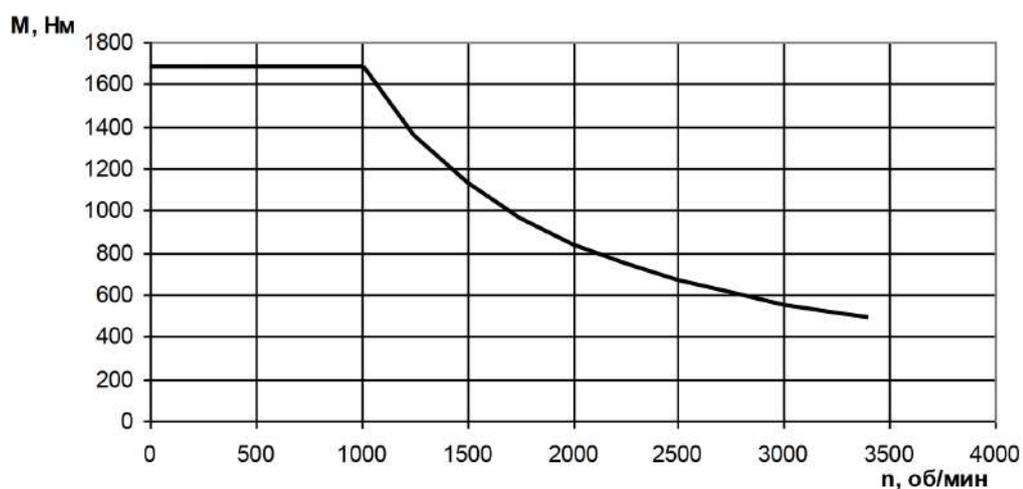


Рисунок 30 – Тяговая характеристика электродвигателя

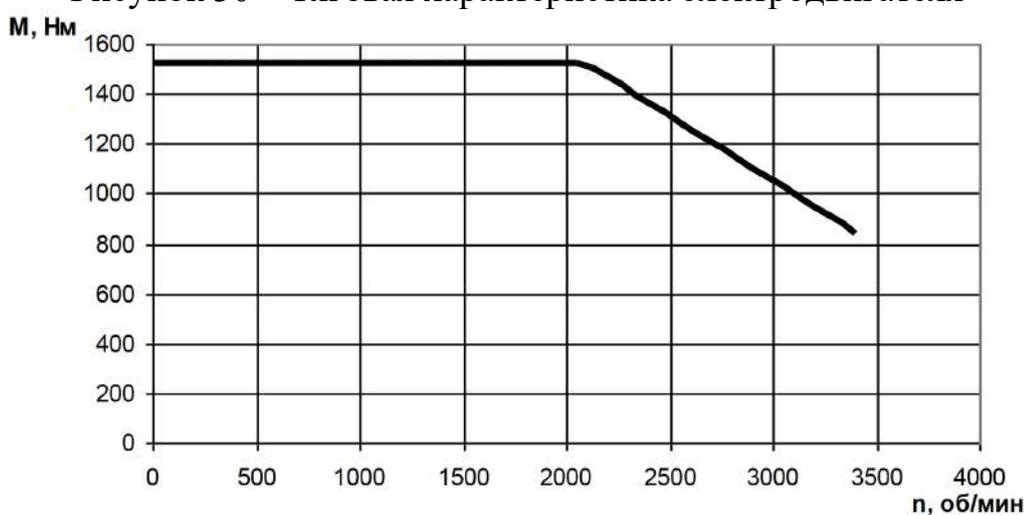


Рисунок 31 – Тормозная характеристика электродвигателя [28]

Таблица 2 – Технические характеристики ЭПС типа «Москва» вагоны 81-765, 81-766 и 81-767

Наименование параметра	Значение параметра		
	81-765	81-766	81-767
<b>Масса, геометрические параметры, вместимость:</b>			
Масса вагона (тара), т, не более	38	36	29
Длина вагона по торцам головок автосцепок, мм, не более	20120	19140	19140
Ширина вагона, мм	2684	2684	2684
Высота порожнего вагона от уровня головки рельса, мм, не более	3670	3670	3670
База вагона, мм	12600	12600	12600
Высота от уровня головки рельса до нижней плоскости рамы вагона на отрегулированных вагонах, мм	972±15	972±15	972±15
Максимальная вместимость из расчета 10 чел./м <sup>2</sup> свободной площади пола и занятости всех мест для сидения, чел.	315	329	329
Вместимость из расчета 8 чел./м <sup>2</sup> свободной площади пола с учетом сидящих пассажиров, пассажиров	259	272	272

## Продолжение таблицы 2

Номинальная вместимость из расчета 5 чел./м <sup>2</sup> свободной площади пола с учетом сидящих пассажиров, пассажиров	176	187	187
Количество мест для сидения, шт.	37	44	44
Количество мест для инвалидной коляски, шт.	1	-	-
Максимальная пассажирская нагрузка вагона, т	22.05	23.03	23.03
Максимальная пассажирская нагрузка состава, т	182.28		
Максимальная вместимость состава, пассажиров	2604		
Номинальная вместимость состава, пассажиров	1474		
Количество сидячих мест в составе	338		
Статическая нагрузка от колесной пары на рельсы, т с, не более	15	15	15
Количество дверей в салоне, шт.	8	8	8
<b>Динамические характеристики:</b>			
Скорость конструкционная, км/ч	90		
Максимальное ускорение, м/с <sup>2</sup>	1.3		
Среднее замедление со скорости 80 км/ч при использовании электрического торможения не более, м/с <sup>2</sup>	1.1		
Время разгона состава с максимальной загрузкой на горизонтальном участке пути при номинальном значении напряжения контактной сети, с, не более:			
до скорости 30 км/ч	10		
до скорости 60 км/ч	20		
до скорости 80 км/ч	35		
Скорость изменения ускорения или замедления движения состава при автоматическом управлении (кроме аварийных режимов и экстренного торможения) не должна превышать, м/с <sup>3</sup>	0.6		
Длина тормозного пути при торможении со скорости 90 км/ч на прямом горизонтальном участке пути (площадка, 0 ‰), м, не более:			
- при служебном электрическом торможении	330		
- при торможении по командам APC	388		
- при экстренном торможении	295		
Показатель плавности хода, не более	3.25		
<b>Производительность и экономичность:</b>			
Удельная мощность двигателей при максимальной пассажирской нагрузке, кВт/т	8.96		
Максимальный потребляемый ток, А, не более	6500		
Суммарная часовая мощность тяговых двигателей, кВт, не менее	4080		
Удельный расход электроэнергии на тягу при номинальной нагрузке состава на перегоне 1700 м, профиле пути ±3‰ и технической скорости движения 48 км/ч, без учета расхода на собственные нужды и возврата электроэнергии в сеть при рекуперации, Вт*ч/т км, не более	57		

Таблица 3 – Основные технические характеристики моторных тележек вагонов 81-765/766

Наименование	Единица измерения	Значение, тип
Масса тележки:	кг	7500±3 %
Масса тягового двигателя, не более	кг	790
Масса колесной пары	кг	1700
Габаритные размеры:		
ширина	мм	2620
длина	мм	4204* (3474**)
высота	мм	1021
База тележки	мм	2150
Мощность тягового двигателя	кВт	170
Количество тяговых двигателей	шт.	2
Рессорное подвешивание	—	Двухступенчатое, с пружинным буксовым и пневматическим центральным подвешиванием
Соединение колесных пар с рамой	—	Букса с роликовыми подшипниками
Соединение тележки с кузовом	—	Горизонтальная тяга
Подвеска тягового привода	—	Опорно-рамное подвешивание тягового двигателя и опорно-осевое подвешивание редуктора
Передаточное отношение редуктора	—	5.75 или 5.74 (ZF)

В состав тягового электрооборудования вагонов 81-765 и 81-766 входят комплекты асинхронного тягового привода (КАТП), и отдельные силовые блоки.

Таблица 4 – Состав электрооборудования тягового привода КАТП-3

Наименование оборудования	Обозначение	Комплект 7650.40.00.001 (шт.)
Двигатель асинхронный	HITACHI HS35533-01RB или TME 43-23-4, или ТАДВМ280-4У2	4
Контейнер тягового инвертора	КТИ-3 У2	1
Тормозной резистор R=0,58 Ом±5%	DT50923	1
Дроссель сетевого фильтра	РСФ-1000-0,008 У2	1
Датчик частоты вращения	DSD 1820.17 M2HV	4

Контейнер тягового инвертора КТИ-3 У2 предназначен для размещения оборудования (аппаратуры) управления тяговым приводом и питания регулируемым напряжением и частотой четырех асинхронных тяговых двигателей вагона в режиме тяги и управления тяговыми двигателями в режиме следящего рекуперативного и реостатного электрического торможения.

Таблица 5 – Технические характеристики КТИ-3 У2

Наименование характеристики	Значение параметра
Напряжение питания силовой цепи, В:	
- максимальное	975
- номинальное	750
- минимальное	550
Выходное напряжение длительное (среднеквадратичное значение при номинальном входном напряжении 750 В), В	от 0 до 530
Частота коммутации ШИМ инвертора, Гц	2400
Частота коммутации ШИМ тормозного чоппера, Гц	1200
Частота выходного 3-фазного напряжения питания, Гц	от 1 до 120
Номинальная мощность, кВт	1000
Номинальное напряжение цепей управления, В	80
Диапазон напряжения цепей управления, В	от 52 до 84
Потребляемая мощность цепей управления, Вт	200
Номинальные выходные параметры блока питания вентиляторов:	3 фазы, 220 В 50 Гц, два канала мощностью 2,2 кВт
Масса, кг, не более	1000
Габаритные размеры, мм	2900x2000x700

Итак, второго февраля 2022 г. в был запущен электроподвижной состав «Москва-2019» (рисунок 32) на Таганско-Краснопресненской линии Московского метрополитена с вышеупомянутыми характеристиками в штатном режиме с регистратором параметров движения поезда (РПДП) и состоянием 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. Информация из бортовых самописцев повседневно используется для контроля действий машиниста и работоспособности ЭПС после каждого выезда из депо в тоннель и обратно, а в особых случаях — при расследовании аварий. Сама система объективного контроля состоит из большой группы датчиков (собственных и внешних), блоков обработки информации и отдельного регистрирующего устройства (накопителя информации).



Рисунок 32 – Электроподвижной состав «Москва», готовящийся к эксперименту в электродепо «Выхино»

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 33 – 35, таблица 6), среди которых следующие основные характеристики его движения, требующиеся для оценки электро-энергетических потоков, а именно: зависимости тока на токоприемнике, напряжения в контактной сети, скорости, силы тяги и торможения от времени.

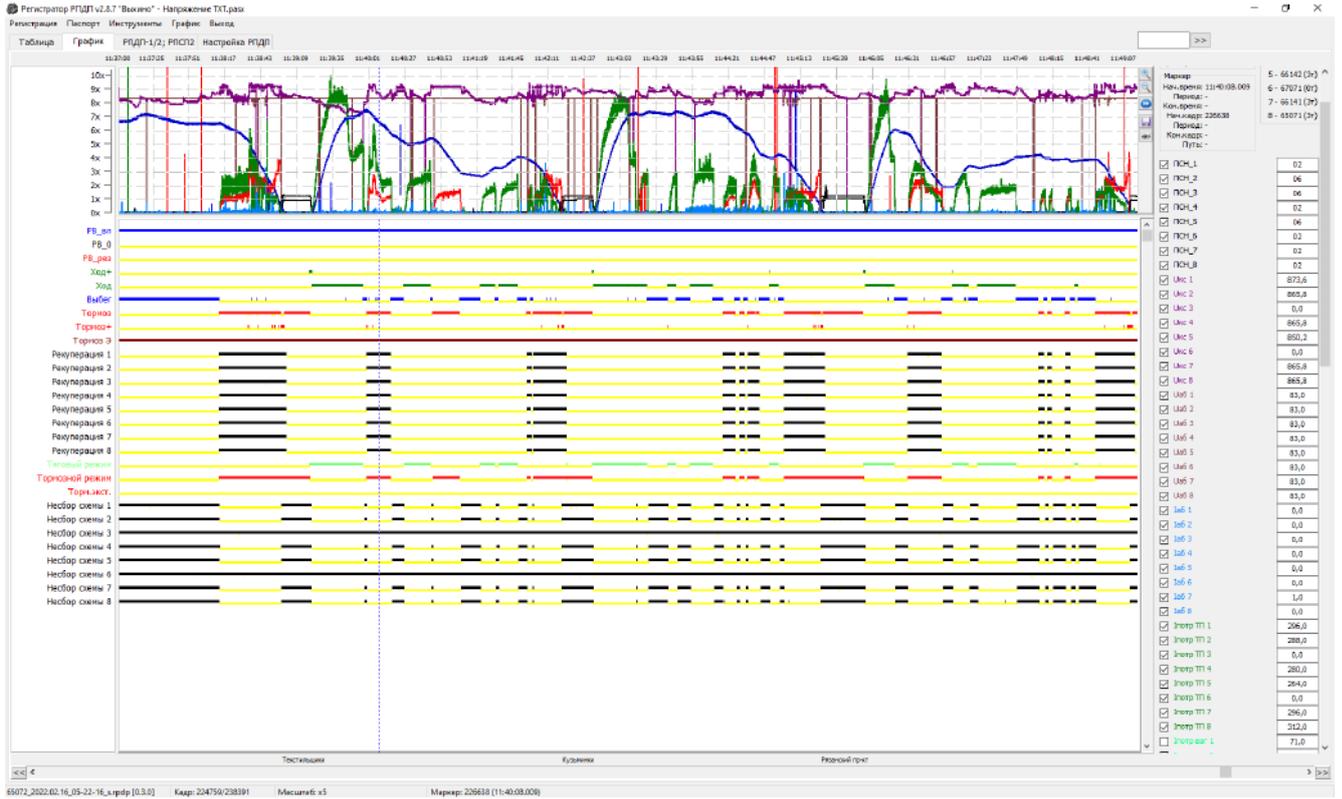


Рисунок 33 – Фрагмент оригинальных показателей движения поезда в программе РПДП

Таблица 6 – Фрагмент оригинальных показателей движения поезда

Время	Vфа кт (км/ч )	Uкс (Вольт (1000В )	Iтп (Ампе р (1024А )	Uаб (Вольт(А Б))	Fтяг и (кНью тон )	Fтор м (кНью тон )	РВ впер ед (Бит _5)	Ход + (Бит _3 )	Ход (Бит _1)	Вы бег (Бит _0 )	Тор моз (Бит _2 )	Тор моз + (Бит _4)
11:59:09.038	0	865.8	24	83	30.4	0	1	0	1	0	0	0
11:59:09.043	0.8	865.8	32	83	33.5	0	1	0	1	0	0	0
11:59:09.003	1				35.1	0	1	0	1	0	0	0
11:59:09.008	1.3	865.8	40	83	35.9	0	1	0	1	0	0	0
11:59:09.013	1.6				37.4	0	1	0	1	0	0	0
11:59:09.018	1.8	865.8	56	83	39	0	1	0	1	0	0	0
11:59:09.023	2.1				40.6	0	1	0	1	0	0	0
11:59:09.028	2.4	865.8	64	83	42.1	0	1	0	1	0	0	0
11:59:10.033	2.8				43.7	0	1	0	1	0	0	0
11:59:10.038	3	865.8	80	83	45.2	0	1	0	1	0	0	0

Продолжение таблицы 6

11:59:10.043	3.3				46.8	0	1	0	1	0	0	0
11:59:10.048	3.6	858	104	83	48.4	0	1	0	1	0	0	0
11:59:10.003	4				49.9	0	1	0	1	0	0	0
11:59:10.008	4.4				51.5	0	1	0	1	0	0	0
11:59:10.013	4.7				53	0	1	0	1	0	0	0
11:59:10.018	5.1	858	136	83	54.6	0	1	0	1	0	0	0
11:59:10.023	5.5				56.2	0	1	0	1	0	0	0
11:59:10.028	5.9	850.2	160	83	57.7	0	1	0	1	0	0	0
11:59:11.033	6.3				59.3	0	1	0	1	0	0	0
11:59:11.038	6.7	850.2	200	83	60.8	0	1	0	1	0	0	0
11:59:11.043	7.1				62.4	0	1	0	1	0	0	0
11:59:11.048	7.4	850.2	232	83	62.4	0	1	0	1	0	0	0
11:59:11.003	7.8				62.4	0	1	0	1	0	0	0
11:59:11.008	8.2	850.2	256	83	62.4	0	1	0	1	0	0	0
11:59:11.013	8.7				62.4	0	1	0	1	0	0	0
11:59:11.018	9.1	850.2	280	83	62.4	0	1	0	1	0	0	0
11:59:11.023	9.6				72.5	0	1	0	1	0	0	0
11:59:11.028	10	850.2	288	83	69.4	0	1	0	1	0	0	0
11:59:12.033	10.5				69.4	0	1	0	1	0	0	0
11:59:12.038	10.9	842.4	312	83	69.4	0	1	0	1	0	0	0
11:59:12.043	11.3				70.2	0	1	0	1	0	0	0
11:59:12.048	11.6	842.4	328	83	71	0	1	0	1	0	0	0
11:59:12.003	11.9				70.2	0	1	0	1	0	0	0
11:59:12.008	12.5	842.4	352	83	71.8	0	1	0	1	0	0	0
11:59:12.013	12.9				70.2	0	1	0	1	0	0	0
11:59:12.018	13.5	842.4	368	83	70.2		1	0	1	0	0	0
11:59:12.023	14				68.6	0	1	0	1	0	0	0

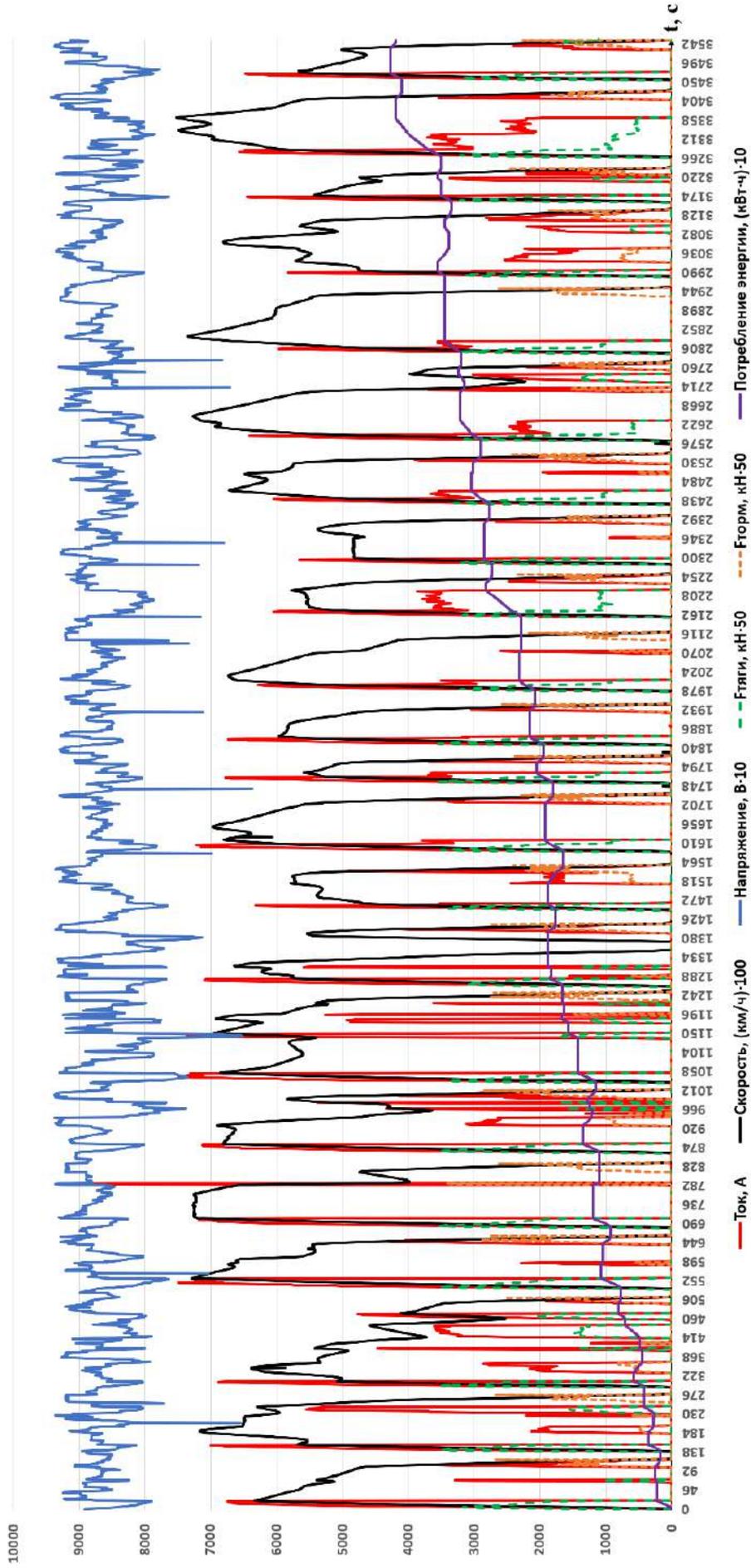


Рисунок 34 – Результаты замеров (обработанные) показателей работы ЭПС по второму пути Таганско-Краснопресненской линии Московского метрополитена от станции м. «Котельники» до ст. м. «Планерная»

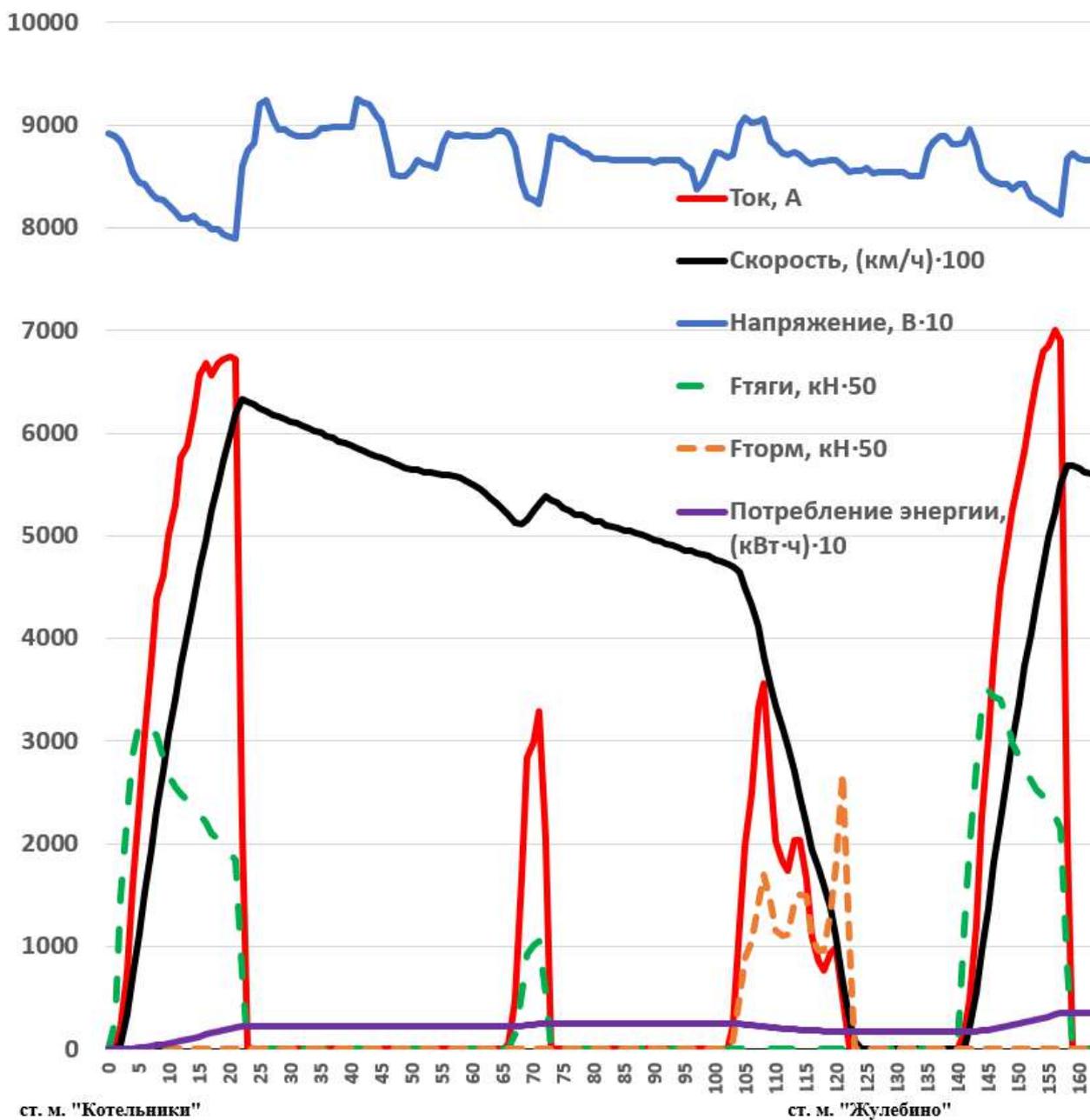


Рисунок 35 – Фрагмент результатов замеров показателей работы ЭПС на Таганско-Краснопресненской линии Московского метрополитена от станции м. «Котельники» до ст. м. «Жулебино»

В момент, когда ЭПС находится в режиме торможения двигателем, происходит выработка электроэнергии [52], которая частично может быть запасена в бортовых накопителях. Стоит отметить, что счетчик электрических параметров установлен в блок распределительного устройства (БРУ) каждого вагона (рисунок 26). 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 36, таблица 7).

Таблица 7 – Энергия, вырабатываемая двигателями ЭПС при торможении (МПО).

№ п/п	Выработанная электроэнергия, кВт · ч	№ п/п	Выработанная электроэнергия, кВт · ч
1	7.857	22	7.937
2	7.859	23	2.488
3	1.072	24	0.000
4	0.000	25	8.398
5	12.506	26	0.615
6	0.725	27	8.064
7	3.931	28	2.555
8	3.177	29	12.492
9	12.278	30	5.749
10	9.907	31	4.718
11	0.003	32	0.000
12	13.685	33	16.953
13	0.541	34	10.396
14	12.487	35	5.407
15	3.670	36	9.495
16	0.025	37	8.596
17	1.003		
18	12.131		
19	23.885		
20	12.285		
21	9.306		

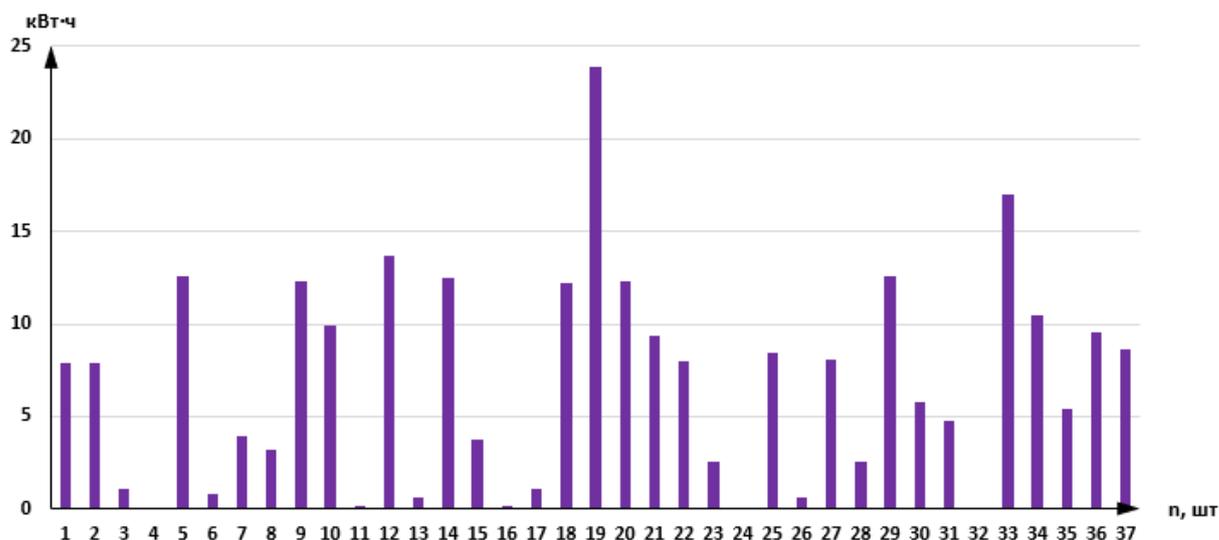


Рисунок 36 – Энергия, вырабатываемая двигателями ЭПС при торможении на ТКЛ

Среднее значение выработанной энергии определяется по формуле:

$$\overline{E_{\text{МПО}}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n E_i = \frac{1}{n} (E_1 + \dots + E_n) \quad (8)$$

где:

$n$  – количество выбросов электроэнергии поездом при рекуперативном торможении;

$E$  – численное значение выработанной электроэнергии.

Далее необходимо посчитать всю энергию, выработанную ЭПС при движении от начала участка до его конца по формуле:

$$E_{\text{МПО}} = \sum_{i=1}^n E_i = (E_1 + \dots + E_n) \quad (9)$$

Получившиеся значения выработанной электроэнергии  $\overline{E_{\text{МПО}}} = 6.816$  и  $E_{\text{МПО}} = 252.197$  кВт·ч, при условии того, что оно было получено лишь для одного поезда, и лишь в те моменты, когда другие электроподвижные составы могли принять эту энергию. Следует отметить, что ту часть энергии, которая сжигается в тормозных резисторах и которая также может быть запасена в бортовых накопителях, при проведении эксперимента зафиксировать не представилось возможным. Поэтому данная величина определялась при помощи имитационного

моделирования. Данный эксперимент однозначно доказывает то, что внедрение накопителей на борт ЭПС действительно необходимо с энергоэффективной точки зрения.

### **3.4 Анализ показателей работы ЭПС на Кольцевой линии Московского метрополитена**

Для накопления опыта и анализа вырабатываемой электроэнергии [57 – 64] ЭПС потребовалось провести дополнительное практическое исследование, а именно: проанализировать работу электроподвижного состава, курсирующего на Кольцевой ветке Московского метрополитена.

Кольцевая линия (КЛ) была дополнительно выбрана не случайно, а по следующим важным критериям:

- особенность системы тягового электроснабжения, которая электрически замкнута в кольцо;
- новейший электроподвижной состав 81-775/776/777 «Москва-2020», состоящий из 7-ми вагонов с двумя немоторными вагонами следующей конфигурации: МГ-НП-МП-МП-МП-НП-МГ;
- рассматриваемая линия считается одной из самых пассажиронапряженных, так как абсолютно все станции являются пересадочными на другие ветки Московского метрополитена. То есть Кольцевая линия связывает между собой большинство линий Московского метрополитена;
- на линии в часы пик применяется самый минимальный интервал движения поездов, который равняется девяносто секундам.

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» (рисунок 37). Который по силовой электрической части практически аналогичен предыдущей серии вагонов 81-765/766/767 «Москва», но со своими отличиями,



Продолжение таблицы 8

промежуточного моторного вагона	т	59.66	
промежуточного немоторного вагона	т	57.79	
Количество моторных осей вагона	шт.	4	
Количество вагонов в поезде:	шт.	8	7
головных моторных	шт.	2	2
промежуточных моторных	шт.	4	3
промежуточных немоторных	шт.	2	2
Масса состава тара	т	286.7	251.0
Масса состава максимальная (для тяговых расчётов)	т	440.9	385.6
Масса состава брутто	т	475.1	415.5
Диаметр среднеизношенного колеса по кругу катания	мм	835	
Передаточное отношение редуктора	-	5.75	
Коэффициент полезного действия редуктора с учётом зубчатой муфты	-	0.964	
Коэффициент учета вращающихся масс моторного вагона		1.09	
немоторного вагона		1.06	
Максимально допустимое ускорение поезда	м/с <sup>2</sup>	1.3	
Максимально допустимое нарастание ускорение	м/с <sup>3</sup>	0.6	
Максимальная скорость движения на участке	км/ч	80	

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, получены следующие основные графики зависимости тока на токоприемнике, величины силы тяги и торможения, скорости поезда, а также напряжения в контактном рельсе от времени (рисунки 38 – 39).

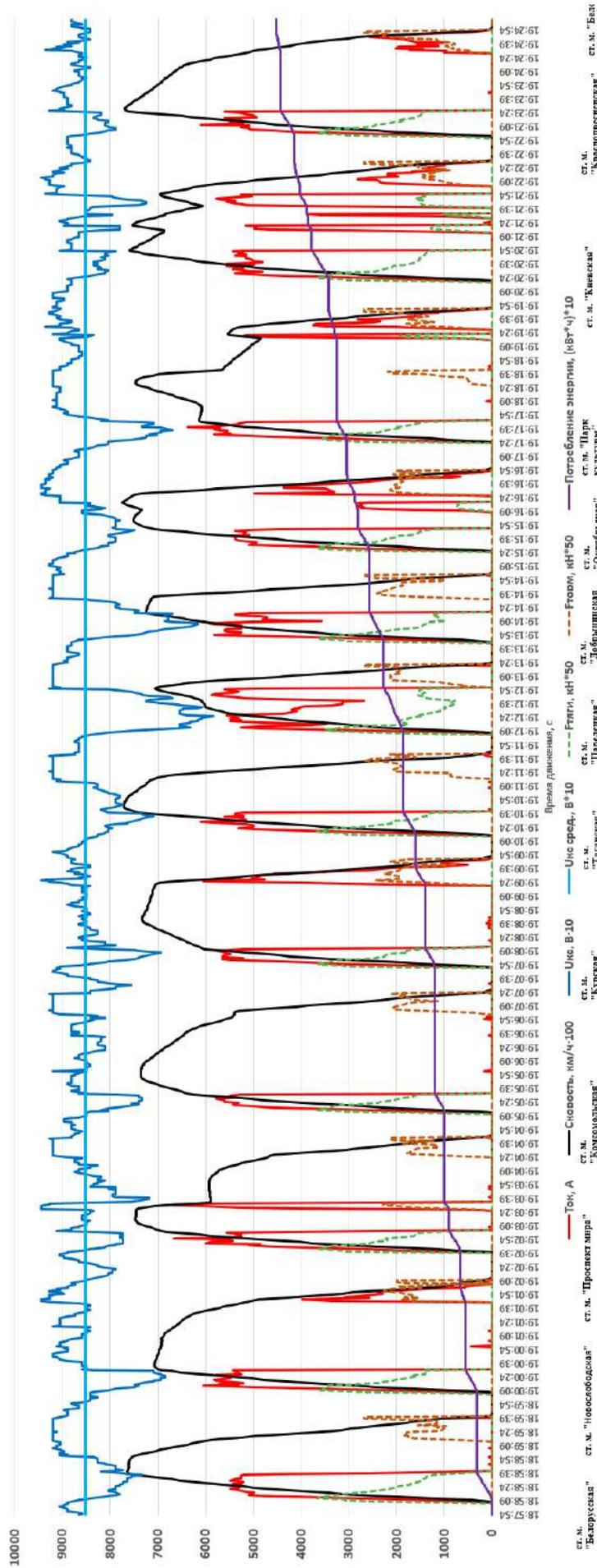


Рисунок 38 – Основные показатели движения поезда «Москва-2020» по Кольцевой линии Московского метрополитена

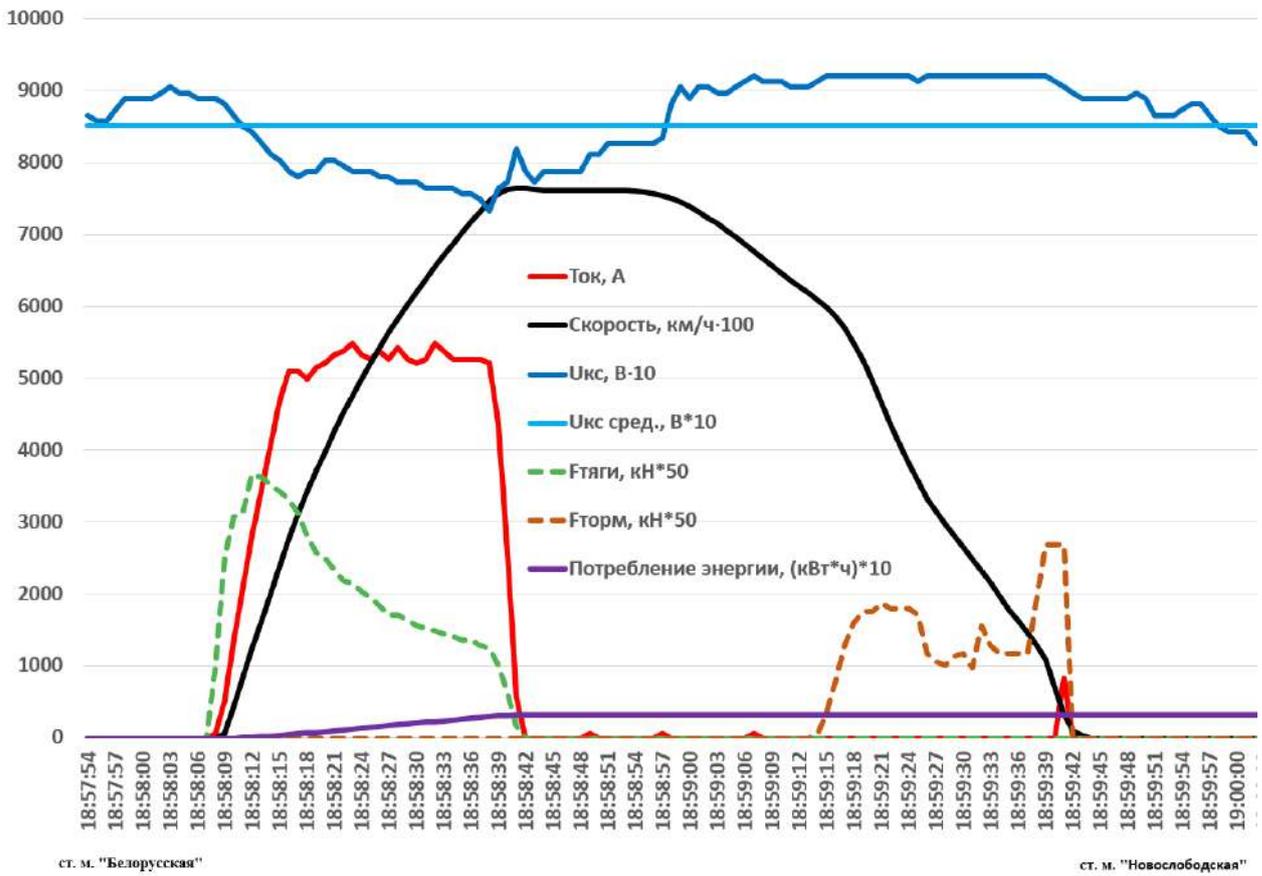


Рисунок 39 – Фрагмент параметров движения ЭПС «Москва-2020» на Кольцевой линии Московского метрополитена

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 (таблица 9). Эти параметры являются основными для оценки потенциальной электроэнергии, которая могла бы быть запасена в БНЭ.

Таблица 9 – Выработанная электроэнергия ЭПС при рекуперативном торможении на КЛ, использованная для МПО

№ п/п	Выработанная электроэнергия, кВт·ч	№ п/п	Выработанная электроэнергия, кВт·ч
1	0.21112	8	0.143173333

Продолжение таблицы 9

2	10.074064	9	0.028634667
3	10.24029067	10	17.76768933
4	0.027421333	11	11.07300133
5	0.013104	12	11.07494267
6	20.978776	13	8.857454667
7	0.069645333		

Определим среднее значение выработанной энергии и всю энергию, выработанную ЭПС на МПО при движении от начала его следования и до конца маршрута по формулам (8) и (9).

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.

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 (рисунок 71, таблица 13), размер электроэнергии, приходящийся на МПО.

Бутовская линия Московского метрополитена (легкое метро) не рассматривалась ввиду своих особенностей: укороченный ЭПС, увеличенный интервал следования поездов, пониженная маршрутная скорость поездов.

## **4 ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ ЭПС В СТЭ МЕТРОПОЛИТЕНА**

Расчётная модель ЭПС была разработана в среде программного комплекса ETAP [47] при использовании модуля «eTraX» [160], предназначенного для анализа всех типов тяговых сетей с учетом первичной и вторичной систем электроснабжения.

Комплекс позволил смоделировать систему тягового электроснабжения совместно с системой внешнего электроснабжения (вплоть до питающих центров) и нетяговыми потребителями, включая промежуточные станции, тяговую сеть, а также воспроизвести работу ЭПС с большим количеством электромеханических характеристик, графики движения поездов и запустить имитацию движения поездов по заданному графику [1, 2, 33].

### **4.1 Формирование баз исходных данных для имитационного моделирования**

#### **4.1.1 Профиль пути**

При оценке энергоёмкости накопителя следует учитывать продольный профиль и план участка железнодорожной линии, где будут курсировать электроподвижные составы с бортовыми накопителями энергии [93, 98, 99, 124]. От продольного профиля будут зависеть характеристики потребляемой электроэнергии. Чем больше будут наблюдаться перепады высот, тем больше энергии будет требоваться поезду для преодоления сопротивления движению [107 – 110]. В данной диссертации рассмотрим продольный профиль Таганско-Краснопресненской линии Московского метрополитена.

Продольным профилем пути линии метрополитена является проекция её трассы железнодорожных путей на вертикальную плоскость (вертикальный разрез по трассе, развернутый на плоскость). За расположение станций относительно вертикальной оси берётся высота над уровнем моря. По горизонтальной оси

принимаются координаты точек с отметками величины уклона, начиная с левой стороны линии (от точки на перегоне Планерная – Котельники). Продольный профиль, как и на железной дороге, характеризуется длиной уклонов в метрах и их крутизной, измеряемых в промилле (‰). Зная расстояние между точками уклона и их крутизну, удалось вычислить высоту отдельных участков относительно друг друга путем перемножения данных. Располагая упомянутой информацией и высотой первой отметки относительно уровня моря, мы получили профиль исследуемого участка (рисунок 40).

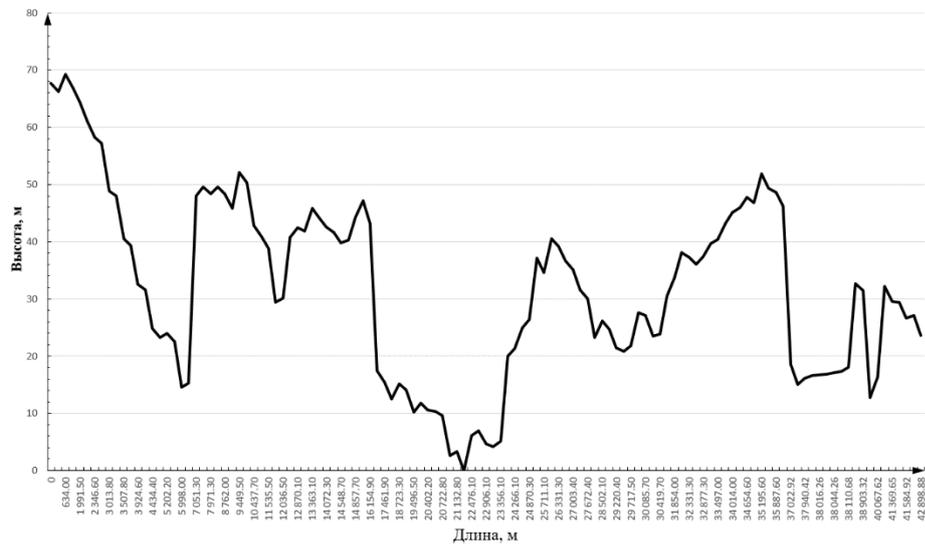


Рисунок 40 – Продольный профиль Таганско-Краснопресненской линии Московского метрополитена. Первый путь

Итак, преобразовав исходные данные, получили визуальную картинку, удобную для восприятия форму отображения профиля пути Таганско-Краснопресненской дистанции.

#### 4.1.2 Координаты расположения элементов на профиле пути

Проанализировав профиль пути, можем перейти к соотношению продольного профиля с высотными отметками и расположения на нем станций, точек подключения питающих линий к нему (таблицы 10 – 11), а также мест нахождения нейтральных вставок, контактного рельса и скоростных отметок (таблица 12).

Используя данные о высотах и длинах уклонов, а также точные координаты расположения станций и точек присоединения подстанций, удалось полностью смоделировать профиль и места подключения питающих линий к контактному рельсу. В модели точки подключения подстанций к контактному рельсу задаются одним питающим кабелем с одной стороны подстанции и другой стороны соседней подстанции – получается двустороннее питание фидерного участка. На практике дополнительно подключаются нулевые фидеры от шины подстанции к контактному рельсу для обеспечения секционирования в случае выхода из строя основного кабеля. В модели нулевые фидера не учитывались.

Точки подключения питающих линий важно учитывать при моделировании движения поезда, так как их место подключения влияет на падение напряжения при прохождении электроэнергии от подстанции до потребителя. Сопротивление тяговой сети (рисунок 41) от шин ТП до нагрузки  $R_{тс}$  складывается из сопротивлений питающего фидера  $R_{пф}$ , контактной сети  $R_{кс}$ , рельсовой цепи  $R_r$  и фидера обратного тока (отсасывающей линии тяговой подстанции)  $R_{ф.от}$ .

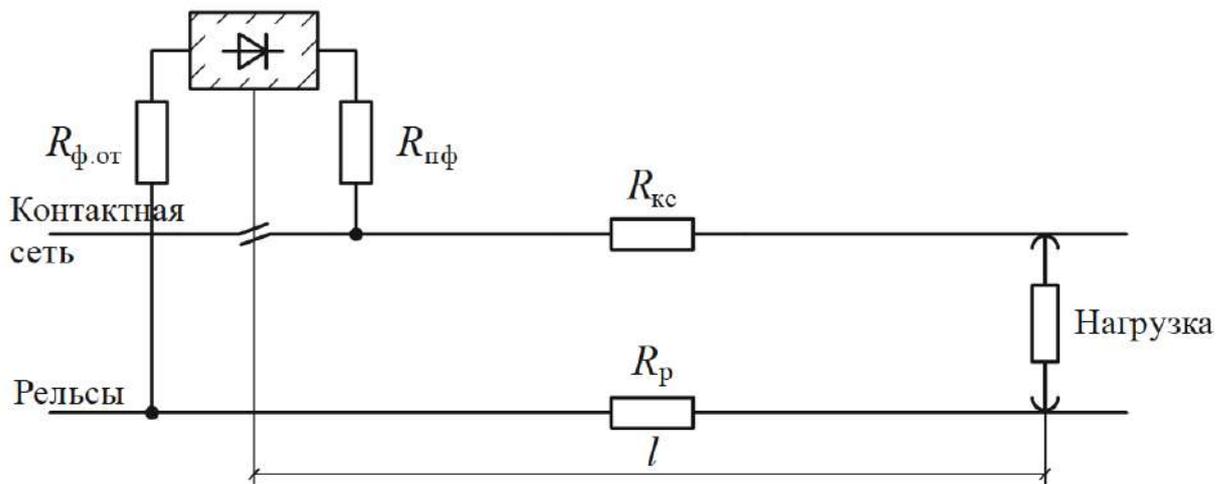


Рисунок 41 – Принципиальная схема питания участка тяговой сети однопутного участка

Таблица 10 – Координаты расположения станций и точек подключения (первый путь)

Название станции	Расположение станции, м	Ф-1, м	Начало нейтральной вставки, м	Конец нейтральной вставки, м	Ф-3, м
Начало участка	0	–	–	–	–
Планерная	275	–	–	–	151
Сходненская	1435	1326	1335	1349	1548

## Продолжение таблицы 10

Тушинская	4121	4016	4020	4034	4253
Спартак	5075	6169	6175	6189	6193
Щукинская	7470	7362	7366	7380	7595
Октябрьское поле	9957	9841	9850	9864	10069
Полежаевская	12651	12351	12505	12519	12530
Беговая	14464	14347	14354	14368	14377
Улица 1905 года	15898	15771	15775	15789	15793
Баррикадная	17193	17078	17084	17098	17331
Пушкинская	19176	19054	19060	19074	19080
Кузнецкий мост	20463	20343	20350	20364	20368
Китай-город (ТКЛ)	21233	21075	21081	21095	21363
Таганская (ТКЛ)	23257	23110	23129	23143	23156
Пролетарская	24675	24551	24555	24569	24573
Волгоградский проспект	26215	26108	26115	26129	26320
Текстильщики	29628	29521	29528	29542	29736
Кузьминки	31820	31715	31722	31736	31920
Рязанский проспект	34295	34158	34162	34176	34183
Выхино	36195	36057	36066	36080	36086
Лермонтовский проспект	38876.24	38665	38743	38757	38790
Жулебино	40943.73	40788	40810	40824	40839
Котельники	42568	42425	–	–	42702
Конец участка	43060	–	–	–	–

Таблица 11 – Расположение станций и точек подключения (второй путь)

Название станции	Расположение станции, м	Ф-2	Начало нейтральной вставки, м	Конец нейтральной вставки, м	Ф-4
Начало участка	0	–	–	–	–
Планерная	275	–	–	–	151
Сходненская	1435	1521	1525	1539	1551
Тушинская	4121	4209	4213	4227	4231
Спартак	5075	6169	6175	6189	6193
Щукинская	7470	7565	7568	7582	7595
Октябрьское поле	9957	10053	10057	10071	10075
Полежаевская	12651	12364	12760	12774	12781
Беговая	14464	14347	14556	14570	14576
Улица 1905 года	15898	15785	15988	16002	16022
Баррикадная	17193	17271	17276	17290	17296
Пушкинская	19176	19055	19265	19279	19285
Кузнецкий мост	20463	20355	20555	20569	20579
Китай-город (ТКЛ)	21233	21342	21350	21364	21378
Таганская (ТКЛ)	23257	23156	23345	23359	23368
Пролетарская	24675	24562	24760	24774	24780
Волгоградский проспект	26215	26298	26302	26316	26322
Текстильщики	29628	29713	29717	29731	29735

Продолжение таблицы 11

Кузьминки	31820	31903	31907	31921	31927
Рязанский проспект	34295	34173	34413	34427	34433
Выхино	36195	36304	36317	36331	36386
Лермонтовский проспект	38876.24	38665	38991	39005	39014
Жулебино	40943.73	40786	–	–	–
Котельники	42568	42651	–	–	–
Конец участка	43060	–	–	–	–

Таблица 12 – Установленные скорости на путях ТКЛ

№ п/п	Расположение ограничителя скорости на первом пути, м	Установленная скорость, км/ч	Расположение ограничителя скорости на втором пути, м	Установленная скорость, км/ч
1	0	35.00	0	40.00
2	275	75.00	458.18	75.00
3	500.5	80.00	770.88	70.00
4	1197	75.00	1794.88	75.00
5	1435	75.00	2082.45	75.00
6	1664.7	80.00	2234.18	80.00
7	3134	75.00	3988.18	75.00
8	3658.7	60.00	4149.94	75.00
9	4121	60.00	4288.18	80.00
10	4362	75.00	4976.18	75.00
11	4437	80.00	5525.18	80.00
12	4705	75.00	6627.18	75.00
13	4805	60.00	6831.18	80.00
14	5075	75.00	7780.18	75.00
15	5948	80.00	8731.18	75.00
16	7254	75.00	9047.18	80.00
17	7470	75.00	10153.18	75.00
18	7691	80.00	11206.18	75.00
19	9351	75.00	11565.28	80.00
20	9957	75.00	12515.18	75.00
21	10180	80.00	13398.18	75.00
22	11388	75.00	13951.18	80.00
23	11861	60.00	15256.18	75.00
24	12285.5	75.00	16811.18	75.00
25	12651	75.00	18351.18	60.00
26	14464	75.00	19769.18	75.00
27	15898	75.00	20173.18	80.00
28	16384	60.00	21620.18	75.00
29	17193	75.00	21793.18	60.00
30	19176	75.00	21945.18	75.00
31	20463	60.00	22563.18	75.00
32	20976	75.00	23850.18	75.00
33	21233	75.00	24057.68	80.00

Продолжение таблицы 12

34	21613	80.00	25192.68	75.00
35	22991.9	75.00	25833.18	75.00
36	23257	75.00	27128.18	75.00
37	24063	60.00	28562.18	75.00
38	24675	75.00	30375.18	75.00
39	25137	80.00	30595.18	80.00
40	26036.8	75.00	32450.18	75.00
41	26215	75.00	33069.18	75.00
42	27656	80.00	33300.18	80.00
43	28887	75.00	34941.18	75.00
44	29628	75.00	35556.18	60.00
45	30054	80.00	36541.18	80.00
46	31616	75.00	37423.18	75.00
47	31820	75.00	37951.18	75.00
48	33178	80.00	38172.18	80.00
49	34078	75.00	38563.18	75.00
50	34295	75.00	38729.18	60.00
51	36195	35.00	38905.18	75.00
52	36538	60.00	39434.18	80.00
53	37312	75.00	41333.18	75.00
54	38283	80.00	41591.18	75.00
55	38724	75.00	41825.08	80.00
56	38876.24	60.00	42513.18	75.00
57	39674	80.00	42751.18	–
58	40786	75.00	–	–
59	40943.73	75.00	–	–
60	41481.3	70.00	–	–
61	42256.3	–	–	–

Характеристики профиля пути и контактной сети в программном комплексе задаются поперегонно. Пример заполнения данных по одному из путей – перегон ТКЛ от ст. м. «Жулебино» до ст. м. «Лермонтовский проспект» по второму пути представлен на рисунках 42 – 43:

eTraX Editor

Icon	Object	Distance (m)	Speed (kph)		GIS Coordinate				Bend Radius (m)	Segment Length (m)
			Frgt	Psgr	X	Y	Z (m)	Grade		
	Жулебино (Platf)	-			40943.24 m	149048.02 m	31.5	0.00 %		-
	Track464	-								-
	M326	16.69	80	53	40926.55 m	149049.03 m				16.69
	M411	59.58			40883.61 m	149049.09 m	31.5	0.00 %		42.89
	Node456	156.26			40786.76 m	149048.22 m				96.69
	Track463	-								-
	M602	458.22			40484.40 m	149049.64 m	32.2	0.18 %		301.96
	M600	874.55			40067.50 m	149050.20 m	16.3	-3.82 %		416.33
	M598	1599.97			39341.06 m	149051.20 m	12.7	-0.50 %		725.42
	Node451	1925.62			39014.94 m	149050.66 m				325.65
	Track462	-								-
	Node450	1935.16			39005.39 m	149050.66 m				9.54
	dcSW187	-								-
	Node449	1949.02			38991.51 m	149050.67 m				13.86
	Track332	-								-
	M409	2003.90			38936.57 m	149051.69 m	31.5	4.65 %		54.88
	ЛермонПр (Platf)	2065.03			38875.33 m	149050.69 m	31.5	0.00 %		61.13

Track Route Train Schedule Train Config Train Assign

Рисунок 42 – Основные параметры участка ТКЛ от ст. м. «Жулебино» до ст. м. «Лермонтовский проспект»

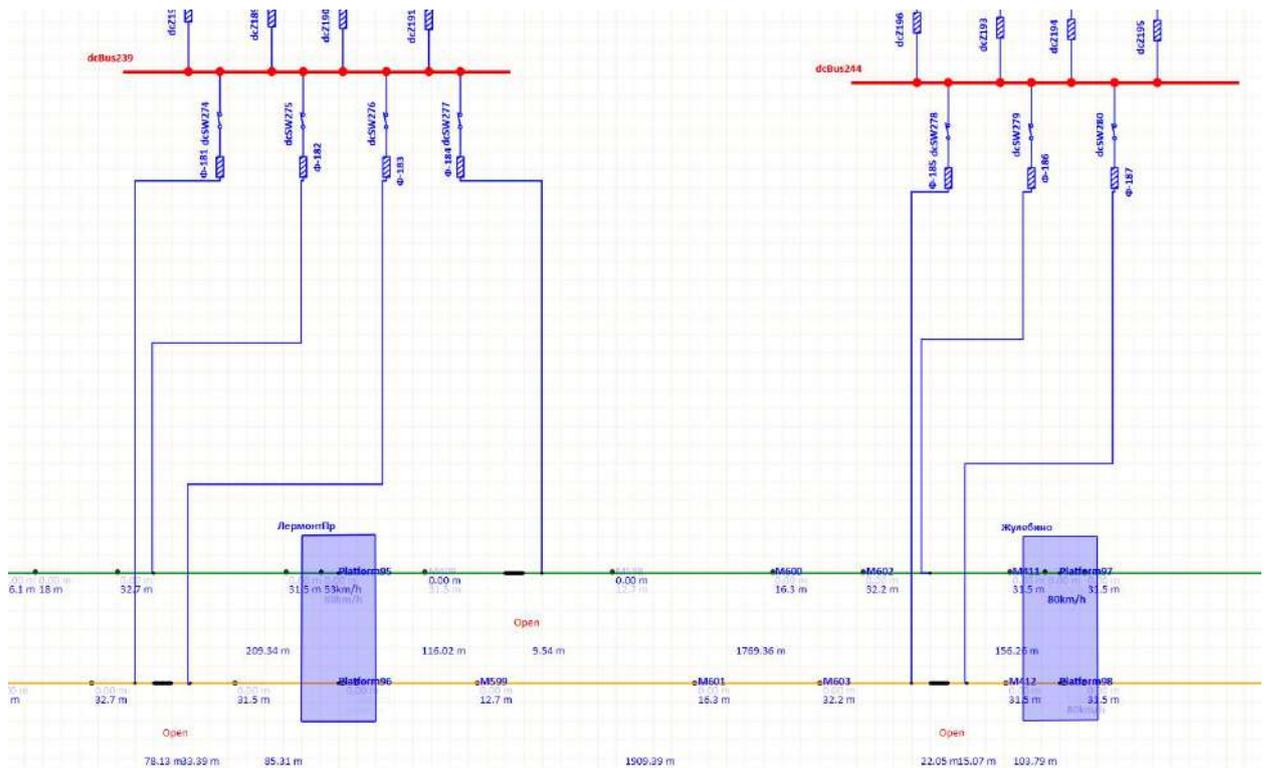


Рисунок 43 – профиль участка Таганско-Краснопресненской линии от ст. м. «Жулебино» до ст. м. «Лермонтовский проспект» с подключенной к нему совмещенной тяговой подстанцией

Задать характеристики по контактному и ходовому рельсу в программный комплекс необходимо через соответствующие базы данных (рисунок 44):

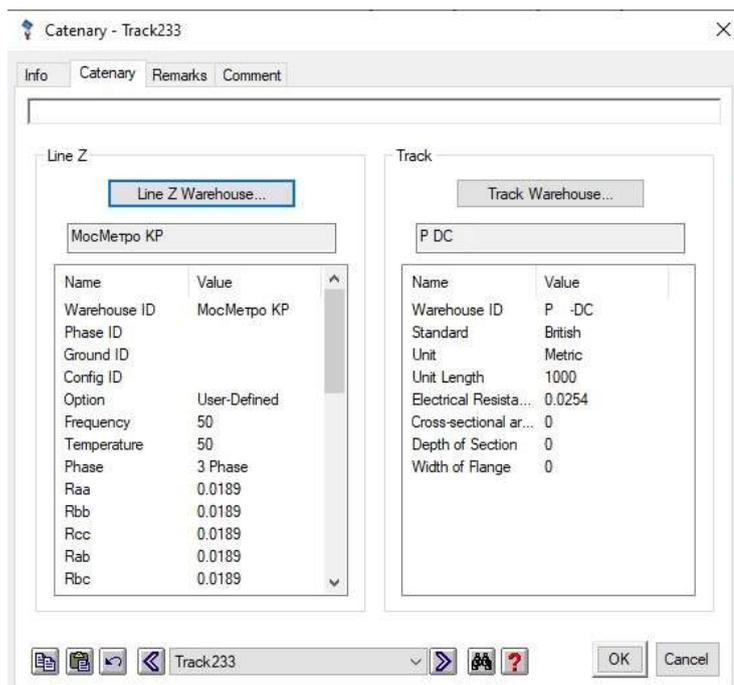


Рисунок 44 – Характеристики контактного и ходового рельса

### 4.1.3 Формирование графика движения поездов

В диссертационной работе выбран вариант режима ведения поезда с жестко заданным графиком движения, и минимальным межпоездным интервалом, так как данный режим является максимально сопоставимым с тем режимом ведения поезда, который соответствует расписанию маршрутов в час пик на исследуемом участке.

Чтобы задать направление движения поездам, т. е. по двухпутной дороге по первому пути от ст. м. «Планерная» до ст. м. «Котельники» и по второму пути от ст. м. «Котельники» до ст. м. «Планерная» потребуется определить данный маршрут поездов в программном комплексе (рисунок 45).

eTraX Editor

Route	Color	Distance (m)
TrackRoute1	Yellow	41419.02
TrackRoute2	Blue	41419.81
test1track	Red	770.10
test2track	Brown	766.91
TrackRoute5	Orange	42234.39
TrackRoute6	Green	42234.50

Track	Station		Distance (m)
	From	To	
TrackGroup74	Котельники (Platform99)	Жулебино (Platform97)	1623.05
TrackGroup75	Жулебино (Platform97)	ЛермонгПр (Platform95)	2065.03
TrackGroup76	ЛермонгПр (Platform95)	Выхино (Platform93)	2676.08
TrackGroup77	Выхино (Platform93)	РязанскийПр (Platform91)	1897.78
TrackGroup78	РязанскийПр (Platform91)	Кузьминки (Platform89)	2471.29
TrackGroup79	Кузьминки (Platform89)	Текстил (Platform87)	2188.54
TrackGroup80	Текстил (Platform87)	ВолгоградскийПр (Platform85)	3408.57
TrackGroup81	ВолгоградскийПр (Platform85)	Пролетарская (Platform83)	1537.84
TrackGroup82	Пролетарская (Platform83)	Таганская (Platform81)	1416.21
TrackGroup83	Таганская (Platform81)	КитайГород (Platform79)	2021.18
TrackGroup84	КитайГород (Platform79)	КузнецкийМост (Platform77)	768.97
TrackGroup85	КузнецкийМост (Platform77)	Пушкинская (Platform75)	1285.24
TrackGroup86	Пушкинская (Platform75)	Баррикадная (Platform73)	1980.21
TrackGroup87	Баррикадная (Platform73)	УлицаГода (Platform71)	1293.50
TrackGroup88	УлицаГода (Platform71)	Беговая (Platform69)	1431.82
TrackGroup89	Беговая (Platform69)	Полежаевская (Platform67)	1810.53
TrackGroup90	Полежаевская (Platform67)	ОктПоле (Platform65)	2690.08
TrackGroup91	ОктПоле (Platform65)	Щукинская (Platform63)	2482.69
TrackGroup92	Щукинская (Platform63)	Спартак (Platform61)	2392.72
TrackGroup93	Спартак (Platform61)	Тушинская (Platform59)	952.29
TrackGroup94	Тушинская (Platform59)	Сходненская (Platform57)	2692.73
TrackGroup95	Сходненская (Platform57)	Планерная (Platform55)	1158.15

Track Route Train Schedule Train Config Train Assign

Рисунок 45 – Маршрут поездов по второму пути Таганско-Краснопресненской линии

Также необходимо создавать расписание поездов на основе интервала между поездами и времени остановки поезда на станции. Опытным путем была установлена минимальная остановка поезда на пассажирских станциях в «час-пик», составляющая двадцать секунд и был выбран минимальный официальный межпоездной интервал, составляющий 90 секунд (рисунок 46).

Station	2TrainTKL_				2TrainTKL1				2TrainTKL2			
	Arrival	Dwell (m)	Departure	Trip	Arrival	Dwell (m)	Departure	Trip	Arrival	Dwell (m)	Departure	Trip
Котельники		0.33	6.00.00			0.33	6.01.30			0.33	6.03.00	
Жулебино		0.33				0.33				0.33		
ЛермонтПр		0.33				0.33				0.33		
Выхино		0.33				0.33				0.33		
РязанскийПр		0.33				0.33				0.33		
Кузьминки		0.33				0.33				0.33		
Текстиль		0.33				0.33				0.33		
ВолгоградскийП		0.33				0.33				0.33		
Пролетарская		0.33				0.33				0.33		
Таганская		0.33				0.33				0.33		
КитайГород		0.33				0.33				0.33		
КузнецкийМост		0.33				0.33				0.33		
Пушкинская		0.33				0.33				0.33		
Баррикадная		0.33				0.33				0.33		
УлицаОда		0.33				0.33				0.33		
Беговая		0.33				0.33				0.33		
Полежаевская		0.33				0.33				0.33		
ОктПоле		0.33				0.33				0.33		
Щукинская		0.33				0.33				0.33		
Спартак		0.33				0.33				0.33		
Тушинская		0.33				0.33				0.33		
Сходненская		0.33				0.33				0.33		
Планерная		0.33				0.33				0.33		

Рисунок 46 – Параметры межпоездного интервала и остановки на пассажирских станциях

Продemonстрировано движение поездов в цифровой модели на примерах нескольких пассажирских станций и прилегающих к ним перегонов (рисунки 47 – 48).

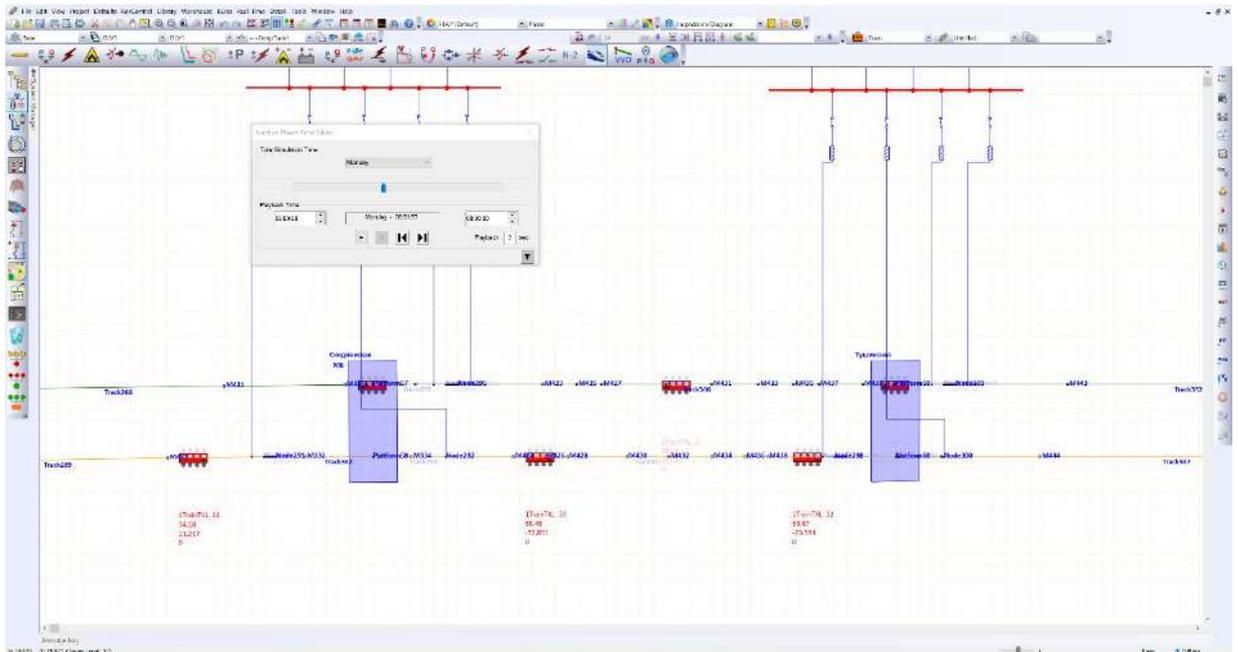


Рисунок 47 – Движение поездов по участку ст. м. «Сходненская» - ст. м. «Тушинская»



Рисунок 48 – Движение поездов по участку ст. м. «Текстильщики» - ст. м. «Кузьминки»

Поезда начинают движение по участку с начала линии навстречу друг другу. Далее поезда встречаются примерно в середине пути спустя 30 минут после начала движения. Через 3579 секунд, после начала движения первые поезда на первом и втором пути завершают свое движение и с этого момента начинается полное перекрытие движения поездов – это когда первый и второй путь полностью заполнены поездами и СТЭ работает на полную мощность.

## 4.2 Алгоритм расчета и общий подход к моделированию

Существует множество подходов к имитационному моделированию систем тягового электроснабжения электрифицированных железных дорог и метрополитенов. В зависимости от задачи, применяются как методы численного моделирования электромагнитных переходных процессов (моделирование во мгновенных значениях в энергетике и в тяговом электроснабжении [137, 166]), так и электромеханических переходных процессов (моделирование в среднеквадратичных значениях) с применением ряда допущений о квазиустановившемся характере процессов. Примером моделирования в среднеквадратичных значениях является разработка ИрГУПС Fazonord [31, 32].

Моделирование с учётом квазиустановившегося характера процессов является более удобным для симуляции длительных процессов, к которым относятся суточные графики движения поездов и метрополитенов. При этом, модель, которая применяется в симуляции, разбивается на 2 фрагмента:

- электрическая сеть, включая систему тягового электроснабжения до токоприёмников поездов;
- электроподвижной состав.

ЭПС представляется либо материальной точкой, либо системой материальных точек в центрах тяжести каждого локомотива/вагона (при этом сцепка считается жёсткой и механические процессы взаимодействия вагонов через сцепки не учитываются). Для каждого поезда процесс его движения описывается численной моделью уравнения движения поезда, которая включает в себя определение тягового усилия по тяговой характеристике, тормозного усилия по тормозной характеристике (рекуперативной характеристике), силы сопротивления (движению, уклону, кривой). В каждый момент времени механическая мощность поезда пересчитывается в потребляемую электрическую мощность из сети или, при рекуперации, отдаваемую в сеть. Данные величины мощностей являются исходными данными для расчёта электрического режима в электрической сети (первый фрагмент модели).

Расчёт электрической сети в квазиустановившемся режиме является хорошо проработанной проблемой, описанной в сотнях работ в России и в мире. В российской литературе его часто называют расчётом установившегося режима или расчётом потокораспределения [37, 38]. В работах, которые написаны на английском языке его называют Load Flow или Power Flow [152]. Причина высокой проработанности данных методов является в их универсальности в энергетике для оценки длительного или квазиустановившегося режима в электрической сети любого уровня напряжения и отрасли (передача и распределение электрической энергии, электрические станции и подстанции, электроснабжения городов и промышленных предприятий, системы тягового электроснабжения). Под электрическим режимом понимают совокупность параметров, которые определяют процессы производства, передачи, распределения и потребления электрической энергии в установившемся или квазиустановившемся режиме (напряжения в узлах сети, токи и мощности в ветвях). Под установившимся режимом (для сохранения общности терминологии далее в контексте квазиустановившихся режимов применяется термин «установившийся режим») понимают условное постоянство комплексных векторов токов и напряжений или их изменение с некоторым шагом времени, который превышает постоянные времени электромагнитных переходных процессов (примером является шаг расчёта 1 секунда). При этом, в моделях не учитываются некоторые разновидности электромагнитных переходных процессов большой длительности, например броски тока намагничивания трансформаторов, которые могут занимать время, измеряемое секундами.

Методы расчёта установившихся режимов основаны на модификации метода узловых потенциалов с нагрузками, которые задаются отбором мощности из узла нагрузки. При этом, мощность задаётся статической характеристикой, которая является функцией мощности от напряжения. Для двигательной нагрузки мощность обычно принимается постоянной при любом напряжении в пределах рабочих диапазонов, а нагревательные элементы и статические установки компенсации реактивной мощности имеют зависимость в виде квадратичной параболы.

Если рассмотреть модель постоянной мощности, то в методе узловых потенциалов ток нагрузки является отношением мощности на сопряжённый комплексный вектор напряжения. Умножение каждого уравнения на такой вектор даёт квадратичную функцию от модуля напряжения. Таким образом, система уравнений становится системой нелинейных алгебраических уравнений. Для их решений за десятилетия разработано множество методов, включая метод Зейделя, метод Ньютона-Рафсона и их модификации, которые подробно изложены в [22, 37, 38, 152]. В такой постановке уравнения прекрасно работают для симметричных схем замещения электрических сетей, позволяя выполнять расчёт для одной фазы. Однако, с ростом необходимости учёта несимметрии напряжений и токов, особенно с учётом несимметричных нагрузок большой мощности, возникла необходимость модификации методов расчёта для расчёта несимметричных установившихся режимов. Это требует перестройки схем замещения элементов систем электроснабжения в трёхфазные с учётом взаимоиндукции и межфазных ёмкостей. При этом, матрица собственных и взаимных проводимостей имеет размерность  $6 \times 6$ . Данная модель подробно описана в [30, 33, 165]. Данная модель реализована в программных комплексах Fazonord и ЕТАР.

Помимо описанной выше модели учёта схем замещения элементов электрической сети, программный комплекс использует усовершенствованный алгоритм расчёта установившегося режима на основе метода инъекции тока. Подробное описание данного метода приведено в [155]. Данная методика хорошо зарекомендовала себя при решении задач по расчёту установившихся режимов для сильно разреженных матриц и обладает улучшенной сходимостью итерационного процесса [33].

В матричном виде уравнения метода имеют вид (для СТЭ):

$$[\Delta U_{rm}^{abc}][Y^{abc}] = [\Delta I_{mr}^{abc}] \quad (10)$$

где:

$U$  – напряжения в узле по трем фазам А, В, С (мнимая и действительная части);

$I$  – узловой ток;

$Y$  – проводимость (компоненты матрицы Якоби).

$$E_k = U_{rk} + jU_{mk} \quad (11)$$

В преобразованном виде уравнение в матричной форме представляется так:

$$\begin{bmatrix} \Delta I_{m1} \\ \Delta I_{r1} \\ \vdots \\ \Delta I_{mk} \\ \Delta I_{rk} \\ \vdots \\ \Delta I_{mn} \\ \Delta I_{rn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{B}_{11} & \dot{G}_{11} \end{bmatrix} & \cdots & \begin{bmatrix} B_{1k} & G_{1k} \\ G_{1k} & -B_{1k} \end{bmatrix} & \cdots & \begin{bmatrix} B_{1r} & G_{1r} \\ G_{1r} & -B_{1r} \end{bmatrix} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \begin{bmatrix} B_{k1} & G_{k1} \\ G_{k1} & -B_{k1} \end{bmatrix} & \cdots & \begin{bmatrix} \dot{B}_{kk} & \dot{G}_{kk} \\ \dot{G}_{kk} & \dot{B}_{kk} \end{bmatrix} & \cdots & \begin{bmatrix} B_{kr} & G_{kr} \\ G_{kr} & -B_{kr} \end{bmatrix} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \begin{bmatrix} B_{1n} & G_{1n} \\ G_{1n} & -B_{1n} \end{bmatrix} & \cdots & \begin{bmatrix} B_{rk} & G_{rk} \\ G_{rk} & -B_{rk} \end{bmatrix} & \cdots & \begin{bmatrix} \dot{B}_{rn} & \dot{G}_{rn} \\ \dot{G}_{rn} & \dot{B}_{rn} \end{bmatrix} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta U_{r1} \\ \Delta U_{m1} \\ \vdots \\ \Delta U_{rk} \\ \Delta U_{mk} \\ \vdots \\ \Delta U_{rn} \\ \Delta U_{mn} \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$B'_{kk} = B_{kk} - \left( \frac{Q_k^{sp} ((U_{rk})^2 - (U_{mk})^2) + 2P_k^{sp} U_{rk} U_{mk}}{U_k^4} \right) \quad (13)$$

$$B''_{kk} = -B_{kk} - \left( \frac{Q_k^{sp} ((U_{rk})^2 - (U_{mk})^2) + 2P_k^{sp} U_{rk} U_{mk}}{V_k^4} \right) \quad (14)$$

$$G'_{kk} = G_{kk} - \left( \frac{P_k^{sp} ((U_{rk})^2 - (U_{mk})^2) + 2U_{rk} U_{mk} Q_k^{sp}}{U_k^4} \right) \quad (15)$$

$$G''_{kk} = -G_{kk} - \left( \frac{P_k^{sp} ((U_{rk})^2 - (U_{mk})^2) + 2U_{rk} U_{mk} Q_k^{sp}}{U_k^4} \right) \quad (16)$$

где:

$G, B$  – реактивные и активные проводимости относительно узлов;

$r$  – индекс активных компонент;

$m$  – индекс мнимых компонент;

$Q$  – реактивная мощность в узлах;

$P$  – реактивная мощность в узлах.

Данный расчёт является основой алгоритма программного комплекса, который позволяет рассчитывать токи и напряжения в узлах для любой схемы с определённой координатой поездов на участках рассчитываемой линии. Во время моделирования движения поездов (при изменении их координат не только во времени, но и в пространстве) данный алгоритм взаимодополняется расчётом мгновенной мощности поезда с оптимизацией всего графика движения поездов.

Критерием оптимизации является максимизация скорости с учётом продольного профиля. Помимо этого, есть другой режим моделирования, в котором ограничением является заданное время в пути. В этом случае ускорение и скорость оптимизируются с учётом профиля так, чтобы обеспечить заранее заданное время в пути.

Поезд представляет собой совокупность материальных точек. Каждый локомотив или вагон представляется материальной точкой в центре вагона или локомотива. Силы сопротивления определяются отдельно для каждой материальной точки. Результирующая сила сопротивления определяется за счёт суммирования. Таким образом, при моделировании длинного состава будет корректно учтено наличие участка профиля с длиной меньше длины поезда.

Расчёт значений активной и реактивной мощности поезда производится при известных значениях развиваемого поездом тягового усилия и скорости:

$$P = \frac{F \cdot v}{1000} \quad (17)$$

где:

$F$  – тяговое усилие, Н;  $v$  – скорость, м/с;  $P$  – мощность, кВт.

Реактивная мощность рассчитывается с помощью коэффициента мощности поезда.

Значения тягового усилия и скорости определяются по результатам работы алгоритма оптимизации ведения поезда по участку (ведение поезда по максимально энергоэффективному режиму разгона и торможения).

В каждый момент времени по значениям скорости, уклона, радиусу кривой и константам поезда рассчитываются силы сопротивления:

– Сопротивление движению:

$$W_f = \left( A + \frac{A_1}{n} + \frac{A_1}{\sqrt{\frac{W}{n}}} + B \cdot V + B_1 \cdot v \cdot W + C \cdot \alpha \cdot v^2 \right) \cdot W \quad (18)$$

где:

$W$  – масса, [т];

$\alpha$  – поперечное сечение, [м<sup>2</sup>];

$n$  – число осей;

$A$  – коэффициент сопротивления подшипников, [кГ/т];

$A_1$  – коэффициент сопротивления подшипников на одну ось, [кГ];

$A_2$  – коэффициент сопротивления, учитывающий взаимодействие реборды с рельсом, [кГ\*√т];

$B$  – коэффициент сопротивления, [кГ\*ч/(км\*т)];

$B_1$  – коэффициент сопротивления для электропоезда, [кГ\*ч/(км\*т<sup>2</sup>)];

$v$  – скорость, [км/ч];

$C$  – аэродинамический коэффициент.

– Сопротивление от ускорения:

$$\omega_a = \frac{1000 (1 + \zeta) a_a}{9.81} \quad (19)$$

$$\omega_a = 110 a_a \text{ при } \zeta = 0.08 \quad (20)$$

где:  $a_a = m/c^2$ ;

$\zeta = 0.08$  конст.;

$\omega_a = \text{кгс/мгс}$

– Сопротивление от уклона:

$$\omega_s = \pm s \quad (21)$$

где:

$s$  – сопротивление уклону, %;

$\omega_s = \text{кгс/мгс}$

– Сопротивление на кривой:

$$\omega_k = \frac{153S + 100a}{R} \quad (22)$$

где:  $S$  – диаметр колес, м;

$a = 2.896$ , конст.;

$R$  – радиус кривой, м;

$\omega_k = \text{кГ/т}$

По данным значениям определяется какие величины силы ускорения и торможения должны быть задействованы на основе соответствующих кривых тяговых и тормозных характеристик.

$$F_u = W_g = W_f + W_s + W_k + W_a \omega_g G_z = (\omega_f + \omega_s + \omega_k + \omega_a) G_z \quad (23)$$

где:

$F_u$  – сила на ободу колеса;

$\omega_f$  – удельное сопротивление движению;

$\omega_s$  – удельное сопротивление от уклона;

$\omega_k$  – удельное сопротивление на кривой;

$\omega_a$  – удельное сопротивление ускорению;

$W$  – масса.

Алгоритм оптимизации ведения поезда представляет собой два режима:

- точный график движения с закрепленным временем прибытия поезда на станцию;
- график с жёстко заданным межпоездным интервалом и числом поездов по каждому пути, время прибытия на станцию нефиксированное (использовался в моделировании).

Мгновенные токи, полученные в качестве результатов моделирования, представленные в виде зависимости от времени, неудобны для анализа, поэтому помимо мгновенных токов, полученных за все время моделирования, также рассчитаем их эффективные и средние значения на этом же временном интервале.

Эффективный ток – постоянный ток, эквивалентный переменному по тепловому воздействию. При его вычислении на интервале воспользуемся интегралом Джоуля, а именно интегралом квадрата электрического тока по заданному интервалу времени (рисунок 49).

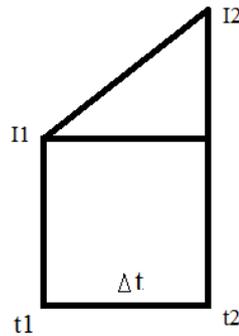


Рисунок 49 – Фрагмент интервала между двумя соседними мгновенными значениями токов

$I_1$  – значение тока в момент времени  $t_1$ , А;

$I_2$  – значение тока в момент времени  $t_2$ , А;

$t$  – момент времени, с;

$\Delta t$  – временной интервал между двумя соседними токовыми точками, с;

$$I(t) = I_1 + (I_2 - I_1) \frac{t}{\Delta t} \quad (24)$$

$$I^2(t) = I_1^2 + (I_2 - I_1)^2 \frac{t^2}{\Delta t^2} + 2I_1(I_2 - I_1) \frac{t}{\Delta t} \quad (25)$$

$$\begin{aligned} I_{\text{эф}}^2 \Delta t &= \\ &= \int_0^{\Delta t} I^2(t) dt = I_1^2 \Delta t + (I_2 - I_1)^2 \frac{\Delta t^3}{3 \Delta t^2} + 2I_1(I_2 - I_1) \frac{\Delta t^2}{2 \Delta t} = \\ &= I_1^2 \Delta t + (I_2 - I_1)^2 \Delta t \frac{1}{3} + 2I_1 I_2 \Delta t \frac{1}{2} - 2I_1^2 \frac{\Delta t}{2} = \\ &= \Delta t \left( \frac{(I_2 - I_1)^2}{3} + I_1 I_2 \right) \end{aligned} \quad (26)$$

Эффективный ток на фидере на всем наблюдаемом интервале, А:

$$I_{\text{эф}} = \sqrt{\frac{\Delta t \left( \frac{(I_2 - I_1)^2}{3} + I_1 I_2 \right)}{\Delta T}} \quad (27)$$

Эффективный ток ЭПС на всём наблюдаемом интервале, А:

$$I_{\text{эф}} = \sqrt{\frac{\Delta t \left( \sum_{i=1}^n \frac{(I_{i+1} - I_i)^2}{3} + I_i I_{i+1} \right)}{\Delta T}} \quad (28)$$

где:

$\Delta T$  – время моделирования, с;

$n$  – количество значений.

Основное потребление энергии в системах тягового электроснабжения приходится на движение составов. По данным Московского метрополитена, около 75-80 % энергии потребляется исключительно подвижными составами. В системах постоянного тока, в том числе и метрополитенах, реактивная мощность играет малую, практически незначительную роль, поскольку основная часть энергии преобразуется в постоянный ток, для которого понятия реактивной мощности в принципе не существует.

В начале движения первого поезда выполняется расчёт сил сопротивления так, что сила тяги, развиваемая ЭПС, считается равной максимальной (ограниченная лишь силой сцепления колёс с ходовыми рельсами). По этому значению рассчитывается ускорение. Если ускорение превышает предельное значение, то расчёт силы тяги выполняется заново до получения значения, соответствующего предельному значению ускорения для выбранного поезда.

Далее, выполняется последовательный расчёт во времени.

С помощью схемы решения уравнения движения, определяется значение скорости в следующий момент времени и так далее до завершения расчёта.

Это позволяет перейти к расчёту электрической мощности данного ЭПС в некоторой точке движения. Результатом расчёта являются рассчитанные значения напряжений каждого узла схемы, мощностей в каждой ветви схемы и токи, включая значения этих величин на питающих линиях, тяговых подстанциях, в сетях внешнего электроснабжения.

По значению напряжения на токоприёмнике может быть выполнена корректировка силы тяги, исходя из зависимости предельного значения силы тяги от напряжения путём интерполяции характеристик.

В этом месте расчёта появляется различие между двумя видами алгоритма оптимизации ведения поезда.

Если задан жёсткий график движения поездов, то тяговый расчёт для всех поездов по мере их выхода на участок повторяется помногу раз для того, чтобы

определить оптимальное время ускорения/торможения, оптимальные значения тяговых и тормозных характеристик, исходя из минимизации расхода энергии и ограничения:

- тяговой характеристики;
- тормозной характеристики;
- предельных значений ускорения/замедления;
- ограничение скорости;
- время в пути (фиксированное значение).

При этом учитываются такие параметры, как:

- уклон продольного профиля на всём маршруте;
- кривизна поперечного профиля на всём маршруте движения.

Таким образом, алгоритм тягового расчёта совмещает в себе следующие возможности:

- тяговый расчёт с оптимизацией ведения поезда;
- электрический расчёт установившегося режима, определяющий токи,

напряжения и мощности во всей моделируемой схеме, включая:

- ЭПС;
- тяговые подстанции;
- продольное электроснабжение;
- внешнее электроснабжение;
- одновременный расчёт систем переменного и постоянного тока.

### **4.3 Моделирование тяговых подстанций в составе системы тягового электроснабжения «Таганско-Краснопресненской» линии**

Основное оборудование тяговых подстанций и питающие линии из целей соображения конфиденциальности были заменены на сопоставимые по мощности и сечению аналоги (рисунки 50 – 53).

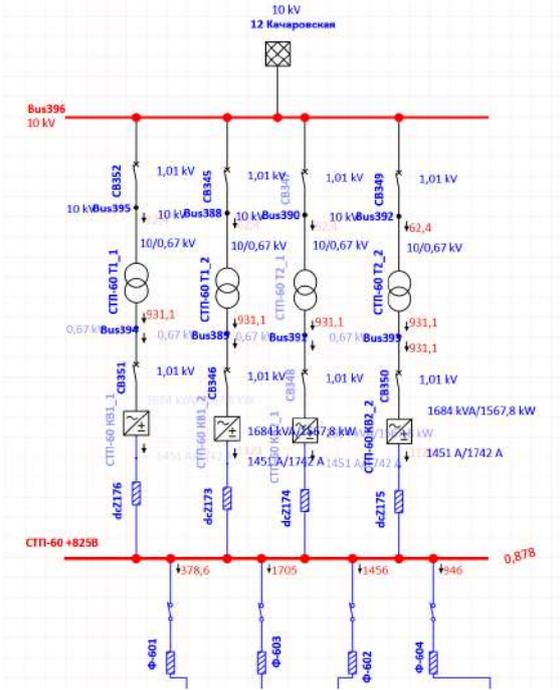


Рисунок 50 – Моделирование СТП

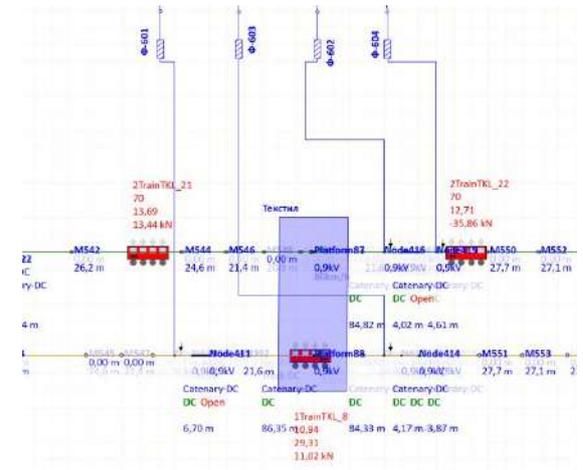


Рисунок 51 – Питающие линии тяговой подстанции

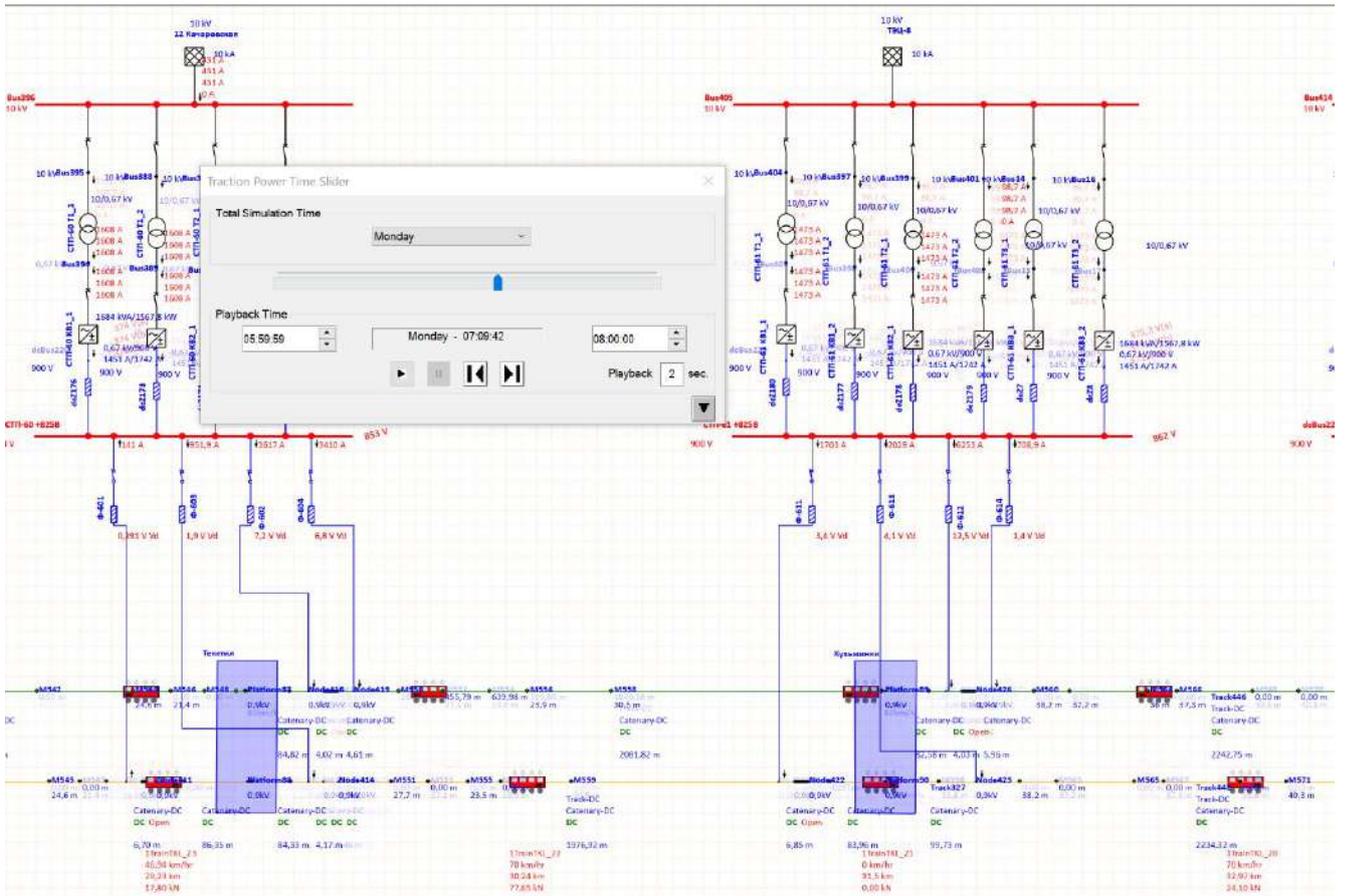


Рисунок 52 – Фрагмент модели СТЭ Таганско-Краснопресненской линии

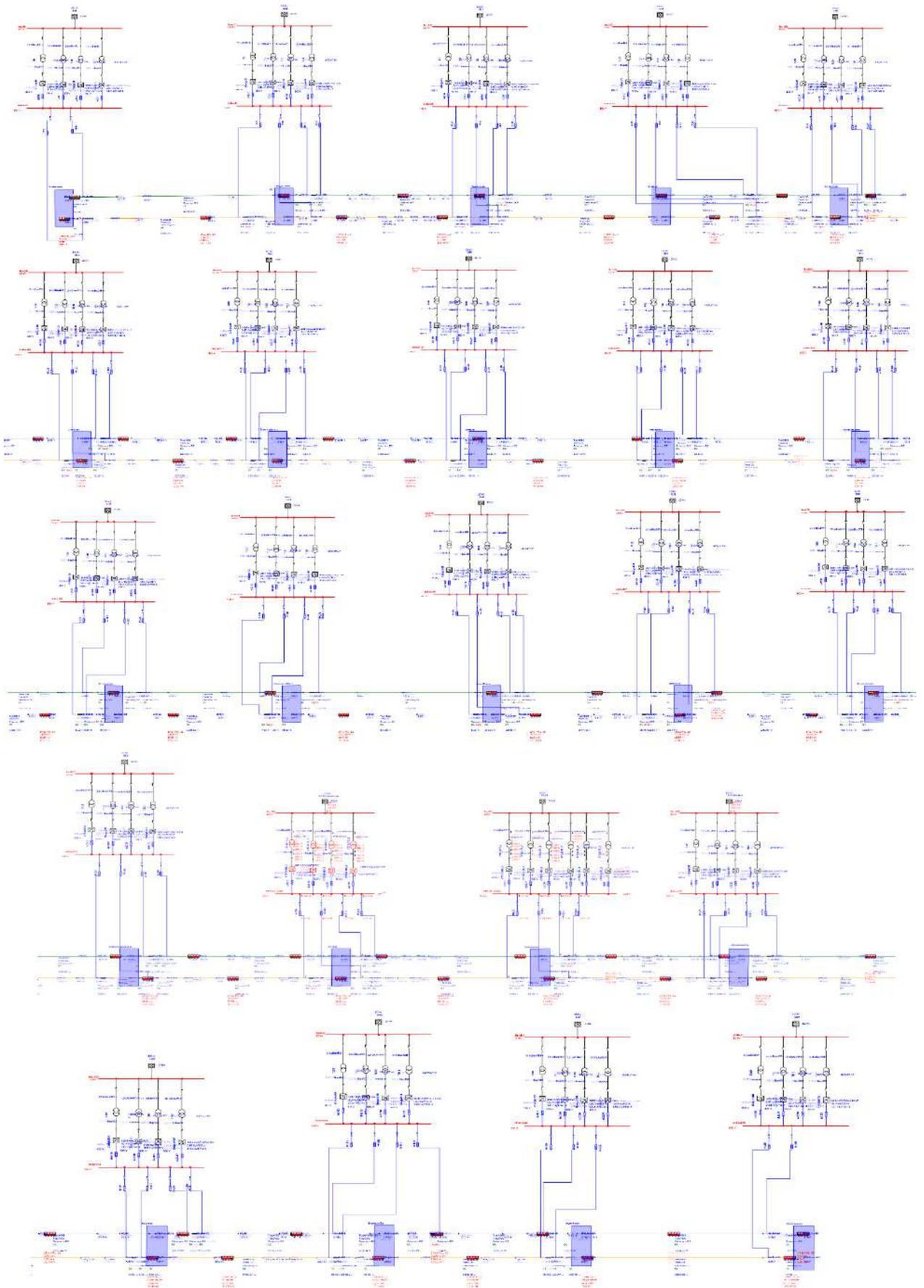


Рисунок 53 – Мнемосхема полной модели СТЭ Таганско-Краснопресненской линии

#### 4.4 Моделирование движения ЭПС «Москва-2019»

Моделирование движения ЭПС состоит из множества фрагментов, главным из которых является тяговый и электрический расчёт. Этот расчет в последующем определяет структуру системы тягового электроснабжения [117, 118, 119]:

- тип системы электроснабжения;
- число и расположение подстанций;
- состав основного оборудования тяговых подстанций;
- тип и марку кабельных линий и т. д.

Для выполнения тягового и электрического расчёта требуются следующие данные:

- схема электропитания тяговой сети, на которой указаны координаты подключения питающих и отсасывающих линий к контактной сети, нейтральных вставок, марка, сечение, количество жил, длина, количество параллельных контактных проводов;
- схема питания первичной сети, где указаны марка кабелей, сечение, количество жил, длина, количество параллельных питающих линий (вводные кабели и кабельные перемычки), мощности короткого замыкания (ток к. з.) на вводах подстанций (х/г внешней сети);
- однолинейные схемы тяговых подстанций. Технические паспорта выпрямителей и понижающих трансформаторов, их количество. Кабельные паспорта и журналы по питающим линиям. Тип системы электроснабжения;
- технический паспорт электроподвижного состава, где указаны: масса (снаряженного, максимальная), тяговая характеристика (график зависимости в кН от скорости), тормозная/рекуперативная характеристика (график зависимости в кН от скорости), тяговые двигатели (мощность, количество, модель), мощность собственных нужд, напряжение, полином уравнения сопротивления движения, скоростные ограничения на участке, график движения ЭПС по участкам;
- профиль (уклоны, радиусы).

Результатами тяговых расчетов являются расходы электроэнергии каждым составом по перегонам и суммарно по расчетному участку, а также значения изменения тока при его движении по участку – график зависимости тока от времени/пройденного расстояния [56].

В данной диссертации для моделирования электроподвижного состава были взяты характеристики электровагонов типа 81-765/766/767 «Москва-2019» (тяговая и тормозная характеристика электропоезда, величины ускорения и торможения и др.).

В диссертации рассмотрен режим приближенный к реальным условиям:

- масса максимальная для тяговых расчётов головного моторного вагона – 56.37 тонн;
- промежуточного моторного вагона – 55.32 тонн;
- промежуточного немоторного вагона – 53.25 тонн.

Тяговые характеристики задаются при номинальном напряжении на токоприёмнике электропоезда, равном 750 В. В реальности этот показатель может быть как выше, так и ниже номинального значения. Уровень напряжения, потребления энергии и тяговое усилие, развиваемое поездом в настоящий момент времени, можно отследить в реальном времени в модели. Были созданы базы данных для каждой модели вагона (81-765, 81-766, 81-767), используемом в ЭПС. Некоторые из основных параметров ЭПС приведены на рисунках 54 – 60.

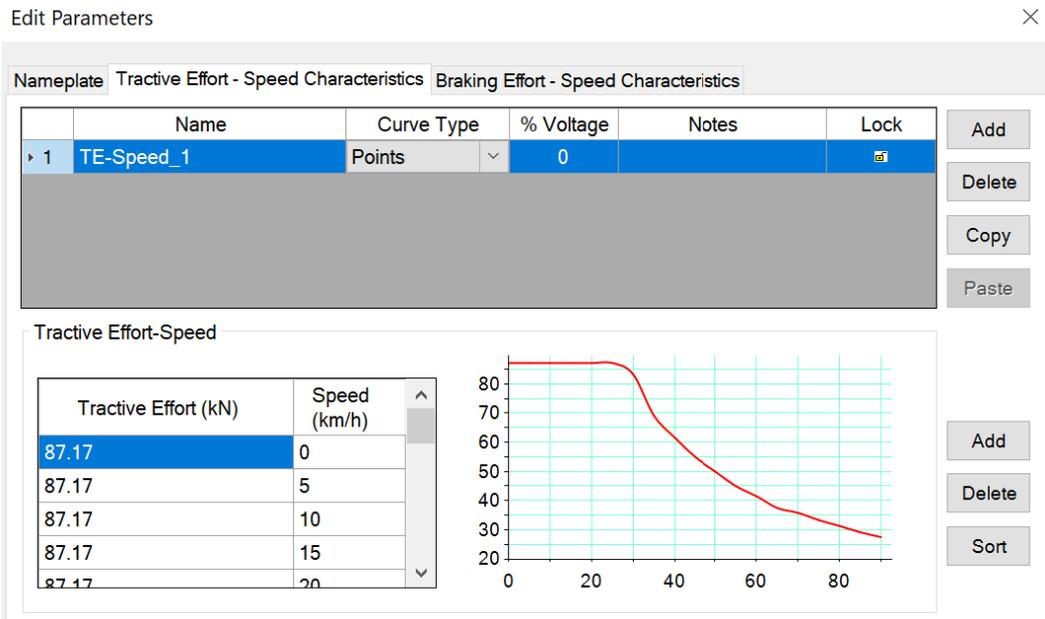


Рисунок 54 – Тяговая характеристика головного моторного вагона с кабиной управления модели 81-765

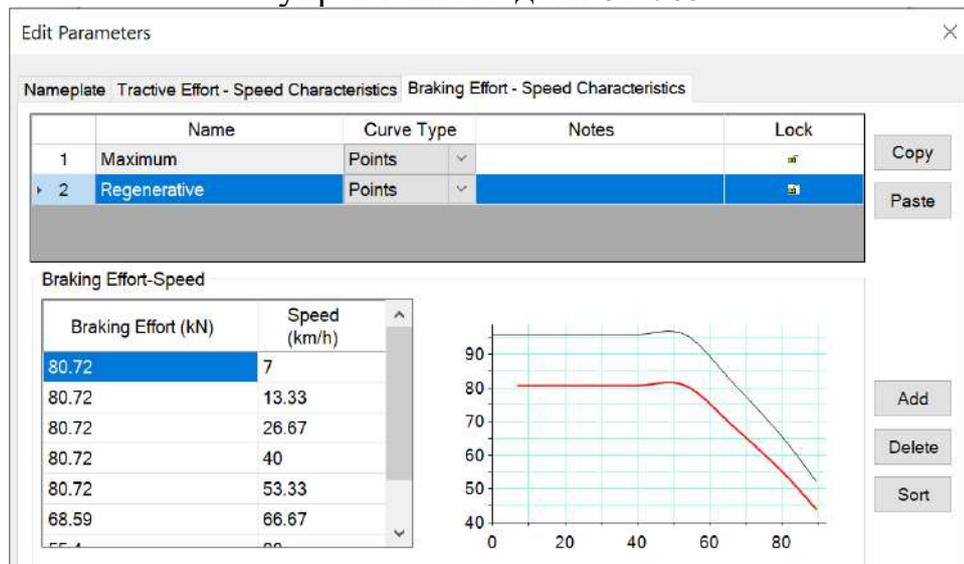


Рисунок 55 – Тормозная и рекуперативная характеристика головного моторного вагона с кабиной управления модели 81-765

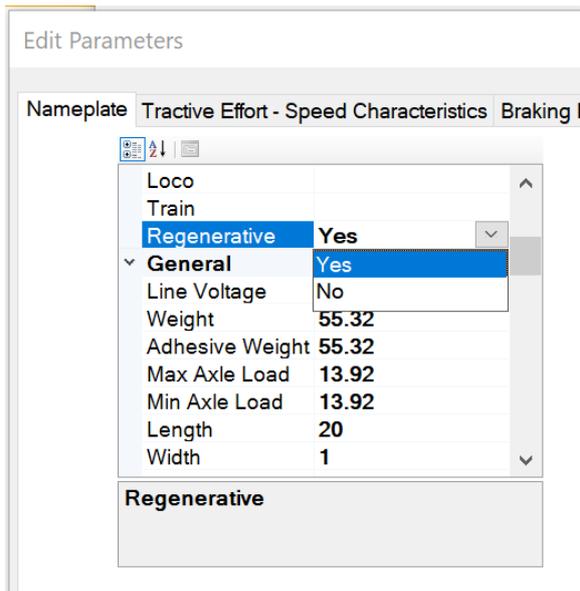


Рисунок 56 – Электрические и физические параметры промежуточного моторного вагона модели 81-766

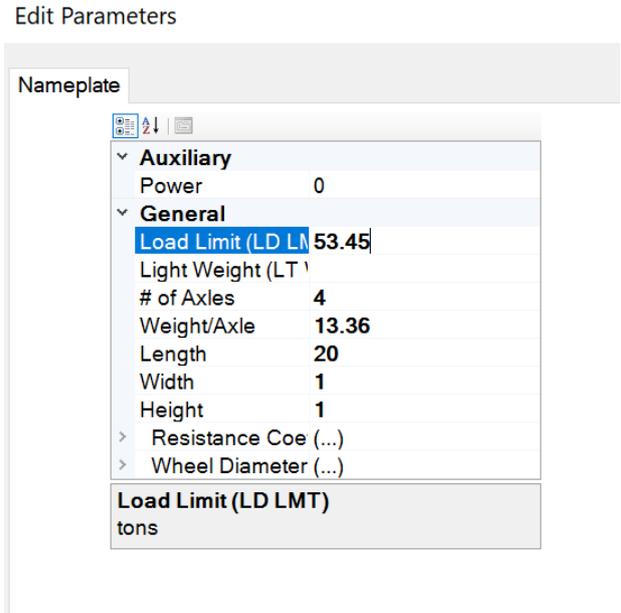


Рисунок 57 – Физические параметры промежуточного (прицепного) немоторного вагона модели 81-767

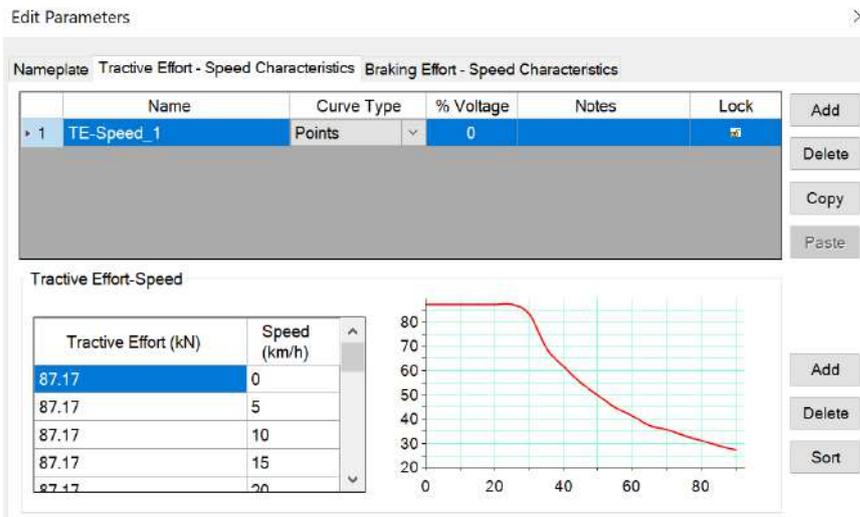


Рисунок 58 – Тяговая характеристика промежуточного моторного вагона модели 81-766

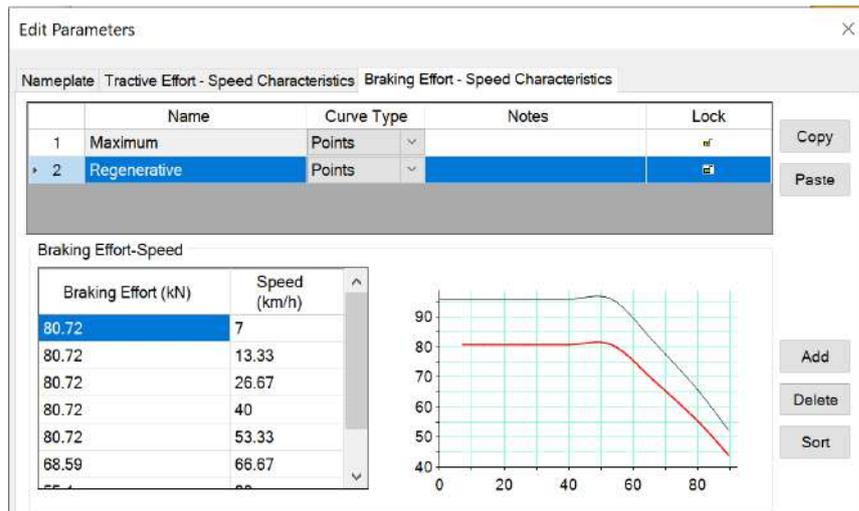


Рисунок 59 – Тормозная и рекуперативная характеристика промежуточного моторного вагона модели 81-766

Для расчета параметров потребления и выработки энергии при разгоне и рекуперативном торможении соответственно использовалась конфигурация ЭПС из 8-ми вагонов типа 81-765/766/767 с двумя немоторными вагонами в следующей последовательности: МГ-НП-МП-МП-МП-МП-НП-МГ.

Active	Type	Configuration	Acceleration Limit (m/s <sup>2</sup> )	Deceleration Limit (m/s <sup>2</sup> )
<input checked="" type="checkbox"/>	Passenger	TrainConfig1	1.3	1.1

Order	Quantity	Type	Manufacturer	Model	Weight	% Loaded	Length	Library
1	2	Locomotive	DCTrain	Moscow	56.37	100	20	—
2	4	Coach	DCTrain	Moscow Motor	55.32	100	20	—
3	2	Coach	DCTrain	Moscow NoMoto	53.45	100	20	—

Рисунок 60 – Конфигурация восьмивагонного электроподвижного состава «Москва-2019» МГ-НП-МП-МП-МП-НП-МГ

Параметры точности расчетов приведены на рисунках 61 – 62:

Traction Study Case

Info Events Schedules Loading Adjustment Alert Plot

Study Case ID: Train

Calculation Options

Max. Iteration: 9999

Precision: 0.001

Adhesive Coefficient: 0.33

Update

Initial Bus Voltages

Method

Calculate AC & DC System (Unified Load Flow)

Coasting

Apply Train Coasting

Initial Voltage Condition

Bus Initial Voltages

User-Defined

Vmag: 100 Vang: 0

Study Remarks

< Train > Copy New Delete Help OK Cancel

Рисунок 61 – Настройка параметров моделирования движения поезда (часть 1)

Traction Study Case

Info Events Schedules Loading Adjustment Alert Plot

Route & Train Schedule

Active	Update	Route ID	# of Schedules	Schedule ID
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	TrackRoute1	3	1Track80s100Train
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	TrackRoute2	3	2Track80s100Train
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	test1track	1	test1_
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	test2track	1	test2_
<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	TrackRoute5	2	1TrackTKL90s100
<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	TrackRoute6	3	2TrackTKL90s100

Calculation Time Selection

Complete Train Schedule

User-Defined Time

From: 05:59 To: 08:10

Simulation Time Step (dt): 1 Seconds

Plot Time Step: 1 x dt

< Train > Copy New Delete Help OK Cancel

Рисунок 62 – Настройка параметров моделирования движения поезда (часть 2)

#### 4.5 Разработка программы статистического анализа

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 63, рисунок 65);
- загрузка и обработка параметров движения поезда, полученных при экспериментальных замерах, построение графиков (рисунок 70);
- определение энергии, выработанной ЭПС при рекуперативном торможении и распределяющуюся на МПО и резисторы, построение гистограммы (рисунок 64, рисунок 66);
- расчет энергии, рассеянной в тормозных резисторах (рисунок 67);
- расчет срока окупаемости накопителя и экономии (рисунок 68);
- расчет экономии в абсолютных единицах (рисунок 69);
- анализ параметров работы поезда, полученных при экспериментальных замерах (рисунок 70, таблица 13);
- определение интегральных показателей и сравнение результатов моделирования с результатами экспериментального замера (рисунок 71).



Рисунок 63 – Параметры движения поезда (рекуперация на МПО)

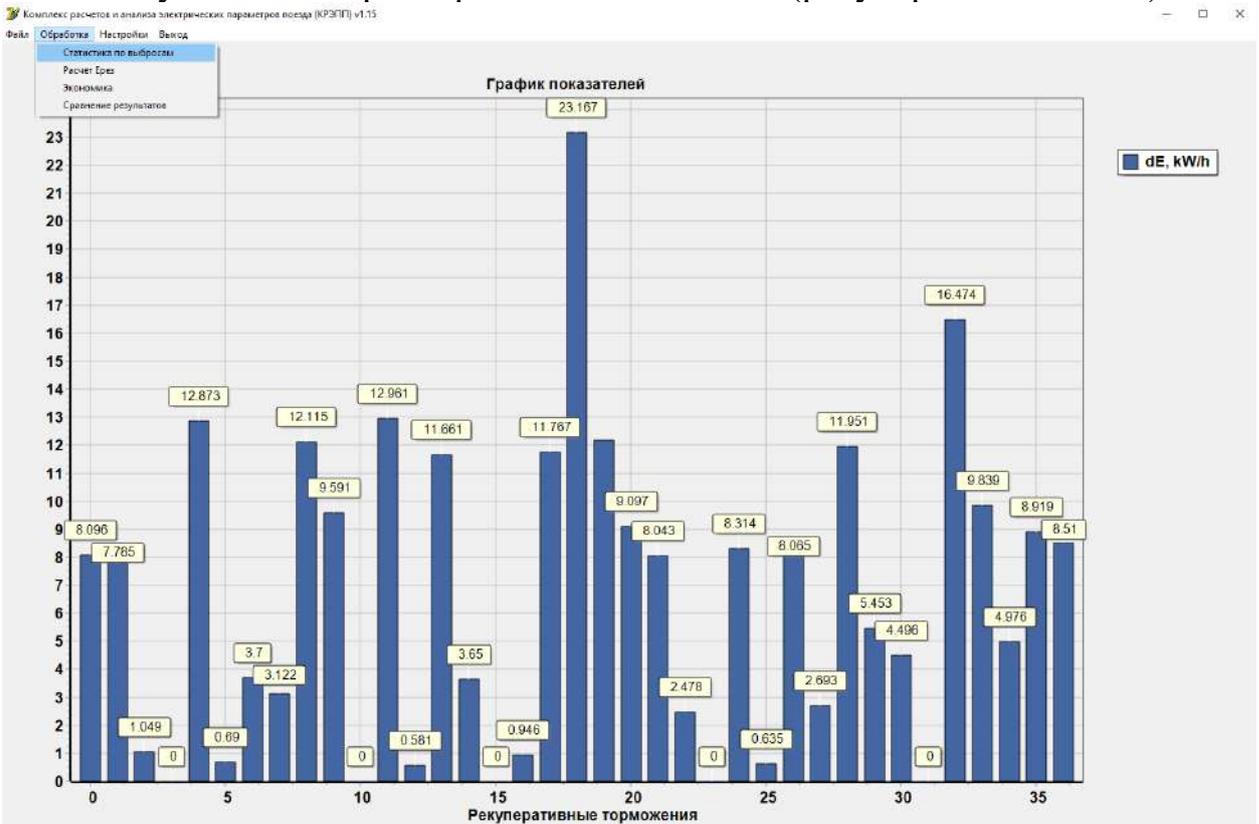


Рисунок 64 – Электроэнергия рекуперации, приходящаяся на МПО

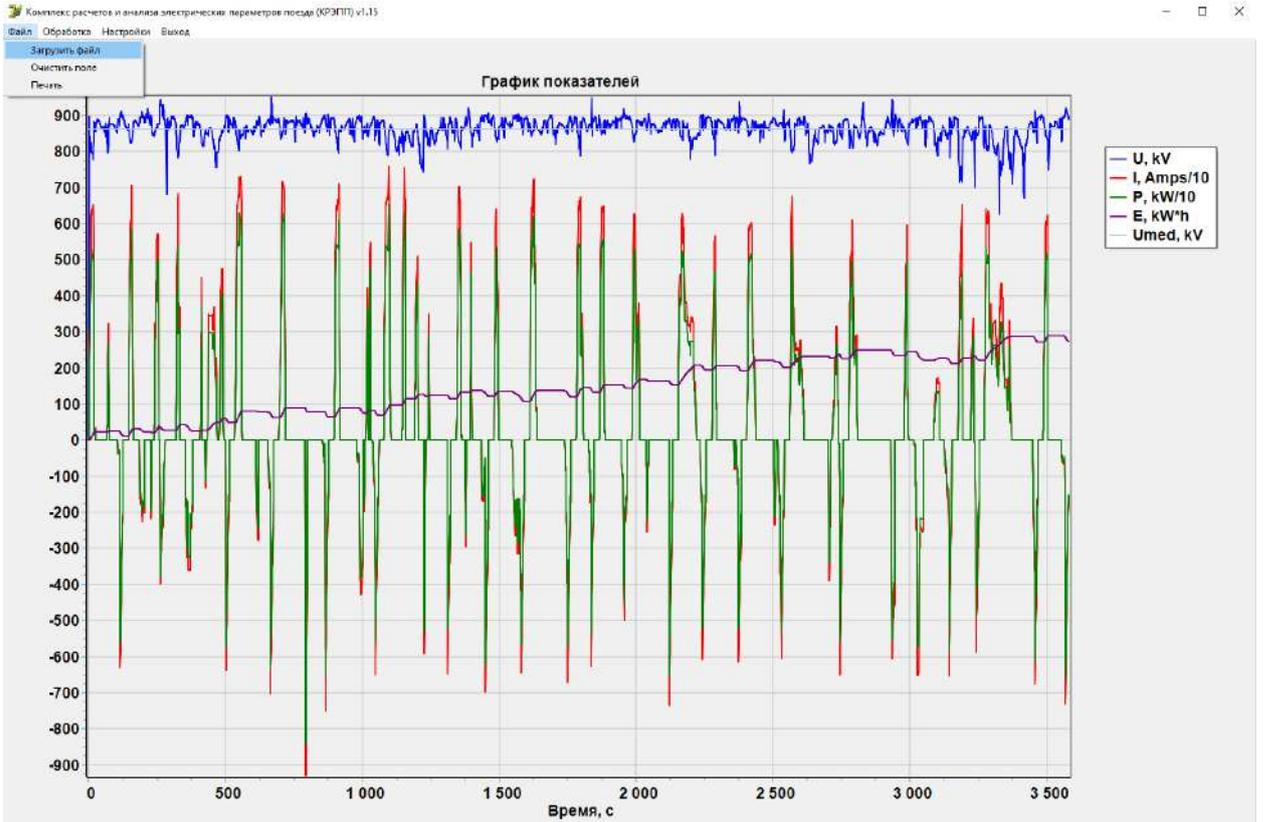


Рисунок 65 – Параметры движения поезда (рекуперация на МПО и резисторы)

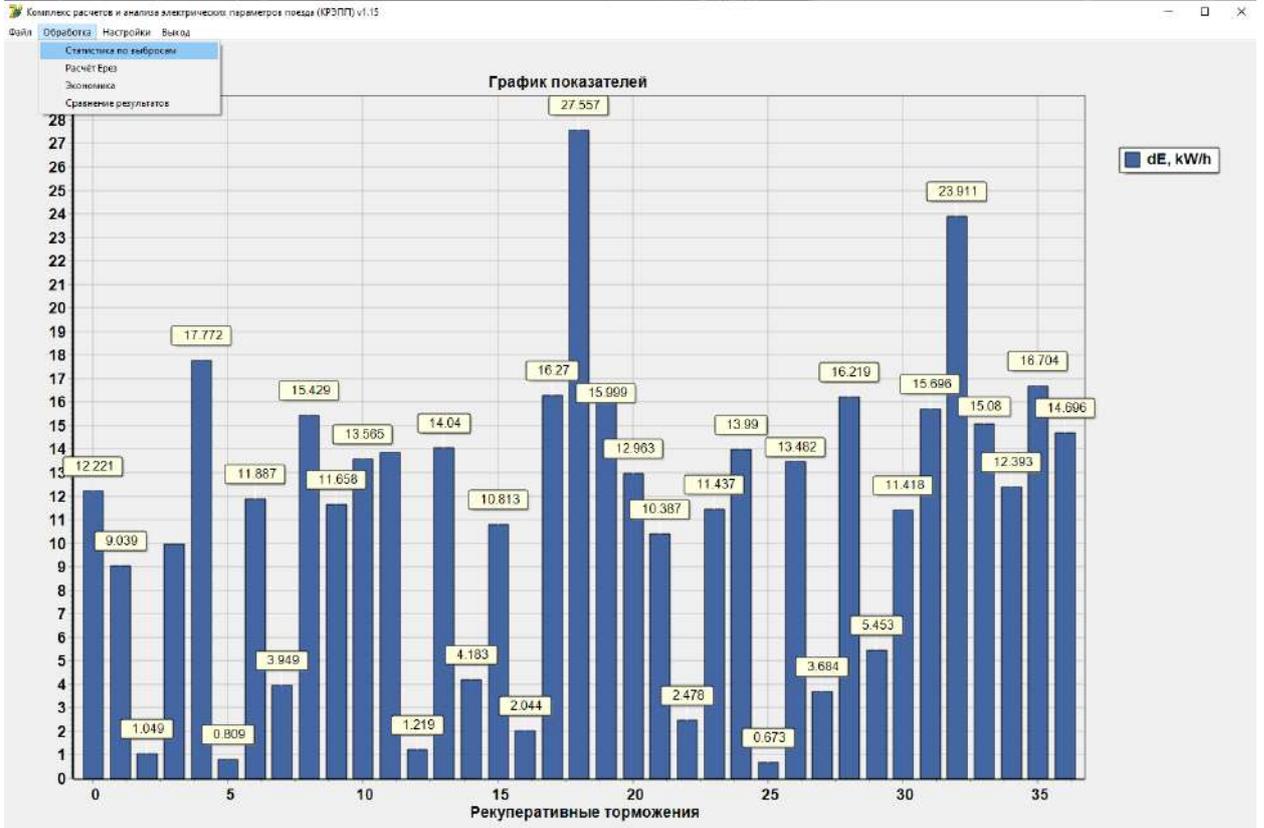


Рисунок 66 – Электроэнергия рекуперации, приходящаяся на МПО и резисторы

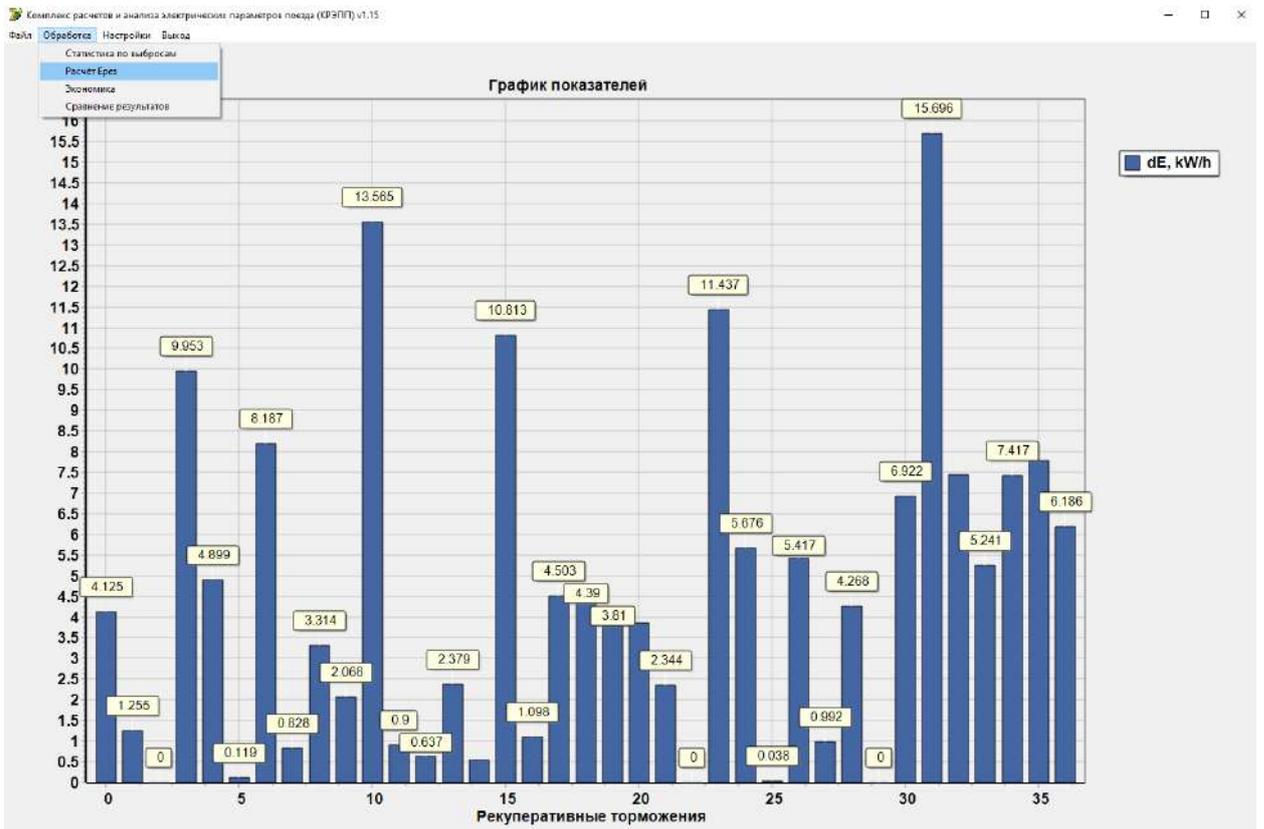


Рисунок 67 – Энергия рассеянная в тормозных резисторах

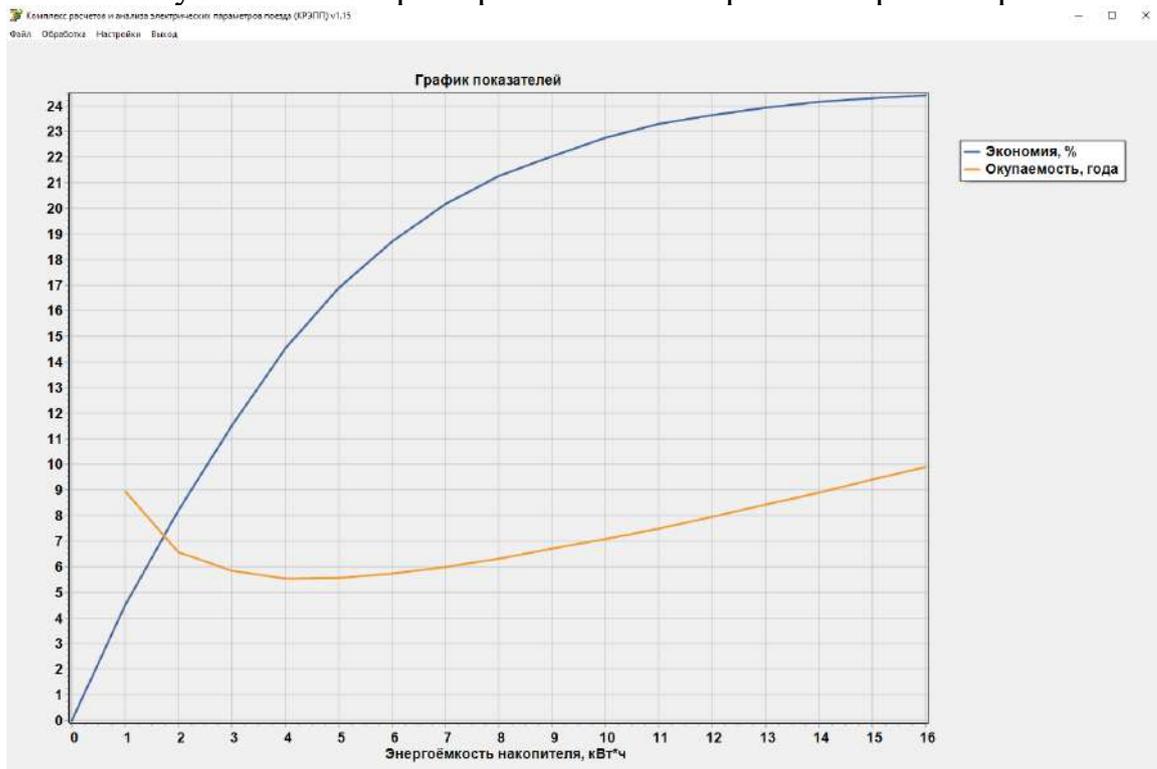


Рисунок 68 – Расчет срока окупаемости накопителя и экономии энергии

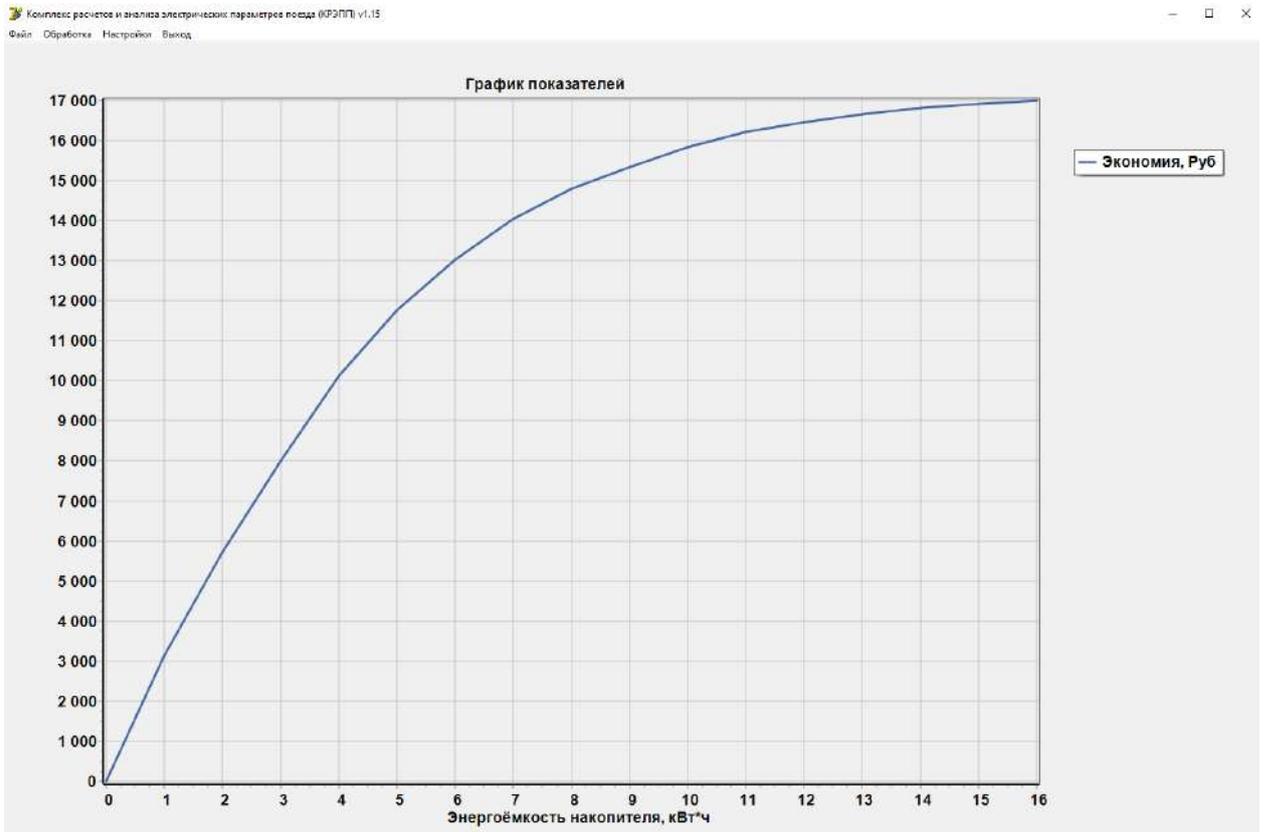


Рисунок 69 – Расчет экономии в абсолютных единицах

Для верификации результатов моделирования в программу необходимо загрузить файл Excel с реальными параметрами движения поезда, а затем файл с параметрами движения поезда, полученными при имитационном моделировании, максимально приближенным по условиям друг к другу.

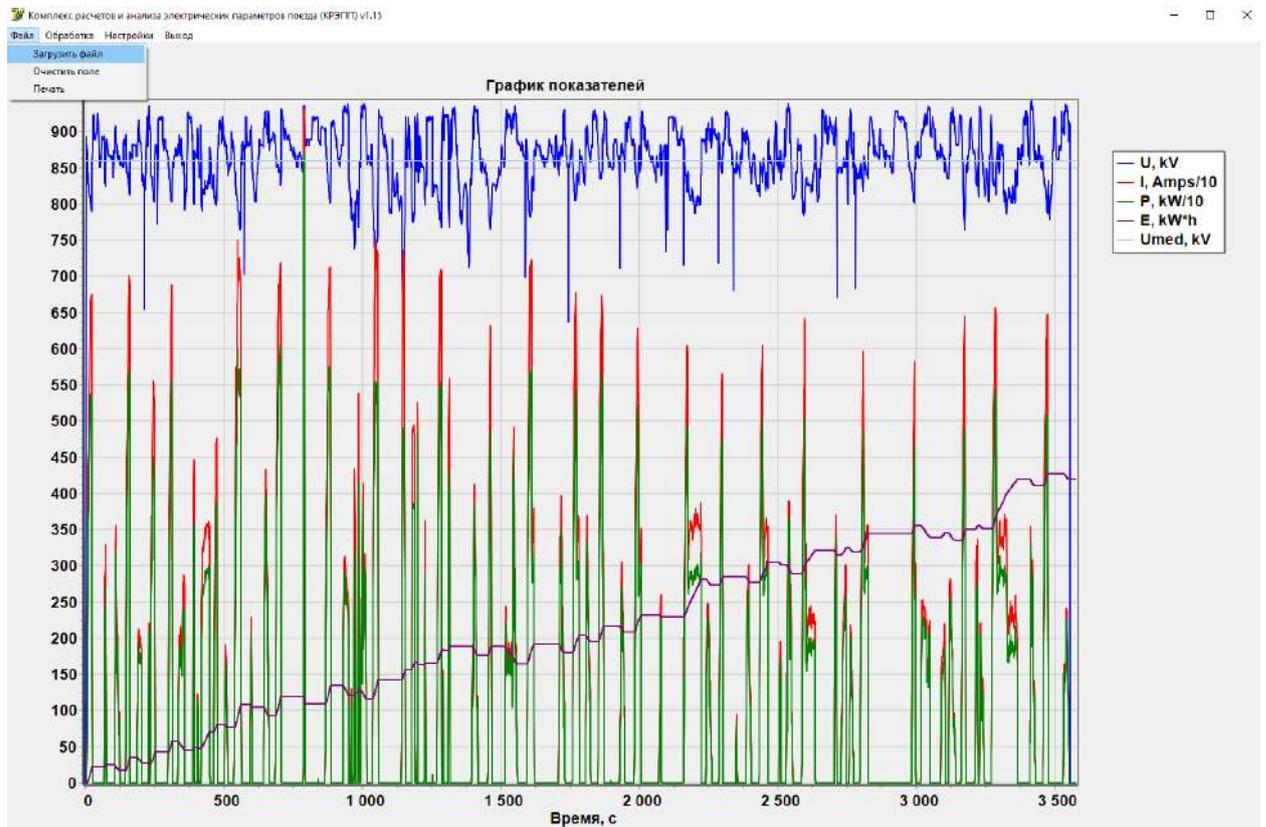


Рисунок 70 – Показатели работы поезда, полученные при экспериментальных замерах

Интегральные показатели							
	Етяга, кВт·ч	Ерек, кВт·ч	Иср.тяга, А	Иср.рек, А	Уср., В	tхода, с	Имакс, А
Экспериментальный замер	671.476	-252.197	3453.000	-1804.947	859.738	3577.000	7500.800
Имитационное моделирование	688.423	-245.884	3473.960	-1767.846	862.551	3579.000	7581.154
Сравнение интегральных показателей	-2.524 %	2.504 %	-0.607 %	2.056 %	-0.327 %	-0.056 %	-1.071 %

Рисунок 71 – Определение и сравнение интегральных показателей ЭПС

Интегральные показатели движения состава приведены в таблице 13.

Таблица 13 – 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	Средне техническая скорость, км/ч
Экспериментальный замер	671.476	252.197	3453.000	1804.947	859.738	3577	7500.800	41.948
Имитационное моделирование	688.423	245.884	3473.960	1767.846	862.551	3579	7581.154	42.63
Различие, %	2.524	2.504	0.607	2.056	0.327	0.056	1.071	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 0.056 % до 2.524 %. Данное расхождение обусловлено тем, что детально воспроизвести управление движением поезда с учетом человеческого фактора в цифровой модели не представляется возможным.

#### **4.6 Анализ результатов моделирования ЭПС**

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 [69].

Были получены электротехнические показатели (рисунки 72 – 75) электропоезда, который от начала и до конца моделирования находится на линии метрополитена. Та, в свою очередь, была полностью заполнена по первому и второму пути другими поездами для того, чтобы максимально приблизиться к условиям реальной эксплуатации метрополитена. Для анализа результатов моделирования движения представлены следующие характеристики: зависимость тока от времени, уровень напряжения на токоприёмнике, потребляемая электропоездом энергия и мощность. Визуально на графике можно отследить время остановки поезда на станциях, Таким же способом можно отследить параметры любого электропоезда по двум путям в зависимости от времени с шагом моделирования в 1 секунду.

Также по полученным графикам в результате моделирования можно определить, как меняется энергопотребление поезда [46] в зависимости от профиля пути и режима движения. Большая часть этой энергии тратится на ускорение, поддержание скорости на подъемах и собственные нужды поезда. А при электрическом торможении двигатели начинают работать в генераторном режиме

и вырабатывать электроэнергию, в связи с этим применение энергосберегающих технологий начало активно внедряться в Московском метрополитене с 2006 года.

Данные по проведенным экспериментам приведены в таблице 14.

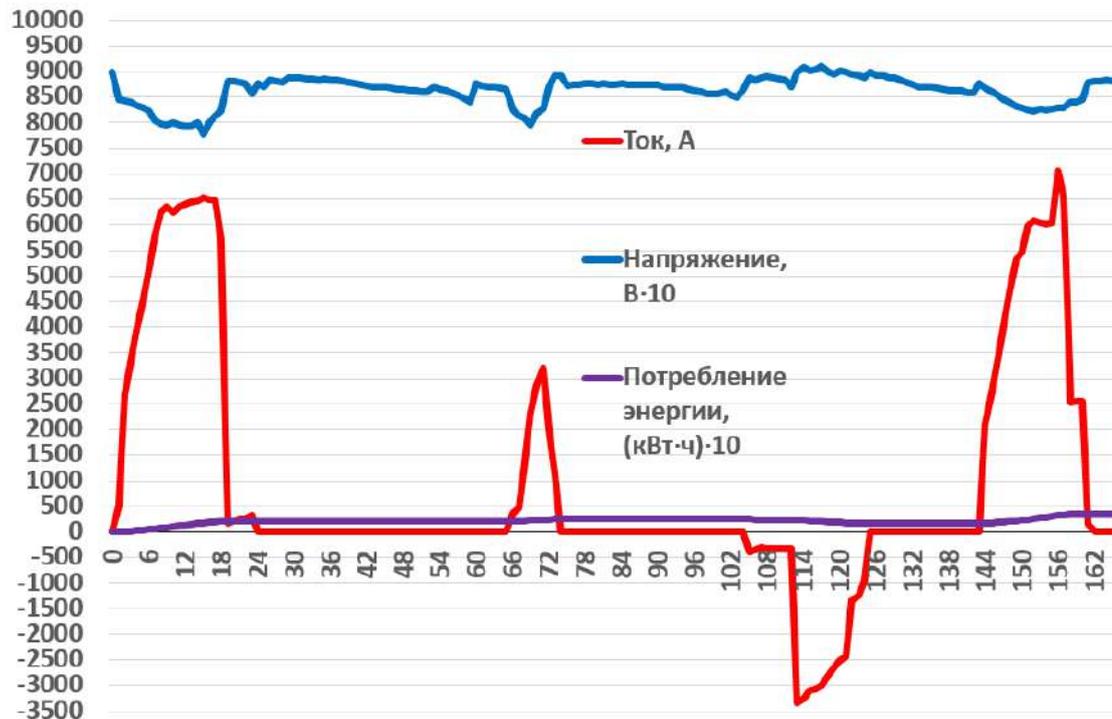


Рисунок 72 – Фрагмент результатов цифрового моделирования ЭПС на Таганско-Краснопресненской линии Московского метрополитена от станции м. «Котельники» до ст. м. «Жулебино»

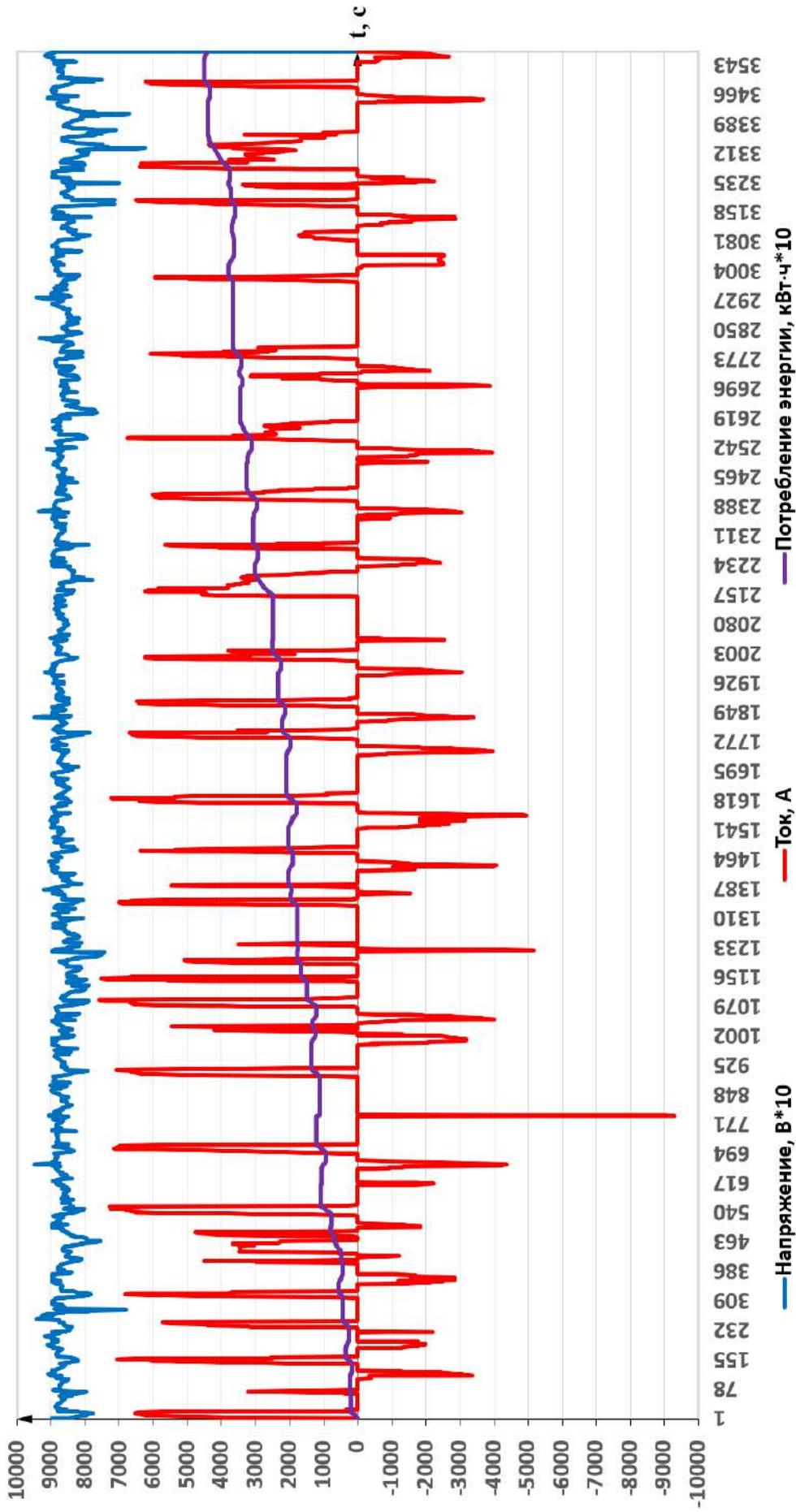


Рисунок 73 – Результаты цифрового моделирования ЭПС на Таганско-Краснопресненской линии Московского метрополитена по второму пути от станции м. «Котельники» до ст. м. «Планерная» с учетом рекуперации на МПО

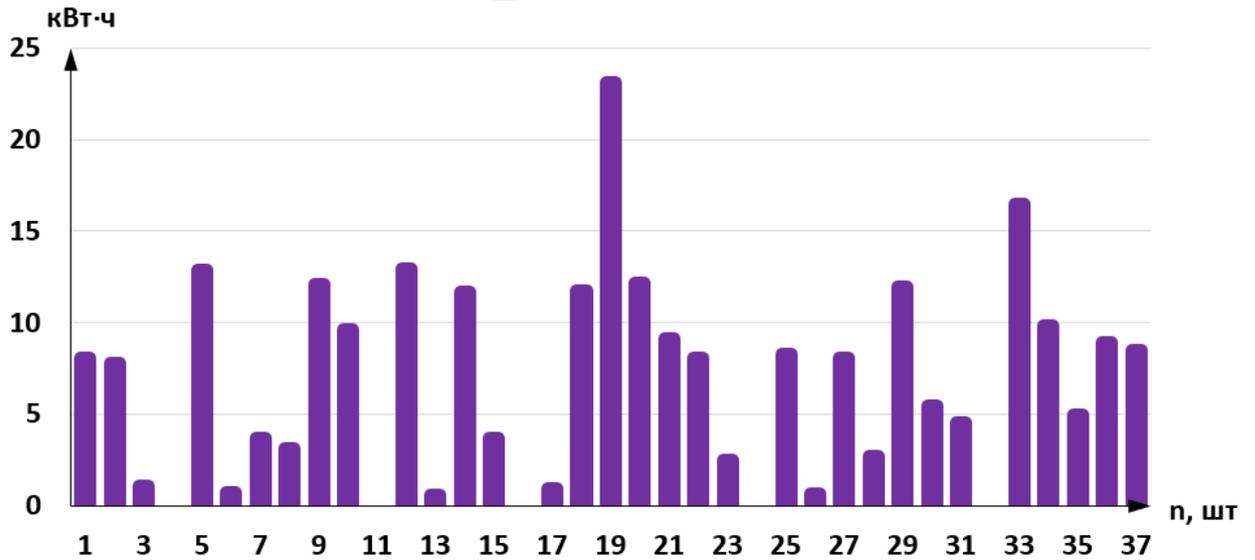


Рисунок 74 – Выработанная энергия поездом при рекуперативном торможении по второму пути на МПО

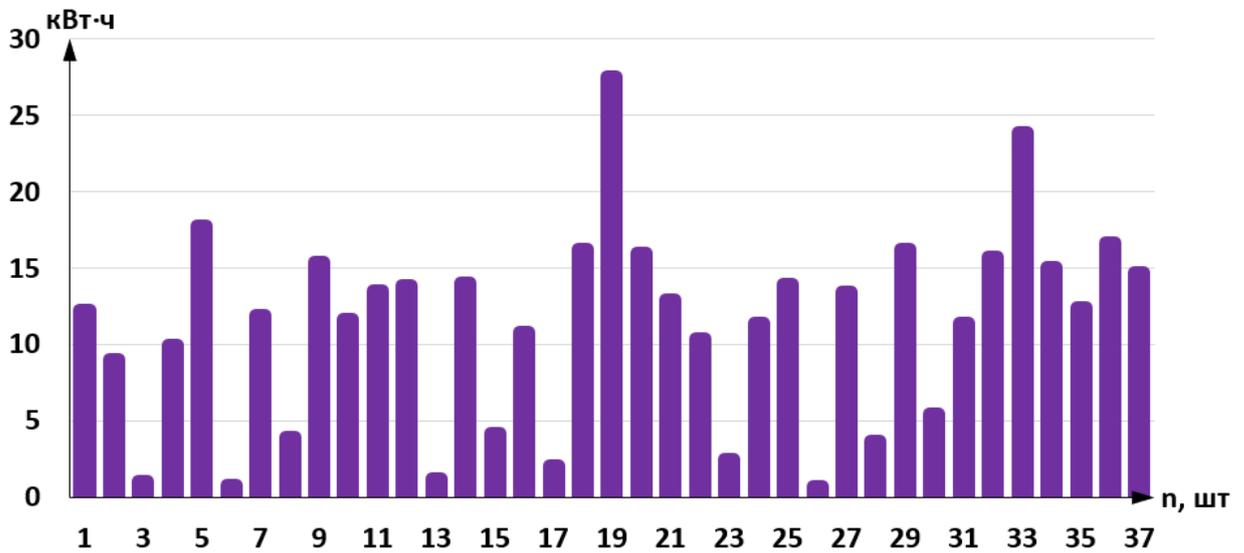


Рисунок 75 – Выработанная энергии поездом при рекуперативном торможении по второму пути на МПО и рассеянную в резисторах

Таблица 14 – Энергия ЭПС в рассматриваемых режимах рекуперации

ЭПС	Расчетная потребляемая энергия ЭПС, кВт·ч	Средняя выработанная энергия на МПО, кВт·ч	Суммарная выработанная энергия ЭПС на МПО, кВт·ч	Суммарная выработанная энергия ЭПС на резисторы, кВт·ч	Суммарная выработанная энергия ЭПС на МПО и резисторы, кВт·ч	Соотношение выработанной энергии на МПО и резисторы с потребленной, %
Второй путь (от ст. м. «Котельники» до ст. м. «Планерная»)	688.423	6.646	245.884	168.097	413.98	60.13

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.

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.

#### **4.7 Сравнение результатов имитационного моделирования движения поезда с результатами экспериментальных замеров параметров движения ЭПС на Таганско-Краснопресненской линии Московского метрополитена**

Основными электроэнергетическими результатами, полученными в ходе имитационного моделирования, являются следующие показатели движения поезда: ток и напряжение в зависимости от времени. На основании этих параметров высчитывается энергопотребление поезда, генерация энергии при рекуперативном

торможении в целом, а также на МПО и энергию, которая не смогла быть использована соседними поездами на линии и была погашена в тормозных резисторах [104].

Стоит отметить, что режим работы системы автоматического ведения поезда, используемый при моделировании (аналог системы АЛС-АРС, применяемой в Московском метрополитене), незначительно отличается от реального движения поезда, управляемым машинистом. На движение ЭПС в реальных условиях действуют разнообразные внешние факторы, которые достаточно проблематично учесть при моделировании, среди них основными считаются:

- человеческий фактор машиниста (его профессионализм, психическое и физическое состояние);
- общая масса пассажиров;
- удержание дверей поезда, которое происходит по вине пассажиров и последующий нагон времени;
- учет поездов, находящихся на линии одновременно с конкретным рассматриваемым ЭПС (местоположение, работу автоматических систем движения поезда);
- напряжение на токоприемнике, зависящее от внешних факторов;
- изменение зависимости сопротивления движению поезда.

С целью проверки результатов теоретически рассчитанных параметров движения поезда при выполнении имитационного моделирования было проведено сравнение полученных данных с результатами натурного замера движения аналогичного ЭПС, состоящего из вагонов типа 81-765/766/767 при прохождении участка от ст. м. «Котельники» до ст. м. «Планерная». Также в целях получения дополненных знаний по параметрам движения поезда и анализа бóльшего количества линий Московского метрополитена были проведены экспериментальные замеры параметров движения семисоставного ЭПС 81-775, 81-776, 81-777 по Кольцевой линии.

На рисунке 35 показан фрагмент основных параметров движения на участке от ст. м. «Тушинская» до ст. м. «Планерная», полученных при экспериментальном замере.

В число измеряемых основных параметров движения поезда входят следующие:

- ток на токоприемниках ЭПС;
- напряжение в контактной сети;
- скорость движения;
- величины тягового и тормозного усилия.

При проведении моделирования и оценке результатов учитывались соседние поезда на линии, так как они влияют на уровень напряжения в контактной сети, чтобы максимально соответствовать действительности. На рисунке 73 выведены основные электрические параметры ЭПС при движении по второму пути ТКЛ:

- ток электродвигателей состава в режиме «пуск» и «рекуперативное торможение на МПО», А;
- напряжение контактной сети, В·10;
- потребление энергии, кВт·ч·10.

Анализируя результаты экспериментальных замеров и цифрового моделирования, можно оценить, насколько происходит расхождение амплитуды и формы значений тока. Однако, сравнивать результаты эксперимента и расчетов следует не только по мгновенным значениям полученных характеристик. Следует также учитывать интегральные показатели (таблица 13) движения ЭПС при оценке результатов, а именно:

- расход и выработка энергии;
- среднее напряжение;
- средний ток;
- время движения;
- среднетехническая скорость.

#### 4.8 Верификация результатов моделирования

Исследованиями было определено, что распределение выработанного количества электроэнергии при рекуперативном торможении ЭПС соответствует экспоненциальному закону [19].

Заданы две выборки (таблица 15) значений случайной величины  $X$  ( $E_{\text{МПО}}^{\text{модель}}$  - энергия рекуперации, полученная при моделировании и которая была распределена на МПО, и  $E_{\text{МПО}}^{\text{замеры}}$  - энергия рекуперации, распределенная на МПО при экспериментальных замерах), количеством  $n=37$  для каждой.

Таблица 15 – Энергия рекуперации ЭПС на МПО

№	$E_{\text{МПО}}^{\text{модель}}$ , кВт·ч	$E_{\text{МПО}}^{\text{замеры}}$ , кВт·ч
1	8.096222	7.856642
2	7.784889	7.859036
3	1.048582	1.072359
4	2.58E-07	2.42E-07
5	12.8728	12.50556
6	0.690056	0.725232
7	3.699716	3.9311
8	3.121767	3.176886
9	12.11508	12.27824
10	9.590531	9.90723
11	2.48E-08	0.003261
12	12.96066	13.68469
13	0.581154	0.541421
14	11.66076	12.48652
15	3.650202	3.670124
16	2.24E-08	0.02548
17	0.946285	1.003322
18	11.76725	12.13138
19	23.16723	23.88482
20	12.18867	12.2848
21	9.097259	9.306045
22	8.043365	7.936896
23	2.477689	2.488301
24	2.47E-08	2.56E-08
25	8.313607	8.398092
26	0.634545	0.614837
27	8.064948	8.064078

Продолжение таблицы 15

28	2.692554	2.555081
29	11.95074	12.49211
30	5.45298	5.748562
31	4.496031	4.717939
32	2.46E-08	2.55E-08
33	16.47412	16.95271
34	9.839106	10.3956
35	4.975827	5.407284
36	8.918637	9.495298
37	8.510234	8.596393

Построим статистическое распределение выборки в виде интервального вариационного ряда частот для  $E_{\text{МПО}}^{\text{модель}}$ . Минимальное значение в выборке равно 0, максимальное – 23.167, размах –  $R=23.167$ . Определим число интервалов  $k$  по формуле Стерджеса:

$$k = 1 + \log_2 n = 6.21 \quad (29)$$

примем  $k = 6$ , определим длину интервала  $h$ :

$$h = \frac{R}{k} = 3.87 \quad (30)$$

Все параметры вариационного ряда приведем в таблице 16:

Таблица 16 – Параметры вариационного ряда

$i$	Левая граница	Частота, $n_i$	Середина интервала, $x_i$	Относительная частота	Накопленная относительная частота
1	0.0	15	1.90	0.41	0.41
2	3.8	3	5.77	0.08	0.49
3	7.7	10	9.64	0.27	0.76
4	11.6	7	13.51	0.19	0.95
5	15.4	1	17.38	0.03	0.97
6	19.3	1	21.25	0.03	1.00
		Сумма=	37		1.00

Подсчитаем основные статистические характеристики по формулам:

– выборочное среднее (характеризует среднее значение признака)

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^6 x_i n_i = 7.44 \quad (31)$$

– выборочная дисперсия

$$D = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^6 (x_i - \bar{x})^2 n_i = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^6 (x_i)^2 n_i - \bar{x}^2 = 28.77 \quad (32)$$

– среднее квадратическое отклонение (характеризует степень рассеяния значений признака)

$$s = \sqrt{s^2} = 5.36 \quad (33)$$

Построим на одном рисунке (рисунок 76) гистограмму плотности относительных частот и график теоретической плотности экспоненциального распределения:

$$f(x) = \frac{1}{\lambda} e^{-\frac{x}{\lambda}}; x \geq 0 \quad (34)$$

где  $\lambda = \bar{x} = 7.44$  – параметр, оцененный по данной выборке.

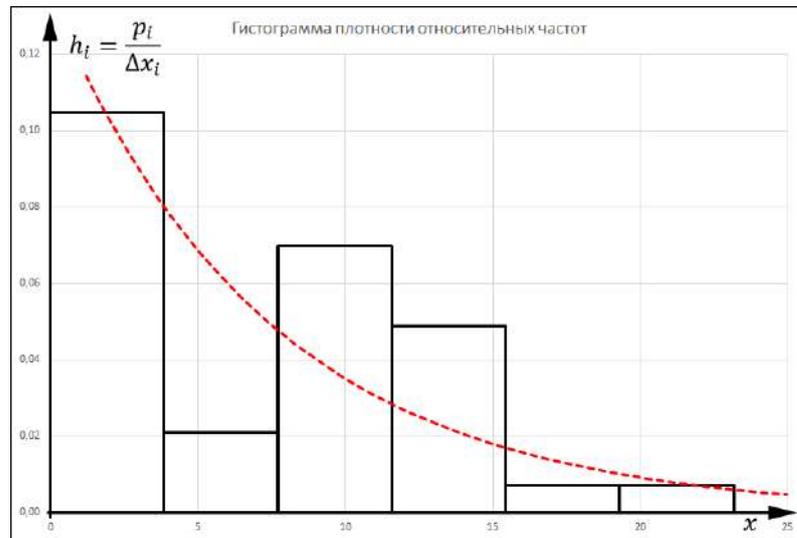


Рисунок 76 – Гистограмма плотности относительных частот и график теоретической плотности экспоненциального распределения для  $E_{\text{МПО}}^{\text{модель}}$

Примем в качестве нулевой гипотезу  $H_0$ : генеральная совокупность, из которой извлечена выборка, имеет экспоненциальное распределение, и проверим ее, пользуясь критерием Пирсона при уровне значимости 0.005.

Определим меру расхождения эмпирических частот  $n_i$  и теоретических (ожидаемых) частот  $m_i = n p_i$  по наблюдаемому значению критерия

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^6 \frac{(n_i - np_i)^2}{np_i} \quad (35)$$

Все промежуточные расчеты оформим в таблице 17:

Таблица 17 – Промежуточные расчеты для выборки  $E_{\text{МПО}}^{\text{модель}}$

$i$	$a_i$	$n_i$	$F(a_i)$	$p_i$	$np_i$	$n_i - np_i$	$\frac{(n_i - np_i)^2}{np_i}$
1	0.0	15		0.402	14.89	0.11	0.001
2	3.8	3	0.402	0.242	8.97	-5.97	3.970
3	7.7	10	0.645	0.144	5.33	4.67	4.092
4	11.6	7	0.789	0.086	3.17	3.83	4.634
5	15.4	1	0.875	0.051	1.88	-0.88	0.414
6	19.3	1	0.925	0.075	2.76	-1.76	1.122
	Суммы=	37		1.0000	37	$\chi^2 =$	<b>14.234</b>

Здесь  $F(x) = 1 - e^{-\frac{x}{\lambda}}$ ;  $x \geq 0$  - функция распределения экспоненциальной случайной величины, в которой теоретический параметр  $\lambda$  заменен точечной оценкой, полученной по выборке:  $\lambda = \bar{x} = 7.44$ . Тогда  $p_1 = P\{X \leq a_2\} = F(a_2)$ ,  $p_i = P\{a_i < X \leq a_{i+1}\} = F(a_{i+1}) - F(a_i)$  ( $i = 2, 3, 4, 5$ ),  $p_6 = P\{a_6 \leq X\} = 1 - F(a_6)$ .

Тогда наблюдаемое значение статистики  $\chi^2 = 14.234$ .

По таблице распределения  $\chi^2$  с  $6-2=4$  степенями свободы для уровня значимости 0.005 получим критическое значение  $\chi^2(\text{критич}) = 14.86$ . Так как наблюдаемое значение  $\chi^2 < \chi^2(\text{критич})$ , то гипотезу об экспоненциальном распределении выборки отвергать нельзя.

**Проведем аналогичное исследование для второй выборки значений случайной величины энергии на МПО ( $E_{\text{МПО}}^{\text{замеры}}$ ) объемом  $n=37$**

Построим статистическое распределение выборки в виде интервального вариационного ряда частот. Минимальное значение в выборке равно 0, максимальное – 23.885, размах –  $R=23.885$ . Определим число интервалов по формуле Стерджеса (29)  $k=6.21$ .

Примем количество интервалов  $k=6$ , определим длину интервала по формуле (30)  $h=3.87$ .

Все параметры вариационного ряда приведем в таблице 18.

Таблица 18 – Параметры вариационного ряда

$i$	Левая граница	Частота, $n_i$	Середина интервала, $x_i$	Относительная частота	Накопленная относительная частота
1	0.0	15	1.96	0.41	0.41
2	4.0	6	5.95	0.16	0.57
3	7.9	7	9.94	0.19	0.76
4	11.9	7	13.93	0.19	0.95
5	15.9	1	17.92	0.03	0.97
6	19.9	1	21.91	0.03	1.00
		Сумма=	37		1,00

Подсчитаем основные статистические характеристики по формулам:

– выборочное среднее (характеризует среднее значение признака) определяется по формуле (31)  $\bar{x} = 7.35$ .

– выборочная дисперсия определяется по формуле (32)  $D = 30.31$ .

– среднее квадратическое отклонение (характеризует степень рассеяния значений признака) определим по формуле (33)  $s = 5.51$

Построим на одном рисунке (рисунок 77) гистограмму плотности относительных частот и график теоретической плотности экспоненциального распределения по формуле (34), где  $\lambda = \bar{x} = 7.35$  – параметр, оцененный по данной выборке.

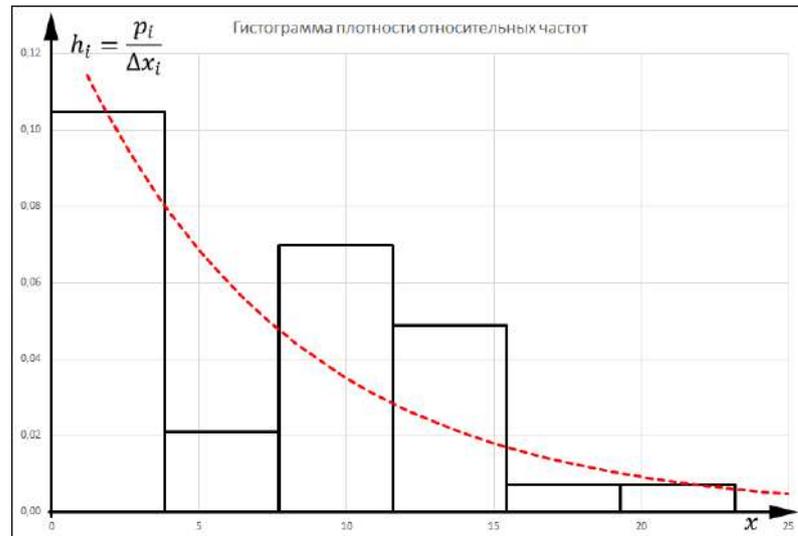


Рисунок 77 – Гистограмма плотности относительных частот и график теоретической плотности экспоненциального распределения для  $E_{\text{МПО}}^{\text{замеры}}$

Примем в качестве нулевой гипотезу  $H_0$ : генеральная совокупность, из которой извлечена выборка, имеет экспоненциальное распределение, и проверим ее, пользуясь критерием Пирсона при уровне значимости 0.05.

Определим меру расхождения эмпирических частот  $n_i$  и теоретических (ожидаемых) частот  $m_i = np_i$  по наблюдаемому значению критерия

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^6 \frac{(n_i - np_i)^2}{np_i} \quad (36)$$

Все промежуточные расчеты оформим в таблице 19.

Таблица 19 – Промежуточные расчеты для выборки  $E_{\text{МПО}}^{\text{замеры}}$

$i$	$a_i$	$n_i$	$F(a_i)$	$p_i$	$np_i$	$n_i - np_i$	$\frac{(n_i - np_i)^2}{np_i}$
1	0.0	15		0.382	14.14	0.86	0.052
2	4.0	6	0.382	0.238	8.81	-2.81	0.894
3	7.9	7	0.620	0.146	5.41	1.59	0.465
4	11.9	7	0.767	0.090	3.33	3.67	4.053
5	15.9	1	0.857	0.055	2.05	-1.05	0.534
6	19.9	1	0.912	0.088	3.26	-2.26	1.570
	Суммы=	37		1.0000	37	$\chi^2 =$	<b>7.569</b>

Здесь  $F(x) = 1 - e^{-\frac{x}{\lambda}}, x \geq 0$  - функция распределения экспоненциальной случайной величины, в которой теоретический параметр  $\lambda$  заменен точечной оценкой, полученной по выборке:  $\lambda = \bar{x} = 7.35$ . Тогда  $p_1 = P\{X \leq a_2\} = F(a_2)$ ,  $p_i = P\{a_i < X \leq a_{i+1}\} = F(a_{i+1}) - F(a_i)$  ( $i = 2, 3, 4, 5$ ),  $p_6 = P\{a_6 \leq X\} = 1 - F(a_6)$ .

Тогда наблюдаемое значение статистики  $\chi^2 = 7.569$  (сумма чисел в последнем столбце).

По таблице распределения  $\chi^2$  с  $6-2=4$  степенями свободы для уровня значимости 0.005 получим критическое значение  $\chi^2(\text{критич}) = 9.49$ . Так как наблюдаемое значение  $\chi^2 < \chi^2(\text{критич})$ , то гипотезу об экспоненциальном распределении выборки отвергать нельзя.

Итак, возможно, что обе выборки извлечены из одной и той же генеральной совокупности экспоненциального распределения.

Проверим гипотезу  $H_0$  о равенстве математических ожиданий двух генеральных совокупностей  $X_1$  и  $X_2$  при неизвестных (то есть вычисленных по выборкам) генеральных дисперсиях. Для этого используем критерий со статистикой Стьюдента:

$$t = \frac{\bar{X}_1 - \bar{X}_2}{\sqrt{\frac{n_1 * S_1^2 + n_2 * S_2^2}{n_1 + n_2 - 2}}} \sqrt{\frac{n_1 n_2}{n_1 + n_2}} \quad (37)$$

(используется для несвязанных выборок), которая при выполнении нулевой гипотезы  $H_0$  имеет распределение Стьюдента с  $(n_1 + n_2 - 2) = 72$  степенями свободы. Выберем уровень значимости 0.05, то есть вероятность ошибиться в ответе на следующий вопрос не должна превышать 5%. В нашем случае:

$$\bar{X}_1 = 7.44; \bar{X}_2 = 7.35; S_1^2 = 28.77; S_2^2 = 30.31.$$

$$\text{Разность средних значений } \bar{X}_1 - \bar{X}_2 = 0.093.$$

Вычисленное значение  $t=0.072$ . По таблицам обратного распределения Стьюдента определяется значение  $t(\text{критическое}) = 1.993$ . Видим, что вычисленное значение больше критического, следовательно, гипотеза о случайности различий должна быть отвергнута.

Проверим гипотезу  $H_0: \sigma_x^2 = \sigma_y^2$  о равенстве дисперсий двух генеральных совокупностей  $X_1$  и  $X_2$  против альтернативной гипотезы  $\sigma_x^2 < \sigma_y^2$ . Для этого используем критерий со статистикой:

$$F = \frac{S_2^2}{S_1^2} \quad (38)$$

которая при выполнении нулевой гипотезы  $H_0$  имеет распределение Фишера-Снедекора с  $n_1 - 1$  и  $n_2 - 1$  степенями свободы.

В нашем случае  $F = \frac{30.31}{28.77} = 1.054$ . Выберем уровень значимости 0.05. По таблицам Фишера-Снедекора с 36 / 36 степенями свободы получаем  $F_{\text{крит}} = 1.7$ .

Видим, что вычисленное значение меньше критического, следовательно, гипотеза о случайности различий отвергнута быть не может.

Итак, можно сделать

**Вывод:** обе выборки извлечены из одной и той же генеральной совокупности экспоненциального распределения с параметром  $\lambda = 7.4$  и однородны (рисунок 78).

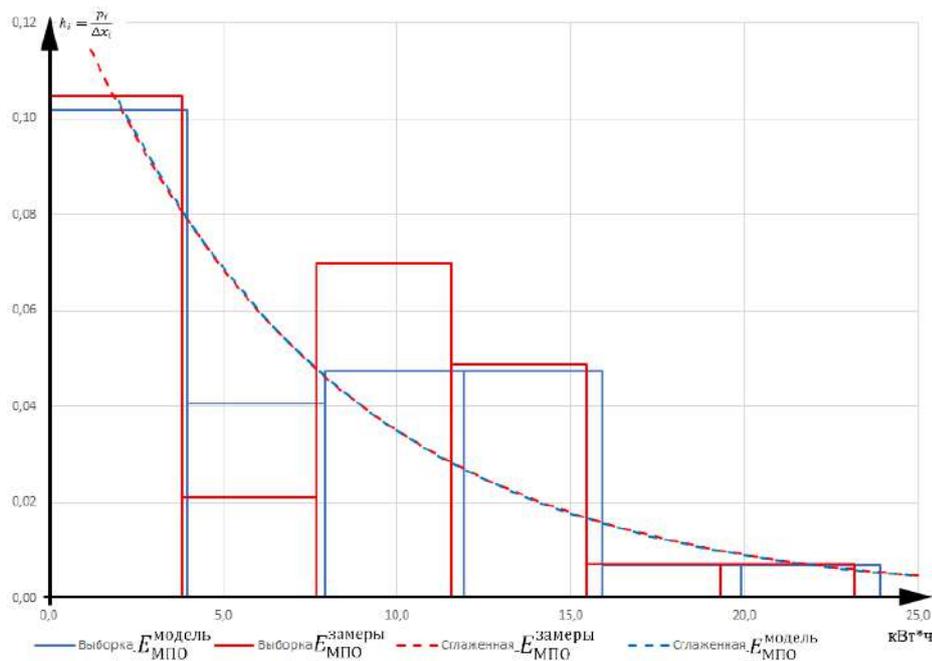


Рисунок 78 – Совмещенные гистограммы плотности относительных частот и графики теоретической плотности экспоненциального распределения для  $E_{\text{МПО}}^{\text{модель}}$  и  $E_{\text{МПО}}^{\text{замеры}}$

Относительное различие величин плотности вероятности (рисунок 79) для выборок  $E_{\text{МПО}}^{\text{модель}}$  и  $E_{\text{МПО}}^{\text{замеры}}$  определяется по формуле:

$$\Delta X(x) = \frac{\left| \frac{1}{\lambda_1} e^{-\frac{x}{\lambda_1}} - \frac{1}{\lambda_2} e^{-\frac{x}{\lambda_2}} \right|}{\frac{1}{\lambda_2} e^{-\frac{x}{\lambda_2}}} \quad (39)$$

где:

$\Delta X$  – разница между выборками  $E_{\text{МПО}}^{\text{модель}}$  и  $E_{\text{МПО}}^{\text{замеры}}$ , отнесенная к наибольшему значению;

$x_1$  – наименьшее значение  $x$ ;

$\lambda_1$  – параметр распределения  $E_{\text{МПО}}^{\text{модель}}$ ;

$\lambda_2$  – параметр распределения  $E_{\text{МПО}}^{\text{замеры}}$ .

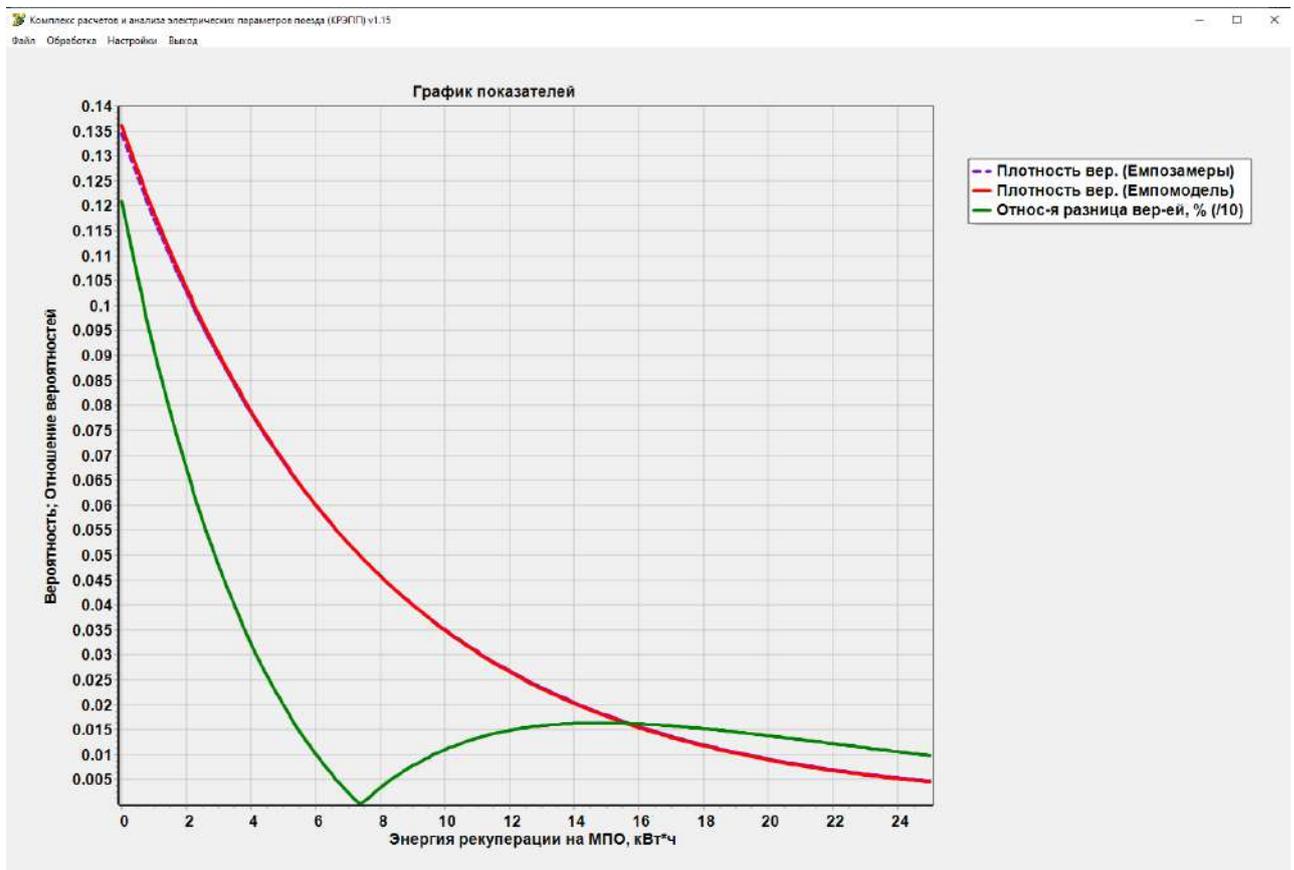


Рисунок 79 – Относительное различие величин плотности вероятности

#### 4.9 Оценка результатов по критерию Стьюдента

Верификация результатов двух совокупностей значений проводилась так же с помощью критерия Стьюдента (t-критерий). При этом сравнивались данные по энергии рекуперации, которая была использована на межпоездной обмен, полученные в ходе моделирования и при экспериментальном замере (таблица 15).

**Статистика выборки:**

Число элементов в выборке для каждого набора данных:

$$N_{\text{МПО}}^{\text{модель}} = 37 \text{ шт.};$$

$$N_{\text{МПО}}^{\text{замеры}} = 37 \text{ шт.}$$

Выборочные средние значения:

$$m_{\text{МПО}}^{\text{модель}} = 6.646 \text{ кВт}\cdot\text{ч};$$

$$m_{\text{МПО}}^{\text{замеры}} = 6.816 \text{ кВт}\cdot\text{ч.}$$

Выборочные среднеквадратические значения определяются по формулам:

$$s_{\text{МПО}}^{\text{модель}} = \sqrt{\frac{\sum |N_{\text{МПО}i}^{\text{модель}} - \mu|^2}{N_{\text{МПО}}^{\text{модель}}}} \cdot \sqrt{\frac{N_{\text{МПО}}^{\text{модель}}}{N_{\text{МПО}}^{\text{модель}} - 1}} = 5.52 \quad (40)$$

где:

$\mu$  – среднее арифметическое.

$$s_{\text{МПО}}^{\text{замеры}} = \sqrt{\frac{\sum |N_{\text{МПО}i}^{\text{замеры}} - \mu|^2}{N_{\text{МПО}}^{\text{замеры}}}} \cdot \sqrt{\frac{N_{\text{МПО}}^{\text{замеры}}}{N_{\text{МПО}}^{\text{замеры}} - 1}} = 5.681 \quad (41)$$

Степени свободы при комбинировании двух средних рассчитываются по формуле:

$$v = N_{\text{МПО}}^{\text{модель}} + N_{\text{МПО}}^{\text{замеры}} - 2 = 72 \quad (42)$$

Среднеквадратическая ошибка расхождения в наборах данных определяется по формуле:

$$s = \sqrt{\frac{(N_{\text{МПО}}^{\text{модель}} - 1)s_{\text{МПО}}^{\text{модель}^2} + (N_{\text{МПО}}^{\text{замеры}} - 1)s_{\text{МПО}}^{\text{замеры}^2}}{v}} \cdot \sqrt{\frac{1}{N_{\text{МПО}}^{\text{модель}}} + \frac{1}{N_{\text{МПО}}^{\text{замеры}}}} = 1.30 \quad (43)$$

**Уровень значимости**

Обозначим, что уровень значимости  $\alpha = 5 \%$

**Критерий значимости** определяется по формуле:

$$t = \frac{m_{\text{МПО}}^{\text{модель}} - m_{\text{МПО}}^{\text{замеры}}}{s} = 0.131 \quad (44)$$

Обозначим гипотезу, что исследуемые выборки случайных величин однородны.

**Расчет р-значения и проверка гипотезы** определяется по формуле:

$$P = 2 * (1 - pt(|t|, v)) = 0.896 \quad (45)$$

где:  $pt(x, d)$  — возвращает кумулятивное распределение вероятности для значения  $x$ .

$P \geq \alpha$  следовательно, гипотеза подтверждена, а это значит, что сравниваемые выборки однородны.

Существует вероятность 0.896, что критерий значимости больше, чем наблюдаемый критерий, при условии, что нулевая гипотеза истинна. Сравнение р-значения с уровнем значимости показывает, что альтернативная гипотеза не может быть истинной.

Выдвинем гипотезу о том, что  $m_{\text{МПО}}^{\text{модель}}$  не превышает  $m_{\text{МПО}}^{\text{замеры}}$ .

**Расчет предела критической области и проверка гипотезы** по формуле:

$$C_{\text{крит.обл.}} = \left| qt\left(\frac{\alpha}{2}, v\right) \right| = 1.993 \quad (46)$$

где:

$qt$  — Функция  $qt(p, d)$  возвращает обратное кумулятивное распределение вероятности для вероятности  $p$ .

$|t| < C_{\text{крит.обл.}}$  следовательно, нет данных, подтверждающих, что  $m_{\text{МПО}}^{\text{модель}}$  больше  $m_{\text{МПО}}^{\text{замеры}}$ , а это значит, что гипотеза о том, что  $m_{\text{МПО}}^{\text{модель}}$  не превышает  $m_{\text{МПО}}^{\text{замеры}}$  подтверждена (рисунок 80).

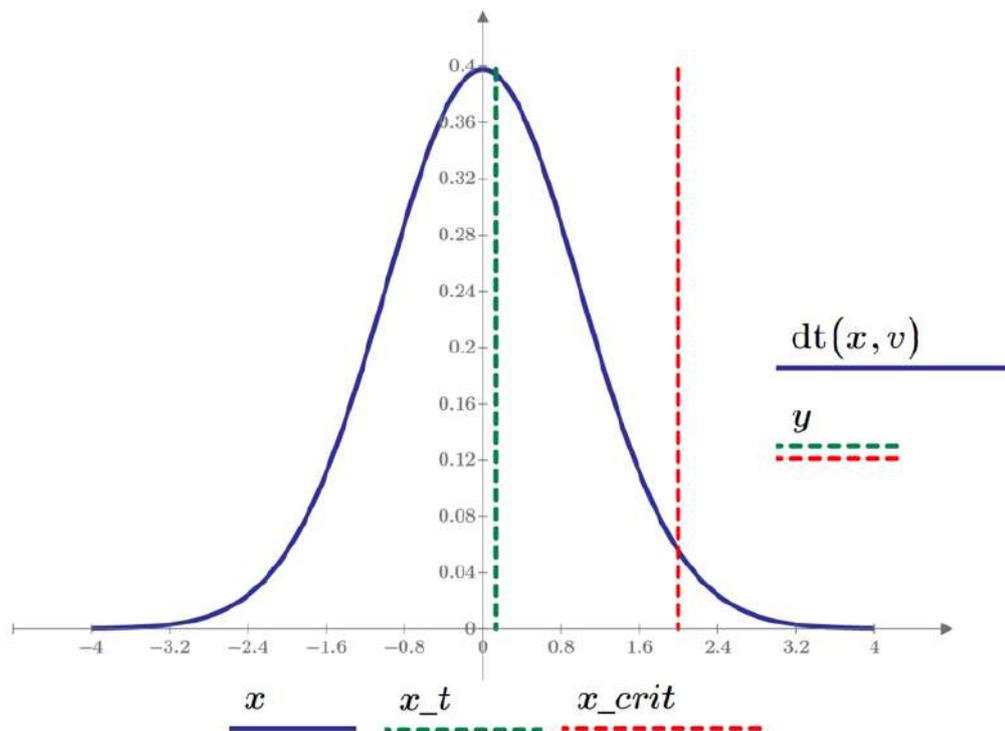


Рисунок 80 – Распределение Стьюдента (вертикальная ось – величина параметра, горизонтальная – вероятность распределения)

Из проведенного анализа можно сделать вывод, что выборки однородны.

#### 4.10 Модуль программы, предназначенный для определения энергоемкости накопителя электроэнергии, числа циклов перезаряда и срока службы

Разработанная методика определения числа циклов перезаряда НЭ строится на опыте использования накопительных элементов конкретного производителя. На рисунке 81 представлены зависимости количества циклов перезаряда для элементарного элемента, модуля и полной сборки НЭ при 50 % и 30 % разряда накопителя.

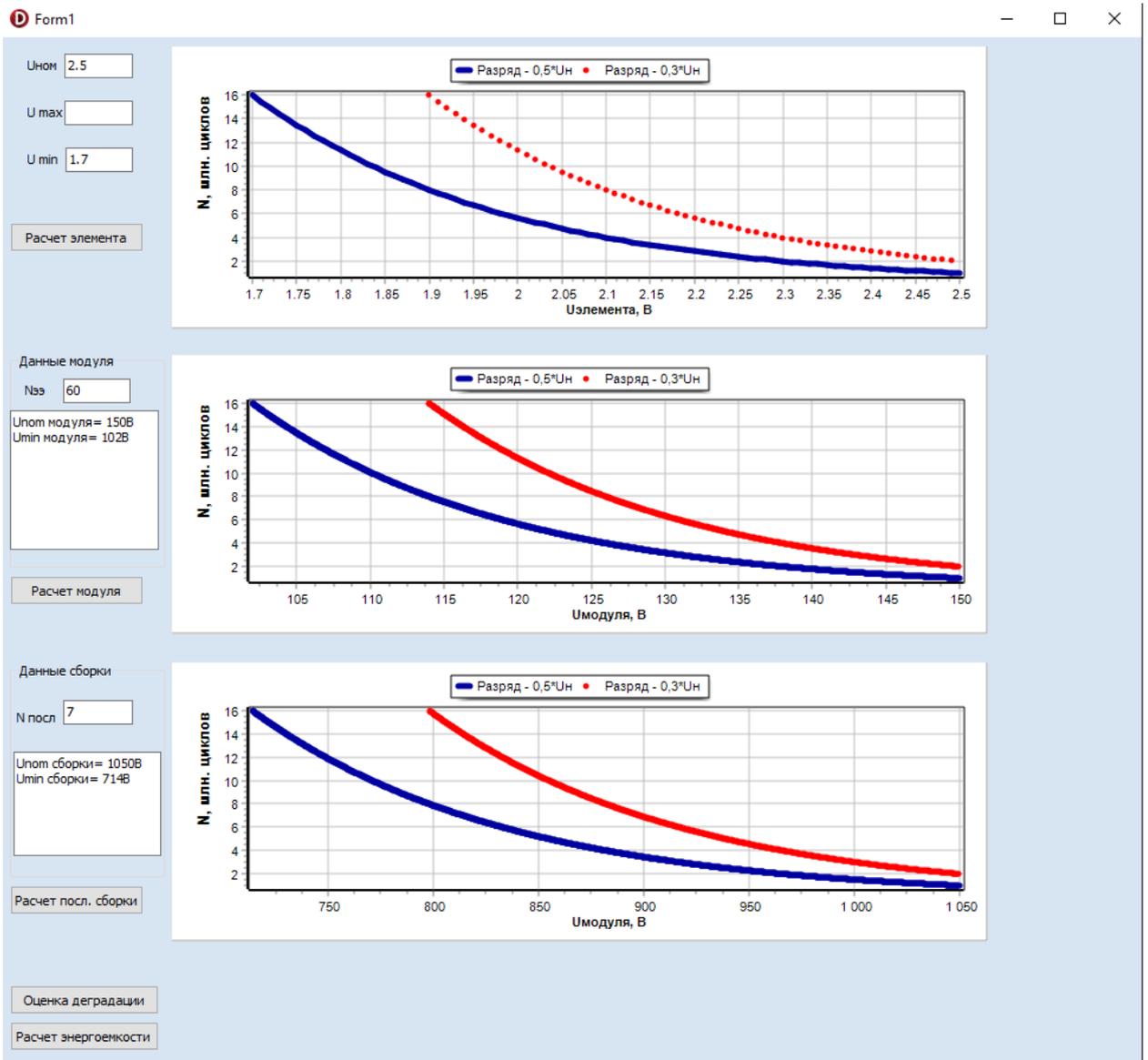


Рисунок 81 – Характеристики накопителя энергии

Для расчета числа циклов перезаряда (рисунок 82) полной сборки НЭ для конкретных условий эксплуатации была выведена следующая формула:

$$N_{ц.п.} = e^{\delta - \frac{\sigma}{N_{эз} \cdot N_{посл.} \cdot U_{эз}(A_p)}} \quad (47)$$

где:

$A_p$  – энергия, рассеянная в тормозных резисторах (или БНЭ);

$\delta$  и  $\sigma$  – 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);

$N_{эз}$  – количество элементарных элементов;

$U_{эз}$  – напряжение элементарного элемента;

$A_p$  – рабочая энергия накопителя;

$N_{\text{посл.}}$  – количество последовательно соединенных элементов.

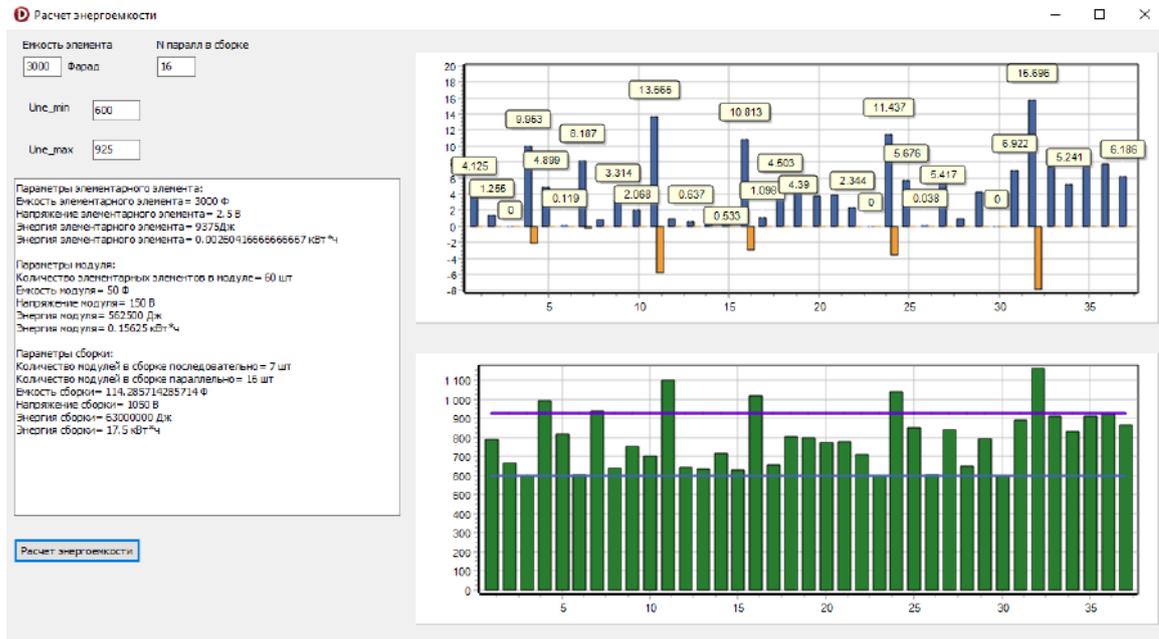


Рисунок 82 – Расчет энергоёмкости

Имитационное моделирование и данные по опытному использованию накопительных элементов позволили определить зону работы полной сборки НЭ (рисунок 83). Из полученных расчётных и эмпирических данных следует, что для ТКЛ и в настоящих условиях количество циклов перезаряда БНЭ на ЭПС составит порядка 8 млн.

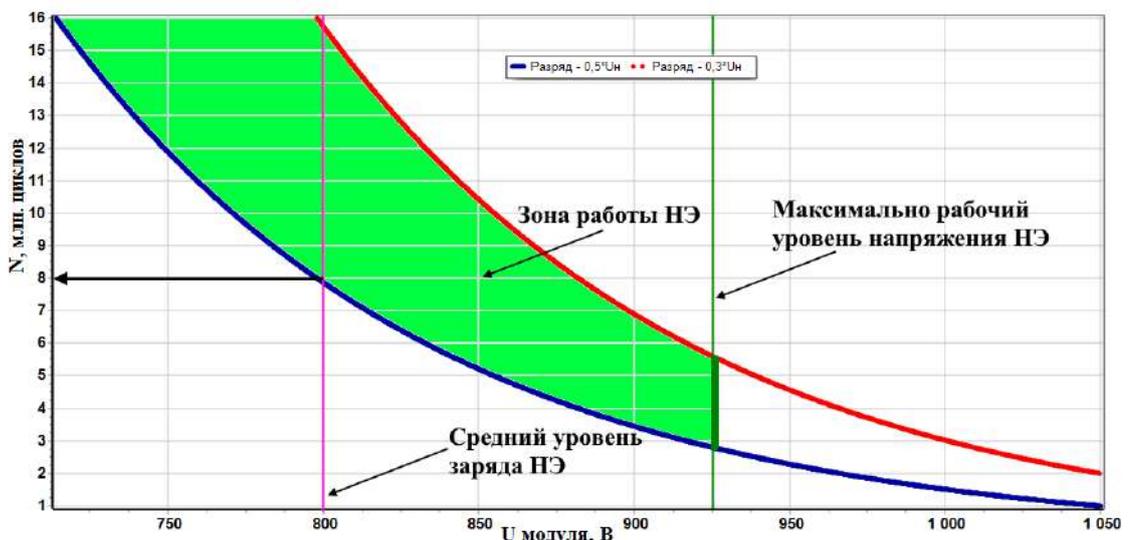


Рисунок 83 – Зависимость циклов перезаряда на сборку

Время срока службы БНЭ рассчитывается по формуле:

$$T_{с.с.} = \frac{N_{ц.п.}}{N_{ц.п.}^{год}} = \frac{N_{ц.п.}}{m_{о.п.}^т \cdot n_{м}^д \cdot 365} = 31 \text{ год} \quad (48)$$

где:

$N_{ц.п.}$  – количество циклов перезаряда;

$N_{ц.п.}^{год}$  – количество циклов перезаряда в год;

$m_{о.п.}^т$  – количество торможений за один проезд ветки метро от начала до конца;

$n_{м}^д$  – количество совершенных маршрутов в день.

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

## **5 СХЕМА И КОНСТРУКЦИЯ БОРТОВОГО НАКОПИТЕЛЯ ЭНЕРГИИ ДЛЯ ЭПС МЕТРО**

Определение параметров емкости накопителя электроэнергии целесообразно следует начать с выбора технического назначения БНЭ.

Схема и конструкция БНЭ должна обеспечивать следующие основные функции:

- накопление избыточной энергии рекуперативного торможения;
- повторное использование накопленной энергии при работе двигателя электроподвижного состава в режиме «пуск»;
- выравнивание графика потребления энергии и уменьшение наложения токов с целью повышения эффективности СТЭ [89, 90];
- автономное движение ЭПС в тупиках, ангарах, депо, а также при аварийном движении при выводе из тоннеля (когда нет электроснабжения в контактной сети).

Следует отметить, что данный функционал БНЭ должен выполнять при интеграции в существующую силовую схему ЭПС при минимальных изменениях.

### **5.1 Электрическая силовая схема ЭПС с бортовым НЭ**

На данный момент большинство линий Московского метрополитена имеет в своем парке поезда, способные рекуперировать электроэнергию. Учитывая конструктив, БНЭ выгоднее всего устанавливать либо на электровагоны метрополитена типа 81-775/776/777 «Москва-2020», 81-765/766/767 «Москва» или аналоги типа 81-725.1/726.1/727.1 «Балтиец» (Петербургский метрополитен). Также стоит отметить, что полученный опыт в ходе проведенных исследований позволит в дальнейшем производить расчеты и внедрение накопителей энергии и на поездах железных дорог, трамваях, троллейбусах.

Проанализировав систему электроснабжения электропоезда, можем сделать вывод о том, что бортовой накопитель энергии необходимо включить параллельно

в цепь с тормозными резисторами, согласно схеме (рисунки 84 – 85) между выводом от «чѐпера» реостатного контура и силовым кабелем обратного тока к колѐсным парам.

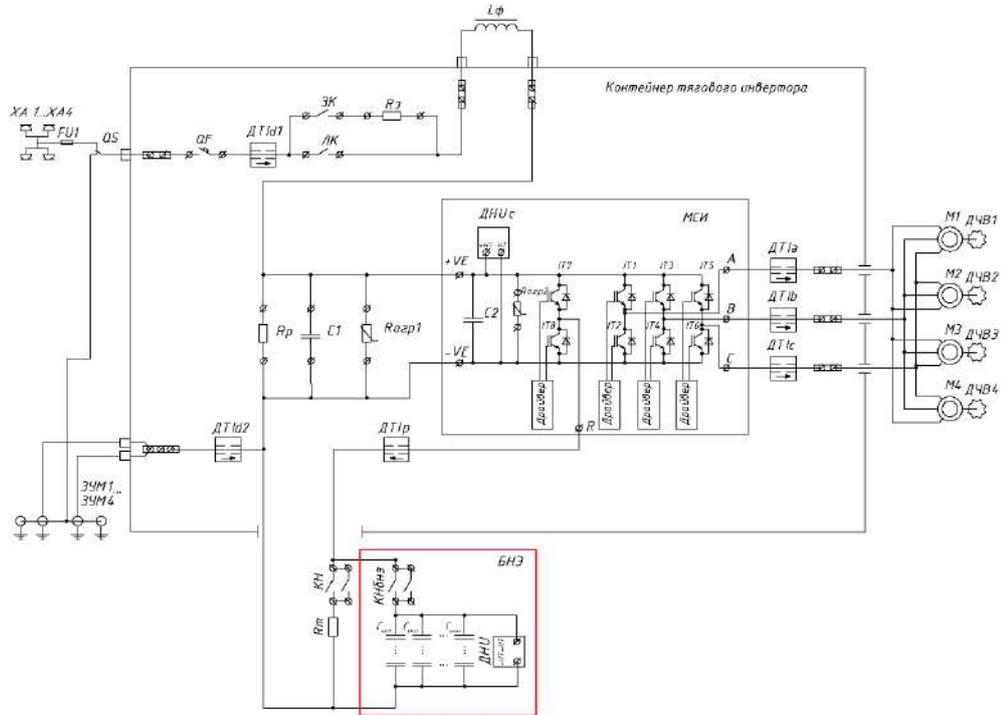


Рисунок 84 – Принципиальная схема подключения БНЭ в составе силового оборудования ЭПС

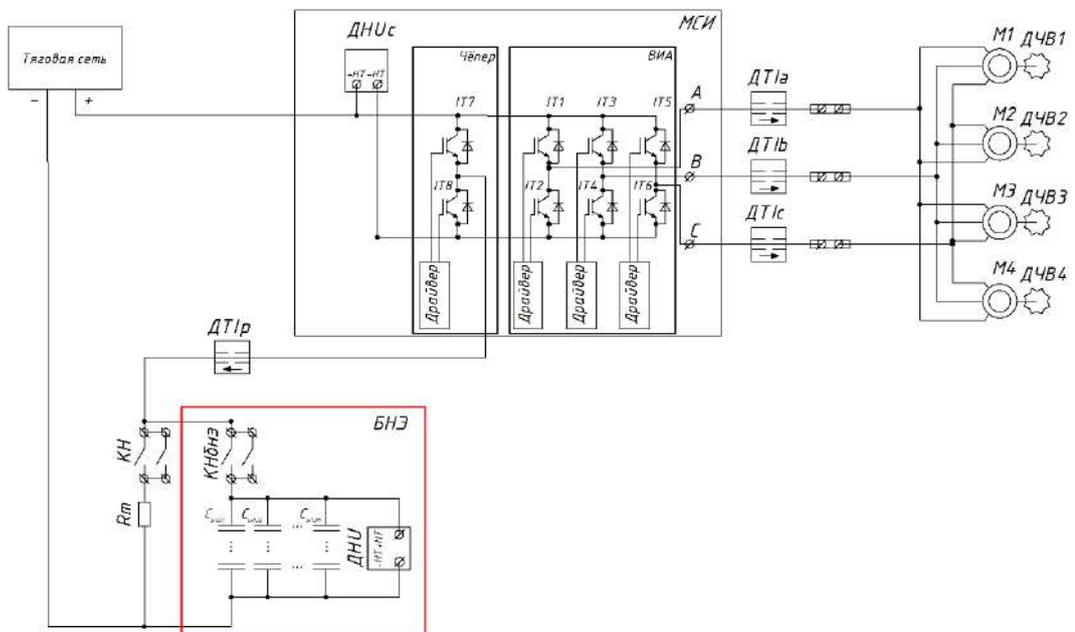


Рисунок 85 – Укрупненная схема электроэнергетического взаимодействия тяговых двигателей ЭПС с БНЭ

Предполагается, что бортовой накопитель энергии будет работать по следующему алгоритму (рисунок 86):

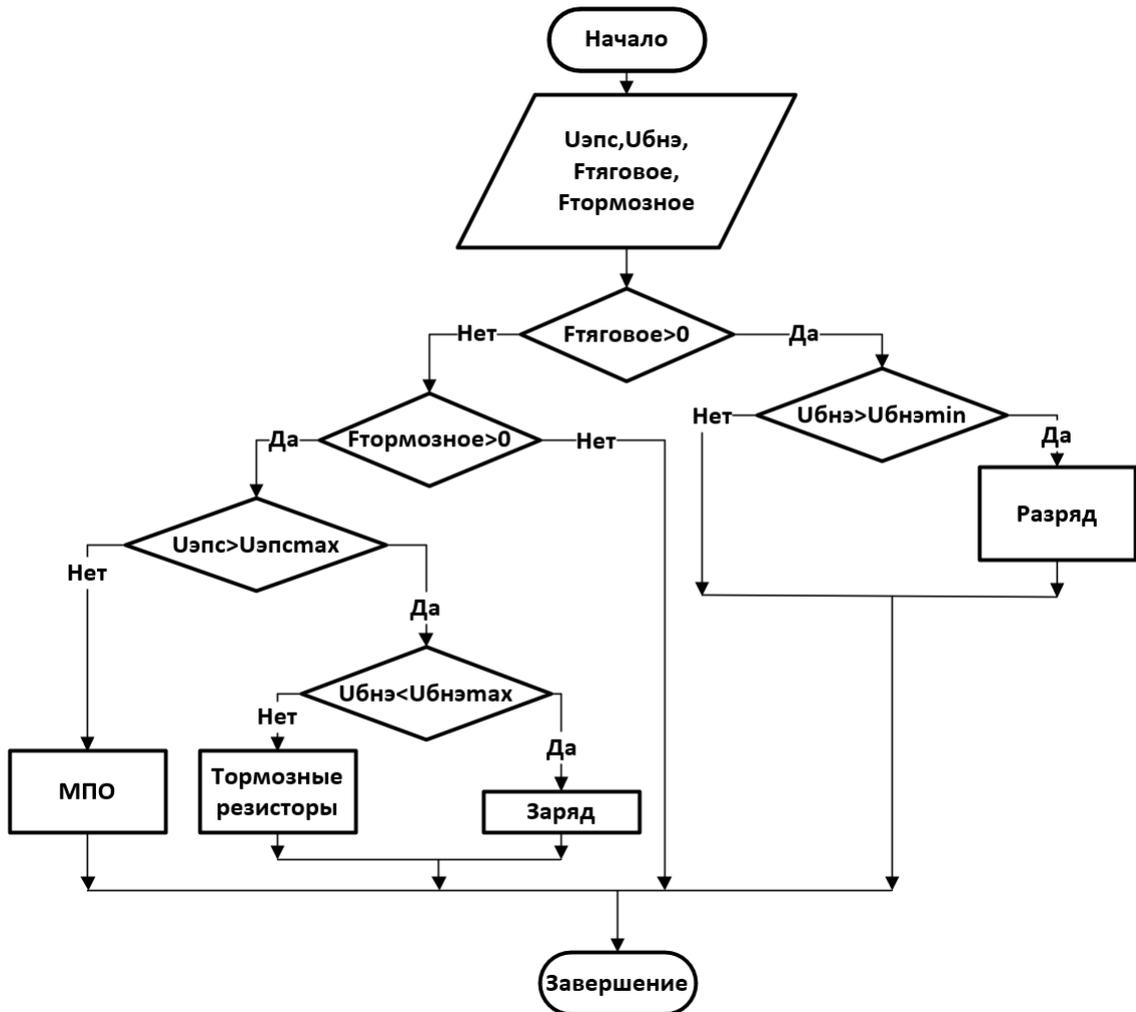


Рисунок 86 – Блок-схема алгоритма работы БНЭ

В режиме пуска, когда на ЭПС подается тяговое усилие ( $F_{\text{тяговое}}$ ), аппаратура управления БНЭ непрерывно в реальном времени сравнивает текущее состояние напряжения на накопителе ( $U_{\text{бнэ}}$ ) с минимальным рабочим напряжением ( $U_{\text{бнэmin}} = 600 \text{ В}$ ), если  $U_{\text{бнэ}} > U_{\text{бнэmin}}$ , то для пуска движения поезда используется энергия, запасенная в БНЭ. Как только наступает момент, когда  $U_{\text{бнэ}} = U_{\text{бнэmin}}$ , накопитель отключается и электроэнергия начинает поступать из тяговой сети.

Когда поезду сообщается тормозное усилие ( $F_{\text{тормозное}}$ ), и выполняется условие  $U_{\text{эпс}} < U_{\text{эпсmax}}$  ( $U_{\text{эпсmax}} = 925 \text{ В}$ ), то энергия рекуперативного торможения распределяется на МПО, если  $U_{\text{эпс}} > U_{\text{эпсmax}}$ , то энергия рекуперации через «чёрп» может сохраниться в БНЭ, если условие  $U_{\text{бнэ}} < U_{\text{бнэmax}}$

соблюдается, а если не соблюдается, то энергия рассеивается в тормозных резисторах.

Стоит отметить, что аппаратура управления работы накопителя по описанному алгоритму непрерывно следит за параметрами движения поезда.

## **5.2 Описание конструктивной части бортового накопителя энергии**

Проанализировав типы существующих накопителей [115], которые потенциально могут подходить для работы непосредственно на борту подвижного состава, было определено, что по массогабаритным, циклам заряда-разряда, мощности, энергоемкости и пр. параметрам наиболее перспективными для данной задачи представляются НЭ на базе суперконденсаторных элементов [75, 82].

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).

После анализа рынка производителей суперконденсаторов, предпочтительно была выявлена Российская компания «ТЭЭМП», которая производит аккумулирующие элементы на базе суперконденсаторов собственной технологии со всем технологическим процессом, находящимся в России.

Наиболее подходящим модулем, по перечисленным выше характеристикам, является МО-150В50Ф-0-3 [53] (рисунки 87 – 90, таблица 20).



Рисунок 87 – Внешний вид суперконденсатора типа MO-150B50Φ-0-3

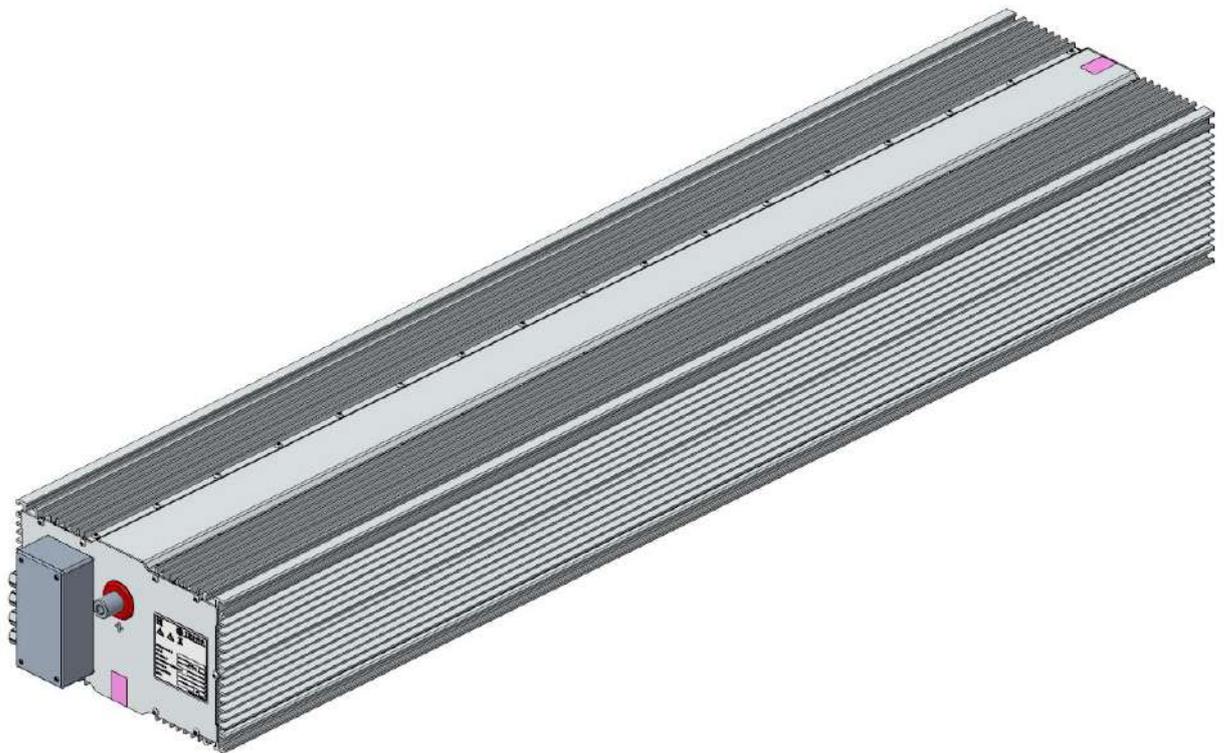


Рисунок 88 – 3D чертеж с соблюдением габаритных размеров суперконденсатора типа MO-150B50Φ-0-3

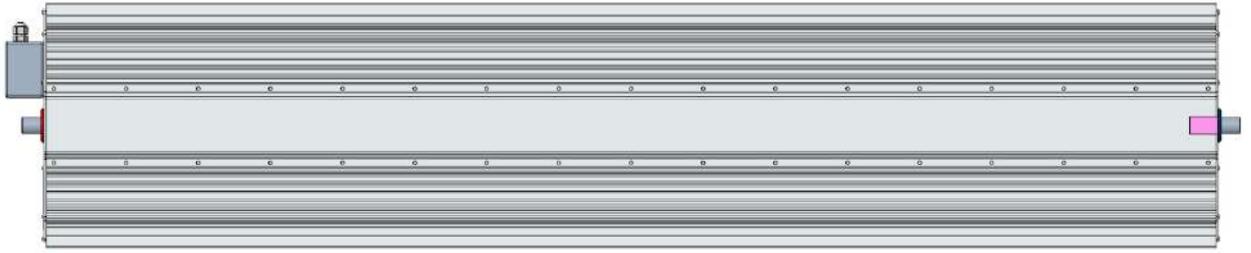


Рисунок 89 – 3D чертеж с соблюдением габаритных размеров суперконденсатора типа MO-150B50F-0-3 (вид сверху)

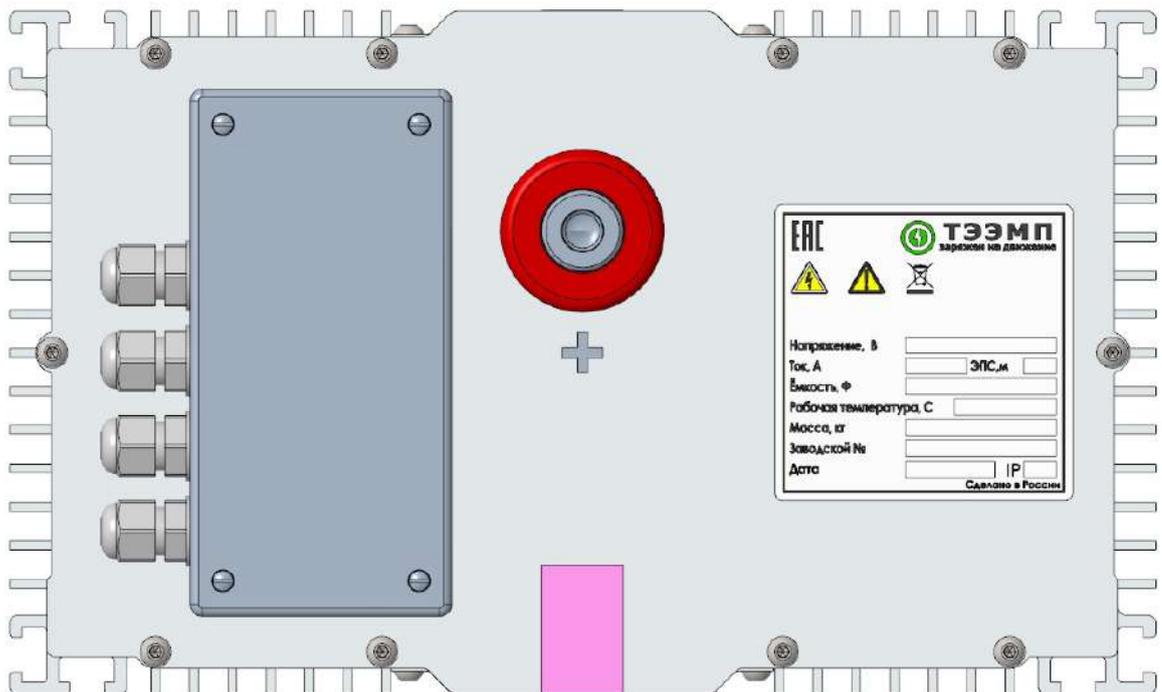


Рисунок 90 – 3D чертеж с соблюдением габаритных размеров суперконденсатора типа MO-150B50F-0-3 (вид спереди)

Таблица 20 – Основные характеристики модуля [53]

Технические характеристики	Суперконденсатор типа MO-150B50F-0-3
Номинальная ёмкость, Ф	50
Номинальное напряжение, В	150
Эквивалентное последовательное сопротивление в начале ресурса, мОм	не более 27,6
Параметр отклонения фактического значения емкости от номинального, %	0...20
Показатель «сохранности» напряжения (72 часа), %	не менее 90
Рабочая температура окружающей среды, °С	-60...+65
КПД по энергии, %	не менее 94
Габариты, мм	998±5 x 283 x 168.4
Масса, кг	53

С учетом падения напряжения на внутреннем сопротивлении и деградации характеристик при эксплуатации требуется следующая сборка модулей:

- потребная емкость накопителя (в начале эксплуатации) 114.2 Ф;
- схема подключения 7s16p (7 модулей последовательно в группу, 16 групп параллельно);
- количество модулей 112 шт.;
- масса сборки 5936 кг;
- полезная энергоемкость  $6 \text{ кВт}\cdot\text{ч} \cdot 3600 \text{ с} = 21\,600 \text{ кДж}$ .

### 5.3 Размещение БНЭ в подвагонном пространстве ЭПС

При внедрении бортовых накопителей энергии следует учитывать ограниченность места для их установки [79]. Особенно важно это учитывать для вагонов метрополитена, так как габариты поезда должны отвечать жестко определенным требованиям, исходя из особенностей тоннелей, где они эксплуатируются. При проведении обследования вагонов типа 81-765/766/767 «Москва», и 81-775/776/777 (рисунки 91 – 92) было выявлено, что наилучшее место для их установки находится в подвагонном пространстве неоторных промежуточных (НП) вагонов типа 81-767 и 81-777. На каждом из двух НП вагонов есть свободное место (рисунок 93), позволяющее разместить накопители энергии в виде каскада из модулей суперконденсаторов типа МО-150В50Ф-0-3 и при этом не мешая работе уже установленных устройств, соответствует следующим параметрам:  $4 \cdot (2346 \cdot 1829 \cdot 676 \text{ мм})$  (рисунки 91 – 98).



Рисунок 91 – Обследование подвагонного пространства немоторного вагона, определение свободного места для размещения накопителей энергии. Свободное место вблизи рамы тележки справа

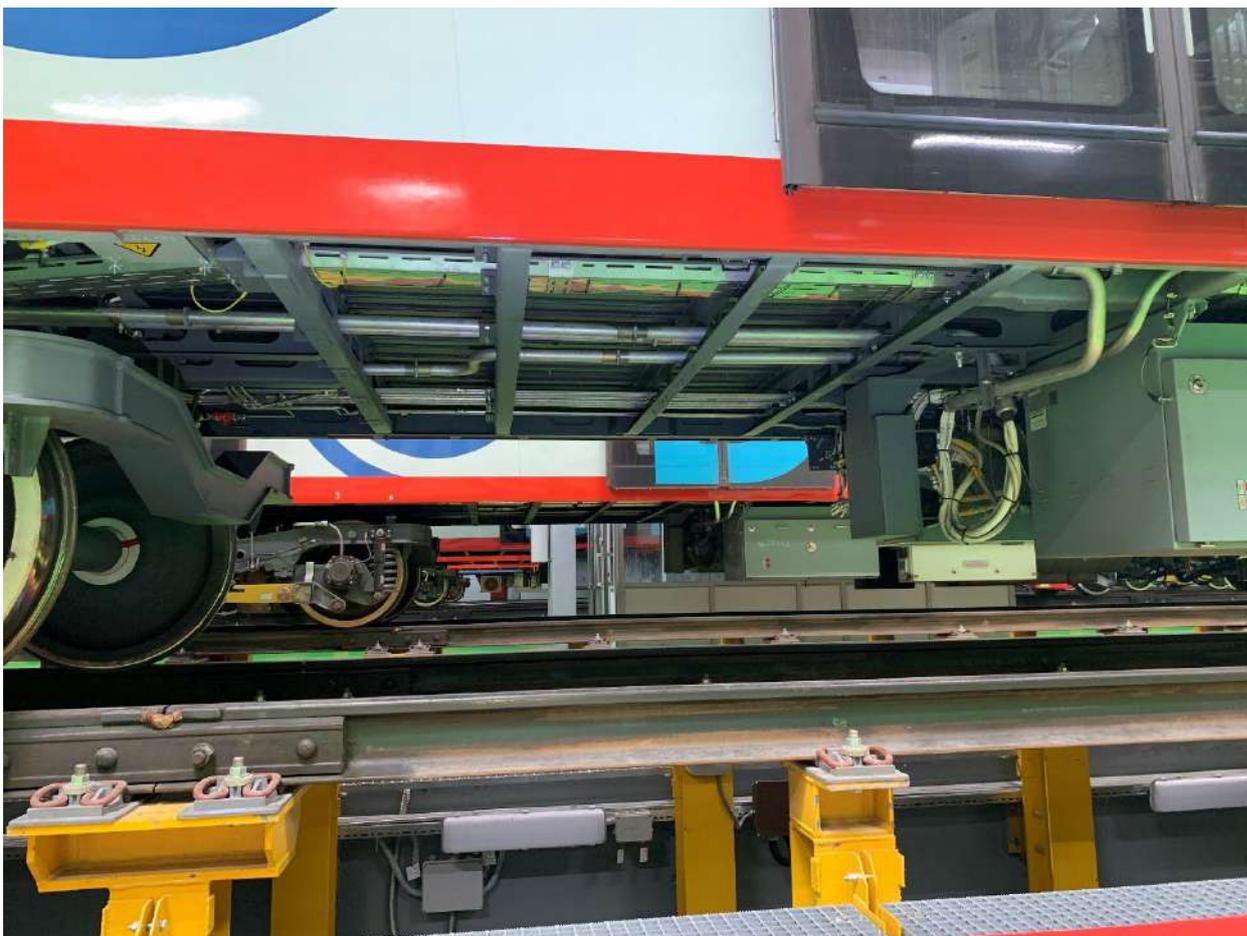


Рисунок 92 – Обследование подвагонного пространства немоторного вагона, определение свободного места для размещения накопителей энергии. Свободное место вблизи рамы тележки слева

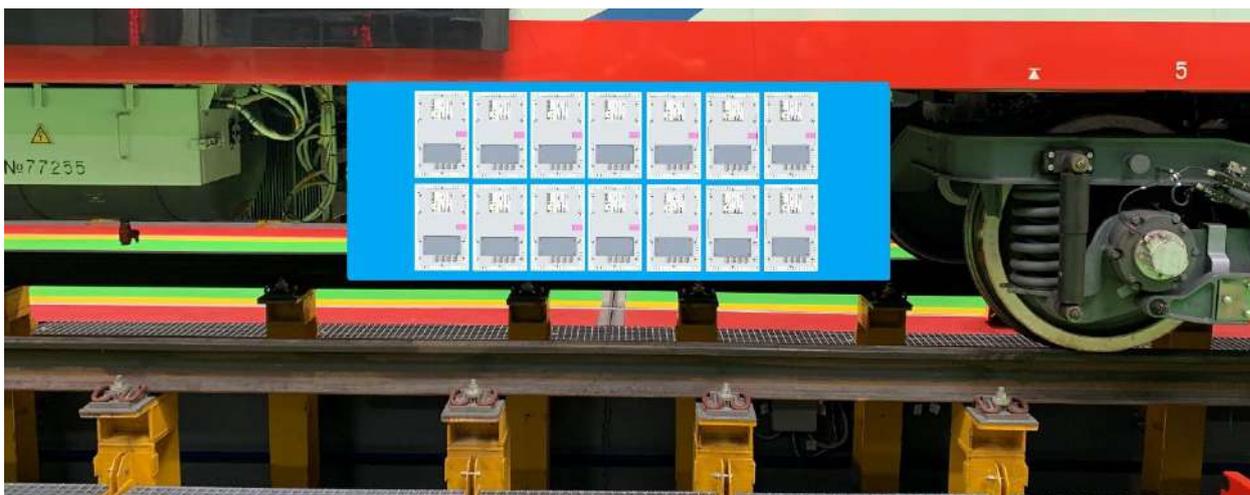


Рисунок 93 – Графический монтаж расположения БНЭ типа МО-150В50Ф-0-3 с соблюдением габаритных размеров

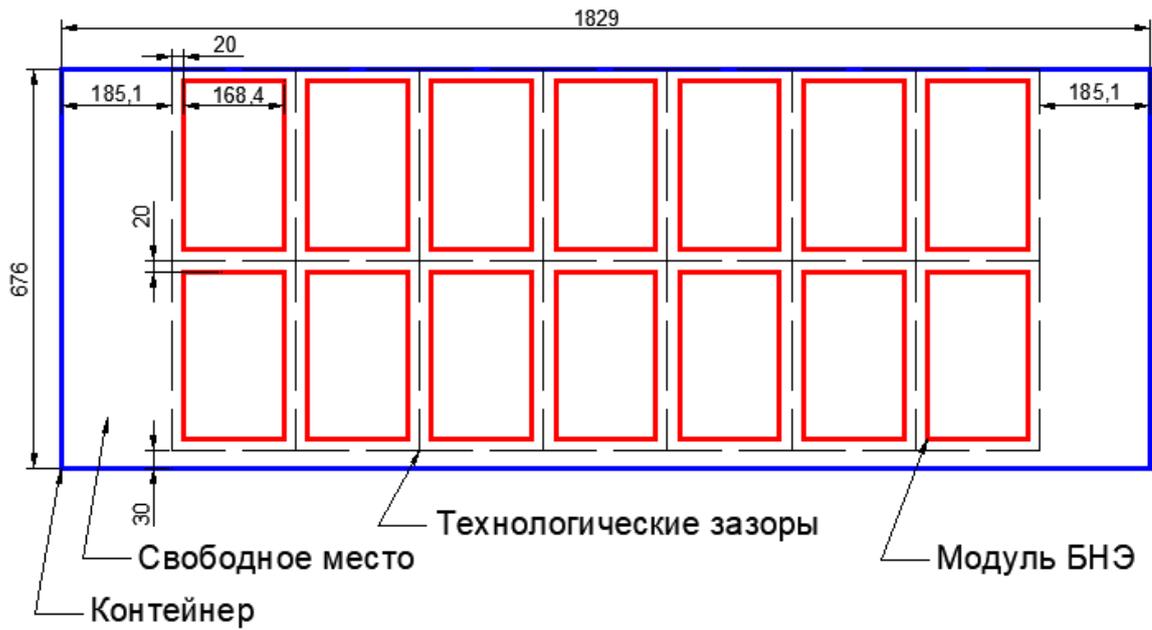


Рисунок 94 – Габаритный чертеж БНЭ и контейнера (Вид спереди. Размеры в мм)

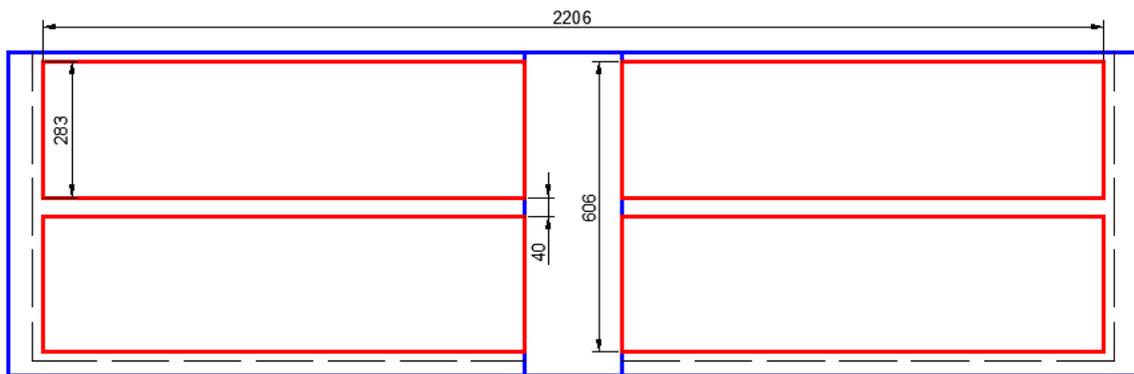


Рисунок 95 – Габаритный чертеж БНЭ и контейнера (Вид сбоку. Размеры в мм)

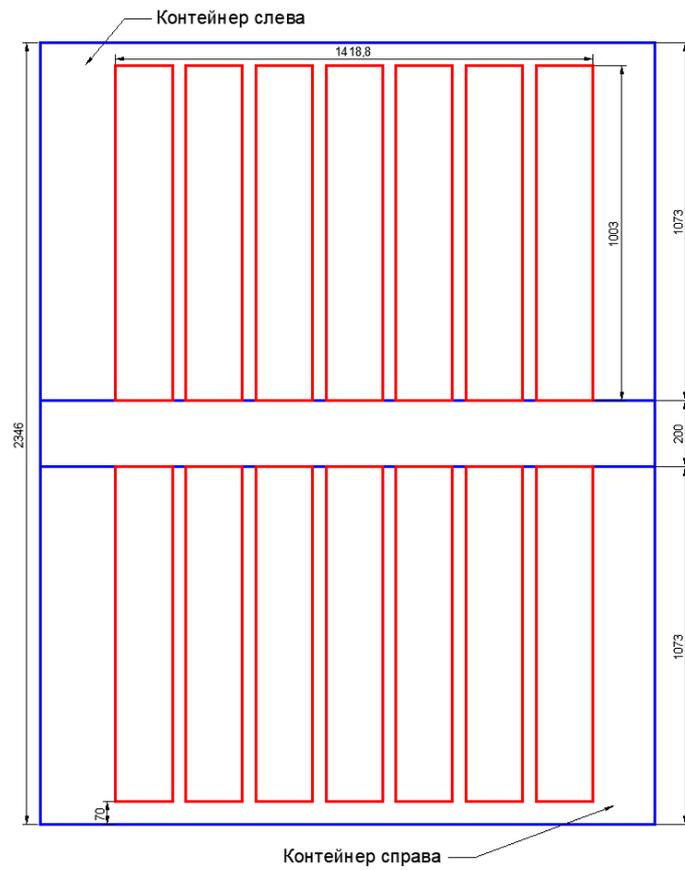


Рисунок 96 – Габаритный чертеж БНЭ и контейнера (Вид сверху. Размеры в мм)

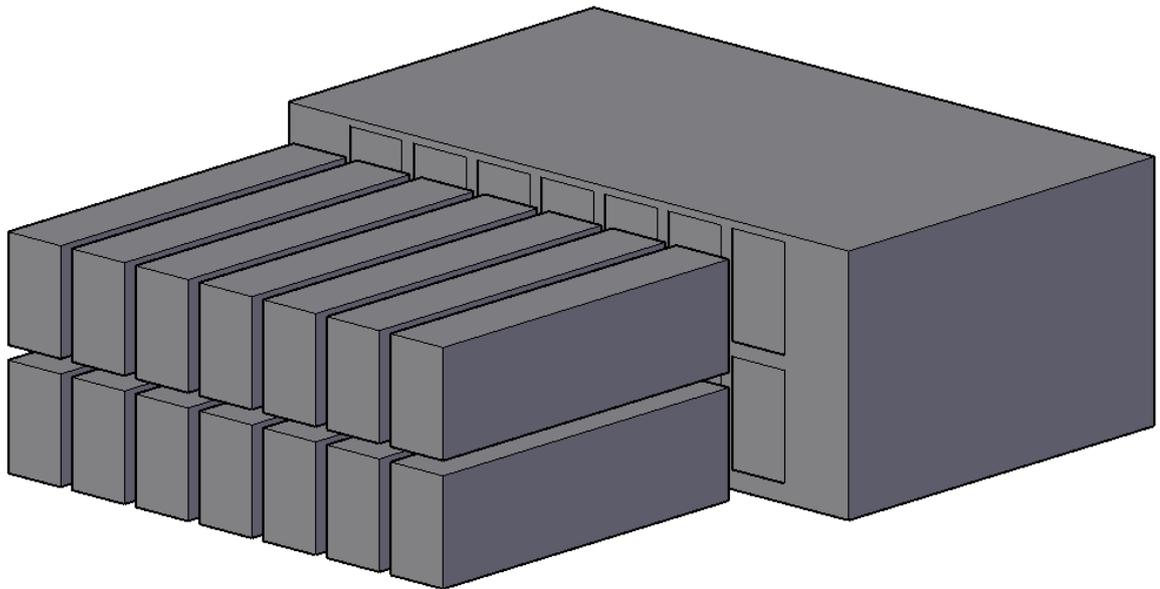


Рисунок 97 – Габаритный чертеж БНЭ и контейнера (Вид 3D)

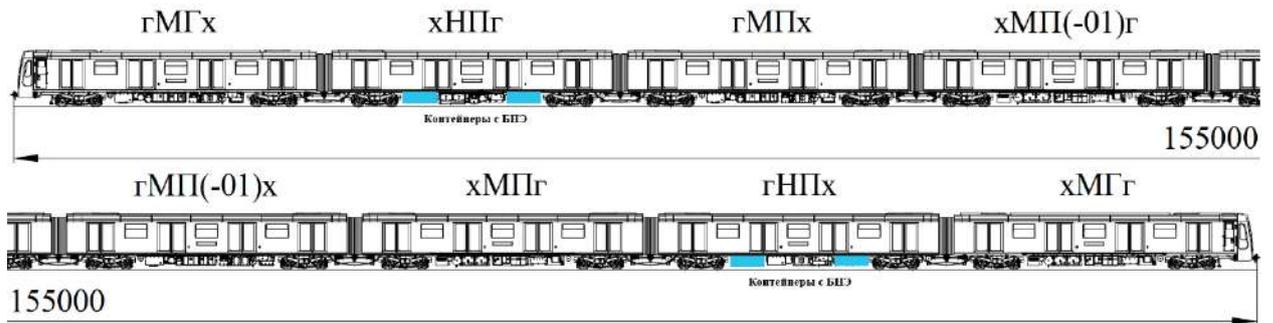


Рисунок 98 – Схематичное расположение контейнеров с БНЭ на вагонах ЭПС

#### 5.4 Проверка параметров БНЭ для автономного хода ЭПС

Возможность автономного хода позволит вывести на качественно новый уровень безопасность движения ЭПС в аварийных ситуациях [97], а также при маневрах в депо.

Из результатов имитационного моделирования и графиков (рисунки 34 – 35), полученных при проведении экспериментальных замеров электротехнических параметров движения ЭПС, удалось определить, что поезд для разгона до 30 км/ч потребляет 6 кВт·ч энергии, при этом он проезжает 40 метров в режиме тяги и далее двигается в режиме выбега.

##### Исходные данные для расчета

Исходные данные для расчёта приведены в таблицах 2 – 5 и на рисунках 30 – 31.

##### Тяговый расчёт

Тяговая характеристика вагона – зависимость силы тяги  $P$  (определяется по формуле (48) на колесах от скорости движения  $v$  (км/ч) (рассчитывается по формуле (49) – определяется по тяговой характеристике электродвигателя с учетом характеристик редуктора и диаметра колеса [21]).

$$P = \frac{2Mi_p\eta_p}{D} (H) \quad (49)$$

где:

$M$  – момент на валу электродвигателя (Нм);

$i_p$  – передаточное отношение редуктора;

$\eta_p$  – КПД редуктора;

$D$  – диаметр колеса по кругу катания (м).

$$v = \frac{0.06\pi Dn}{i_p} \quad (50)$$

где:

$n$  – частота вращения электродвигателя (об/мин).

Сила тяги на колесах не может быть больше силы тяги, обеспечиваемой сцеплением колеса с рельсами.

Сила тяги по сцеплению колеса с рельсами  $P_c$  определяется по формуле:

$$P_c = G_c \varphi \quad (51)$$

где:

$G_c$  – нагрузка на рельсы от колесной пары;

$\varphi$  – коэффициент сцепления колеса с рельсами.

Коэффициент сцепления колес с рельсами в зависимости от скорости в тяговом режиме определяется по формуле:

$$\varphi = \frac{25}{100 + v} \quad (52)$$

Расчётные тяговые характеристики поездов при номинальной пассажирской нагрузке имеют вид (рисунок 99, [28]):

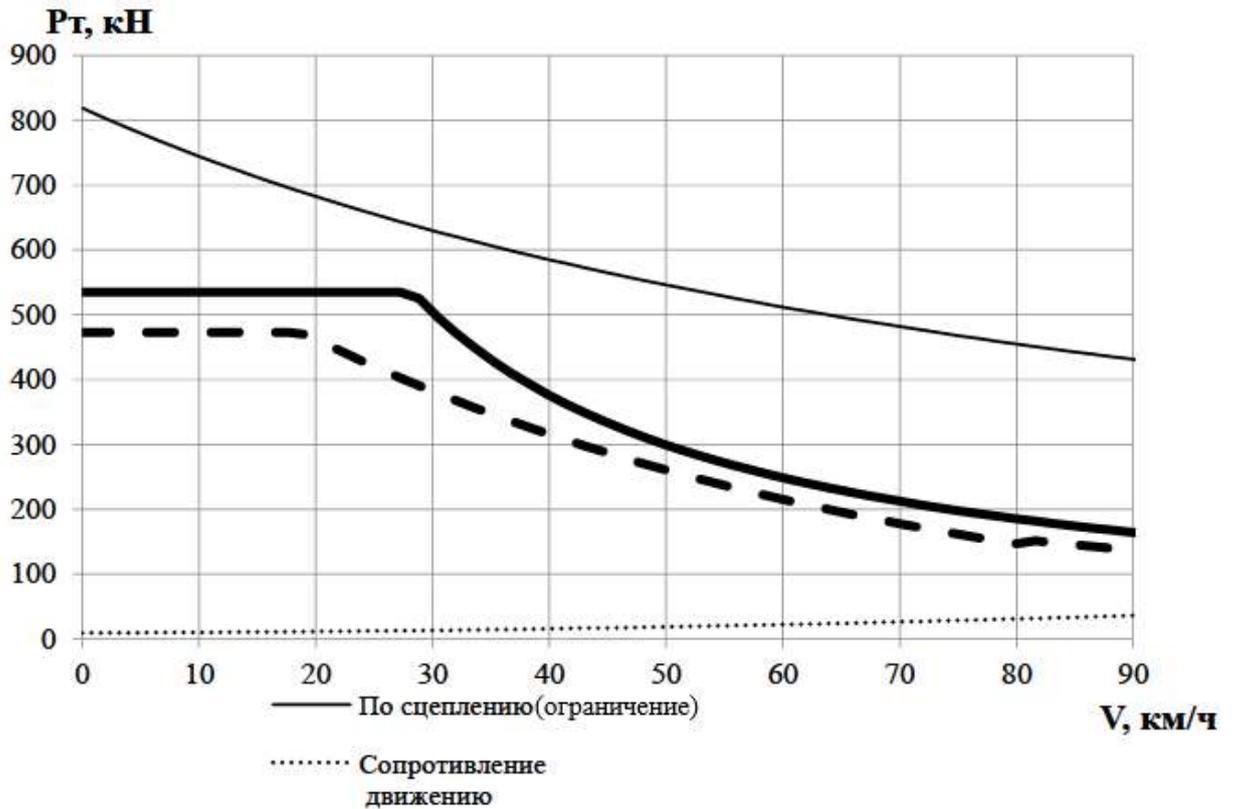


Рисунок 99 – Расчетная тяговая характеристика состава 81-765/766/767 «Москва»

### Расчёт характеристик процесса разгона

Движение вагона определяется вторым законом Ньютона по формуле (52) или (53):

$$G_B a = P - W \quad (53)$$

где:

$G_B$  – масса поезда с учетом коэффициента вращающихся масс;

$a$  – ускорение вагона;

$P$  – движущая сила (сила тяги);

$W$  – сила сопротивления.

или

$$a = \frac{P - W}{G_B} \quad (54)$$

Основное сопротивление движению поезда в тяговом режиме рассчитывается по формуле:

$$W = w_0 G \quad (55)$$

где  $w_0$  – основное удельное сопротивление движению поезда в тяговом режиме, определяемое по формуле [21]:

$$w_0 = 2.05 + 0.0097v + \frac{C_B v^2}{G} \quad (56)$$

При выбеге по формуле:

$$w_{0x} = 2.5 + 0.025v + \frac{C_B v^2}{G} \quad (57)$$

где:  $G$  – масса вагона;

$C_B$  – обобщенный коэффициент воздушного сопротивления; значения коэффициента в зависимости от количества вагонов и типа исполнения тоннеля приведены в таблице 21.

Таблица 21 – Значения обобщенного коэффициента воздушного сопротивления [21]

Характеристика тоннеля	Количество вагонов в поезде						
	2	3	4	5	6	7	8
Ребристый тоннель	1.516	1.823	2.031	2.295	2.474	2.674	2.831
Гладкий тоннель	1.165	1.436	1.646	1.852	2.013	2.192	2.328
Открытая трасса	0.471	0.510	0.549	0.575	0.598	0.628	0.657

Интегрируя общее уравнение движения, можно определить скорость и пройденный путь за заданный промежуток времени. На практике ввиду сложных аналитических выражений для сил тяги и сил сопротивления задача процесса разгона решается численным интегрированием.

Скорость движения от 0 до  $v_{\max}$  разбивается на интервалы с шагом  $dv$ .

При расчёте разгона шаг был равен  $dv = v_{\max}/50$ , при расчёте торможения шаг составлял  $dv = v_T/400$ .  $v_T$  – скорость начала торможения.

Ускорение при скорости  $v_i$  определяется как:

$$a_i = \frac{P_i - W_i}{G_B} \quad (58)$$

Если  $a_i > a_{\max}$ , то  $a_i = a_{\max}$

Где  $P_i$  и  $W_i$  – сила тяги и сила сопротивления при скорости  $v_i$ .

При движении от  $v_i$  до  $v_{i+1}$  время движения определяется по формуле:

$$t_i = \frac{2(v_{i+1} - v_i)}{a_i + a_{i+1}} \quad (59)$$

Время движения от 0 до  $v_{i+1}$  составит:

$$T_{i+1} = \sum_1^{i+1} t_i \quad (60)$$

Среднее ускорение разгона  $A_i$  от 0 до скорости  $v_{i+1}$  будет равно:

$$A_{i+1} = \frac{v_{i+1}}{T_{i+1}} \quad (61)$$

Тогда путь разгона от 0 до скорости  $v_{i+1}$  определится как:

$$S_{i+1} = \frac{A_{i+1} T_{i+1}^2}{2} = \frac{v_{i+1}^2}{2A_{i+1}} \quad (62)$$

Характеристики разгона при максимальной пассажирской нагрузке поездов различной составности представлены на рисунках 100 – 101 [28] и сведены таблицу 22.

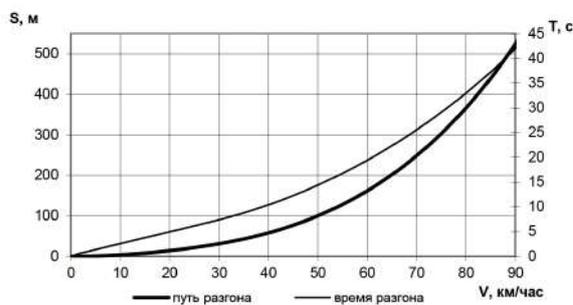


Рисунок 100 – Путь и время разгона до максимальной скорости состава МГ-НП-МП-МП-МП-НП-МГ

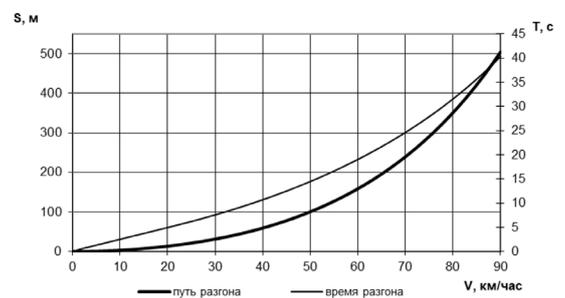


Рисунок 101 – Путь и время разгона до максимальной скорости состава МГ-НП-МП-МП-МП-НП-МГ

Таблица 22 – Характеристики разгона [28]

Наименование параметра	Модель вагонов метрополитена 81-765/766/767	
	МГ-НП-МП-МП-МП-МП-НП-МГ	МГ-НП-МП-МП-МП-НП-МГ
Масса состава при номинальной пассажирской загрузке, т	440.9	385.6
Время разгона до скорости, с		
30 км/ч	7.44	7.52

Продолжение таблицы 22

60 км/ч	19.81	19.02
80 км/ч	33.77	31.55
Путь разгона до скорости 80км/ч, м	375.2	350.5

### Оценка показателей ЭПС движения по типовому перегону

В данном случае необходимо оценить запас энергии БНЭ и возможное расстояние прохождения ЭПС на автономной тяге.

Результаты расчёта [28] при заданной максимальной скорости движения по перегону  $V = 80$  км/час приведены на рисунках 102 – 103.

Результаты времени движения по перегону [28] приведены в таблице 23.

Таблица 23 – Время движения по типовому перегону в ребристом тоннеле 8-ми вагонного состава [28]

Наименование параметра	Состав поезда	
	МГ-НП-МП- МП-МП-МП- НП-МГ	МГ-НП-МП-МП- МП-НП-МГ
<i>Движение по перегону с выбегом до начала торможения</i>		
Время движения по участку, с	103.7	102.10
Средняя скорость движения по участку, км/ч	59.0	59.9
Средняя скорость движения с учетом остановки	49.5	50.12

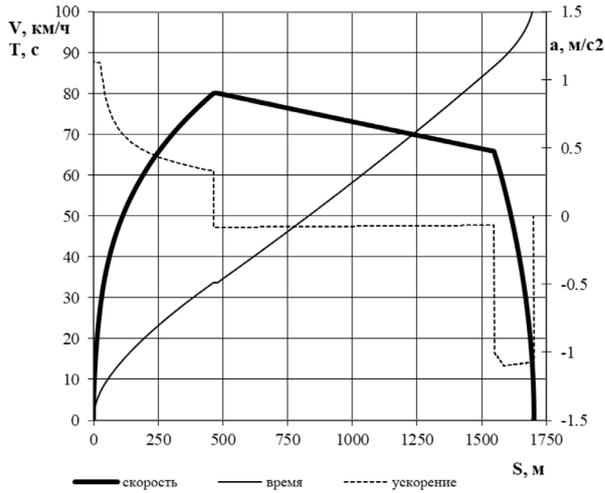


Рисунок 102 – Движение по перегону с выбегом состава МГ-НП-МП-МП-МП-МП-НП-МГ [28]

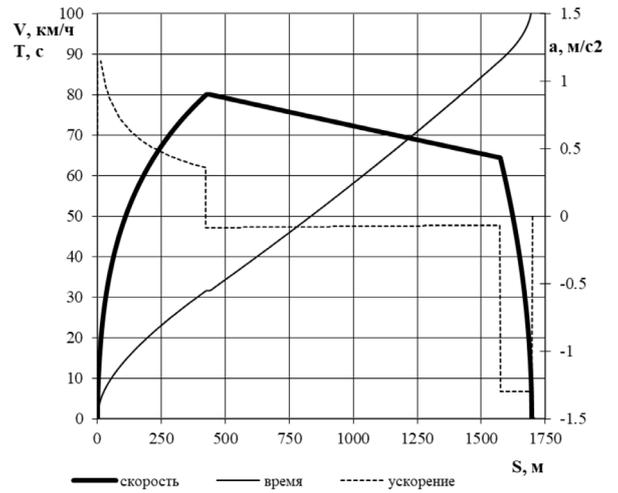


Рисунок 103 – Движение по перегону с выбегом состава МГ-НП-МП-МП-МП-НП-МГ [28]

По полученным данным в ходе экспериментального замера, было определено, что ЭПС, используя ~ 6 кВт·ч, при различном профиле и от станции к станции меняющимся наполнением людьми, может разогнаться минимально до 27.6 км/ч (рисунок 104).



Рисунок 104 – Разгон поезда при помощи БНЭ

Также примем во внимание, что в процессе эксплуатации ЭПС экспериментально было установлено, что поезд может находиться в режиме тяги при напряжении не менее 450 В. Отсюда следует, что при аварийных условиях БНЭ

может разряжаться глубже, чем на 600 В. При этом в накопителе при аварийном случае всегда остается 2.498 кВт·ч резервной энергии, определяемой по формуле:

$$A_{\text{рез.}} = \frac{C_{\text{нак.}} U_{600}^2}{2} - \frac{C_{\text{нак.}} U_{450}^2}{2} \quad (63)$$

где:

$C_{\text{нак.}}$  – потребная емкость бортового накопителя энергии, Ф.

Используя  $A_{\text{рез.}} = 2.498$  кВт·ч подвижной состав метрополитена по данным экспериментального замера, может разогнаться до 18.1 км/ч.

В то же время ЭПС для разгона с 0 до 10 км/ч требуется примерно 1 кВт·ч.

По опыту расчетов, экспериментальных замеров и эксплуатации ЭПС типа 81-765/766/767 с полной снаряженной массой 475.1 тонны может проехать на выбеге с 10 км/ч до полной остановки по пути без уклонов 264 метра.

Используя 8.5 кВт·ч поезд вместе с пассажирами может проехать на автономном ходу приблизительно 2244 метра.

В среднем перегон между станциями составляет 1700 метров.

Расстояние от основного пути до въезда в депо составляет менее 600 метров.

Таким образом БНЭ с оборотной энергоемкостью в 6 кВт\*ч покрывает все необходимые энергетические расходы при автономном ходе (аварийный или маневровый) на всем полигоне Московского метрополитена.

## 5.5 Оценка КПД БНЭ

Наиболее корректно оценивать КПД работы БНЭ на ЭПС следует за суточный период по следующей формуле:

$$\eta_{\text{БНЭ}}^{\text{сут.}} = \frac{A_{\text{Рек}}^{\text{сут.}} - \Delta A_{\text{БНЭ}}^{\text{сут.}}}{A_{\text{Рек}}^{\text{сут.}}} = \frac{\sum_{i=1}^n \int_0^{T_{\text{рек.}i}} I_{\text{рек.}i} U_{\text{рек.}i} dt - \sum_{k=1}^m \int_0^{T_{3-p_i}} I_{\text{БНЭ}k}^2 R_{\text{БНЭ}} dt}{\sum_{i=1}^n \int_0^{t_{\text{рек.}i}} I_{\text{рек.}i} U_{\text{рек.}i} dt} \quad (64)$$

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;

$T_{z-p_i}$  – 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 работы БНЭ на ЭПС составляет от 93 до 95 %.

## 6 ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ БНЭ НА ЭПС

При технико-экономической оценке [4] следует учитывать основные достоинства и новые возможности, которые появляются при внедрении БНЭ на электроподвижном составе, а именно:

- затраты на коммутационную аппаратуру;
- вывод ЭПС при аварийных ситуациях в СТЭ;
- автономный ход в тупиках и ангарах депо;
- сохранение и повторное использование избыточной энергии рекуперации, которая в настоящий момент рассеивается в резисторах;
- уменьшение потребления электроэнергии от тяговой сети;
- уменьшение потерь электроэнергии в ТС;
- усиление системы электроснабжения;
- снижение нагрузки на тяговое оборудование и кабельные линии, что положительно скажется на сроке их службы;
- снижение заявленной мощности от питающих центров;
- повышение качества электроэнергии по уровню напряжения;
- значительное улучшение климатических условий [94];
- снижение расходов при проектировании и строительстве новых депо, а также экономия на эксплуатации как новых депо, так и уже существующих.

В стоимость внедрения накопителя энергии на борт электроподвижного состава входят:

- затраты на аккумулярующие модули;
- затраты на выкатные ячейки, крепящиеся к раме вагона, предназначенные для размещения НЭ;
- затраты на систему защиты;
- затраты на модернизацию существующих ЭПС, ввиду прокладки дополнительных кабелей;

– затраты на подключение НЭ к электрической схеме ЭПС.

Срок окупаемости бортового накопителя энергии можно оценить по следующей формуле:

$$T_{OK} = \frac{K_{НЭ} - C_{ум} - C_{од}}{\mathcal{E} - P_{\mathcal{E}}} = \frac{K_{НЭ} - \Delta P_{ум} \cdot C_{ум} - C_{од}}{(A_{рекГод} + A_{клим} + \Delta A_{потТП} + \Delta A_{потТС}) \cdot C_{элЭн} - P_{ЭнЭ} + P_{Эд}} \quad (65)$$

где:

$C_{ум}$  – стоимость сниженной установленной мощности;

$C_{од}$  – стоимость оборудования депо;

$K_{НЭ}$  – капитальные затраты на БНЭ;

$\Delta P_{ум}$  – величина, на которую была снижена установленная мощность подстанций;

$C_{ум}$  – цена подводимой установленной мощности от питающего центра.

$C_{элЭн}$  – цена электроэнергии;

$\mathcal{E}$  – экономия за счет снижения энергопотребления;

$P_{ЭнЭ}$  – расходы на эксплуатацию БНЭ;

$P_{Эд}$  – сэкономленные эксплуатационные затраты на обслуживание СТЭ в депо и тупиках;

$A_{рекГод}$  – избыточная энергия рекуперации в год;

$A_{клим}$  – энергия, необходимая для отвода тепла реостатов из подземной части метрополитена;

$\Delta A_{потТП}$  – потери энергии в ТП в год;

$\Delta A_{потТС}$  – потери энергии в ТС в год.

На рисунке 105 представлена схема развития путей в депо и к его подъезду, а также СТЭ, обеспечивающая питание ЭПС. Для вновь строящихся депо с учётом БНЭ на ЭПС СТЭ в пределах депо можно исключить. Стоимость сэкономленных капитальных затрат при этом соизмерима со стоимостью БНЭ всего парка ЭПС на данной линии.



Экономическая эффективность использования БНЭ для новых депо будет также складываться за счет снижения капитальных затрат на следующее оборудование электродепо, парковых путей и тупиков, которое может быть ликвидировано за ненадобностью при внедрении накопителей на борт подвижного состава [54]:

- пункт распределительный питания тупиков РППТ-825 В;
- подвесной на изоляторах токопровод каждого пути;
- пункт распределительный депо ПРД-825 В (РП 925 В) (рисунок 106);
- сборная шина (рисунок 107);



Рисунок 106 – ПРД-825 В



Рисунок 107 – Сборная шина в депо

- шланговый кабель с передвижной каретой каждого пути «удочки» (рисунки 108 – 109);

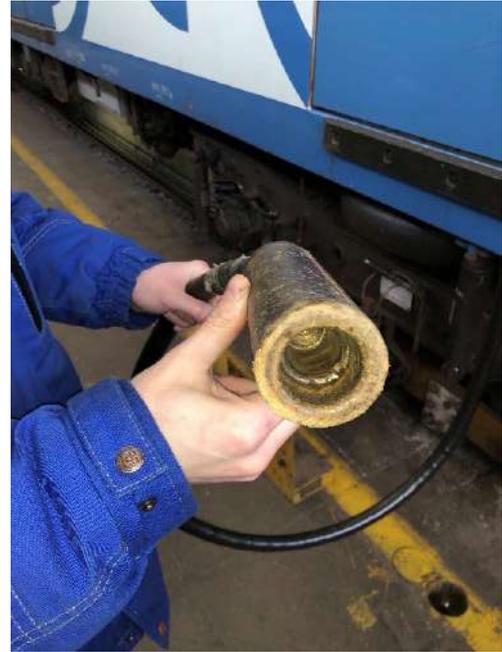


Рисунок 108 – Передвижная карета

Рисунок 109 – Шланговый кабель

- межпутные перемычки;
- фидеры, которые идут от подстанции к сборной шине;
- отсасывающая сеть;
- тяговые подстанции питающие непосредственно депо с понижающими трансформаторами и выпрямительными агрегатами;
- быстродействующий автоматический выключатель;
- разъединители с ручным приводом;
- пункт секционирования депо ПСД-825 В (рисунок 110);



Рисунок 110 – ПСД-825 В

- старогодные рельсы или кабели большого сечения;

- ячейки питающих линий;
- разъединители с электроприводом;
- кабельные лотки и рожки;

Оценка срока окупаемости БНЭ с учетом цен на октябрь 2023 г. на существующих линиях Московского метрополитена представлена на рисунке 111.

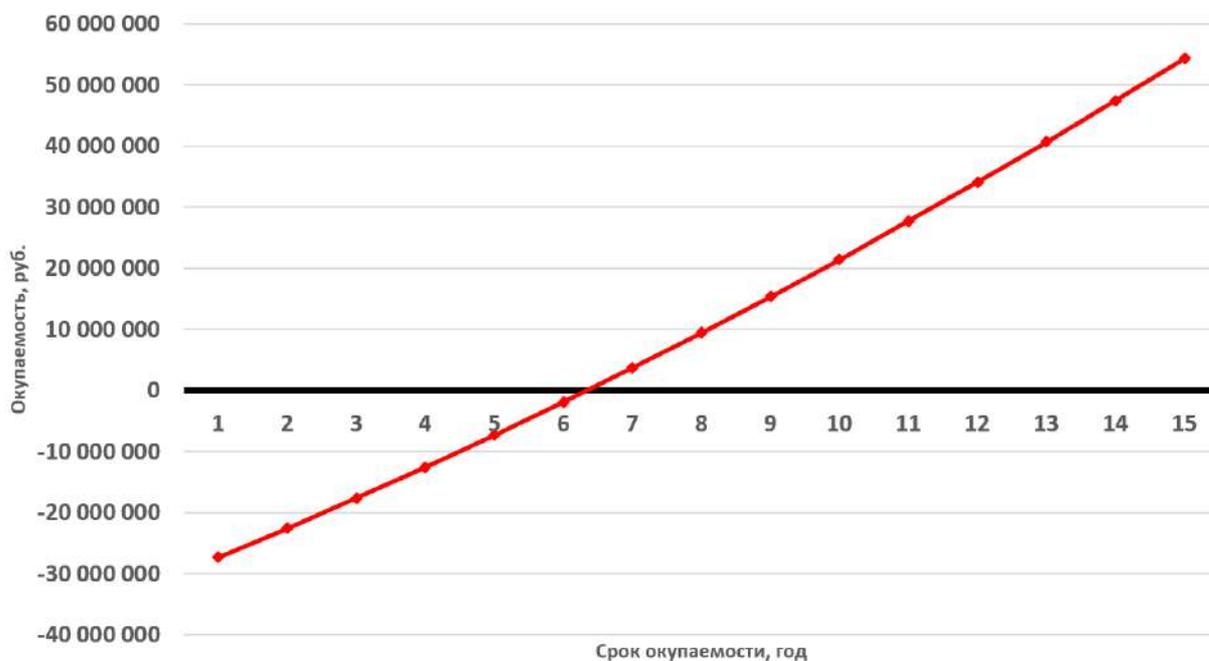


Рисунок 111 – Зависимость ЧДД от срока полезного использования БНЭ на ЭПС

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

**СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ**

- БНЭ – бортовой накопитель электроэнергии
- БРУ – блок распределительного устройства
- ГСНЭ – гибридная система накопления энергии
- КЛ – Кольцевая линия
- КПД – коэффициент полезного действия
- ЛК – линейный контактор
- МГ – вагон головной моторный с кабиной управления модели 81-765
- МП – вагон промежуточный моторный модели 81-766
- МПО – межпоездной обмен
- МСИ – модуль силового инвертора
- НП – вагон промежуточный (прицепной) немоторный модели 81-767
- НЭ – накопитель энергии
- ПА – преобразовательный агрегат
- ПОВБ – проточная окислительно-восстановительная батарея
- РПДП – регистратор параметров движения поезда и состояния вагонного оборудования
- СПИНЭ – сверхпроводниковый индуктивный накопитель энергии
- СТП – совмещенная тягово-понижительная подстанция
- СТЭ – система тягового электроснабжения
- СУДП – система управления движением поезда
- ТКЛ – Таганско-Краснопресненская линия
- ТП – тяговая подстанция
- ТС – тяговая сеть
- ЭПС – электроподвижной состав

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Андреев, В.В. Методы разработки алгоритмов и программ при использовании средств вычислительной техники для решения задач проектирования и эксплуатации систем электроснабжения электрифицированных ж. д. [Текст] / В.В. Андреев // М.– 1984.– 88с.

2. Андреев, В.В. Программный комплекс расчета пропускной способности по системе электроснабжения двухпутных магистральных электрифицированных линий. [Текст] / В.В. Андреев ОФАП МПС № г.р. 1115863.00258-01.– М.–1980.– С.11-12.

3. Астахов, Ю.М. Накопители энергии в электрических системах. [Текст] / Ю.М. Астахов и др. // Высшая школа.– М.– 1989. – 145с.

4. Астахов, Ю.Н. Критериальный анализ технико-экономических задач в энергетике. [Текст] / Ю.Н.Астахов, И.Г.Гордиевский, Д.Д. // Кибернетику на службу коммунизму.– М.– 1973.– т.7. 45с.

5. Астахов, Ю.Н. Применение накопителей энергии для повышения эффективности энергоснабжения [Текст] / Ю.Н.Астахов и др. // Москва МЭИ.– 1985. – 71с.

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

7. Беляков, А.И. Асимметричные электрохимические конденсаторы [Текст] / А.И.Беляков // Рефераты 201-го Симпозиума Электрохимического Общества Филадельфия, Пенсильвания, США.– 2002-1– № 217. –67-73.

8. Беляков, А.И. Высоковольтные электрохимические конденсаторы. [Текст] / А.И.Беляков, А.М. Брынцев // Материалы 10 Международного семинара по конденсаторам с двойным электрическим слоем и сходным устройствам накопления энергии.– Дирфилд-Бич, Фл. США.– 2000 г.– С.34-39.

9. Беляков, А.И. Интеграция электрохимических конденсаторов в бортовые электронные системы автомобилей [Текст] / А.И.Беляков //1999- Автомобильные электронные системы - Европейская конференция и выставка (материалы конференции).– Ковентри, Великобритания. – 1999 г.,

10. Беляков, А.И. Исследование работы стартерных суперконденсаторов в импульсном разряде [Текст] / А.И.Беляков, М.В.Лукашин // The Battery Man.– США.– 1997.– С.24-29.

11. Беляков, А.И. Исследования и разработка конденсаторов с двойным электрическим слоем для пуска двигателей внутреннего сгорания и разгонных систем гибридного электротранспорта [Текст] / А.И.Беляков // Материалы 7-го Международного симпозиума по источникам тока.– Белград.–1997.– С.43-44.

12. Беляков, А.И. Исследования и разработка конденсаторов с двойным электрическим слоем для пуска ДВС и электропривода гибридного транспорта [Текст] / А.И.Беляков // Материалы 6 Международного семинара по конденсаторам с двойным электрическим слоем и сходным устройствам накопления энергии.– Дирфилд-Бич, Фл. США. – 1996 г. С.34-36.

13. Беляков, А.И. Мощностные характеристики конденсаторов высокой удельной энергии системы углерод-оксид никеля [Текст] / А.И.Беляков, А.М.Брынцев // Материалы 9 Международного семинара по конденсаторам с двойным электрическим слоем и сходным устройствам накопления энергии. – Дирфилд-Бич, Фл. США.– 1999. – С.56-62.

14. Богницкий, И.Я. Конденсатор с двойным электрическим слоем [Текст]/ И.Я. Богницкий и др. // Патент Р.Ф.– № 2036523.– 27.05.95.

15. Бочкарёв: 25 станций метро построят в столице за три года [Электронный ресурс]: офиц. сайт «Комплекс градостроительной политики и строительства города Москвы. 03.10.2020. URL: <https://stroi.mos.ru/news/bochkariov-25-stantsii-metro-postroiat-v-stolitsie-za-tri-ghoda>

16. Бут, Д.А. Накопители энергии. [Текст] / Д.А.Бут (ред.), Б.Л.Алиевский, С.Р.Мизюрин, П.В.Васюкевич // М.– Энергоатомиздат.– 1991.– 398 с.

17. Быков Е. И., Панин Б. В., Пупынин В. Н. Тяговые сети метрополитенов. — М.: Транспорт, 1987. 256 с.
18. Варакин, И.Н. Конденсатор с двойным электрическим слоем. [Текст] / И.Н.Варакин, А.Б.Степанов // Патент Р.Ф.— № 2058054.— 10.04.96.
19. Вентцель, Е.С. Теория вероятностей. [Текст] / Е.С. Вентцель // М.— «Наука», 1969.— 576 с.
20. Волков, И.В. Оптимальные процессы заряда емкостных накопителей энергии. [Текст] / И.В.Волков, Пентегов И.В. // Изв. вузов. Энергетика.—1967.— №4.— С.33-36.
21. Временные методические указания по расчёту тягово-энергетических параметров и показателей вагонов метрополитена. Минтяжмаш, 1986 г.
22. Герасименко, А. А., Передача и распределение электрической энергии : учебное пособие / А. А. Герасименко, В. Т. Федин. — Москва : КноРус, 2014. — 648 с. — ISBN 978-5-406-03226-8.
23. Гречишников, В. А. Выбор мест установки накопителей энергии на тяговых подстанциях линий метрополитена [Текст] / В. А. Гречишников, Д. С. Плетнев, М. Н. Белов, М. В. Шевлюгин // Электротехника. – 2023. – № 9. – С. 45-50. – DOI 10.53891/00135860\_2023\_9\_45. – EDN TQUIRU.
24. Громовенко, А.В. Зарядные устройства расщепленных емкостных накопителей. [Текст] / А.В. Громовенко, В.М. Опре, Н.А. Щеголева // Электротехника.—1997.— №3. С.45-48.
25. Деньщиков, К. К. Гибридные технологии для создания систем накопления энергии [Текст] / К. К. Деньщиков, А. Ю. Вараксин // Международный научный журнал Альтернативная энергетика и экология. – 2019. – № 7-9(291-293). – С. 106-115. – DOI 10.15518/isjaee.2019.07-09.106-115. – EDN ZINSVV.
26. Деньщиков, К. К. Наборные суперконденсаторы нового поколения [Текст] / К. К. Деньщиков // Международный научный журнал Альтернативная энергетика и экология. – 2019. – № 7-9(291-293). – С. 97-105. – DOI 10.15518/isjaee.2019.07-09.097-105. – EDN YYFHTM.

27. Деньщиков, К. К. Суперконденсаторы в современной энергетике [Текст] / К. К. Деньщиков, А. З. Жук, А. Ф. Герасимов, М. В. Голиков // Известия Российской академии наук. Энергетика. – 2011. – № 5. – С. 125-131. – EDN OJMYMD.

28. Дзюбан, О. Л. ВАГОНЫ МЕТРОПОЛИТЕНА 81-775/776/777: Тяговый и тормозной расчёт СТНР-М25.0032-20. [Текст] / О. Л. Дзюбан, А.А. Шамаев, Д.С. Чернявский, А.К. Тотнев // Обособленное подразделение ООО "ТМХ Инжиниринг" в г. Мытищи: Конструкторское бюро "Городской транспорт". - Мытищи, 2020.

29. Жукова, Л.А. Состав постоянного формирования из вагонов метрополитена моделей 81-765,81-766,81-767: руководство по эксплуатации - Часть 1,2,3 7650.30.00.001 РЭ / ОАО «МЕТРОВАГОНМАШ». – Москва, 2016.

30. Закарюкин, В. П. Методы и алгоритмы совместного моделирования систем тягового и внешнего электроснабжения железных дорог переменного тока: специальность 05.22.07 "Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация" : автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук / Закарюкин Василий Пантелеймонович. – Омск, 2009. – 32 с. – EDN NLBYUZ.

31. Закарюкин, В. П. Моделирование и параметрическая идентификация узлов нагрузки электроэнергетических систем / В. П. Закарюкин, А. В. Крюков, К. З. Ле. – Иркутск : Изд-во Иркут. нац. исследоват. техн. уни-та, 2016. – 158 с.

32. Закарюкин, В. П. Моделирование режимов систем электроснабжения железных дорог / В. П. Закарюкин, А. В. Крюков. – Иркутск : Изд-во Иркут. гос. ун-та путей сообщения, 2014. – 164 с.

33. Закарюкин, В. П., Крюков А.В. Методы совместного моделирования систем тягового и внешнего электроснабжения железных дорог переменного тока / под ред. А.В. Крюкова. – Иркутск: ИрГУПС. – 2010. – 160 с.

34. Иванов, А.М. Конденсатор с двойным электрическим слоем. [Текст]/ А.М.Иванов, А.Ф.Герасимов, И.Я.Богницкий, В.А.Ильин, Г.И.Емельянов // Патент Р.Ф.– № 2041516.– 09.08.95.

35. Иванов, А.М. Техническое описание, характеристики, области применения аномальных конденсаторов. [Текст] / А.М. Иванов // М.– 1999.– 34с.

36. Иванов, Ф.М. Молекулярные накопители электрической энергии на основе двойного электрического слоя. [Текст] / Ф.М. Иванов, А.Ф. Герасимов // Электричество.– №8.– 1991.– 5-9.

37. Идельчик, В.И. Расчеты установившихся режимов электрических систем; под ред. В.А. Веникова. [Текст] М.: Энергия, 1977.

38. Идельчик, В.И. Электрические системы и сети: Учебник для вузов. [Текст] / В.И. Идельчик. - М.: Альянс, - 2016.

39. Кацай, А. В. Активная нагрузка и полезная утилизация рекуперативной энергии бортовых и стационарных накопителей в горэлектротранспорте [Текст] / А. В. Кацай, М. В. Шевлюгин // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2022. – № 7. – С. 476-487. – DOI 10.24412/2071-6168-2022-7-476-488. – EDN GQMFOR.

40. Кацай, А. В. Влияние буферных накопителей бортового и стационарного типа на энергопотребление тяговых подстанций в горэлектротранспорте [Текст] / А. В. Кацай, М. В. Шевлюгин // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2023. – № 4. – С. 542-560. – DOI 10.24412/2071-6168-2023-4-542-560. – EDN ХОJPAO.

41. Кацай, А. В. Коэффициенты полезного действия накопителя энергии в контактной сети горэлектротранспорта [Текст] / А. В. Кацай, М. В. Шевлюгин // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. – 2022. – Т. 30, № 4(76). – С. 127-141. – DOI 10.14498/tech.2022.4.9. – EDN AMJPCB.

42. Кацай, А. В. Преобразование энергии рекуперации в городском электротранспорте [Текст] / А. В. Кацай, М. В. Шевлюгин // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2022. – № 43. – С. 5-28. – DOI 10.15593/2224-9397/2022.3.01. – EDN NJGNFT.

43. Кацай, А. В. Структура потоков энергии рекуперации в контактной сети тяговой подстанции с наземным накопителем [Текст] / А. В. Кацай, М. В. Шевлюгин // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2023. – № 45. – С. 48-79. – DOI 10.15593/2224-9397/2023.1.03. – EDN ZHENIV.

44. Кацай, А. В. Утилизация избыточной рекуперации в контактной сети электротранспорта при зарядке стационарного накопителя [Текст] / А. В. Кацай, М. В. Шевлюгин // Электротехнические системы и комплексы. – 2023. – № 1(58). – С. 10-20. – DOI 10.18503/2311-8318-2023-1(58)-10-20. – EDN REUZQQ.

45. Кацай, А. В. Экономия энергии в контактной сети электротранспорта при работе стационарного накопителя [Текст] / А. В. Кацай, М. В. Шевлюгин // Практическая силовая электроника. – 2023. – № 1(89). – С. 42-52. – EDN OYHQUC.

46. Кисляков, В.А. О расчетном режиме для определения мощности и размещения приемников избыточной энергии рекуперации. [Текст] / В.А.Кисляков // Труды МИИТ, вып. 199.– 1965.– с. 233-237.

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

48. Крупнейшие энергокатастрофы в мире [Электронный ресурс]: сетевое издание «РБК». 27.05.2005. URL: <https://www.rbc.ru/society/27/05/2005/5703c47e9a7947dde8e0c58e>

49. Кульмановский, А.И. Исследование работы системы электроснабжения метрополитена при применении рекуперативного торможения. [Текст] / А.И. Кульмановский // Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. М.– 1975.– 164с.

50. Марквардт, К.Г. Справочник по электроснабжению железных дорог. [Текст] / К.Г. Марквардт // М.– Транспорт. т. I.– 1980.– 254с, т. II.–1981.–391 с.

51. Марквардт, К.Г. Электроснабжение электрифицированных железных дорог. [Текст] / К.Г. Марквардт // М.– Транспорт. 1982.– с. 527.

52. Митрофанов, А.Н. Мониторинг расхода электроэнергии на тягу поездов и потерь на участках значительной протяженности. [Текст] / А.Н.Митрофанов, И.А. Крестовников, М.А.Гаранин // Улучшение качества и снижение потерь электроэнергии в системах электроснабжения ж.д. МежВуз. Тематич. Сборник научных трудов. – Омск.– ОмГУПС.– 2004.– С.145-152.

53. Модули общего назначения на основе ламинированных суперконденсаторов с двойным электрическим слоем. Технические условия [Текст]. ТУ 27.90.52-002-15613642-2021. Утверждены 01.07.2021 г.

54. Оборудование тяговой сети 825 В для метрополитена: Каталог – 190 [Текст] / ООО «НИИЭФА-ЭНЕРГО» – Москва, 2018.

55. Павельчик, М. «Проблема энергосбережения в метрополитенах и пути её решения. [Текст] / М. Павельчик // Вторая Научно-практическая конференция «Ресурсосберегающие технологии на железнодорожном транспорте». М.–1999.– С. IV-35 – 37.

56. Павельчик, М. Моделирование системы тягового электроснабжения с накопителями энергии. [Текст] / М. Павельчик // Всероссийский электротехнический конгресс с международным участием «На рубеже века: итоги и перспективы» ВЭЛК-99. М.–1999.– с. 291.

57. Павельчик, М. Обеспечение экономической эффективности систем пригородного сообщения и метрополитенов путем применения рекуперативного торможения. [Текст] / М. Павельчик // Вторая сетевая научно-практическая конференция «Современные проблемы экономики и управления на железнодорожном транспорте». М.–2000.–С.IV-12 - IV-13.

58. Павельчик, М. Оценка дополнительных потерь энергии в системе тягового энергоснабжения и возможности их минимизации или полного исключения. [Текст] / М. Павельчик // Третья научно-практическая конференция «Ресурсо- сберегающие технологии на железнодорожном транспорте». М.–2000.– С.34-35.

59. Павельчик, М. Повышение энергетической эффективности мотор-вагонного электроподвижного состава в условиях пригородного сообщения и

метро. [Текст] / М. Павельчик // Научно-техническая конференция «Подвижной состав 21 века (Идеи, требования, проекты)». Санкт-Петербург.– 1999.–С.60-61.

60. Павельчик, М. Повышение эффективности электрической тяги при помощи накопителей энергии. [Текст] / М. Павельчик // Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. М.– МИИТ.– 2000.– 451с.

61. Павельчик, М. Сглаживание неравномерности потребления электроэнергии в энергосистемах при помощи накопителей энергии и определение параметров накопителей. [Текст] / М. Павельчик // Второй Международный Симпозиум «Энергосбережение, качество электроэнергии, электромагнитная совместимость на железнодорожном транспорте». М.–2000.– С. 63-66.

62. Павельчик, М. Улучшение качества электрической энергии в тяговых сетях постоянного тока применением накопителей энергии. [Текст] / М. Павельчик // Первый Международный Симпозиум «Энергосбережение, качество электроэнергии, электромагнитная совместимость на железнодорожном транспорте». М.–1997.– С.114-117.

63. Павельчик, М. Улучшение режима энергопотребления в метрополитене за счет применения накопителей энергии. [Текст] / М. Павельчик // II Международная научно-техническая конференция «Актуальные проблемы развития железнодорожного транспорта». М.–1996.– т. I.– с. 123.

64. Павельчик, М. Экономия электроэнергии в электрической тяге при применении накопителей энергии. [Текст] / М. Павельчик // Научно-практическая конференция «Ресурсосберегающие технологии на железнодорожном транспорте». М.–1998.– С. IV.6-7.

65. Пазеев, Г.Ф. О некоторых ключевых схемах для заряда емкости от источника постоянного напряжения. [Текст] / Г.Ф.Пазеев // Проблемы технической электродинамики.– 1969.– вып. 19.–С.35-38.

66. Пентегов, И.В. Основы теории зарядных цепей емкостных накопителей энергии. [Текст] / И.В. Пентегов // Киев.– 1982.– 243с.

67. Петленко, А.Б. Емкостные накопители энергии в электротранспортных средствах малого класса. [Текст] / А.Б.Петленко // VI Международная научно-

техническая конференция «Проблемы развития локомотивостроения». М.–1996.– С. 65-66.

68 Петров А. Московский блэкаут. Кто виноват и что делать? [Электронный ресурс]: Журнал «Наука и жизнь». 07.2006. URL: <https://www.nkj.ru/archive/articles/6345/>

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

70. Постановление правительства Москвы от 4 мая 2012 г. № 194-ПП «Об утверждении Перечня объектов перспективного строительства московского метрополитена в 2012 - 2020 гг.» (в ходе работ в документ могут быть внесены изменения).

71. Причиной пожара на станции метро «Выхино» назвали сбой в работе защиты электрооборудования [Электронный ресурс]: офиц. Сайт «Федеральное государственное унитарное предприятие «Информационное телеграфное агентство России (ИТАР-ТАСС)». 18.07.2016. URL: <https://tass.ru/proisshestviya/3463610>

72. Причиной пожара на станции метро «Выхино» назвали сбой в работе защиты электрооборудования [Электронный ресурс]: офиц. Сайт «Федеральное государственное унитарное предприятие «Информационное телеграфное агентство России (ИТАР-ТАСС)». 18.07.2016. URL: <https://tass.ru/proisshestviya/3463610>

73. Пупынин, В.Н. Capacitor Storage Systems for Traction Vehicles. [Текст] / В.Н. Пупынин, М.В. Шевлюгин // «Supercaps europe 2005», I European meeting on supercapacitors: Development and implementation in energy and transportation techniques, Berlin-adlershof, November, 2005., 5 с.

74. Пупынин, В.Н. Локальная буферизация энергии, как эффективный способ энергосбережения в электроэнергетических системах», «Использование нетрадиционных и возобновляемых видов энергии и способы ее хранения. [Текст]/ В.Н. Пупынин, М.В. Шевлюгин // Международная научно-практическая конференция ЮНЕСКО/МЦОС. МГТУ Н.Э. Баумана. М.– 2004.– С.30-32.

75. Пупынин, В.Н. Разработка принципиальных схем энергосберегающих систем тягового электроснабжения с использованием сверхпроводящих индуктивных и емкостных накопителей энергии. [Текст] / В.Н.Пупынин, М.В.Шевлюгин // Фундаментальные и поисковые научно-исследовательские работы в области железнодорожного транспорта. Отчет по НИР, тема 376 (85н/05). МИИТ.– 2005.– 39 с.

76. Романцов, И. О. Общий обзор свинцо-кислотного и никель-кадмиевого аккумуляторов с указанием их удельных характеристик [Текст] / И. О. Романцов, М. Ю. Демидчик, А. Р. Рзаева, Н. Е. Галушкин // Научная весна-2023. Технические науки: сборник научных трудов : научное электронное издание, Шахты, 15–19 мая 2023 года / Институт сферы обслуживания и предпринимательства (филиал) ДГТУ в г. Шахты. – Шахты: ИСОиП (филиал) ДГТУ в г. Шахты, 2023. – С. 242-247. – EDN HTSNEH

77. Рекорды Московского метрополитена [Электронный ресурс]: Сетевое издание РИА Новости. 09.03.2021. URL: <https://ria.ru/20210309/metropoliten-1600477496.html>

78. Рубинраут, А.М. Сверхпроводниковый индуктивный накопитель энергии для повышения динамической устойчивости энергосистемы с синхронной нагрузкой. [Текст] / А.М.Рубинраут, Н.В.Бурбаева // «Электричество». 1996.– №10.– С. 7-11.

79. Рябцев, Г.Г. Модернизация электрооборудования вагонов метрополитена. [Текст] / Г.Г. Рябцев // Научно-практическая конференция «Ресурсосберегающие технологии на железнодорожном транспорте». М.–1998.– С. III.17-18.

80. Сверхпроводниковые индуктивные накопители энергии (СПИН) [Electronic resource]. URL: <https://www.rgups.ru/content-pages/sverkhprovodnikovye-induktivny-603/?special=0>

81. Средняя зарплата в московском метро составляет 65 тыс руб [Электронный ресурс]: Сетевое издание «Портал Региональное информационное агентство Московской области (РИАМО)». 01.04.2016. URL:

<https://riamo.ru/article/126163/srednyaya-zarplata-v-moskovskom-metro-sostavlyayet-65-tys-rub-xl>

82. Тимченко, Е.А. Методика выбора приемников избыточной энергии рекуперации для метрополитена. [Текст] / Е.А.Тимченко // Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. М.– МИИТ.– 1981.–147с.

83. Трамвай с питанием от аккумуляторной батареи. [Текст] / Железные дороги мира.– №5.– 2005.– С.17-21.

84. Феоктистов, В.П. Новая постановка задачи энергосбережения в тяге поездов. [Текст] / В.П.Феоктистов, С.С.Петраковский, Н.Н.Сидорова // Научно-техническая конференция «Подвижной состав 21 века (Идеи, требования, проекты)». Санкт-Петербург. 1999.– С. 55-56.

85. Феоктистов, В.П. Повышение тягово-энергетической эффективности транспортных систем при помощи накопителей энергии. [Текст] / В.П.Феоктистов, М.Павельчик // Транспорт.– №12.– 1999.– С. 21-26.

86. Черноплеков, Н.А. Сверхпроводники для электроэнергетики. [Текст] / Н.А. Черноплеков // Информационный бюллетень. Издатель ООО НИЦ «НЕОТОН».– 2004.

87. Чижевский, С.В. Конденсатор с двойным электрическим слоем. [Текст] / С.В.Чижевский, И.Я.Богницкий, А.В.Фомин, Г.Н.Лаврова, А.Ф.Герасимов, А.М.Иванов // Патент Р.Ф., № 2047235, 27.10.95;

88. Чижевский, С.В. Конденсатор с двойным электрическим слоем. [Текст] / С.В.Чижевский, И.Я.Богницкий, А.В.Фомин, Г.Н.Лаврова, А.Ф.Герасимов, А.М.Иванов // Патент Р.Ф., № 2041517, 09.08.95.

89. Шевлюгин, М. В. Выравнивание графика потребления тяговой нагрузки электрических железных дорог с помощью накопителей энергии. [Текст] / М.В. Шевлюгин // Второй международный симпозиум ElTrans.– 2003.– С-Петербург.– 2003.– С. 83-84.

90. Шевлюгин, М. В. Выравнивание уровня напряжения в тяговой сети ж.д. постоянного тока с помощью накопителей энергии. [Текст] / М.В. Шевлюгин // Вестник МИИТа М.– МИИТ.– Вып.7– 2002.– С. 40 – 43.

91. Шевлюгин, М. В. ЕНЭ на борту метropоезда. [Текст] / М.В. Шевлюгин // «Мир транспорта». МКЖТ МПС РФ. М.–№1.– 2007.– С.46-49.

92. Шевлюгин, М. В. Зарядное устройство для емкостного накопителя энергии. [Текст] / М.В. Шевлюгин, В.Н. Пупынин // Патент на полезную модель №53826, приоритет от 23.12.05. Федеральная служба по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам. М.–27.05.06.

93. Шевлюгин, М. В. Имитационная модель системы тягового электроснабжения железных дорог переменного тока для оценки качества электроэнергии на вводах подстанций [Текст] / М. В. Шевлюгин, Е. В. Щегловитова // Энергобезопасность и энергосбережение. – 2023. – № 1. – С. 89-92. – EDN ZEGSEE.

94. Шевлюгин, М. В. Использование емкостных накопителей энергии для обеспечения комфортного климата в метрополитене. [Текст] / М.В. Шевлюгин, И.А.Каптел // «Безопасность движения поездов». Труды VIII научно- практической конференции. МИИТ.– 2007.–V-51.

95. Шевлюгин, М. В. Криогенные накопители энергии в системе тягового электроснабжения железных дорог. [Текст] / М.В. Шевлюгин // «Известия Самарского научного центра РАН». ISSN 1990-5378. Самара.– 2007.–С.101-105.

96. Шевлюгин, М. В. Критерии, определяющие целесообразность использования емкостных накопителей энергии на электроподвижном составе метрополитена. [Текст] / М.В. Шевлюгин, И.А. Каптел // «Электрификация и организация скоростных и тяжеловесных коридоров на ж.д. транспорте». т. д. Четвертого международного симпозиума ElTrans' 2007. С-Петербург.– 2007.– С.104-105.

97. Шевлюгин, М. В. Моделирование движения поезда при аварийной эвакуации из туннеля метро с помощью емкостного накопителя энергии. [Текст] / М.В. Шевлюгин, И.А.Каптел // Вестник МИИТа. Научно-технический журнал. М.– МИИТ.– Вып.17.– 2006.–15-18.

98. Шевлюгин, М. В. Модель работы звена постоянного тока с накопителем энергии для повышения качества электрической энергии в сетях промышленного

назначения [Текст] / М. В. Шевлюгин, А. Е. Голицына // Энергобезопасность и энергосбережение. – 2022. – № 5. – С. 42-48. – EDN KANGMW.

99. Шевлюгин, М. В. О применении накопителей энергии в системе электроснабжения мегаполиса на примере Москвы [Текст] / М. В. Шевлюгин, А. Н. Стадников, А. С. Юдин // Электропитание. – 2020. – № 1. – С. 7-31. – EDN YNSHXQ.

100. Шевлюгин, М. В. Оценка возможности использования емкостных накопителей энергии на электроподвижном составе метрополитена. [Текст] / М.В. Шевлюгин И.А.Каптёл // Неделя науки – 2006. «Наука - транспорту». Труды научно-практической конференции. М.– МИИТ.– 2006.– С. II-38 – II-39.

101. 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, 27–28 октября 2022 года. – Омск: Омский государственный университет путей сообщения, 2022. – С. 263-270. – EDN XMXPUK.

102. Шевлюгин, М. В. Повышение надежности работы оборудования тяговой подстанции с помощью сверхпроводящих накопителей энергии. [Текст] / М.В. Шевлюгин // «Безопасность движения поездов». Труды VI научно-практической конференции. МИИТ.– 2005.–С. VI-61 – VI-62.

103. Шевлюгин, М. В. Повышение надежности электроснабжения собственных нужд тяговых подстанций метрополитена с помощью накопителей энергии [Текст] / М. В. Шевлюгин, А. Е. Голицына, М. Н. Белов, Д. С. Плетнев // Электротехника. – 2020. – № 9. – С. 26-31. – EDN LMIFX.

104. Шевлюгин, М. В. Повышение эффективности электрической тяги с помощью накопителей энергии. [Текст] / М.В. Шевлюгин // «Транссибирская магистраль на рубеже XX-XXI веков: Пути повышения эффективности

использования перевозочного потенциала». Международная научно-практическая конференция. МИИТ.– 2003.–С. IVb-34 – IVb-35.

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

106. Шевлюгин, М. В. Проблемы использования накопителей энергии в системах тягового электроснабжения. [Текст] / М.В. Шевлюгин // Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. ГУПС (МИИТ).– М.– 2000.– 174 с.

107. Шевлюгин, М. В. Программа для ЭВМ: «Моделирование процесса заряда емкостного накопителя энергии с помощью двойного электромагнитного дросселя». [Текст] / М.В. Шевлюгин // Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ №2006611591. Федеральная служба по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам. М.– 12.05.06.

108. Шевлюгин, М. В. Программа для ЭВМ: «Моделирование процесса энергопотребления электроподвижного состава железных дорог и метрополитенов с накопителями энергии на борту». [Текст] / М.В. Шевлюгин // Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ №2005611422, Федеральная служба по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам. М.– 14.06.05.

109. Шевлюгин, М. В. Программный комплекс «Электроснабжение метрополитена». [Текст] / М.В. Шевлюгин, В.М. Абрамсон, В.В. Андреев, В.А. Гречишников, В.Ю. Клинов, А.М. Минц, В.Н. Пупынин, С.В. Розанцева, Н.Н. Комиссаров // Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ №2005610082. Федеральная служба по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам. М.– 11.01.05.

110. Шевлюгин, М. В. Программный комплекс «Электроснабжение электрифицированных железных дорог постоянного и переменного тока». [Текст]

/ М.В. Шевлюгин, В.В.Андреев, В.А.Гречишников, В.Н.Пупынин // Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ №2005611421. Федеральная служба по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам. М.– 14.06.05.

111. Шевлюгин, М. В. Силовая установка для автономного хода электроподвижного состава [Текст] / 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. – EDN WGVTHD.

112. Шевлюгин, М. В. Система накопления энергии на вагоне метро для аварийного вывода поезда из туннеля. [Текст] / М.В. Шевлюгин // «НТТ – Наука и техника транспорта» // Научно-технический и производственный журнал. РГОТУПС. М.– №3.– 2006.–С.29-32.

113. Шевлюгин, М. В. Снижение расхода электроэнергии на движение поездов в Московском метрополитене при использовании емкостных накопителей энергии. [Текст] / М.В. Шевлюгин, К.С.Желтов // «НТТ – Наука и техника транспорта» // Научно-технический и производственный журнал. РГОТУПС М.– №1.– 2008.– С.15-20.

114. Шевлюгин, М. В. Совершенствование системы тягового электроснабжения с помощью накопителей энергии. [Текст] / М.В. Шевлюгин // «Мир транспорта» – приложение «Соискатель». МКЖТ МПС РФ. М.–№1.– (04) 2007.–С.35-38.

115. Шевлюгин, М. В. Сравнительный анализ базовых модулей емкостных накопителей энергии различных производителей для использования в системе тягового электроснабжения метрополитена. [Текст] / М.В. Шевлюгин, И.А. Каптел // Вестник МИИТа. Научно-технический журнал – М.– МИИТ.– Вып.16.– 2007.– С.31-36.

116. Шевлюгин, М. В. Устройство накопления электроэнергии для аварийного тягового питания электроподвижного состава. [Текст] / М.В. Шевлюгин, К.С. Желтов // Патент на полезную модель №56736 приоритет от 12.05.06. Федеральная служба по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам. М.–10.09.06.

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

118. Шевлюгин, М. В. Цифровой двойник электроподвижного состава в тяговой сети метрополитена [Текст] / М. В. Шевлюгин, А. А. Королев, А. Е. Голицына, Д. С. Плетнев // Электротехника. – 2019. – № 9. – С. 41-46. – EDN DWWJST.

119. Шевлюгин, М. В. Экспериментальная оценка качества электрической энергии в сетях собственных нужд совмещенной тяговой подстанции метрополитена [Текст] / М. В. Шевлюгин, А. Е. Голицына, М. Н. Белов, Д. С. Плетнев // Электротехника. – 2022. – № 9. – С. 67-71. – DOI 10.53891/00135860\_2022\_9\_67. – EDN NPIMIE.

120. Шевлюгин, М. В. Экспериментальное исследование автономного хода электроподвижного состава метрополитена [Текст] / М. В. Шевлюгин, К. С. Желтов, Д. С. Плетнев, М. Д. Глущенко // Электротехника. – 2021. – № 9. – С. 19-21. – EDN PJXМAM.

121. Шевлюгин, М. В. Эксплуатация энергопринимающих устройств промышленной сети с учётом влияния тяговой нагрузки на несимметрию напряжений / М. В. Шевлюгин, Е. В. Щегловитова // Энергетик. – 2023. – № 3. – С. 28-30. – EDN NYQSID.

122. Шевлюгин, М. В. Энерго- и ресурсосбережение в системе тягового электроснабжения железных дорог с помощью сверхпроводящих накопителей

энергии. [Текст] / М.В. Шевлюгин // «Электрификация и развитие энергосберегающей инфраструктуры и электроподвижного состава на железнодорожном транспорте». Материалы Третьего международного симпозиума EITrans' 2005. С-Петербург.– 2006.–С. 34-36.

123. Шевлюгин, М. В. Энергосберегающие схемы тягового электроснабжения железных дорог на базе сверхпроводниковых индуктивных накопителей энергии. [Текст] / М.В. Шевлюгин // «Электротехника» Научно-технический журнал. ЗАО «Знак». М.– №7.– 2008.– С. 28-34.

124. Шевлюгин М.В. Энергосберегающие технологии на железнодорожном транспорте и метрополитенах, реализуемые с использованием накопителей энергии [Текст]: автореферат дис. ... доктора технических наук: 05.09.03 / Шевлюгин Максим Валерьевич. – М.: МГУПС(МИИТ), 2013.

125. Шевлюгин, М. В. Энергосберегающие технологии на железнодорожном транспорте и метрополитенах, реализуемые с использованием накопителей энергии : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук [Текст] / Шевлюгин Максим Валерьевич, 2014. – 345 с. – EDN OEQLWE.

126. Шевлюгин, М. В. Энергосбережение на железнодорожном транспорте с помощью сверхпроводниковых индуктивных накопителей энергии. [Текст] / М.В. Шевлюгин // «НТТ – Наука и техника транспорта» Научно-технический и производственный журнал. РГОТУПС. М.–№2.– 2008.–С.67-70.

127. Электрическое оборудование вагонов метрополитена серии 81-765 (81-766, 81-767): учебное пособие курса «Машинист электропоездов метрополитена» / ГУП «Московский метрополитен». Служба профориентации, обучения и развития персонала. Учебно – производственный центр. – Москва, 2018.

128. Энергетическая стратегии ОАО "РЖД" на период до 2010 года и на перспективу до 2030 года. [Текст] // М.– 2008.

129. Alotto P, Guarnieri M, Moro F. Redox flow batteries for the storage of renewable energy: a review. Renew Sust Energ Rev 2014; 29:325–35.

130. Battery trams running in Nanjing [Electronic resource]. URL: <https://www.railwaygazette.com/battery-trams-running-in-nanjing/39945.article>

131. Battery-powered Drive Systems: Latest Technologies and Outlook [Electronic resource]. URL: [https://www.hitachi.com/rev/archive/2017/r2017\\_02/07/index.html](https://www.hitachi.com/rev/archive/2017/r2017_02/07/index.html)
132. Bombardier's Catenary-Free Tram Technology Enables Start of Passenger Operations During Summer Youth Olympic Games in China [Electronic resource]. URL: <https://bombardier.com/en/media/news/bombardiers-catenary-free-tram-technology-enables-start-passenger-operations-during>
133. Campillo J, Ghaviha N, Zimmerman N, et al. Flow batteries use potential in heavy vehicles. In: International Conference on Electrical Systems for Aircraft, Railway, Ship Propulsion and Road Vehicles (ESARS), Aachen, Germany, 2015, 1–6.
134. Chen H, Cong TN, Yang W, et al. Progress in electrical energy storage system: a critical review. *Prog Nat Sci* 2009; 19:291–312
135. Chmiola J, Yushin G, Gogotsi Y, et al. Anomalous increase in carbon capacitance at pore sizes less than 1 nanometer. *Science* 2006; 313:1760–3.
136. Curry C. Lithium-ion battery costs and market. Technical report. Bloomberg New Energy Finance 2017.
137. Dommel, H. W., «Digital computer solution of electromagnetic transients in single and multiphase networks» *IEEE Trans. Power App. Syst.*, vol. PAS-88, no. 2, pp. 734–77, Apr. 1969.
138. Development of the Optimal Charge and Discharge Control Method for Diesel Hybrid Trains under High Operational Load [Electronic resource]. URL: [https://www.jreast.co.jp/e/development/tech/pdf\\_37/tec-37-55-60eng.pdf](https://www.jreast.co.jp/e/development/tech/pdf_37/tec-37-55-60eng.pdf)
139. Energy storage for railways [Electronic resource]. URL: <https://www.pibas.de/en/markets/railwayrolling-stock/>
140. Farret FA, Simoes MG. *Integration of Alternative Sources of Energy*, Hoboken, US.. John Wiley & Sons, 2006.
141. González A, Goikolea E, Barrena JA, et al. Review on super- capacitors: technologies and materials. *Renew Sust Energ Rev* 2016; 58:1189–206.
142. Gu W, Yushin G. Review of nanostructured carbon materials for electrochemical capacitor applications: advantages and limitations of activated carbon,

carbide-derived carbon, zeolite-templated carbon, carbon aerogels, carbon nanotubes, onion-like carbon, and graphene. *Wires Energy Environ* 2014; 3:424–73.

143. Hadjipaschalis I, Poullikkas A, Efthimiou V. Overview of current and future energy storage technologies for electric power applications. *Renew Sust Energ Rev* 2009; 13:1513–22.

144. Hemmati R, Saboori H. Emergence of hybrid energy storage systems in renewable energy and transport applications: a review. *Renew Sust Energ Rev* 2016; 65:11–23.

145. Hitachi battery fleet saves 2.7 million kg of CO<sub>2</sub> emissions in five years [Electronic resource]. URL: <http://www.jrkyushu.co.jp/news/pdf/chikudennchidennsha.pdf>

146. International Electrotechnical Commission. Electrical energy storage: white paper. Technical report. IEC 2011

147. Khaligh A, Li Z. Battery, ultracapacitor, fuel cell, and hybrid energy storage systems for electric, hybrid electric, fuel cell, and plug-in hybrid electric vehicles: state of the art. *IEEE T Veh Technol* 2010; 59:2806–14.

148. Korolev A. Modeling of energy saving in substations feeding DC metro systems based on appropriate location of energy storage elements / A. Korolev, M. Shevluygin, M. Belov [et al.] // Proceedings of the 3rd 2021 International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering, REEPE 2021 : 3, Moscow, 11–13 march 2021. – Moscow, 2021. – P. 9388021. – DOI 10.1109/REEPE51337.2021.9388021. – EDN PZUUEP.

149. Lead-acid battery modelling in perspective of ageing: a review. Published in: 2019 IEEE 12th International Symposium on Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics and Drives (SDEMPED), Date of Conference: 27-30 August 2019, Date Added to IEEE Xplore: 14 October 2019, ISBN Information: INSPEC Accession Number: 19048402, DOI: 10.1109/DEMPED.2019.8864849, Publisher: IEEE, Conference Location: Toulouse, France

150. Lorenzen H. Energiespeicherung mit supraleitenden Spulen. [Текст] / H.Lorenzen, W.Rehm, H.P. Grotter // Brennstoff-Warme-Kraft. 40 (1988) C. 353-360.

151. Maruyama N. Wayside Flywheel Energy Storage system for Railway and its Field Test. [Текст] / N.Maruyama // J.I.E.E. Session on Railway. RAT-83-6.–1983.
152. Milano. F., Power System Modelling and Scripting, Springer, Berlin, 2010 pp. 558.
153. Nice Trams Project in France Near the Italian Border [Electronic resource]. URL: <https://www.railway-technology.com/projects/nice-trams/>
154. Niklas H. Physikalische Grenzen heutiger Speicherbatterien und Chancen für die Entwicklung neuer Systeme. [Текст] / H. Niklas, D. Berndt // ETZ.Vol.94.–1973.
155. Paulo A.N. Garsia, Jose Luiz R. Pereira, Sandoval Carneiro Jr., Vander M. da Costa, Nelson Martins. Three-Phase Power Flow Calculations Using the Current Injection Method // IEEE Transactions on power systems. 2000. Vol. 15. № 2.
156. Pumera M. Graphene-based nanomaterials and their electrochemistry. Chem Soc Rev 2010; 39:4146–57.
157. Ryabchik T. A. Digital Monitoring and Assessment of Lifetime of Underground Substation Traction Units / T. A. Ryabchik, E. E. Smirnova, V. A. Grechishnikov [et al.] // Proceedings of the 2022 Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, ElConRus 2022, St. Petersburg, 25–28 января 2022 года. – St. Petersburg, 2022. – P. 1254-1256. – DOI 10.1109/ElConRus54750.2022.9755689. – EDN TYASEI.
158. Simon P, Burke A. Nanostructured carbons: double-layer capacitance and more. Elec Soc Interface 2008; 17:38.
159. Sun L, Feng K, Chapman C, et al. An adaptive power-split strategy for battery–supercapacitor powertrain: design, simulation, and experiment. IEEE T Power Electr 2017; 32:9364–75.
160. Tulsy V. Application of ETAPTMeTraXTMsoftware package for digital simulation of distribution network that feeds an AC traction power supply system / V. Tulsy, A. Murzintsev, K. Zhgun [et al.] // E3S Web of Conferences, Irkutsk, 07–11 сентября 2020 года. – Irkutsk, 2020. – P. 07011. – DOI 10.1051/e3sconf/202020907011. – EDN RWZUWE.

161. Vazquez S, Lukic SM, Galvan E, et al. Energy storage systems for transport and grid applications. *IEEE T Ind Electron* 2010; 57:3881–95.
162. Wang G, Zhang L, Zhang J. A review of electrode materials for electrochemical supercapacitors. *Chem Soc Rev* 2012; 41:797–828.
163. Wang W, Luo Q, Li B, et al. Recent progress in redox flow battery research and development. *Adv Funct Mater* 2013; 23:970–86.
164. Wang Y, Yang Z, Lin F, et al. A hybrid energy management strategy based on line prediction and condition analysis for the hybrid energy storage system of tram. *IEEE T Ind Appl* 2020; 56:1793–803.
165. Yoshihide Hase, Tanuj Khandelwal, Kazuyuki Kameda, *Power System Dynamics with Computer-Based Modeling and Analysis*, 2019, pp. 1136, ISBN: 9781119487456
166. Zhang, P., Marti, J. R., & Dommel, H. W. (2007). Synchronous Machine Modeling Based on Shifted Frequency Analysis. *IEEE Transactions on Power Systems*, 22(3), 1139–1147.
167. Zhao H, Wu Q, Hu S, et al. Review of energy storage system for wind power integration support. *Appl Energ* 2015; 137:545–53.