

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

На правах рукописи

Белов Михаил Николаевич

Стационарный управляемый накопитель энергии в системе тягового
электрооборудования 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.....	6
1 АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ СИСТЕМ НАКОПЛЕНИЯ ЭНЕРГИИ И ОПЫТА ИХ ПРИМЕНЕНИЯ В СИСТЕМАХ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ МЕТРОПОЛИТЕНОВ В РОССИИ И МИРЕ.....	12
1.1 Классификация накопителей энергии.....	12
1.2 Электрохимические накопители энергии.....	13
1.2.1 Свинцово-кислотные аккумуляторы	13
1.2.2 Никель-кадмиевые аккумуляторы	14
1.2.3 Никель-металлогидридные аккумуляторы	16
1.2.4 Натрий-серные аккумуляторы.....	16
1.2.5 Литий-ионные аккумуляторы.....	17
1.2.6 Проточные редокс-аккумуляторы.....	18
1.3 Электромеханические накопители энергии	19
1.3.1 Гидроаккумулирующие электростанции (ГАЭС)	19
1.3.2 Накопители кинетической энергии (НКЭ).....	20
1.3.3 Системы накопления энергии на сжатом воздухе.....	22
1.4 Электрические накопители энергии	23
1.4.1 Сверхпроводниковые индуктивные накопители энергии	23
1.4.2 Суперконденсаторы.....	24
1.5 Основные критерии выбора накопителей	24
1.5.1 Удельная энергоёмкость	24
1.5.2 Удельная мощность	25
1.5.3 Величина саморазряда.....	25
1.5.4 Цикличность.....	25
1.5.5 КПД цикла заряд/разряд.....	26
1.5.6 Срок службы.....	26
1.6 Обзор опыта применения накопителей на железнодорожном транспорте в мире	27

1.6.1	Аккумуляторные батареи.....	27
1.6.2	Суперконденсаторы.....	29
1.6.3	Маховики	32
2	РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ УНЭ.....	34
2.1	Принципиальная схема управляемой накопительной установки ...	34
2.1.1	Накопительный элемент.....	40
2.1.2	Преобразователь постоянного напряжения	40
2.1.3	Система управления накопителя энергии	42
2.2	Задача выбора накопителей энергии.....	45
2.3	Требования к накопителям энергии	47
2.4	Расположение накопителей энергии.....	50
2.4.1	Расположение УНЭ составе оборудования тяговой подстанции	50
2.4.1.1	Использование накопителя в качестве резервного источника энергии.....	51
2.4.2	Использование УНЭ в качестве усиливающего оборудования тяговой сети	52
2.4.2.1	Расположение в середине перегона	53
2.4.2.2	Расположение на конце консольного участка	54
2.4.3	Определение мест установки накопителей энергии на тяговых подстанциях метрополитена	56
2.4.4	Обследование тоннеля на предмет наличия свободных площадей для размещения УНЭ	58
3	МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ УПРАВЛЯЕМОГО НАКОПИТЕЛЯ ЭНЕРГИИ.....	62
3.1	Моделирование литий-ионного накопителя	62
3.1.1	Описание использованной математической модели.....	62
3.1.2	Программное представление выбранной математической модели НЭ.....	64
3.1.3	Масштабирование модели накопителя энергии	68

3.1.4	Оценка результатов моделирования	69
3.1.4.1	Опыт заряда и разряда накопителя при постоянном напряжении.....	70
3.1.4.2	Опыт разряда батареи при постоянном токе	74
3.1.4.3	Опыт работы модели с случайным входным напряжением.....	75
3.1.5	Верификация результатов имитационного моделирования.....	77
3.1.5.1	Опыт заряда и разряда накопителя при постоянном напряжении.....	80
3.2	Моделирование суперконденсаторной батареи.....	83
3.2.1	Описание математической модели	83
3.2.2	Реализация метаматематической модели при помощи программного кода.....	85
3.2.3	Оценка результатов моделирования	86
3.2.3.1	Опыт заряда и разряда накопителя при постоянном напряжении.....	87
3.2.3.2	Опыт разряда батареи при постоянном токе	90
3.2.3.3	Опыт работы модели с случайным входным напряжением.....	91
3.2.4	Верификация результатов имитационного моделирования суперконденсатора	92
3.2.4.1	Опыт заряда и разряда суперконденсаторного накопителя при постоянном напряжении.....	95
3.3	Моделирование системы управления накопителями энергии в составе системы тягового электроснабжения	96
3.3.1	Система управления накопителем энергии в режиме принятия энергии рекуперации.....	96
3.3.2	Система управления накопителем энергии в режиме снижения установленной мощности тяговой подстанции	101
3.4	Моделирование DC-DC преобразователя в составе УНЭ	104
4	ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ УНЭ В СТЭ МЕТРОПОЛИТЕНА.....	115

4.1	Разработка имитационной модели	115
4.1.1	Объект моделирования.....	115
4.1.2	Формирование баз исходных данных.....	116
4.1.3	Структурная и принципиальная схемы имитационной модели	117
4.1.4	Режимы расчёта.....	120
4.2	Результаты имитационного моделирования системы тягового электроснабжения	121
4.2.1	Моделирование работы СТЭ без рекуперации и УНЭ	121
4.2.2	Моделирование работы СТЭ с рекуперацией, без УНЭ.....	125
4.2.2.1	Верификация результатов моделирования.....	128
4.2.3	Моделирование работы СТЭ с рекуперацией и различными конфигурациями УНЭ.....	131
4.2.3.1	Моделирование работы СТЭ с рекуперацией и УНЭ на СТП в режиме принятия избыточной рекуперации	131
4.2.3.2	Анализ влияния расположения накопителей энергии на эффективность использования энергии рекуперации	140
4.2.3.3	Моделирование работы СТЭ с рекуперацией и УНЭ на СТП в середине перегона	142
4.2.3.4	Моделирование работы консольного участка СТЭ с УНЭ в конце зоны	147
4.2.4	Проверка методики выбора мест установки накопителей	152
5	ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ УНЭ.....	154
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	162
	СПИСОК УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ.....	164
	СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	165

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования.

Рост городов и становление мегаполисов неразрывно связаны с интенсивным развитием городских инфраструктур. Неминуемо, претерпевает изменение и рост транспортная система городов. Одной из основных транспортных систем крупных городов является метрополитен. Повышенное внимание к «зелёным» технологиям, вопросам энергоэффективности приводит к растущей необходимости в совершенствовании энергосберегающих решений во всей городской инфраструктуре, в её транспортных системах и метрополитенах. В этом контексте, научно-технический интерес сосредотачивается вокруг современных эффективных решений с обозримой практической реализацией, одно из которых заключается в интеграции системы тягового электроснабжения метрополитена и управляемых накопителей энергии (УНЭ). Данная научная работа направлена на исследование и анализ эффективности внедрения управляемых электрических накопительных систем, а также на разработку способов их использования в целях повышения энергетической защищённости и экономии энергетических ресурсов в условиях постоянного роста энергопотребления и модернизации транспортной инфраструктуры метрополитена.

Сбережение электроэнергии является одним из важных направлений развития энергетической отрасли в Российской Федерации, что может быть подтверждено ежегодными докладами «о состоянии энергосбережения и повышении энергетической эффективности в Российской Федерации». Московский метрополитен, является одним из крупнейших потребителей электроэнергии в стране, а это означает, что вопросы экономии электроэнергии всегда являются актуальными для данного предприятия.

Темпы развития технологий накопления электрической энергии и объёмы производств современных накопителей энергии ежегодно возрастают, предоставляя всё большие возможности по построению энергоэффективных технических решений в различных областях экономики. Внедрение накопителей энергии на многих предприятиях по всему миру, включая различные виды

электрического транспорта, приносят ощутимые результаты по экономии электроэнергии.

Задачи применения управляемых накопителей энергии (УНЭ), как современной меры, показывающей себя крайне эффективно в разных сферах энергетики [48, 60], в системах тягового электроснабжения электрифицированного рельсового транспорта, повышения эффективности использования электросетей за счёт перераспределения электроэнергетических потоков, снижения капитальных затрат на тяговое оборудование подстанций и кабельные линии за счёт продления их срока службы, повышения энергосбережения и энергобезопасности являются крайне актуальным в настоящее время.

Степень разработанности темы исследования.

Проблемам повышения эффективности работы систем тягового энергоснабжения посвящено множество научных работ. Сейчас, когда сбережение энергии стало одним из приоритетов российской энергетики, количество подобных исследований только увеличивается. Все они предлагают множество решений, применение которых в комплексе может значительно повысить эффективность передачи и распределения электроэнергии. В то же время, в связи с постоянно возрастающим энергопотреблением метрополитенов в крупных городах, развитием инфраструктуры и повышением заинтересованности государства в энергоэффективности, разработанных и внедрённых ранее мер по энергосбережению становится недостаточно. Усовершенствования в технологиях производства систем накопления электроэнергии привели к улучшению эксплуатационных характеристик. Это, в свою очередь, привело к росту популярности использования систем накопления энергии (СНЭ) и росту объёмов их производства. Выход на массовый рынок решений по СНЭ обеспечил доступность, надёжность и эффективность их использования при решении самых разнообразных задач. Во многих случаях такое современное решение будет лучше некоторых устоявшихся подходов.

Вопросами энергосбережения и внедрения накопителей энергии занимались многие отраслевые научные школы страны: ВНИИЖТ, ДВГУПС, МАИ, МЭИ,

ОИВТ РАН, ПГУПС, РГУПС, РУТ (МИИТ), СамГУПС, СПбПУ и др. Ученые, которые внесли огромный вклад в развитие данной области: М.П. Бадёр, А.С. Бочев, А.Т. Бурков, Д.А. Бут, А.Л. Быкадоров, В.А. Гречишников, Л.А. Герман, Н.В. Гулиа, К.К. Деньщиков, Ю.И. Жарков, Ю.М. Иньков, В.Е. Кейлин, А.Б. Косарев, Б.И. Косарев, А.В. Котельников, В.А. Кучумов, А.Н. Марикин, К.Г. Марквардт, В.А. Матюшин, В.Н. Пупынин, Г.Г. Рябцев, А.Н. Савоськин, Э.В. Тер-Оганов, В.П. Феокистов, Е.П. Фигурнов, В.С. Хвостов, В.Т. Черемисин, Н.А. Черноплеков, М.В. Шевлюгин и другие.

Цель и задачи исследования. Целью диссертационной работы является исследование эффективности применения УНЭ в системе тягового электроснабжения метрополитена, определение мест его установки, разработка устройства УНЭ и подходов для его практической реализации, а также применение в действующих и вновь строящихся системах тягового электроснабжения (СТЭ) метрополитенов.

Для достижения поставленной цели в работе решены следующие задачи:

- разработана принципиальная схема УНЭ модульного типа для стационарного применения в составе СТЭ метрополитенов;
- разработаны алгоритмы системы управления накопительной установкой для разных режимов работы УНЭ;
- разработана имитационная модель работы СТЭ метрополитена со стационарными УНЭ;
- произведена технико-экономическая оценка эффекта от применения УНЭ предложенной конструкции в СТЭ метрополитена с различными вариантами размещения.

Объектом исследования является СТЭ линии метрополитена с УНЭ, в которую входят 25 совмещенных тяговых подстанции, 25 пассажирских станций и двупутный участок тяговой сети общей протяжённостью 41,2 километра. Номинальное напряжение в тяговой сети – 750 В, на шинах подстанций – 825 В. В качестве электроподвижного состава (ЭПС) используется состав метро «Москва 2020» с восемью вагонами.

Предмет исследования: методы, модели и критерии оценки показателей работы системы тягового электроснабжения, оснащённой УНЭ, с учётом тяговой нагрузки 825В при различном расположении ЭПС на межподстанционных зонах в соответствии с исполненным графиком движения поездов.

Научная новизна результатов, полученных в диссертационном исследовании:

1. Предложена методика определения мест расположения УНЭ в СТЭ метрополитена посредством матричного анализа схемы замещения СТЭ.
2. Качественно и количественно показано, что использование УНЭ в составе СТЭ повышает качество электроэнергии по уровню напряжения и эффективность использования энергии рекуперации для объекта исследования.
3. Разработаны алгоритмы управления УНЭ для различных режимов их использования.
4. Разработана методика оценки технико-экономического эффекта от использования УНЭ в СТЭ метрополитена для объекта исследования.
5. Разработаны математические модели работы НЭ различных типов с интеграцией их в программный комплекс по расчёту СТЭ метрополитенов.

Теоретическая и практическая значимость работы. Разработана новая конструкция УНЭ, основанная на принципах модульности, универсальности и компактности, для условий существующих площадей совмещённых тяговых подстанций (СТП).

Разработаны технические решения на основе УНЭ для повышения качества электроснабжения и энергоэффективности СТЭ метрополитена.

Разработаны программные модули для моделирования работы электрохимических и суперконденсаторных накопителей энергии. Полученные модели интегрированы в вычислительно-измерительный комплекс, разработанный на кафедре «Электроэнергетика транспорта» РУТ (МИИТ).

Доказаны положительные электротехнические эффекты от использования УНЭ и оценена зависимость электротехнических эффектов от места установки УНЭ (ТП, середина межподстанционной зоны, консольное расположение).

Разработан проект внедрения УНЭ для СТП-817 Московского Метрополитена.

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

- методы обработки экспериментальных данных для верификации результатов теоретических исследований;
- методы математического анализа и математической статистики;
- теория расчёта электрических цепей;
- теория графов и матрично-топологический метод расчёта электрических цепей;
- численные методы решения интегро-дифференциальных уравнений и систем этих уравнений.

Положения, выносимые на защиту:

- Принципиальная схема модульного УНЭ для использования в СТЭ метрополитена с целью повышения энергосбережения и качества электроснабжения.
- Комплексная имитационная модель работы СТЭ метрополитена с УНЭ, позволяющая воспроизводить все процессы обмена электроэнергией между исследуемыми объектами и силовыми устройствами СТП для разных мест расположения УНЭ.
- Положительные изменения основных показателей качества электроснабжения ЭПС метрополитена, которые были определены на основании результатов экспериментальных замеров и имитационного моделирования.
- Положительный электротехнический и экономический эффект от внедрения УНЭ в составе СТЭ метрополитенов.

Степень достоверности результатов проведенных исследований. Достоверность результатов исследований подтверждается сопоставлением данных, полученных при имитационном моделировании работы устройств системы тягового электроснабжения с данными экспериментальных системных измерений электротехнических показателей работы оборудования системы тягового

электроснабжения на нескольких действующих подстанциях Московского метрополитена.

Результаты исследований СТЭ после интеграции УНЭ подтверждается установленной адекватностью программного-вычислительного комплекса по расчёту СТЭ, непротиворечивостью моделей УНЭ теоретическим основам электротехники и соблюдением законов коммутации и сохранения энергии.

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

- на III Международной выставке-конференции «ИНТЕРМЕТРО», «Перспективы развития метрополитенов в условиях интенсивного внедрения новых технологий: инфраструктура и подвижной состав». МИИТ, 2019, 2021, 2023 гг;
- на 10 Международном симпозиуме ElTrans, «Электрификация и развитие ж.д. транспорта России. Традиции, современность, перспективы», С-Петербург, 2019г;
- на III международной выставке «INTERNATIONAL YOUTH CONFERENCE ON RADIO ELECTRONICS, ELECTRICAL AND POWER ENGINEERING», Москва, МЭИ, 2021 г;
- на V Всероссийской научно-технической конференции с международным участием, «Приборы и методы измерений, контроля качества и диагностики в промышленности и на транспорте», Омск, 2022 г;
- на заседаниях кафедры «Электроэнергетика транспорта» РУТ(МИИТ) 2020, 2021, 2022 гг.;
- Объединённый научно-технический семинар (кафедра «Электроэнергетика транспорта» и кафедра «Электропоезда и локомотивы») РУТ (МИИТ) 2023.

1 АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ СИСТЕМ НАКОПЛЕНИЯ ЭНЕРГИИ И ОПЫТА ИХ ПРИМЕНЕНИЯ В СИСТЕМАХ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ МЕТРОПОЛИТЕНОВ В РОССИИ И МИРЕ

1.1 Классификация накопителей энергии

Вопрос накопления и хранения энергии уже длительное время является определяющим для развития технологий. Однако, особенно остро проблема развития данной технологии была поставлена с появлением и распространением электричества, как основной и наиболее универсальной формы передачи энергии. Традиционно накопители принято классифицировать исходя из способа накопления энергии. Таким образом выделяют следующие группы систем накопления энергии (СНЭ):

- Электрохимические накопители;
- Электромеханические накопители;
- Электрические накопители.

К электрохимическим накопителям относятся все устройства, энергия в которых запасается путём преобразования электрической энергии в энергию химических связей. Это явление сопряжено с протеканием обратимой химической реакции – электролиза. Основные типы батарей электрохимического типа, производящиеся промышленно:

- Свинцово-кислотные;
- Никель-кадмиевые;
- Никель-металлогидридные;
- Натрий-серные;
- Литий-ионные и их производные;
- Проточные (редокс).

Электромеханические СНЭ запасают энергию путём преобразования её в механическую, будь то потенциальная энергия покоящейся массы или кинетическая – вращающейся. В рамках этого типа СНЭ рассматривают

гидроаккумулирующие электростанции (ГАЭС) и другие гравитационные накопители, а также маховики.

Электрические накопители энергии выгодно отличаются от остальных технологий своей высокой эффективностью. Это достигается благодаря отсутствию каких-либо преобразований в процессе накопления энергии, поскольку энергия запасается в электрическом (суперконденсатор) или магнитном (сверхпроводниковые индукционные накопители энергии (СПИНЭ)) полях, создаваемых соответствующими устройствами.

1.2 Электрохимические накопители энергии

1.2.1 Свинцово-кислотные аккумуляторы

Первую аккумуляторную батарею на основе свинца изобрёл в 1859 г французский учёный Гастон Планте. Именно тогда, более 150-ти лет назад началась история современных батарей. Свинцово-кислотные батареи до сих пор широко используются в разнообразных технических системах, например в качестве аварийного источника питания для цепей 110/230 В на подстанциях метрополитенов и других технических объектах.

Свинцово-кислотные аккумуляторы запасают энергию за счёт комплекса обратимых химических реакций, описываемой т. н. теорией двойной сульфатации. Электролитом является раствор серной кислоты, активным веществом положительных пластин – двуокись свинца PbO_2 , отрицательных пластин – губчатый свинец Pb [24].

За долгое время существования этой технологии, было разработано множество разнообразных типов батарей по данной технологии и самые современные из них могут прослужить порядка 20 лет, однако, они не избавлены от ряда серьёзных недостатков, включая низкую энергоёмкость (на уровне 20–30 Вт·ч/кг), малое количество циклов заряда/разряда (редко превышает 1500 при глубине разряда порядка 80%), а также, в некоторых случаях, необходимость ручного обслуживания (поддержания концентрации электролита). К тому же в их составе содержатся опасные для человека элементы. Принципиальная

конструкция свинцово-кислотного накопительного элемента представлена на рисунке 1.1.

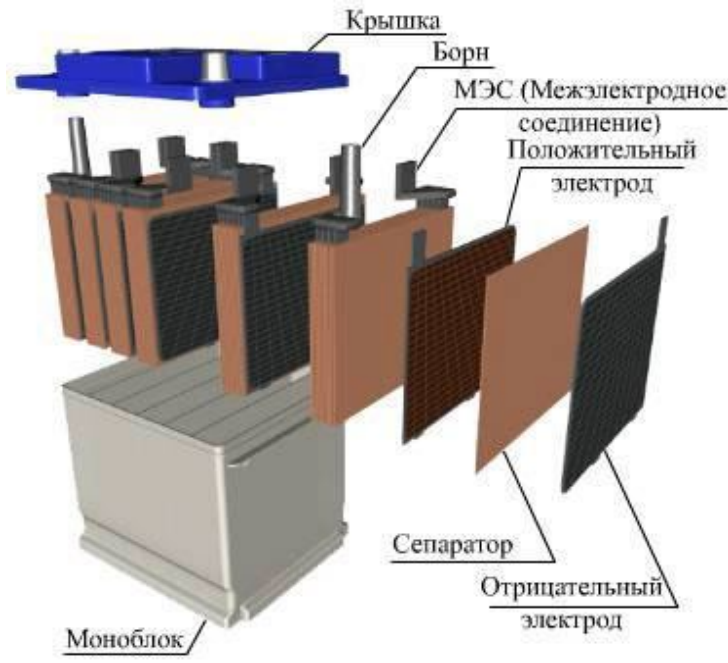


Рисунок 1.1 — Стандартное устройство аккумулятора свинцово-кислотной системы

1.2.2 Никель-кадмиевые аккумуляторы

История никель-кадмиевых батарей берёт своё начало на рубеже XX в. Их изобрёл Вальдмар Юнгер в 1899 г., однако относительно массово производить их начали лишь после разработки нескольких вспомогательных технических решений ко второй половине XX в.[64]. На данный момент в мире крайне распространены герметичные никель-кадмиевые батареи заряжаемых и не заряжаемых типов. Они повсеместно используются в качестве источников питания простой бытовой техники и маломощных электроприборов.

Никель-кадмиевые батареи хорошо работают в режиме быстрого заряда и медленного разряда и практически без последствий разряжаются полностью, а затем без проблем заряжаются снова даже спустя некоторое время хранения в разряженном состоянии. Также стоит отметить, что эти батареи нетребовательны к температурным условиям эксплуатации и сохраняют работоспособность в условиях низких температур.

Принцип действия этого типа накопителей основан на обратимой реакции формирования гидроокиси кадмия на аноде и гидроокиси никеля – на катоде [64].

При всех своих достоинствах, у батарей никель-кадмиевой системы существует довольно много недостатков. Во-первых, в их состав входят токсичные вещества, вызывающие сложности в утилизации. Также они обладают невысокой удельной энергетической плотностью в сравнении с более современными технологиями. Присущий никель-кадмиевым батареям эффект памяти накладывает ряд сложностей в эксплуатации, вынуждая периодически полностью разряжать батарею, а высокий уровень саморазряда не позволяет использовать их для длительного хранения энергии. К тому же, более современные аккумуляторные батареи могут обладать значительно большей цикличностью, что особенно важно в условиях применения их в качестве источника питания на транспорте.

Основные элементы структурной схемы накопителя энергии приведены на рисунке 1.2.



Рисунок 1.2 — Основные элементы щелочного никель кадмиевого аккумулятора серии KL

1.2.3 Никель-металлогидридные аккумуляторы

Никель-металлогидридные аккумуляторы представляют собой развитие идей никель-кадмиевых аккумуляторов и попытку увеличить их удельную энергоёмкость.

Принцип работы этого типа накопителя почти не отличается от никель-кадмиевой системы. В NiMH аккумуляторах анодом является водородный металлогидридный электрод (обычно гидрид никель-лантан или никель-литий), электролит — гидроксид калия, катод — оксид никеля. Благодаря изменениям в составе, удельная энергоёмкость действительно выросла на 30-40% по сравнению с никель-кадмиевой системой, а эффект памяти снизился [64], однако сложность эксплуатации, наоборот, значительно возросла.

Никель-металлогидридные аккумуляторы выполняются двух основных конструкций: цилиндрической и призматической (рисунок 1.3)

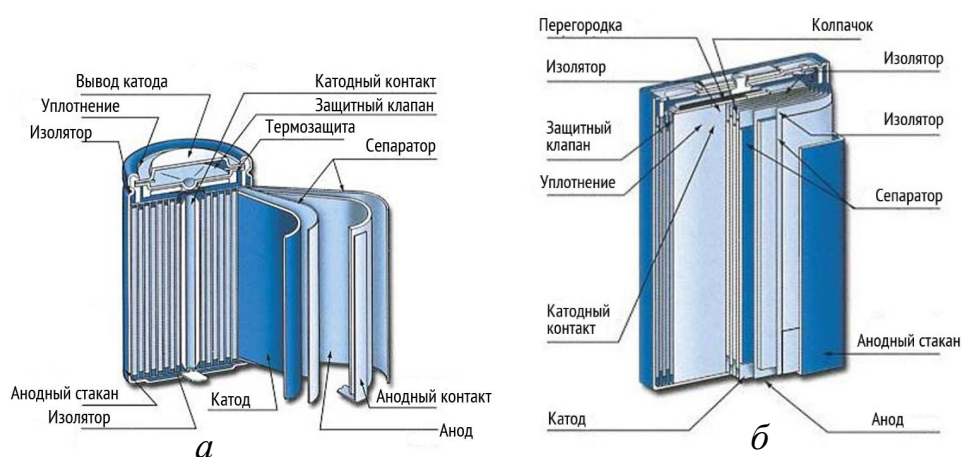


Рисунок 1.3 — Цилиндрическая (а) и призматическая (б) конструкции никель-металлогидридного аккумулятора с обозначением основных элементов

1.2.4 Натрий-серные аккумуляторы

В этой системе анодом является жидкий натрий, электролитом — твёрдый нестехиометрический алюминат натрия, катодом — жидкая элементарная сера в смеси с графитом (рисунок 1.4).

Теоретически энергоёмкость данной системы может достигать 760 Вт·ч/кг, однако в реальной эксплуатации это значение, как правило, не превышает 200

Вт·ч/кг. Также важным недостатком является очень высокая собственная температура работы: вплоть до 340 градусов Цельсия [50].

Главным камнем преткновения при использовании данной технологии становится низкая цикличность. По большей части, сохранение более 80% первоначальной ёмкости после всего 1000 циклов заряда-разряда можно считать очень хорошим результатом для аккумуляторов данных систем [50]. Однако, нельзя не отметить выдающийся результат, описанный в работе [126], где была представлена натрий-серная батарея с особенно длительным временем эксплуатации, которая оказалась способна выдержать более 10000 циклов.



Рисунок 1.4 — Структурная схема натрий-серного аккумулятора

В основном аккумуляторы с твёрдым электролитом ценятся за свою высокую мощность и плотность энергии при небольшой стоимости производства, однако, как было отмечено выше, они подходят только для систем, в которых зарядка аккумуляторов не будет происходить слишком часто.

1.2.5 Литий-ионные аккумуляторы

Литий-ионный аккумулятор (рисунок 1.5) состоит из электродов (катодного материала на алюминиевой фольге и анодного материала на медной фольге), разделённых пористым сепаратором, пропитанным электролитом. Всю историю батарей, которая началась в конце XX в., проводились разнообразные эксперименты с материалом катода. Сейчас часто можно встретить фосфат лития, а батареи на основе титаната лития на данный момент является одними из самых перспективных на рынке электрохимических накопителей.

Достоинствами систем на основе сплавов лития считают высокую плотность энергии (до 250 Вт*ч/кг [49]), низкий саморазряд и практически отсутствующим эффектом памяти [64] а также достаточно простым обслуживанием. На рынке представлен широкий спектр батарей с различными характеристиками, стоимость систем сильно варьируется от ёмкости батарей и сложности зарядно-разрядной электроники.

Наиболее существенным недостатком этих систем остаётся их взрывоопасность, что ограничивает их использование в системах большой мощности. Одним из дорогих, но действенных способов решения этой проблемы является использование твёрдого полимерного электролита.

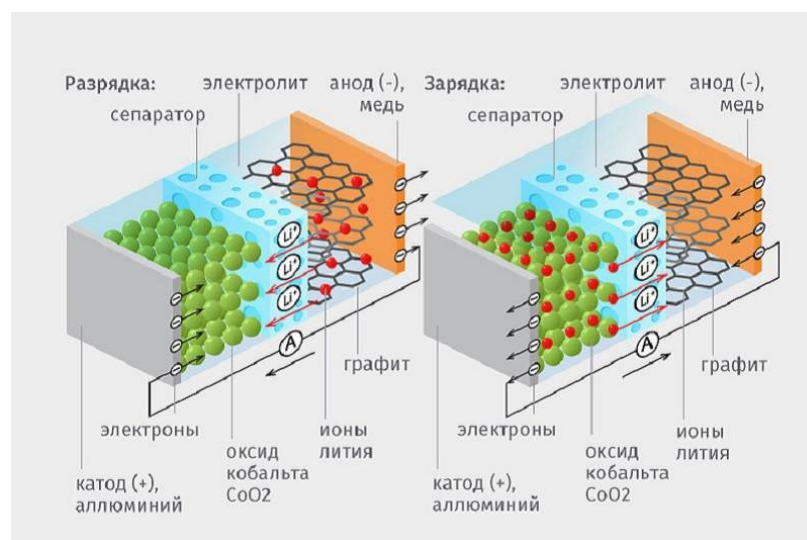


Рисунок 1.5 — Схема устройства аккумуляторов литий-ионной системы

1.2.6 Проточные редокс-аккумуляторы

Редокс-аккумулятор (от англ. Redox — REDuction (восстановление)+OXidation (окисление)) — это достаточно молодая технология в области хранения электрической энергии. Основанная конструкция батареи представляет собой две заполненные жидким электролитом (католитом и анолитом) ёмкости, соединённые с центральной камерой с соответствующими электродами посредством системы насосов и трубок. Электролиты в центральной камере (электродном блоке) разделены специальной ионнообменной мембраной, через которую происходит обмен ионами в процессе заряда/разряда батареи (рисунок 1.6).

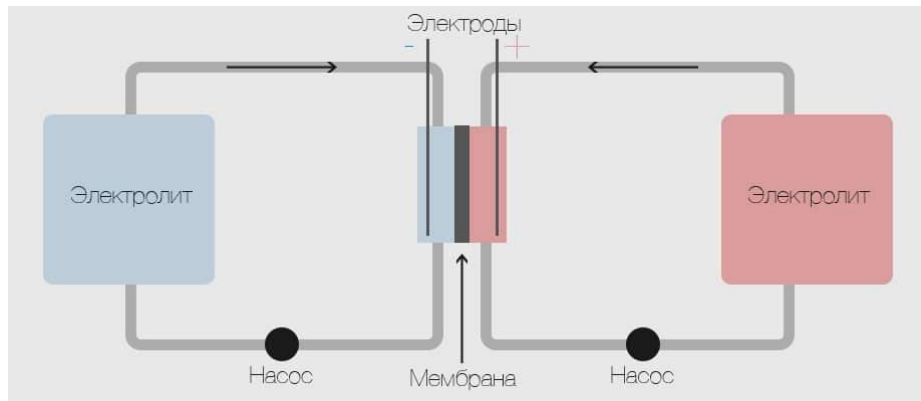


Рисунок 1.6 — Принципиальная схема работы редокс-аккумулятора

В процессе заряда или разряда батареи на одном из электродов протекает обратимая реакция, в ходе которой образуются электроны и положительные ионы. Электроны передаются на второй электрод через внешнюю цепь, а ионы – через полупроницаемую мембрану электронного блока. На втором электроде происходит обратный процесс: восстановление вещества из ионов и электронов [38].

Особенно важной чертой проточных батарей является то, что их мощность и энергоёмкость независимы друг от друга. Причина этому кроется в том, что изменение ёмкости батареи происходит не путём наращивания количества отдельных элементов, как в большинстве прочих случаев, а лишь увеличением объёма резервуаров электролита. В свою очередь, мощность батареи зависит непосредственно от площади электродов в электродном блоке. Это даёт исключительные возможности по масштабированию системы в зависимости от нужд потребителя, недоступные другим типам батарей [17,46]. Ещё одна исключительная особенность – возможность перезарядить батарею, полностью сменив её жидкий электролит с «незаряженного» на «заряженный».

Наибольшее распространение получила система с использованием ванадия. Она достаточно дорогая и имеет низкую плотность энергии [17], однако для неё активно разрабатываются разнообразные аналоги [46].

1.3 Электромеханические накопители энергии

1.3.1 Гидроаккумулирующие электростанции (ГАЭС)

На ГАЭС устанавливается либо комплекс генераторов и насосов, либо обратимые гидроэлектроагрегаты, способные как вырабатывать электроэнергию в

генераторном режиме, так и потреблять её, запасая в виде потенциальной энергии перегоняемой воды. Обычно ГАЭС используется для покрытия пиков нагрузок в энергосетях. Они переходят в режим генерации энергии, когда наблюдается пик нагрузки, тем самым доставляя в сеть дополнительную мощность, без затрат для ближайших электростанций, и запускают насосы в случаях малых нагрузок, чтобы запасти избыточную мощность электросети для покрытия пиков. Естественно, из-за своего устройства, ГАЭС являются достаточно крупным техническим объектом, применение которого оправдано в крупных энергосетях с неравномерным, но достаточно регулярным графиком нагрузок.

Несмотря на крупные габариты, гидроагрегаты достаточно манёвренны и позволяют выдавать нагрузку вплоть до 30 раз в день.

ГАЭС обладают рядом недостатков:

- Малая удельная энергоемкость,
- низкий КПД,
- высокие требования к месту установки,
- необходимость существенного вмешательства в экологию района (для создания ГАЭС приходится затоплять некоторую местность),
- чрезвычайно высокая удельная стоимость строительства (свыше 2 000 долл. за 1 кв. электрической мощности).

Все эти недостатки делают их применение оправданным лишь в составе крупных энергосетей, в которых они и на данный момент показывают достойные результаты [65].

1.3.2 Накопители кинетической энергии (НКЭ)

Инерционные накопители энергии или накопители кинетической энергии – это семейство накопительных установок, в основе которых лежит преобразование электрической энергии в кинетическую энергию вращающейся массы. Вращающийся элемент и, по аналогии с ним, систему накопления энергии на их основе, называют маховым колесом или маховиком. Исходя из исследований [61, 111, 112, 122], именно НКЭ являются наиболее эффективными и универсальными среди прочих механических накопителей.

Технология сохранения энергии во вращающемся колесе существует очень давно. Одним из древнейших примеров её использования может служить гончарный круг, большая масса которого, позволяла длительное время продолжать вращаться за счёт инерции [111]. В более привычном для современного человека понимании, в качестве непосредственных накопителей кинетической энергии, маховики применяются ещё с XIX в.

Современные инерционные накопители энергии представляют собой вращающийся ротор, часто из композитных материалов, на валу которого находится обратимая электрическая машина [122]. Эта конструкция заключается в герметичный корпус и постоянно находится во вращательном движении. В процессе зарядки электрическая машина работает в двигательном режиме, увеличивая частоту вращения маховика, а при разряде переходит в генераторный и вырабатывает электричество, затормаживая систему. Принципиальная схема конструкции изображена на рисунке (рисунок 1.7).

Повышение энергоёмкости системы с маховиковым накопителем сводится к изменению скорости его вращения или момента инерции. Обычно, маховики классифицируют на низкоскоростные (до 10^4 об/мин) и высокоскоростные (до 10^5 об/мин). Высокоскоростные маховики имеют очень хорошие характеристики, но стоят значительно дороже низкоскоростных [122]. Основная причина этого заключается в необходимости применения более технологичных материалов при изготовлении, включая композитные роторы и магнитные подшипники, необходимые для обеспечения безопасности конструкции на разрыв и снижения потерь. Также, потери на трение дополнительно снижают, помещая маховик в герметичный корпус и создавая внутри среду, приближенную к вакууму, чтобы исключить трение колеса о воздух. Магнитные подшипники имеют крайне высокие показатели износостойкости и надёжности [111].



Рисунок 1.7 — Роторный накопитель кинетической энергии: а - компании Socomes; б - компании Active Power

1.3.3 Системы накопления энергии на сжатом воздухе

Технология накопления энергии на основе сжатого воздуха (СНЭСВ) является единственным достойным конкурентом ГАЭС для крупных энергосистем. Сжатый воздух можно использовать для длительного или кратковременного хранения в любом масштабе. Сжатый воздух находится в трёх основных рабочих стадиях: сжатие, хранение и расширение. Многие технические реализации данной технологии похожи на газотурбинные электростанции. Несмотря на зрелость этой технологии, до настоящего времени было замечено очень мало коммерческих внедрений, и поэтому экономическая жизнеспособность остается под вопросом.

В применении на практике накопительные системы на сжатом воздухе очень похожи на ГАЭС и обладают схожими преимуществами, а именно высокую надежность, гибкость, длительный срок службы, относительно низкие эксплуатационные и эксплуатационные расходы и низкую скорость саморазряда [131].

Маломощные системы (<100 КВт) используют искусственные резервуары под давлением, а в более крупных решениях используют природные пещеры. Можно использовать соляные пещеры, заброшенные скважины природного газа, шахты твердых пород или известняка, и прочие природные резервуары.

1.4 Электрические накопители энергии

1.4.1 Сверхпроводниковые индуктивные накопители энергии

В сверхпроводниковых индукционных накопителях энергии (СПИНЭ) энергия запасается в магнитном поле, создаваемом током, протекающим через сверхпроводящую катушку индуктивности (рисунок 1.8). Так как в процессе работы устройства не происходит преобразования энергии в механическую или энергию химических связей, потери при работе устройства оказываются минимальны и сводятся к тепловому воздействию тока на проводник катушки, которое также незначительно, благодаря сверхпроводимости. Это объясняет очень высокий КПД данного класса устройств, который может достигать 98% [15, 95, 106].

Благодаря развитию технологий в области высокотемпературной сверхпроводимости, становится целесообразным применение СПИНЭ в различных энергетических системах [103]. На данный момент они являются дорогой, но конкурентноспособной альтернативой более традиционных систем, благодаря крайне высокому ресурсу. В составе сверхпроводниковых накопителей нет никаких подвижных элементов, также в процессе накопления энергии не происходит никаких химических преобразований, что обеспечивает практически неисчерпаемый ресурс [150].



Рисунок 1.8 — Внутреннее устройство СПИНЭ

Однако, для эффективной работы системы необходимо создать и поддерживать состояние сверхпроводимости. Более того, эффективность работы системы зависит от правильного выбора криогенной аппаратуры [103]. Этот факт значительно увеличивает стоимость установки и эксплуатационные расходы на данные накопители энергии.

1.4.2 Суперконденсаторы

Суперконденсатор, так же называемый ионистором – представляет собой развитие идеи конденсатора, для применения его в распределительных сетях в качестве устройства накопления энергии.

Ионистор — конденсатор с органическим или неорганическим электролитом, «обкладками» в котором служит двойной электрический слой на границе раздела электрода и электролита [132]. Благодаря применению современных материалов, позволяющих увеличить площадь электрического слоя, современные суперконденсаторы имеют сравнительно высокие ёмкость и плотность энергии. Однако, эти параметры значительно проигрывают другим современным типам накопителей [150].

Как и в СПИНЭ, при накоплении энергии в суперконденсаторе не происходит химического превращения вещества и механических процессов, потому ресурс таких накопителей очень высок, вплоть до 10^6 циклов перезарядки [121]. Также они обладают высоким КПД, но основным и самым важным достоинством суперконденсаторов является их крайне высокая, в сравнении с другими накопителями, выходная мощность [150]. Это свойство позволяет использовать суперконденсатор в качестве буферного устройства для батареи с меньшей цикличностью, что позволяет увеличить их рабочий ресурс.

1.5 Основные критерии выбора накопителей

1.5.1 Удельная энергоёмкость

Удельная энергоёмкость, или плотность энергии, определяет количество запасаемой энергии на единицу массы. Чем больше этот показатель, тем более эффективно используются массогабаритные характеристики устройства в процессе

накопления энергии. Этот параметр особенно важен, при установке накопителей в условиях стеснённого пространства, например, на подвижном составе или в условиях ограниченного места на подземных подстанциях метрополитенов.

1.5.2 Удельная мощность

Удельная мощность накопителя энергии характеризует электрическую мощность накопительной установки, отнесённую к её массе. Чем больше этот показатель, тем с большими зарядными и разрядными токами будет работать система. Зарядные и разрядные токи определяют применимость данного типа накопителей в определённых условиях. В идеале накопители должны быть рассчитаны так, чтобы иметь возможность принимать всю пиковую мощность и компенсировать все её провалы, так что мощность накопителей определяется в первую очередь графиками нагрузки конкретной системы.

1.5.3 Величина саморазряда

При проектировании систем накопления энергии важно учитывать период времени, которое накопители должны будут сохранять накопленную энергию. Этот параметр может значительно отличаться от системы к системе. Для большей части крупных промышленных предприятий и электростанций с возобновляемыми источниками энергии, этот период составляет около суток. В случае с рельсовыми видами транспорта, зачастую, такой длительный период хранения не реализуется, поскольку разница между началом циклов заряда и разряда совпадает с прибытием и отбытием поездов на ближайшей станции. Потому величина саморазряда в применении к транспорту играет второстепенную роль. Обычно указывается в процентах ёмкости аккумулятора в сутки.

1.5.4 Цикличность

Цикличность – это количество циклов заряда/разряда, которое способен выдержать СНЭ без значительной потери своих характеристик. Чаще всего имеется в виду снижение энергоёмкости, которая присуща электрохимическим системам, однако для других систем порогом становится износ активных и токоведущих

частей. Обычно указывается количество рабочих циклов при глубине разряда 80%. По этому показателю электрохимические накопители значительно уступают механическим и электрическим конкурентам, что можно видеть в таблице 1.1.

Для нужд тяги цикличность играет наиболее важную роль. Как уже упоминалось ранее, циклы заряда-разряда батарей на транспорте совпадают с количеством пусков и торможений подвижного состава. Это означает, что в день может быть произведено несколько сотен циклов. В таких тяжёлых условиях работы к цикличности предъявляются особенное внимание.

1.5.5 КПД цикла заряд/разряд

Коэффициент полезного действия (КПД) характеризует величину потерь в ходе преобразования энергии внутри накопителя. Как и для любой сложной технической системы, КПД является очень важным критерием выбора накопительной системы.

1.5.6 Срок службы

Жизненный цикл изделия в значительной мере влияет на его экономическую рентабельность. Чем дольше может работать устройство, тем в большей мере оно окупит себя и принесёт прибыль. Устройства с низким жизненным циклом рискуют не окупить вложений в свою установку и оказаться убыточными. Из материалов таблицы 1 можно заключить, что наибольший срок службы присущ батареям с наибольшей цикличностью, что облегчает их выбор в качестве технического решения. С другой стороны, именно эти накопители чаще всего наиболее дороги в производстве, а значит всё ещё рискуют оказаться нерентабельными в некоторых решениях.

В целом задача выбора типа накопителя определяется в ходе технико-экономического расчёта для каждого конкретного случая.

Таблица 1.1 — Сравнение характеристик разных типов СНЭ

Тип устройства	Удельная энергоёмко сть, Вт*ч/кг	Удельная мощность, Вт/кг	Величина саморазряд а, %	Цикличес кость, цикл	КПД, %	Срок службы,
Свинцово-кислотные	20-30	75–300	5	< 1000	< 85	15
Никель-кадмиевые	35-50	150–300	20	< 2000	< 85	20
Никель-металлогидридные	50-120	200–1200	30	< 1000	< 75	10
Натрий-серные	150-240	150–230	15	> 1000	< 75	10
Литий-ионные	150-250	500–2000	10	>10 000	< 90	15
Проточные	20-40	166	0-10	> 10 000	~80	< 20
ГАЭС	0,3–1,33	0,01–0,12	Незначителен	> 10 000	< 86	> 25
Маховики	5–200	400–30000	24–100	~ 10 ⁵	< 96	20
Сажный воздух	3,2–60	2,2–24	Незначителен	> 10 000	< 87	> 25
СПИНЭ	0,5-5	500-2000	10-15	~ 10 ⁶	> 95	> 20
Суперконденсаторы	5-15	5000-10000	10	~ 10 ⁶	< 97	< 30

Таблица 1.1 сформирована по данным источников [15, 17, 18, 24, 28, 38, 49, 50, 64, 95, 106, 111-113, 115, 121, 122, 126, 131-133, 143, 144, 150].

1.6 Обзор опыта применения накопителей на железнодорожном транспорте в мире

1.6.1 Аккумуляторные батареи

В мире присутствует широкий опыт применения электрохимических накопителей для усиления тяговой сети постоянного и переменного тока. Рассмотрим некоторые известные примеры такого использования.

В мае 2005 года муниципальное транспортное бюро Кобе (Япония) провело проверочные испытания системы накопления энергии на основе литий-ионных аккумуляторов на подстанции Миодани линии Сейсин-Яматэ. Система была установлена для повышения эффективности рекуперативного торможения. Участок имеет длину порядка 4 км и уклон в 2,9 тысячных, так что ранее на каждой подстанции были установлены выпрямительно-инверторные агрегаты.

Тестовая установка была призвана подтвердить, что накопители и инверторы не мешают работе друг друга. Также система проверялась отдельно и показала сравнимую с инверторами эффективность. Впоследствии, в 2007 было принято решение установить батареи в два раза большей номинальной мощности на подстанции Итаядо.

В итоге энергопотребление линии снизилось более чем на 310 МВт·ч [123].

Напряжение питания вблизи станции Шин-Андзе линии Нагоя (Япония) обычно сильно падает, потому что станция находится на большом расстоянии от любых подстанций постоянного тока. Однако установка новой подстанции рядом со станцией влечёт некоторые технические проблемы, связанные с пространством, стоимостью и сопутствующими факторами. Поэтому были проведены испытания системы накопления энергии, подключённой неподалёку от станции, чтобы скомпенсировать падение напряжения. Рассматривалась система литий-ионных батарей вдвое меньшей мощности, в сравнении с применённой рассмотренном выше примере. До проведения проверочных испытаний особое внимание уделялось вопросу электромагнитной совместимости данной системы с оборудованием связи на станции. Во время проведения испытаний наибольшее внимание уделялось компенсации падения напряжения. По итогу было установлено, что если номинальная мощность системы превысит 2000 кВт, то напряжение в сети повысится примерно на 45 В, а снижение потерь энергии достигнет 1000 МВт·ч.

Система накопления энергии с использованием литий-ионных аккумуляторов также была установлена на подстанции Шин-Хикида линии Хокурику Западно-Японской железнодорожной компании осенью 2006 года. Систему электроснабжения линии к тому времени как раз перестроили из переменного тока в постоянный. На участке наблюдались проблемы с падением напряжения, к тому же присутствует крутой подъём по склону, при этом периодически приходилось выводить из эксплуатации одну из подстанций.

Для поддержания работы системы в случае отключения одной из подстанций был установлен каскад накопителей ёмкостью 60 А·ч, работающих на напряжении

от 500 В до 780 В с максимально допустимым током 570 А у каждого. По итогам эксплуатации падение напряжения было скомпенсировано на 60 В (при напряжении в сети выше 1300 В). Максимальный зафиксированный зарядный ток составил 688 А, мощность процесса разряда 914 кВт [117].

В апреле 2012 года на подстанции Леттерли линии Маркет-Франкфорд в районе Кенсингтон Северной Филадельфии была установлена система накопления энергии на базе литий-ионных батарей. В системе предусмотрены система управления и три параллельных DC-DC преобразователя общей мощностью 2,2 МВт. Установленные батареи имеют высокую мощность, обеспечивают ток разряда до 1600 А и позволяют хранить до 420 кВт·ч энергии.

Участок Маркет-Франкфорд достаточно сильно загружен, в будние дни по нему проходит 183 поезда, и ежедневно система восстанавливает от 816 до 994 кВтч, а в менее загруженный период выходных дней ещё на 40-50% больше [113, 133].

1.6.2 Суперконденсаторы

В Корее на подстанции Дэдун в 2010 году была установлена система накопления энергии на основе суперконденсаторов. Номинальное напряжение тяговой сети на участке составляет 1500 В постоянного рода тока. Установка состоит из 192 модулей, 8 параллельных групп по 24 элемента. Напряжение одной ячейки составляет 48,6 В, а ёмкость – 165 Ф.

Установка рассчитана на два режима работы: принятие пиков напряжения и сглаживания пиков потребления. То есть система предназначена для выравнивания графика нагрузки в тяговой сети и стабилизации напряжения. До установки накопителей напряжение колебалось в пределах $\pm 19\%$ от номинального, после установки накопителей колебания снизились до $\pm 6\%$. Общее снижение расхода энергии составило 23,4%. За 2 года установленные накопители энергии сэкономили 318762 кВтч [120].

Система накопления энергии на основе суперконденсаторов была внедрена в Мадриде в 2002 году. Система состоит из 42 суперконденсаторов ёмкостью 2400

Ф. Система была рассчитана на накопление 2,3 кВтч энергии и обеспечивают мощность порядка 1 МВт. КПД системы составил 85%.

Испытания системы показали снижение средней потребляемой мощности на один поезд на 50 кВт. Также система обеспечила стабилизацию напряжения, сведя снижения напряжения в линии ниже 530 В (при номинальном напряжении 600В) к минимуму [115, 127, 143].

На железной дороге Сейбу (Япония) системы хранения энергии с применением суперконденсаторов были установлены на подстанции Агано и подстанции Шоумару в декабре 2007 года. Между этими подстанциями средний уклон составляет 2,5 тысячных, потому установка накопителей энергии на таком участке особенно эффективна.

В общей сложности было установлено 288 ячеек, 36 групп по 8 модулей. Эксплуатационные испытания показали следующие результаты [117]:

- Если напряжение питания превышало 1690 В, то накопители заряжались. Энергия принималась от 0 до 4 мин на подстанции Шоумару и от 11 до 14 мин на подстанции Агано.
- Максимальный зарядный ток накопителя составил 990 А на подстанции Агано и 1270 А на подстанции Шоумару. Однако, максимальный ток разряда накопителя составил 1370 А на подстанции Агано и 1160 А на подстанции Шоумару.
- Максимальное напряжение накопителя в режиме заряда составляло 1180 В на подстанции Агано и 920 В на подстанции Шоумару.
- Напряжение не увеличивалось до максимального значения. Это означает, что вся энергия рекуперации была принята накопителем или соседними поездами.
- Сохранённая энергия составила 7,7 кВт * ч, а энергия разряда - 5,9 кВт*ч. Около 77% регенеративной энергии было эффективно использовано повторно.

В 2012 году на тяговой подстанции Т-23 Филёвской линии Московского метрополитена были установлены накопители энергии неуправляемого типа на

основе электрохимических конденсаторов от российской фирмы ООО «ЭКЭ» («ЭЛТОН») общей емкостью 187 Ф.

В общей сложности, было установлено 14 шкафов производства ОАО «ЗАВОД КОНВЕРТОР». Каждый из них содержит по 11 последовательно соединённых накопительных модулей. Система подключена к тяговой сети через ячейку РУ-825В в «положительном» направлении и ячейку с вспомогательным оборудованием и разъединителем к шине обратного тока.

В каждый из шкафов встроена система мониторинга и диагностики основных параметров накопителей: токи, напряжения и температуры каждого модуля снимаются в реальном времени. Данные поступают в специальный логический контроллер, установленный в каждом из шкафов. Модуль оценивает состояние системы и автоматически подаёт соответствующие команды управления, например, активному охлаждению. Также на подстанции был установлен компьютерный контроллер, получающий информацию со всех модулей логического контроля. Он ведёт общий протокол работы системы, а также выполняет роль защиты для накопителей, отключая их от тяговой сети в аварийных ситуациях. На сенсорном экране компьютера выведена мнемоническая схема, обозначающая положение коммутационной аппаратуры и параметры работы всех 14-ти шкафов [92].

Опытный период эксплуатации показал снижение потребляемой мощности подстанции на 13,4% по сравнению со значениями, полученными без использования накопителей энергии. Расчётные потери в тяговых агрегатах, в свою очередь, снизились на 15% (за счет снижения тягового тока). Стоит отметить, что помимо выигрыша за счёт использования энергии рекуперации, потребление энергии также значительно снижается и благодаря полезному воздействию накопителей на режим работы тяговой сети в целом. Более того, достаточно трудно оценить долю рекуперированной энергии от объёма сэкономленной. Дело в том, что некоторая часть метровагонного парка состояла из так называемых «номерных» вагонов, не оборудованных системой рекуперативного торможения. Этой возможностью стали обладать только более новые вагоны «Русич» и «Ока».

Точно оценить соотношение старого и нового подвижного состава не представляется возможным, но можно с уверенностью заявить, что далеко не весь парк ветки на момент проведения испытаний конструктивно был способен рекуперировать. Очевидно, что с полной заменой подвижного состава эффективность работы накопителей энергии вырастет. В условиях эксперимента экономия энергии составила 7%.

Теоретически, установленная система должна была проработать около 25 лет. На данный момент система выведена из эксплуатации по неизвестным причинам.

1.6.3 Маховики

Самый старый накопитель кинетической энергии из применённых на железнодорожной тяге, был установлен на подстанции Дзуси на скоростной железной дороге Кэйхин в 1988 г. Основной задачей устройства стало регулирование процесса рекуперации. По результатам тестов, система накопления энергии принесла выгоду в 12%. Устройство отличается долгим сроком службы и проработало, по крайней мере, 22 года [123].

На линии Лондонского метро Пикадилли расстояние между станциями Northfields и Acton Town настолько велико, что на линии зафиксировано сильное падение уровня питающего напряжения. Напряжение линии колебалось от 880 до 430 В. Завышение напряжения происходило из-за рекуперативного торможения составов.

В 2000 году было принято решение протестировать на участке инерционную систему накопления энергии. Установленная система состояла из трех параллельных блоков мощностью 100 кВт и электронного модуля управления, установленного на подстанции Northfields. Эта система легко масштабируется для удовлетворения дополнительных потребностей в мощности или энергии. Достаточно добавить дополнительные блоки параллельно или последовательно.

Маховики, использованные для этой демонстрации, могли вращаться со скоростью 37 800 об/мин, каждый из них имел энергоёмкость до 11 МДж или около

3 кВтч. Каждая ячейка устанавливалась на площади 600 мм × 600 мм и имела высоту 1500 мм. По данным производителя, КПД цикла составляет примерно 95%, а срок службы около 25 лет.

Номинальное напряжение в месте установки составляло 630 В. Система накопления энергии была настроена так, чтобы при падении напряжения ниже 620 В, система отдавала бы энергию, а при превышении отметки в 650 В – запасала. До установки системы минимальное напряжение линии опускалось до 450 В. Накопитель повысил это значение до 530 В.

Ёмкости системы, по оценкам, было недостаточно, чтобы принять всю энергию рекуперации, потому её часть всё равно сжигалась на резисторах. И использованная энергия рекуперации возросла с 14 до 30%. Суммарная экономия от установки накопителя составила порядка 26% (в виде снижения затрат на электроэнергию). Срок окупаемости, по оценкам, должен составлять порядка пяти лет для каждой из установок [127].

В России ООО «Кинемак» в 2020 проводила испытания своего маховикового стационарного накопителя энергии в трамвайной сети города Коломна. Накопители НКЭ-3Г были установлены в двух местах в передвижных контейнерах с прямым подключением к контактной сети трамвая. В испытательном режиме агрегаты проработали 6 месяцев. Экономия потребления энергии за счёт повторного использования энергии рекуперации, по данным замеров, составила 4,5-4,6%. Снижение пиковой мощности потребления на исследуемой подстанции ТП-3 составило 10-12% [39-45].

2 РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ УНЭ

2.1 Принципиальная схема управляемой накопительной установки

Одним из способов повышения эффективности устройств накопления энергии является внедрение управляемых СНЭ (рисунок 2.1). Стоит отметить, что применение УНЭ может подразумевать увеличение капитальных затрат в сравнении с ННЭ, однако использование систем управления накопителями энергии оказывает значительный положительный эффект на параметры работы накопителя [7, 16, 60]. Благодаря системе управления ресурс накопительной установки используется эффективнее, что значительно продлевает её срок службы, оптимизирует распределение энергии и потери в сети. Управление подразумевает контроль состояния батареи, а также контроль параметров сети в точке его подключения, необходимый для оптимизации режимов работы.

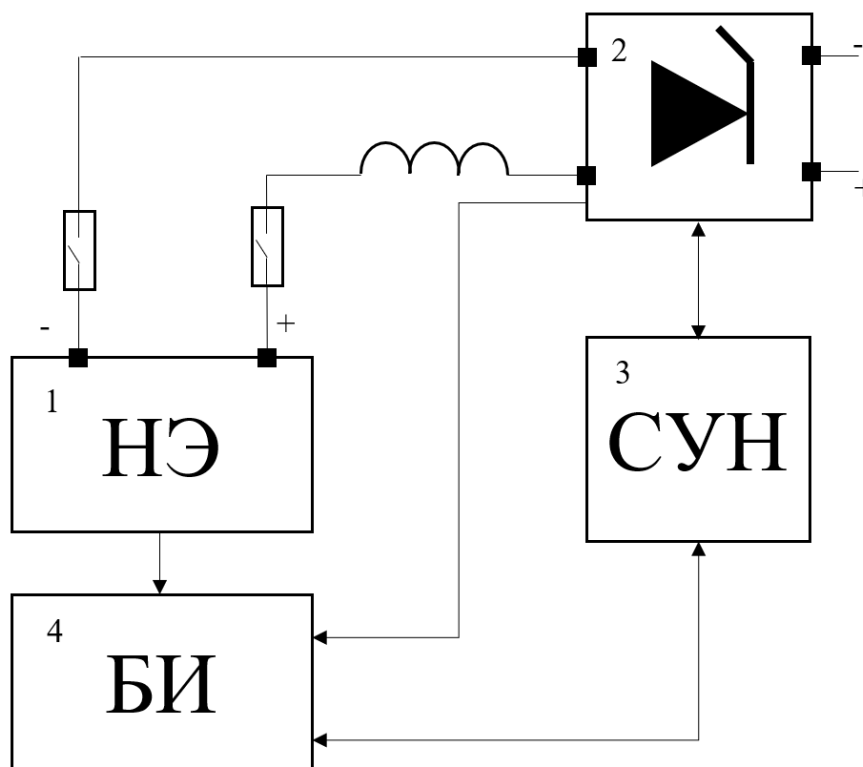


Рисунок 2.1 — Принципиальная схема управляемой накопительной установки (1 – накопительный элемент, 2 – DC-DC преобразователь, 3 – система управления накопителем (СУН), 4 – блок измерений)

Исходя из исследований [20, 40, 60, 105, 118, 136, 138], результатов имитационного моделирования и опытов можно с уверенностью заявить, что

управление значительно повышает эффективность работы накопительных установок. Это происходит за счёт значительно более рационального использования ресурса установки. Помимо очевидного контроля режимов заряда и разряда, сложные системы управления способствуют сохранению работоспособного состояния накопителя, точно определяя его состояние, защищая его от перенапряжений и других неприятных режимов. К тому же, интеллектуальные системы способны разумнее распределять энергию в сети, предсказывая резкие падения напряжений или возрастания тока, для того чтобы подстроиться под сложные режимы работы, например под распределение нагрузок в системах тягового электроснабжения.

Управление также положительно влияет и на показатели энергосистемы. Благодаря системе управления, накопитель в большем числе случаев может обеспечить грамотное перераспределение избыточной энергии рекуперации и скомпенсировать падение напряжений на участках контактной сети в нужный момент времени, что приводит к значительному росту энергетических показателей. При этом, благодаря преобразователю постоянного напряжения, можно обеспечить глубокий разряд батарей, который больше не ограничен разностью напряжений между выводами батареи и тяговой сетью. Это позволяет уменьшить «мёртвый», неиспользуемый объём электрохимических батарей, который может в некоторых случаях достигать 70-80% от всего объёма батареи, позволяя значительно сократить объём накопительной установки, что может быть чрезвычайно важно в условиях размещения в стеснённом пространстве, таком как помещения уже построенных тяговых подстанций метрополитена с подземным размещением (СТП и ТПП), и в целом способствует снижению капитальных затрат.

В общем виде, управление накопителем подразумевает его подключение к DC/DC преобразователю, отвечающему за обеспечение протекания тока в том или ином направлении, в зависимости от команды, подаваемой системой управления после анализа данных, поступающих от измерительных приборов в режиме реального времени.

Предлагается использовать конструкцию, отвечающую следующим принципам:

- Энергоэффективность;
- Модульность;
- Универсальность;
- Обслуживаемость;
- Унифицированность;
- Компактность.

Принцип энергоэффективности подразумевает применение наиболее эффективных технических решений, имеющих наибольший КПД. Например, применение высокоэффективных накопительных элементов и преобразователей энергии, а также алгоритмов систем управления, обеспечивающих наибольшую эффективность работы.

Принцип модульности подразумевает то, что установка состоит из некоторых фиксированных частей – модулей, которые могут быть скомбинированы в различных вариациях для решения широкого спектра задач. Основные модули определены следующими:

1) Накопительные элементы занимают наибольшую часть объёма установки и являются наиболее дорогостоящим из элементов системы. В предложенной конструкции предлагается применять суперконденсаторные модули российского производства. Так-как предлагаемые модули выполнены на напряжение 225 В, они соединяются в последовательные ветви по 5 элементов каждая. Геометрические размеры одного суперконденсаторного модуля составляют ДхВхШ: 1500х180х285 мм. С учётом необходимости технологических зазоров для расположения вспомогательных элементов конструкции, высота одной цепочки накопителей в вертикальном расположении составляет 1145 мм. Ёмкость одного модуля составляет 33 Ф. Диапазон рабочих напряжений установки: от 500 В до 925 В. Таким образом, энергоёмкость одной цепочки составит:

$$E = \frac{C \cdot U_{\max}^2}{2} - \frac{C \cdot U_{\min}^2}{2} \cong 2 \text{ МДж} \quad (2.1)$$



Рисунок 2.2 — схема конструкции одного накопительного шкафа (вид спереди) (размеры представлены в миллиметрах)

С точки зрения размещения и обслуживания оборудования разумно будет разместить три последовательные цепочки накопителей, подключённые параллельно, в одном шкафу. Таким образом энергоёмкость одного накопительного шкафа составит 6 МДж. Оставшаяся высота шкафа (705 мм)

используется для размещения коммутационного и измерительного оборудования, устройств активного охлаждения и прочего вспомогательного оборудования.

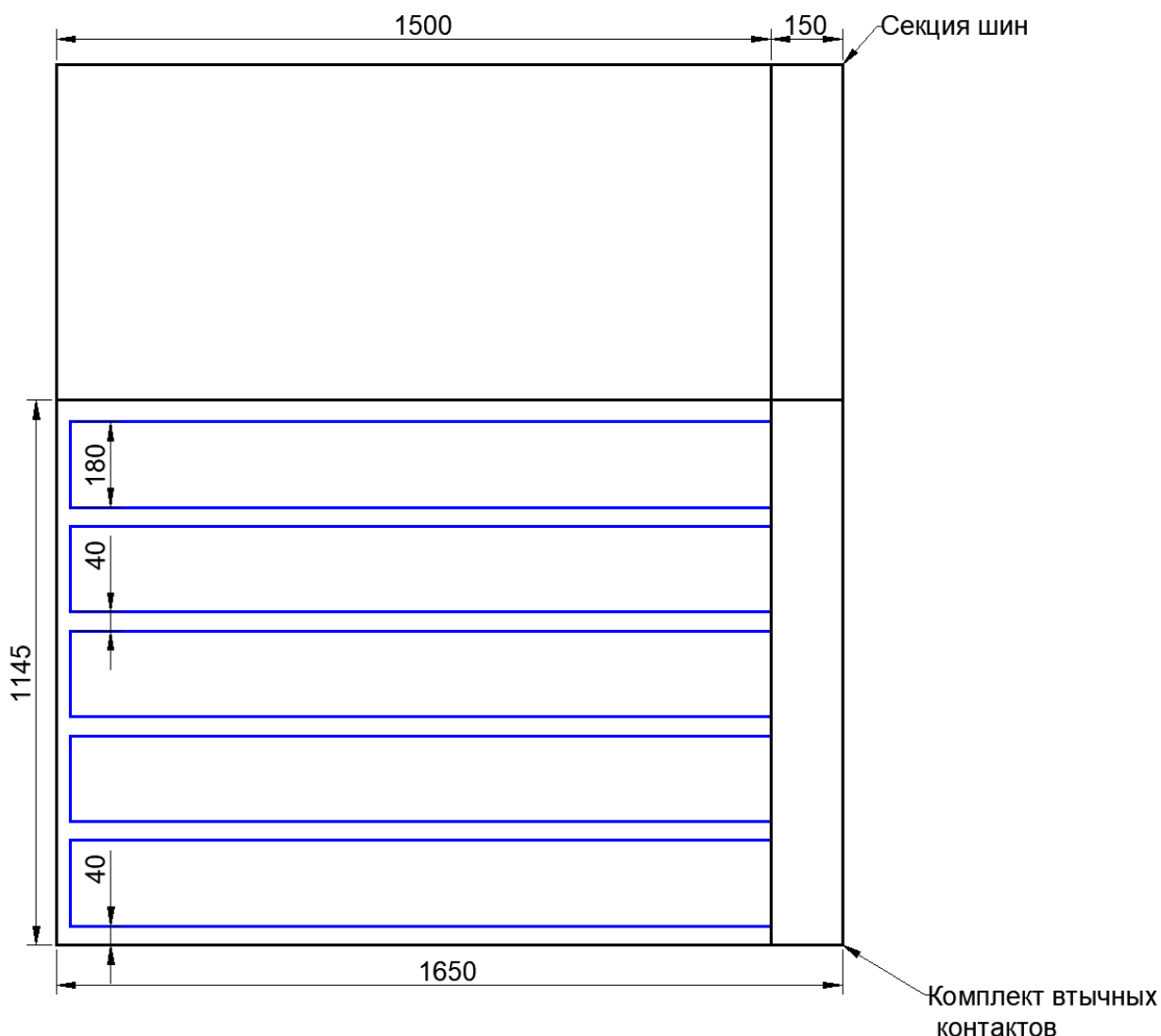


Рисунок 2.3 — схема конструкции одного накопительного шкафа (вид сбоку) (размеры представлены в миллиметрах)

При необходимости увеличения энергоёмкости, накопительный шкафы подключаются к преобразовательному агрегату и системе управления параллельно.

2) Вторым базовым модулем предлагаемой конструкции является преобразователь энергии. В большинстве случаев, он будет представлять из себя шкаф DC-DC преобразователем мощностью с номиналами 1600, 2400 или 3200 кВт.

Модульность конструкции значительно увеличивает надёжность УНЭ, поскольку при отказе части модулей установка может продолжать

функционировать, пусть и с сниженной эффективностью, не неся никакой угрозы безопасности прочего оборудования и обслуживающего персонала. Также модульность повышает ремонтпригодность установки.

Принцип универсальности подразумевает что, благодаря простой масштабируемости, установка может быть выбрана в соответствии с конкретными параметрами задачи. Предложенную установку можно применить для решения всех задач, рассмотренных в данной работе.

Система управления накопителем энергии строится на основе микропроцессора, что позволяет не только корректировать алгоритмы работы для каждого конкретного случая, но и при необходимости изменять пределы управляющих параметров или принципы управления в связи с изменившимися условиями эксплуатации.

Принцип обслуживаемости подразумевает построение установки таким образом, чтобы её обслуживание эксплуатирующей организацией было наиболее удобным и производительным. Модули накопителя выполняются выкатными и оборудованы втычными контактами, пространство которых обозначено на схеме (рисунок 2.3). Соответственно, при необходимости обслуживания, диагностики или ремонта, модуль легко отсоединяется от шкафа, создавая видимый разрыв, и выдвигается на полозьях, а после завершения работы вставляется назад. Данный подход позволит реализовать одностороннее обслуживание без ущерба удобству персонала, но обеспечит больше возможностей для установки УНЭ на ограниченных для установки площадях СТП.

Принцип унифицированности подразумевает использование преобразовательных агрегатов таких мощностей, которые уже применяются в метрополитенах: 1600, 2400, 3200 кВт.

Принцип компактности подразумевает разработку конструкции таким образом, чтобы установка занимала наименьшую возможную полезную площадь при наибольшем полезном эффекте в условиях существующих площадей на СТП. Используются наиболее энергоёмкие накопители (например, суперконденсаторные), компактные способы их размещения и технологии,

позволяющие увеличить их энергоэффективность (в том числе – алгоритмы управления).

2.1.1 Накопительный элемент

Накопительные элементы без преувеличения являются центральной частью систем накопления энергии. Параметры батареи особенно сильно влияют как на электрические, так и на масса-габаритные характеристики СНЭ, к тому же к ним предъявляются высокие требования к безопасности и надёжности, что значительно ограничивает выбор из многообразия различных типов накопителей.

Из представленного в первой главе обзора мирового опыта можно увидеть, что в большинстве примеров применения накопительных установок для нужд транспорта в России и за рубежом, используются накопители следующих систем: электрохимические аккумуляторные батареи литий-ионной системы с высокой цикличностью, батареи суперконденсаторов и маховиковые накопители кинетической энергии.

2.1.2 Преобразователь постоянного напряжения

В отличие от переменного тока, системы постоянного тока сопряжены с проблемой регулирования уровней напряжения. Большая часть мер, применяемых ранее для изменения напряжений нагрузки, являются неэкономичными и основаны на делителях напряжения различной конструкции. Резисторное регулирование приводит к значительным дополнительным потерям электроэнергии, а для обеспечения их регулирования используются контактные группы, которые, несмотря на высокую стоимость и сложную конструкцию, не способны в полной мере обеспечить плавное переключение, из-за чего происходят токовые броски.

Можно выделить четыре базовых схемы преобразователей постоянного напряжения в постоянное (DC-DC преобразователь, от англ. direct current – постоянный ток):

- с широтно-импульсным (временным) регулированием;
- с управляемым обменом энергии реактивных элементов;

- с использованием резонансных явлений LC-контуров;
- с дозированной передачей энергии в нагрузку.

В данной схеме преобразователь руководствуется логикой системы управления. Основная задача DC-DC преобразователя состоит в организации возможности прохода разрядного и зарядного токов накопителя, определяемых не напряжением на шине накопителя, а сигналом системы управления. Для этого необходимо использовать такую схему преобразования, которая способна как повышать, так и понижать выходное напряжение установки в зависимости от режима работы батареи. Потому в данном исследовании будет рассмотрена схема с управляемым обменом энергии реактивных элементов (рисунок 2.4), так как она позволяет реализовать необходимую для данных задач возможность двухстороннего преобразования напряжения, и как повышать выходное напряжение, так и понижать его относительно входного [58].

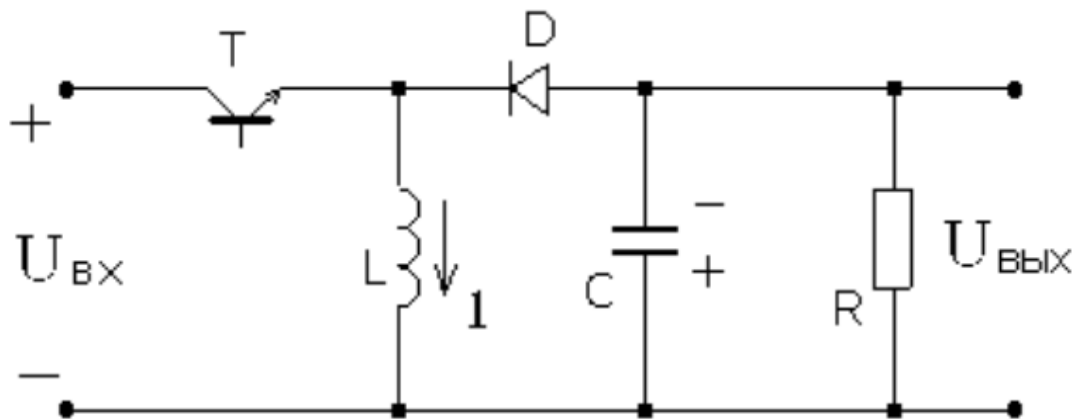


Рисунок 2.4 — Схема "инвертирующего" DC-DC преобразователя

Принцип работы данного преобразователя строится на применении конденсаторных батарей C и катушек индуктивности L , разграниченных диодом D . Поступление энергии в преобразовательную схему, в свою очередь, контролируется транзисторным ключом T . Так как для нужд предложенной выше схемы накопителя необходимо применять реверсивную по току схему преобразователя (рисунок 2.5), что подразумевает шунтирование входного транзистора диодом $D2$, а разграничительного диода – транзистором $T1$. В таком

случае, в зависимости от подаваемых управляющих сигналов режим работы преобразователя будет инвертироваться.

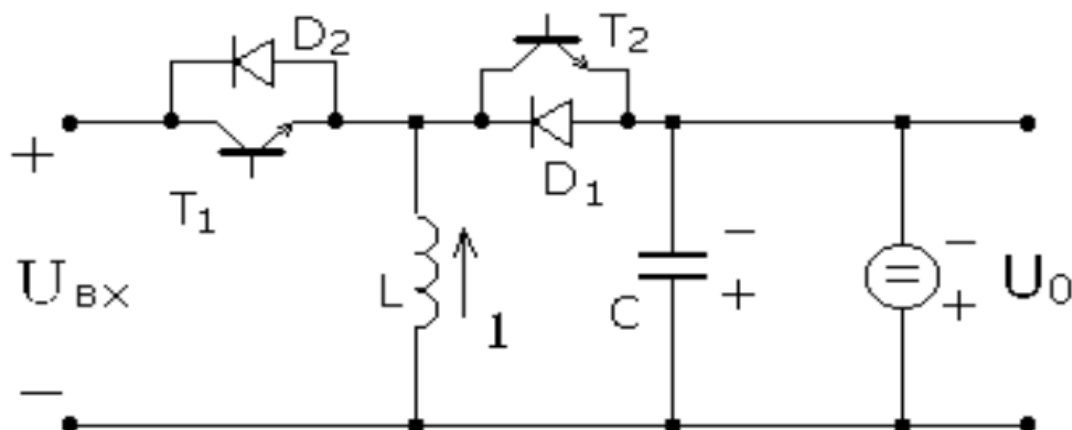


Рисунок 2.5 — Схема реверсивного по току, рекуперативного повышающе-понижающего DC-DC преобразователя

2.1.3 Система управления накопителя энергии

На систему управления ложится принятие решения о текущем режиме работы накопителя исходя из данных, которые поступают от блока измерений в режиме реального времени. Среди анализируемых параметров обычно должны присутствовать как внутренние данные о состоянии накопительного элемента, так и состояние внешней сети. Среди внутренних параметров наиболее важными являются напряжение и ток батареи, и её температура. Это основные параметры, позволяющие оценить текущее состояние батареи, включая её текущий заряд, и среагировать на аварийные перенапряжения, которые могут приводить к перегреву или даже возгоранию аккумуляторных батарей. Эту часть СУН можно назвать системой контроля состояния батареи (СКСБ). Решение о состоянии батареи принимается аналитически, посредством вычислений, произведённых микропроцессорным блоком по заранее задаваемым алгоритмам.

Режим работы накопительной установки определяется на основе внешних данных. Для этого система производит сравнение уровней напряжения в определённых точках схемы и некоторых заранее выбранных, обычно номинальных значений. Если значение контролируемого напряжения ниже номинального, система управления подаёт сигнал преобразователю на переход в режим разряда, чтобы обеспечить подпитку сети. Иначе накопитель остаётся в

режиме ожидания или переходит в режим заряда. Управление может осуществляться относительно любой точки системы, к которой возможно осуществить подключение соответствующей измерительной аппаратуры. При необходимости, возможно осуществлять контроль напряжения на нескольких исследуемых точках, однако это усложнит и удорожит СУН.

Решения о переключении режимов осуществляются блоком микропроцессора. Они могут исполняться как с заранее заложенными алгоритмами, так и с возможностью дополнительной настройки со стороны пользователя. Благодаря подобной настройке, НЭ можно приспособить под нужды любой конкретной схемы. Это может быть полезно при изменении конфигурации поддерживаемой сети или, например, для передвижной накопительной станции. Передвижные станции, выступающие в качестве временных накопительных установок или для аварийных нужд, обычно подразумеваются неуправляемого типа. В первую очередь это связано с высокими требованиями к компактности таких аппаратов. Однако, если есть возможность разместить систему управления, то это повысит эффективность и такой накопительной установки.

Помимо непосредственного уравнивания работой батареи, система управления способна реализовывать более высокоуровневые функции. Так как система управления уже имеет доступ к показаниям датчиков, по которым можно определить состояние контролируемой батареи, разумным решением будет совмещение функций управления с мониторингом или даже диагностикой батареи. Таким образом, соответственно расширив элементную базу, можно получить умную систему контроля батареи, способную ещё сильнее продлить срок службы ячеек, предотвратить аварийные ситуации и прочее.

Современные компьютерные технологии позволяют, при наличии соответствующих данных, создавать точные модели старения ячеек накопителей энергии, обладающие некоторой предсказательной способностью. Если динамически корректировать систему управления накопителем так, чтобы кривая старения стремилась к некому идеальному значению, можно значительно продлить срок службы батарей. Стоит отметить, что кривые старения будут требовать

постоянного пересчёта, при изменениях состояния системы. Это подразумевает наличие значительных вычислительных мощностей, что не всегда можно реализовать в рамках небольшого стационарного устройства управления. Чем больше ячеек содержит батарея, или чем больше накопительных установок подключено к этой аналитической системе, тем эффективнее она будет использоваться.

Системы управления накопителей энергии имеют значительное разнообразие конструктивных и технических исполнений. Самым простым, но не самым эффективным, является расположение всех систем в ячейке, некотором шкафу управления, для контроля каждой конкретной накопительной установки по отдельности. При этом всё дорогостоящее вычислительное оборудование также находится в непосредственной близости, что позволяет сэкономить на системах передачи информации, однако это единственное преимущество данной системы. При наличии нескольких систем управления у одной эксплуатирующей организации, их вычислительные мощности будут использоваться не максимально эффективно, а стоимость оборудования значительно вырастет.

Более предпочтительным можно назвать централизованное исполнение системы управления батареями. В таком случае в непосредственной близости от каждой накопительной установки находится относительно компактная «ведомая» часть СУ. В ней представлен только необходимый минимум оборудования, обеспечивающий непосредственное управление батареей и запись данных, получаемых от блока измерений. Ведомая СУ конструктивно значительно отличается в зависимости от измеряемых батарей, однако обычно она состоит из одного или нескольких одноплатных микропроцессорных блоков, перекодирующих полученные значения и обменивающийся данными с центральным блоком СУ.

Все вычислительные мощности сосредоточены в центральном блоке, который получает информацию от всех ведомых СУ посредством единой информационной шины или других информационных средств. Жизненно важно, чтобы эта связь была обеспечена непрерывно и канал был достаточно широким для двусторонней передачи данных. С точки зрения аппаратного обеспечения,

наличие централизованной системы позволяет получить значительно большую и более эффективно применяемую вычислительную мощность. Это, с одной стороны, обеспечивает использование передовых алгоритмов расчёта моделей старения, с другой стороны, эта система позволит встроить множество дополнительных функций, позволяющих дополнительно увеличить эффективность управления батареями. Например, немецкие учёные предложили адаптировать нейросеть с машинным обучением для определения состояния аккумуляторов и принятия решения по корректировке режима работы.

Как можно заключить из вышесказанного, предложенная система отлично соответствует концепции «Интернета вещей» и «Умной сети», которые активно развиваются в рамках железнодорожного транспорта. Благодаря тому, что все накопители уже соединены в единую информационную сеть, соединить их с другими устройствами будет значительно проще и не потребует значительных капитальных вложений.

Smart grid или «Умные сети» на данный момент являются передовым направлением в современной энергетике. Объединение устройств в единую информационную сеть позволяет обеспечить их мониторинг и контроль их старения – эффективный и передовой способ повышения общей надёжности всей системы. Возможность предсказывать отказы оборудования с достаточной точностью позволяет минимизировать ситуации аварийного отключения электропитания, что способствует выполнению одной из главных задач электроснабжения рельсового транспорта: обеспечение бесперебойной подачи электроэнергии в тяговую сеть. Накопители так же способствуют обеспечению достижения этой цели, поскольку могут являться источниками аварийного питания, поддерживающими высокий уровень напряжения.

2.2 Задача выбора накопителей энергии

Под выбором накопителей энергии подразумевается методика определения параметров накопительной установки, её тип и выбор максимально эффективного места для её подключения [74, 77].

Основными критериями для выбора накопительной установки являются энергия и мощность процессов заряда и разряда. Несмотря на связанность этих понятий, их стоит разделить, поскольку параметры накопителей энергии с одинаковой энергоёмкостью могут значительно отличаться в зависимости от времени протекания процесса разряда и заряда.

Время заряда и разряда накопителя зачастую выступает ограничивающим фактором. В лабораторных условиях любой накопитель энергии может запасать и накапливать энергию в зависимости от разрешённой глубины разряда, которая в свою очередь определяется технологическим исполнением батарей. Именно эта величина принимается за полную энергоёмкость накопителя. В реальных рабочих условиях режим работы накопителя диктуется состоянием сложных электрических цепей, к которым он подключается. В таких условиях энергия накопителя расходуется не полностью. Объём полезной энергии, которую накопитель способен отдавать и принимать в реальной электрической сети называется **оборотной энергией** накопительной установки.

Мощность процесса разряда определяет максимальный возможный ток, который батарея сможет поддерживать в течение заданного времени. Для батарей, предназначенных для длительного поддержания напряжения в схеме, не требуется высокая выходная мощность, поскольку процессы, протекающие в таких цепях, обычно, не подразумевают высокой интенсивности нагрузок и несут предсказуемый характер со строгой периодичностью, описываемой суточными графиками. Электрический транспорт является нагрузкой импульсного характера, потому для их специфики требуются технологические решения с высокой выходной мощностью.

Исходя из опыта исследований и эксплуатации накопителей, становится очевидно, что установка НЭ на одной подстанции сети с двухсторонним питанием приводит к значительному изменению режима работы всей тяговой сети. Для наибольшего положительного эффекта количество подстанций, оборудованных накопителем, следует увеличивать. Возрастание выгоды от установленных УНЭ обычно происходит медленнее, в сравнении с ростом капитальных вложений.

Определение наиболее перспективных участков для оборудования их накопительными установками является сложной технической задачей, решаемой в ходе анализа результатов математического моделирования работы СТЭ в разных режимах.

Нередко транспортная инфраструктура постоянного тока используется в городских условиях, что влечёт за собой ряд серьёзных технических ограничений, связанных с ограниченностью площади, которую возможно выделять под размещение оборудования. Зачастую подстанции, расположенные посреди городской застройки или, тем более, в тоннелях, не располагают достаточным количеством свободного места, для установки необходимого числа накопительных установок.

2.3 Требования к накопителям энергии

Любой вид электрифицированного рельсового транспорта является объектом повышенной опасности. С точки зрения проектирования и внедрения новых технических решений это означает, что любое оборудование, размещаемое на транспортном полигоне, должно соответствовать строгим техническим критериям, позволяющим обеспечить высокую надёжность и безопасность перевозок [67, 70-72].

Из представленного в первой главе обзора мирового опыта можно увидеть, что в большинстве примеров применения накопительных установок для нужд транспорта в России и за рубежом, используются накопители следующих систем: электрохимические аккумуляторные батареи литий-ионной системы с высокой цикличностью, батареи суперконденсаторов и маховиковые накопители кинетической энергии.

Причин для такого сужения возможной элементной базы несколько. Наиболее важным критерием выбора системы является её износостойкость. Так большая часть современных электрохимических батарей неплохо показывают себя в отдельных областях электроники и электротехники, в которых графики нагрузки достаточно предсказуемы, а цикличность процесса заряда-разряда невелика, не превышая в нормальных условиях 2-3 цикла в день. В таких условиях

электрохимические накопители могут служить длительное время, достаточное для их окупаемости.

Согласно таблице 1, практически все электрохимические накопители имеют цикличность от 1000 до 10000. В условиях метрополитена или другого рельсового транспорта накопитель, в нормальных условиях, включается в работу при каждом пуске поезда, когда напряжение в точке его установки падает ниже определённой отметки. В Московском метрополитене, например, это происходит десятки раз в час. В таких условиях износ электрохимических батарей большинства систем не позволит им прослужить достаточно долго для того, чтобы окупить затраты на своё приобретение.

Объём накопителя в значительной мере зависит от решаемой накопителем задачи. В общем виде, выбор объёма накопителя сводится к определению энергии, поступающей в накопитель в рамках одного зарядно-разрядного цикла. В случае, когда накопитель используется для выравнивания графиков нагрузок и компенсации падения напряжения в тяговой сети, предсказать объёмы энергии, проходящие через накопитель в любом направлении относительно просто. Выбор объёма накопителя энергии для принятия энергии рекуперации, напротив, является трудоёмкой задачей, решение которой аналитическим методом не представляется возможным. Без составления и расчёта точных моделей работы сети постоянного тока, оценить распределение энергии рекуперации между межпоездным обменом и накопителями, расположенными в тяговой сети, практически невозможно. Выбор параметров батарей можно осуществить путём анализа параметров множества вариантов установок, полученных в процессе математического моделирования исследуемого объекта.

Прежде чем рассматривать создание подобного алгоритма, необходимо определиться с параметрами сравнения эффективности накопителей энергии. Так, одним из немаловажных факторов можно отметить итоговую стоимость установки, поскольку одним из важнейших критериев эффективности накопителя можно считать его окупаемость. Часто встречается такая ситуация, когда увеличение

объёма накопителя приносит значительные технические преимущества, однако таким образом приобретение накопителя может стать убыточным мероприятием.

Другим немаловажным критерием сравнения является экономия энергии. Расчёт этого показателя является основополагающей частью процесса выбора накопительной установки, поскольку именно экономия электроэнергии является основной и одной из главных задач внедрения любого накопителя энергии.

Третьим критерием для определения параметров накопителей я бы хотел отметить повышение напряжения на нагрузках. Нагрузками в системе тягового электроснабжения являются в основном поезда, которые потребляют наибольшие токи в сравнении со всем другим оборудованием рельсового транспорта. Однако, несмотря на это, контроль уровней напряжений на остальных нагрузках является не менее важной задачей, поскольку вспомогательное оборудование, отвечающее за безопасность пассажиров и грузов, перевозимых посредством рельсового транспорта, зачастую является чувствительным по отношению к уровню питающего напряжения.

В городских условиях и, особенно в условиях тоннельного расположения, важным критерием выбора накопительной системы служит взрыво- и пожаробезопасность. По данным статьи [28] батареи литий-ионной системы подвержены явлению теплового разгона, из-за чего могут взрываться или самовозгораться. В последнее время число таких случаев снижается, но опасность всё-ещё сохраняется. Сравнительно, число аварий, связанных с нарушением эксплуатации СПИНЭ, супермаховика и суперконденсатора значительно ниже.

Некоторые виды транспорта накладывают дополнительные ограничения. Так, метрополитены особенно чувствительны к энергоёмкости накопительной установки, поскольку их размещение происходит в ограниченном пространстве из-за подземного расположения инфраструктуры. Исходя из вышесказанного, в дальнейшем в работе целесообразно будет рассмотреть только высоко циклические литий-ионные батареи в особых местах расположения, а также накопители энергии не электрохимических систем.

2.4 Расположение накопителей энергии

В системе тягового электроснабжения существует несколько возможных вариантов размещения накопительной установки:

- В составе оборудования тяговых подстанций
- В качестве усиливающего оборудования тяговой сети

2.4.1 Расположение УНЭ составе оборудования тяговой подстанции

При установке накопителя энергии на тяговой подстанции, проще всего его подключить непосредственно к шине постоянного тока распределительного устройства 825 В. В зависимости от выбранного режима работы, в таком случае накопитель будет срезать пики нагрузок, которые приходится на момент пуска двигателя электровоза, а также запасать и перераспределять избыточную энергию рекуперации. Снижение пиковых токов нагрузки подразумевает снижение эффективного тока подстанции, что в свою очередь приводит к снижению установленной мощности. Такой накопитель не обязательно должен иметь большую ёмкость, и легко встраивается в любую современную инфраструктуру [129, 130, 135, 137, 142, 145-147, 151], (рисунок 2.6).

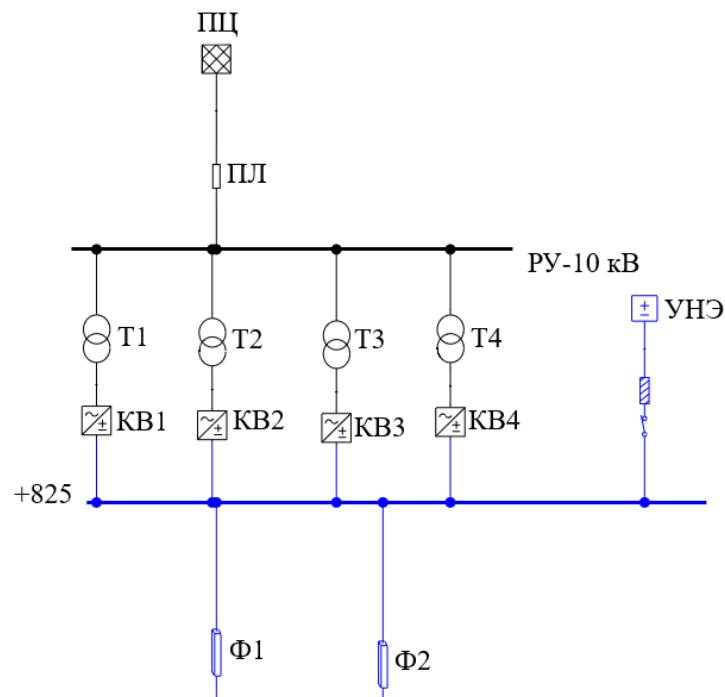


Рисунок 2.6 — Принципиальная схема расположения накопителя энергии в программной среде ЕТАР

2.4.1.1 Использование накопителя в качестве резервного источника энергии

Накопитель на подстанции может служить аварийным источником питания, компенсирующим временное снижение мощности за счёт выравнивания графика нагрузки. Стоит отметить, что такая мера является исключительно аварийной, и не избавляет от необходимости ремонтных мероприятий, однако она может избавить от необходимости установки резерва.

Накопитель энергии, установленный на тяговой подстанции и подключённый к шине 825 В (рисунок 2.6), благодаря своим свойствам стабилизирует напряжение. Благодаря этому, если установить накопитель достаточной ёмкости и мощности, возможно удерживать необходимый уровень напряжения даже после вывода из работы одного из агрегатов, например из-за аварии. Выпрямительные агрегаты и трансформаторы изначально рассчитываются с учётом длительного поддержания аварийного режима, однако очевидно, что такие режимы вызывают значительные длительные токовые перегрузки, которые ускоряют износ оборудования. Накопительная установка в таких условиях примет на себя значительную часть потребляемого тягой тока, что снизит негативный эффект от аварийной ситуации на тяговые агрегаты. Накопитель энергии минимизирует ущерб от длительного вынужденного режима, позволяя продлить жизненный цикл остального оборудования.

В перспективе, с ростом надёжности и доступности накопительных установок, аккумуляторная батарея сможет заменить один из тяговых агрегатов полностью. Включённый таким образом накопитель в основном работает в качестве устройства выравнивания графика нагрузки, который принимает на себя задачу по снижению общих токов агрегатов. Благодаря этому такой накопитель снизит общий износ остальных агрегатов, принимая на себя избыток нагрузки, и заряжаясь в промежутках между пиками.

Очевидно, что требования к такому накопителю крайне высоки. Помимо достаточно высоких требований к мощности и рабочему объёму, подобный накопитель должен быть крайне надёжен. В идеале, настолько же надёжен, как и

заменённый им агрегат. Однако, обычно накопители энергии состоят из большего количества звеньев. Как известно, число последовательно включённых звеньев любом устройстве снижает его надёжность, увеличивая вероятность отказа системы прямо пропорционально своему количеству. Исходя из этого, для перехода к типовым решениям в области сохранения и перераспределения накапливаемой электроэнергии становится крайне важным вопрос надёжности каждого конкретного элемента накопительной установки. Обычно накопители энергии используются для повышения энергетических показателей уже действующей системы, что позволяет несколько снизить требования к их надёжности. Дело в том, что при таком рассмотрении система накопления энергии будет служить вспомогательным оборудованием, которое, пусть и в значительной мере положительно влияет на режимы работы СТЭ, но не является необходимым для её исправного функционирования. Из этого следует, что выход системы накопления из строя, или временный вывод её из работы не является критичным, поскольку это не препятствует обеспечению выполнения главной задачи системы тягового электроснабжения метрополитена: бесперебойных и безопасных перевозок пассажиров.

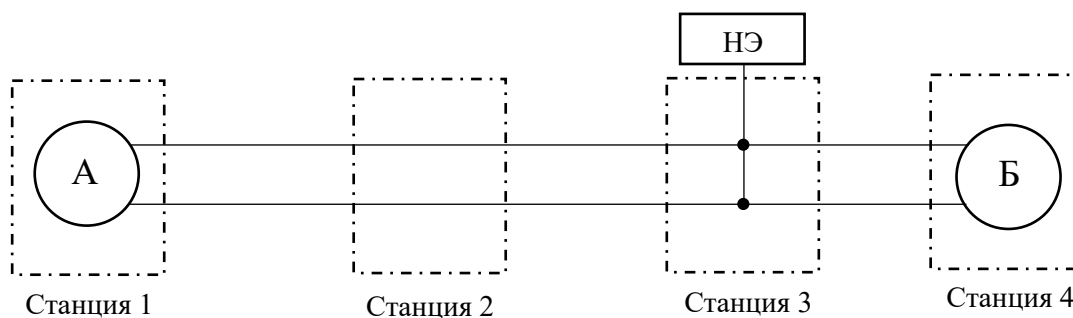
2.4.2 Использование УНЭ в качестве усиливающего оборудования тяговой сети

Накопитель энергии может располагаться и вне тяговой подстанции. В таком случае он, обычно, выполняет усиливающую функцию, избавляя от необходимости в установке дополнительной подстанции.

Любое размещение накопителей энергии в составе тяговой сети подразумевает непосредственное усиление тяговой сети, так что оно может служить аналогом усиливающих проводов. Усиливающие провода снижают потери энергии за счёт увеличения сечения контактной сети, что снижает падение напряжения. Накопители энергии же повышают напряжение в той точке, в которой подключены, а тем самым и на всём участке тяговой сети [80-91, 93, 94].

2.4.2.1 Расположение в середине перегона

Расположение накопителя энергии в середине перегона позволяет увеличить пропускную способность линии, поскольку повышают напряжение в тяговой сети вдалеке от подстанции. Так, накопитель, установленный на удалённом остановочном пункте, примет на себя часть тока нагрузки, уменьшая потери в тяговой сети и значительно облегчая режимы пуска (рисунок 2.7). На рельсовом транспорте постоянного тока для установки накопителей можно использовать уже



имеющуюся инфраструктуру постов секционирования, расширяя тем самым их функционал.

Рисунок 2.7 — Принципиальная схема подключения накопителя энергии

Основываясь на исследовании [118] с точки зрения экономии электроэнергии и поддержания высокого уровня напряжения в тяговой сети наиболее эффективным положением стационарной накопительной установки является середина межподстанционной зоны. Благодаря своим характеристикам накопитель сохраняет высокий уровень напряжения в тяговой сети во время прохождения поезда, что приводит к значительному снижению потерь в тяговой сети и увеличению пропускной способности участка. Из-за схемы включения установки в центре перегона образуется пункт соединения путей, что положительно сказывается на распределении тока в тяговой сети.

Для участков метро, где в одной и той же межстанционной зоне совершается несколько остановок, существует проблема наложения пусковых тока ЭПС, что может привести к значительному снижению напряжения в тяговой сети и значительно повысить нагрузку на тяговое оборудование. В идеальных условиях, для поддержания высокого уровня напряжения на всём протяжении

межподстанционной зоны, тяговые подстанции должны располагаться вблизи каждой остановки, но для самых старых линий это невозможно. Есть много подобных участков на таких линиях, как Сокольническая линия Московского метрополитена, центральный участок которой был построен ещё в первой половине прошлого века. В качестве решения такой проблемы можно предложить включить вблизи такой остановки устройство накопления энергии по схеме (рисунок 2.7).

Как видно из рисунка 2.7, данная схема включает в себя не только устройство накопления энергии, установка которого в рамках тоннельного размещения вполне приемлема, в отличие от полноценной подстанции, но и соединяет два пути, изменяя схему питания на узловую, что облегчает режим работы благодаря перераспределению токов в тяговой сети.

2.4.2.2 Расположение на конце консольного участка

На железных дорогах и в метро иногда можно встретить консольные режимы питания. Часто эти режимы являются вынужденными или аварийными, и, несмотря на выбор оборудования в соответствии с этими режимами, они приводят к значительному увеличению нагрузки на оборудование, тем самым сокращая его срок службы, повышая риск возникновения новых чрезвычайных ситуаций, и вынужденно снижая размеры движения. Снижение срока службы касается как преобразователей, так и трансформаторов и кабелей питания. Напряжение в тяговой сети на конце консоли значительно снижается, что приводит к увеличению тока, проходящего через вышеприведенное оборудование, а иногда даже исключает возможность движения ЭПС.

Наиболее эффективным решением такой проблемы является использование передвижных (комплектных) накопительных станций (ПНС). Передвижная накопительная станция — это вагон, на борту которого размещается набор накопительных элементов и сопутствующего оборудования. В случае чрезвычайной ситуации ПНС перемещается к концу вновь сформированной консольной секции и помещается в любом удобном для этого месте, а затем

подключается к тяговой сети, действуя как мобильная тяговая подстанция. В отличие от полноценной мобильной тяговой подстанции, ПНС стоит меньше, однако может иметь высокую мобильность и компактность при сравнительно большой мощности, сравнимой с небольшой традиционной тяговой подстанцией. При этом она имеет большое преимущество – не требуются дополнительные кабели или воздушные линии электропередач, подвести которые в большинстве случаев невозможно. Следует отметить, что использование нестандартных схем питания требует специфических расчетов с применением специальных имитационных моделей.

Важнейшей целью предприятий железнодорожного транспорта и метрополитена является обеспечение бесперебойного и безопасного процесса перевозки пассажиров и грузов. Напряжение в точке подключения ПНС значительно увеличивается, что позволяет компенсировать дополнительную нагрузку на оборудование и избежать каскадных отказов, что может привести к неприемлемо длительной остановке движения или значительному снижению размеров движения.

Вышеприведенное решение может быть применено на любом полигоне тяги постоянного тока, будь то метро или железные дороги. Специалисты МИИТа предлагают реализовать аналогичное техническое решение для метро на базе ряда вагонов метро 81-765/766/767 «Москва». Учитывая опыт использования ННЭ на тяговых подстанциях Т-23 и Т-24 «Филевской» линии московского метрополитена, можно утверждать, что данный вагон, размеры которого составляют (ДхШхВ) 20х2,6х2,5 метров, вполне вмещают НЭ неуправляемого типа энергоёмкостью 85 МДж со всеми необходимыми коммутационными устройствами, а также системами управления, контроля и диагностики.

Если установить подстанцию на конце консоли, это может решить проблему низкого напряжения, однако приведёт к техническим трудностям и финансовым издержкам. Если вместо традиционной тяговой подстанции установить небольшую накопительную (в тупике или на межпутных съездах), это создаст положительный эффект, снизит тяговые токи, увеличит срок службы оборудования ближайшей

подстанции и даже повысит пропускную способность участка. Однако, вся необходимая энергия ПНС будет поступать из существующей СТЭ через контактную сеть, дополнительные кабельные линии не понадобятся.

СНЭ, установленная в конце консольного участка, может подразумевать достаточно большую энергоёмкость, если интенсивность движения на участке высокая, и подзарядка по контактной сети оказывается невозможной. Обычно, на участках, изначально спроектированных для эксплуатации с консольной системой питания, интенсивность движения невысокая. В таком случае нагрузка имеет редкоимпульсный характер, что позволяет эффективно заряжать накопитель энергии сравнительно невысокой мощностью в интервале между прохождением поездов.

2.4.3 Определение мест установки накопителей энергии на тяговых подстанциях метрополитена

Зачастую невозможно оборудовать каждую подстанцию линии метрополитена накопителем энергии, поскольку это составляет значительные капитальные затраты. Поэтому может стоять задача выбора таких мест их расположения, в которых их установка принесёт наибольший экономический эффект.

Предлагается методика, основанная на анализе взаимных влияний электроустановок по всей линии, включая тяговые подстанции и расположенное на них оборудование, а также ЭПС. Проще всего учесть такие взаимовлияния при помощи матрично-топологических методов анализа электрических цепей.

Обозначим критерии эффективности применения стационарных накопителей энергии на тяговых подстанциях метрополитенов:

1. Наиболее часто рекуперативное торможение фиксируется на электропоездах, приближающихся к станции;
2. Передача энергии от рекуперирующего состава сопряжена с повышением напряжения на токоприёмнике ЭПС;

3. Для максимизации эффекта, необходимо пресечь подзарядку накопителя энергии от выпрямительных агрегатов, то есть поднять напряжение на шинах подстанции выше уровня холостого хода.

Таким образом очевидно, что необходимо установить влияние токов рекуперации на токи ветвей с накопителем и на напряжение на шинах тяговых подстанций. Для этого необходимо проанализировать соответствующие узлы схемы.

Исходя из вышеописанных критериев становится ясно, что можно выделить две матрицы параметров электрической схемы: C, Z_y .

Матрица C состоит из безразмерных коэффициентов, в общем случае – комплексных, характеризующих связь между токами в ветвях схемы и задающими токами в узлах. Она называется *матрица коэффициентов распределения задающих токов по ветвям схемы* и может быть определена следующим выражением:

$$C = Z_B^{-1} \cdot M_t \cdot Y_y^{-1} = Y_B \cdot M_t \cdot Z_y = Z_B^{-1} \cdot M_t \cdot (M \cdot Z_B^{-1} \cdot M_t)^{-1}, \quad (2.2)$$

где: Z_y – матрица узловых сопротивлений схемы;

M – первая матрица инцидентий, M_t – транспонированная первая матрица инцидентий;

Y_B – матрица проводимостей ветвей схемы;

Z_B – матрица сопротивлений ветвей схемы;

Y_y – матрица входных и взаимных узловых проводимостей схемы.

Матрицу Z_y можно назвать *матрицей узловых напряжений схемы*. При помощи этой матрицы возможно определить узловые напряжения по известным значениям задающих токов узлов. Значения в этой матрице имеют размерность сопротивлений, потому значения на главной диагонали можно описать как входные сопротивления, определяющие соотношения токов в узлах схемы с напряжениями в этих узлах. В остальных позициях в матрице расположены взаимные сопротивления. Так, на пересечении строки i и столбца j расположено сопротивление, связывающее изменение напряжения узла i с задающим током узла j . Матрица Z_y может быть определена следующим выражением:

$$Z_y = (M \cdot Z_B^{-1} \cdot M_t)^{-1} = (M \cdot Y_B \cdot M_t)^{-1} \quad (2.3)$$

Предложенная методика позволяет решать задачу с учётом реальных параметров всех токоведущих элементов системы тягового электроснабжения, комплексно учитывает все взаимосвязи и влияния в системе тягового электроснабжения всей линии или дистанции, а сам расчёт выполняется быстро, после задания всей исходной информации [19].

Анализ корреляции методики с данными моделирования произведён в главе 4.

2.4.4 Обследование тоннеля на предмет наличия свободных площадей для размещения УНЭ

В рамках исследования было произведено обследование межподстанционных зон Т-26 – Т-14, Т-12 – Т-6 и Т-6 – Т-718 Арбатско-Покровской линии Московского метрополитена для оценки возможности установки УНЭ.

Межподстанционная зона Т-26 – Т-14 преимущественно располагается на открытом участке пути. Однако, установка оборудования затрудняется насыпью верхнего строения пути с одной стороны и наличием эстакады с другой. Следует отметить, что установка УНЭ у платформы «Измайловская» со стороны станции «Первомайская» (рисунок 2.8) затруднительна в виду загромождения площади.

Наиболее подходящим местом представляется площадь перед въездом между двумя путями со стороны станции «Партизанская» (рисунок 2.9).

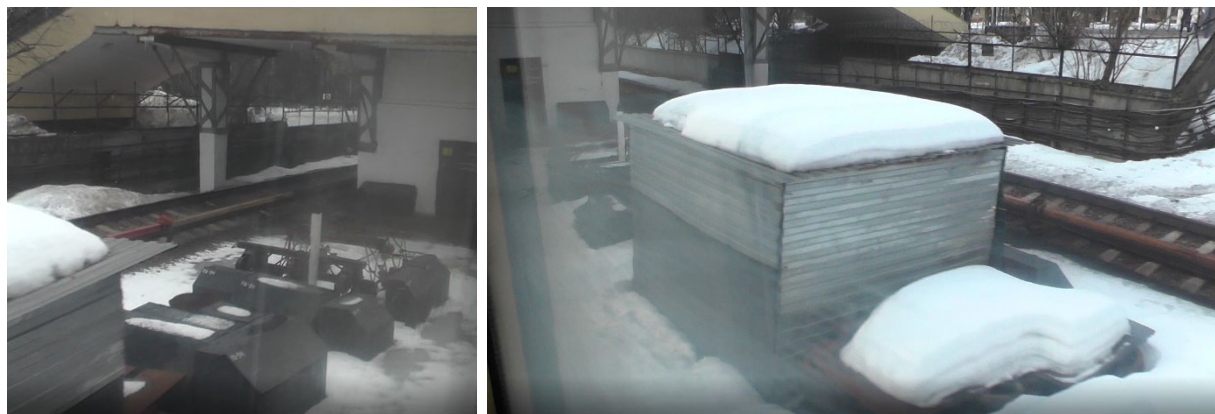


Рисунок 2.8 – Площади возле платформы «Измайловская» со стороны станции «Первомайская»



Рисунок 2.9 – Въезд на станцию «Измайловская» со стороны ст. «Партизанская»

В пределах межподстанционной зоны Т-12 – Т-6 масса площадей, потенциально пригодных для расположения УНЭ, а именно: техническое помещение на въезде к станции «Курская» по второму пути, площади понизительных подстанций (рисунок 2.10), площади между путями при их разветвлении на въезде к станции «Курская» (рисунок 2.11), а также канализационная камера и вентиляционный тоннель (рисунок 2.12).

Следует отметить, что по нормам эксплуатации и по фактическому осмотру использовать площади фекальных камер и вентиляционных тоннелей под установку накопителя энергии представляется ограниченно возможным. Аналогичное использование площадей технических помещений и понизительных подстанций также затруднительно в виду сложности подвода токоведущих шин 825В в данные помещения, находящиеся со стороны одного из путей.

Возможно пригодным местом для установки накопителя энергии на межподстанционной зоне Т-12 – Т-6 представляются площади канализационных камер (рисунок 2.12).



Рисунок 2.10 – Техническое помещение на въезде к ст. «Курская» по второму пути (слева) и понизительная подстанция (справа)



Рисунок 2.11 – Площадь между путями при их разветвлении на въезде к ст. «Курская» по второму пути



Рисунок 2.12 – Канализационная камера (слева) и вентиляционный тоннель (справа)

В пределах межподстанционной зоны Т-6 – Т-718 также обнаружены площади, ограниченно пригодные для расположения УНЭ, а именно: вентиляционные тоннели, ходки (рисунок 2.13), канализационные камеры (рисунок 2.14) и площади перед въездом на станцию «Площадь Революции» (рисунки 2.15-2.16).

Наиболее подходящим местом для установки накопителя энергии на межподстанционной зоне Т-6 – Т-718 представляется канализационная камера (рисунок 2.14).



Рисунок 2.13 – Вентиляционный тоннель (слева) и ходок (справа)

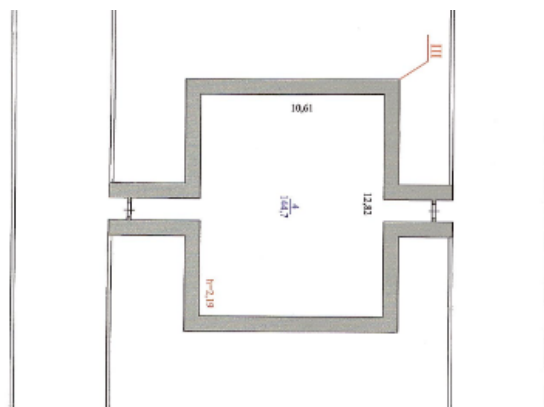


Рисунок 2.14 – Канализационная камера



Рисунок 2.15 – Площади перед въездом на станцию «Площадь Революции»



Рисунок 2.16 – Площади перед въездом на станцию «Площадь Революции»

3 МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ УПРАВЛЯЕМОГО НАКОПИТЕЛЯ ЭНЕРГИИ

3.1 Моделирование литий-ионного накопителя

3.1.1 Описание использованной математической модели

Для решения задач данного исследования было принято решение создать программу, описывающую математическую модель литий-ионного накопителя. Обычно, в математических моделях накопителя энергии нет нужды в учёте полного спектра происходящих внутри батарей химического процесса. На это есть две основные причины:

- во-первых, предоставляемая ими высокая точность является избыточной. Обобщённые уравнения с достаточной точностью описывают общую тенденцию зависимости между выходным напряжением и током, и позволяют оценивать состояние и режим работы батареи с допустимой погрешностью. Современные обобщённые модели учитывают как изменение сопротивления в зависимости от состояния её заряда, так и влияние поляризации на напряжение ячеек.
- во-вторых, моделирование химических процессов не в обобщённом виде — крайне ресурсоёмкая задача. Помимо избавления от избыточности информации, обобщение уравнений позволяет значительно снизить требуемые для расчётов вычислительных мощностей. Разрабатываемую модель в итоге планируется встроить в качестве модуля в систему для электрического расчёта систем тягового электроснабжения, в которой этот модуль будет многократно исполняться при итерационном расчёте показателей работы сети. В таких условиях оптимизация применяемых ресурсов становится важнейшей задачей наряду с обеспечением достоверности получаемых расчётных параметров.

Накопитель энергии, в общем виде, является сложным и комплексным устройством, потому его моделирование является нетривиальной задачей, занимающей учёных уже на протяжении длительного времени. В научной литературе представлено по крайней мере несколько вариантов математического описания модели литий-ионной батареи [49, 64, 124, 134], предлагающие немного отличающийся подход к определению показателей работы накопителя.

В настоящем исследовании рассмотрена модель литий ионной батареи, основанная на методе Шеферда [134] и представляет накопитель в виде схемы замещения, подставляющий собой активный двухполюсник, в общем виде описанный выражением:

$$E_I = E_0 - R_{вн} I - K_I \frac{f}{1-f}, \quad (3.1)$$

где:

- E_I – напряжение батареи, В;
- E_0 – напряжение холостого хода батареи при полном заряде, В;
- $R_{вн}$ – внутреннее сопротивление элемента, Ом;
- I – ток разряда, А;
- K_I – напряжение поляризации, В;
- $f = \int \frac{Idt}{Q}$ – уровень заряда батареи или *SOC* (State of charge, *англ.* состояние заряда);
- Q – полная ёмкость батареи, А·ч.

В данной работе использована уточнённая модель, в которой учтено поведение кривой в области перезаряда. Таким образом, исходя из материалов работы [124], модель заряда описывается следующим выражением:

$$V_{batt} = E_0 - K \frac{Q_{Max}}{Q_{Max} - Q_{\Sigma}(t)} \cdot Q_{\Sigma}(t) + A \cdot e^{(-B \cdot Q_{\Sigma}(t))} - R_0 \cdot i(t) - K \frac{Q_{Max}}{Q_{Max} - Q_{\Sigma}(t)} \cdot i(t) \quad (3.2)$$

где:

- V_{batt} – напряжение на клеммах батареи, В;
- E_0 – максимальное напряжение аккумулятора, В;
- $i(t)$ – ток в цепи аккумулятора, А;
- R_0 – постоянное сопротивление, Ом;
- K – поляризационная составляющая, В;
- A – экспоненциальная составляющая, В;
- B – инверсная экспоненциальная составляющая, $A \cdot ч^{-1}$;
- Q_{Max} – полная ёмкость аккумулятора, А·ч;
- Q_{Exp} – экспоненциальная ёмкость аккумулятора, А·ч;
- $Q_{\Sigma}(t)$ – недостающий текущий заряд батареи:

$$Q_{\Sigma}(t) = \frac{SoD}{Q_{Max}}, \quad (3.3)$$

где $SoD = 1 - SoC$; (State of discharge, *англ.* состояние разряда);

В свою очередь, напряжение батареи в режиме заряда подчиняется следующему уравнению:

$$V_{batt} = E_0 - K \frac{Q_{Max}}{Q_{Max} - Q_{\Sigma}(t)} \cdot Q_{\Sigma}(t) + A \cdot e^{(-B \cdot Q_{\Sigma}(t))} - R_0 \cdot i(t) - K \frac{Q_{Max}}{Q_{\Sigma}(t) - 0,1 \cdot Q_{Max}} \cdot i(t) \quad (3.4)$$

Слагаемое $K \frac{Q_{Max}}{Q_{\Sigma}(t) - 0,1 \cdot Q_{Max}}$, называемое поляризационным сопротивлением, теоретически должно иметь вид $K \frac{Q_{Max}}{Q_{\Sigma}(t)}$. В таком случае, при малых значениях $Q_{\Sigma}(t)$ модель ведёт себя неадекватно реальным данным. Чтобы этого избежать, слагаемое немного видоизменено.

3.1.2 Программное представление выбранной математической модели НЭ

В качестве основной платформы для программирования основного алгоритма модели была использована Visual Studio 22, а код был написан на языке C++. В рамках исследования накопитель представлен в двух вариантах: в качестве

управляемого по напряжению источника тока и управляемого по току источника напряжения. Для первого математического представления необходимо преобразовать уравнения из пункта 3.1.1 в следующий вид:

$$i(V, it) = \frac{V - E_0 - C + V_{poll}}{R}, \quad (3.5)$$

где:

- $i(V, it)$ – ток в цепи с аккумулятором, А;
- it – параметр, определяющий недостающую текущую ёмкость батареи:

$$it = \frac{SoD}{Q_{Max}}; \quad (3.6)$$

- V – напряжение, подаваемое на клеммы батареи, В;
- C – экспоненциальная составляющая напряжения батареи, В:

$$C = A \cdot e^{(-B \cdot it)}; \quad (3.7)$$

- V_{poll} – поляризационная составляющая напряжения батареи, В;

$$V_{poll} = K \frac{Q_{Max}}{Q_{Max} - it} \cdot it; \quad (3.8)$$

- R – сопротивление батареи, Ом:

$$R = K \frac{Q_{Max}}{it - 0,001 \cdot Q_{Max}} + R_0 \text{ для режима заряда}; \quad (3.9)$$

$$R = K \frac{Q_{Max}}{Q_{Max} - it} + R_0 \text{ для режима разряда}. \quad (3.10)$$

Данное выражение определяет ток накопителя (источника тока) в зависимости от уровня входного напряжения и внутреннего состояния батареи. Для того, чтобы ток модели корректно изменялся с течением времени, нужно учесть изменение SoD в процессе заряда или разряда батареи. Для этой задачи введём величину приращения заряда ΔQ в А·ч:

$$\Delta Q = \int_0^t i \cdot dt; \quad (3.11)$$

где: i – ток батареи, А.

В таком случае:

$$Q(t) = Q(0) + \Delta Q(t); \quad (3.12)$$

где: $Q(t)$ – текущий заряд батареи, А·ч;

$Q(0)$ – заряд батареи в нулевой момент времени, А·ч.

Выражения выше позволяют учесть изменение величины it в ходе процесса работы батареи:

$$it(t) = Q_{max} - Q(t) = Q_{max} - (Q(0) + \Delta Q(t)); \quad (3.13)$$

Разность $Q_{max} - Q(0)$ можно представить как $it(0)$, то есть как недостающий заряд батареи в начальный момент времени, из чего следует, что

$$it(t) = it(0) - \Delta Q(t); \quad (3.14)$$

При цифровом моделировании значения рассчитываются дискретно, с заданным интервалом времени. Из выражения выше следует, что значение it в следующий момент времени можно выяснить исходя предыдущего значения it и приращения ΔQ :

$$it_{k+1} = it_k - \Delta Q_k \quad (3.15)$$

где: индекс k обозначает номер шага расчёта.

Для упрощения математического представления, при вычислении ΔQ_k примем, что значение тока между соседними измерениями остаётся неизменным, тогда

$$\Delta Q_k = \frac{i_k \cdot dt}{3600} \quad (3.16)$$

где: i_k – величина тока батареи в k -тый момент времени, А;

dt – шаг моделирования, с.

Подставив выражение в полученное ранее уравнение для расчёта текущего недостающего заряда батареи в момент $k+1$, получим:

$$it_{k+1} = it_k - \frac{i_k \cdot dt}{3600}; \quad (3.17)$$

Выражение для определения тока батареи является функцией от входного напряжения батареи и её состояния заряда. Две эти переменные полностью описывают текущее состояние батареи, что позволяет определять ток батареи, задаваясь её начальным состоянием в виде значения it в начальный момент времени. Переопределяя it по представленной выше формуле, программа автоматически переводит батарею в новое состояние.

Альтернативным режимом работы модели является выполнение обратной задачи, то есть определение напряжения накопителя при заданном токе. Этот режим может быть полезен для построения разрядных и зарядных характеристик смоделированной батареи, которые представляют собой серию зависимостей напряжения батареи от времени при постоянном заданном зарядном или разрядном токе.

Для описания этого режима можно использовать формулы из раздела 3.1.1. Преобразуем их для более удобного представления в программном коде:

$$V(i, it) = E_0 - V_{poll} + C - R \cdot i, \quad (3.18)$$

где:

- i – ток в цепи с аккумулятором, А;
- it – параметр, определяющий недостающую текущую ёмкость батареи:

$$it = \frac{SoD}{Q_{Max}}; \quad (3.19)$$

- $V(i, it)$ – напряжение, подаваемое на клеммы батареи, В;
- C – экспоненциальная составляющая напряжения батареи, В:

$$C = A \cdot e^{(-B \cdot it)}; \quad (3.20)$$

- V_{poll} – поляризационная составляющая напряжения батареи, В:

$$V_{poll} = K \frac{Q_{Max}}{Q_{Max} - it} \cdot it \quad (3.21)$$

- R – сопротивление батареи, Ом:

$$R = K \frac{Q_{Max}}{it - 0,001 \cdot Q_{Max}} + R_0 \text{ для режима заряда;} \quad (3.22)$$

$$R = K \frac{Q_{Max}}{Q_{Max-it}} + R_0 \text{ для режима разряда.} \quad (3.23)$$

Приращение параметра it происходит аналогично основному режиму расчёта.

В случае неуправляемого накопителя энергии режим работы батареи определяется исходя из направления полученного тока. Для этого в процессе моделирования батареи рассчитываются токи заряда и разряда, после чего определяется их направление. Если направление тока совпадает с приложенным напряжением (направление которого принято положительным), можно утверждать, что накопитель заряжается. В ином случае, когда направление тока батареи противоположено внешнему напряжению, определяется режим разряда. В соответствии с режимом, принимается значение тока батареи [125, 127].

Управляемый накопитель определяет режим работы путём сравнения приложенного к батарее напряжения с некоторым заранее известным значением. Если внешнее напряжение выше заданного, батарея перейдёт в режим заряда, иначе должна будет разряжаться. В таких условиях может сложиться ситуация, при которой батарея не сможет разряжаться в естественных условиях. Для того, чтобы обеспечить её правильную работу, в цепь накопителя включается импульсный преобразователь, который повышает выходное напряжение батареи. В таком случае в формулу для расчёта тока разряда следует подставлять напряжение внешней сети, домноженное на передаточный коэффициент, который в таком случае меньше единицы.

3.1.3 Масштабирование модели накопителя энергии

Предложенная модель накопителя подразумевает моделирование работы батареи на основе её реальных параметров, полученных экспериментальным путём или предоставленных производителем. Как известно, реальные накопительные элементы выпускаются на сравнительно невысокое напряжение и сравнительно невысокой энергоёмкости. Для задач энергетики и высокомошных промышленных потребителей, таких как электрифицированный транспорт, требуются накопители не только большой выходной мощности, но и работающие на высоком напряжении.

На практике накопители энергии могут состоять из сотен отдельных ячеек, соединённых последовательно в ветви и параллельно между собой. Последовательное соединение позволяет использовать накопитель на большем рабочем напряжении. Зачастую, электрохимические накопители представляют собой ячейки, с рабочим напряжением порядка нескольких вольт, реже нескольких десятков вольт. Питающее напряжение на промышленных предприятиях на порядки выше, потому для вопрос повышения рабочего напряжения является актуальным. В рамках предложенной модели предполагается, что, так как подключаемые последовательно элементарные ячейки одинаковы, допустимо считать, что в каждый момент времени каждый из элементов находится под воздействием одинакового напряжения. Исходя из этого напряжение одной ячейки:

$$V_{\text{яч}} = \frac{V_{\text{бат}}}{n}; \quad (3.24)$$

где: n – число ячеек в последовательно соединённой ветви.

Важно, что последовательное соединение повышает рабочее напряжение накопителей, но не увеличивает её ёмкость. Ёмкость батареи зависит от числа последовательно включённых ветвей с ячейками. Для потребителя это означает не только увеличение объёма запасаемой батареей энергии, но и повышение рабочих токов установки.

В рамках предложенной модели предполагается, что все ветви, соединённые параллельно, обладают одинаковыми характеристиками. Из этого следует, что ток между ветвями распространяется равномерно. Исходя из этого:

$$I_{\text{яч}} = \frac{I_{\text{бат}}}{k}; \quad (3.25)$$

где: k – число последовательно соединённых ветвей.

3.1.4 Оценка результатов моделирования

Для оценки адекватности результатов моделирования требуется провести расчёт нескольких режимов работы батареи: заряд и разряд накопителя при постоянном напряжении, разряд и заряд накопителя при постоянном токе и работа

батареи при переменном напряжении. Первые две кривые позволяет оценить адекватность поведения модели в процессах разряда и заряда, однако они не отражают никакого реалистичного режима работы батареи, особенно когда речь идёт о быстроизменяющейся нагрузке, такой как тяговая сеть рельсового транспорта. Для того, чтобы смоделировать подобный режим работы, была сгенерирована случайная последовательность значений напряжения, которая в общем виде отражает поведение тяговой сети.

В качестве примера для оценки работоспособности и адекватности модели используем характеристики литий-ионной батареи, аналогичные рассмотренным в MatLab Simulink в качестве стандартных характеристик модели. То есть примем:

$$Q = 5.4 \text{ Ач};$$

$$E_0 = 7.8074 \text{ В};$$

$$R_0 = 0.013332 \text{ Ом};$$

$$K = 0.0099891 \text{ Ом или } \frac{\text{В}}{\text{Ач}};$$

$$A = 0.60463 \text{ В};$$

$$B = 11.3078 \text{ Ач}^{-1}.$$

3.1.4.1 Опыт заряда и разряда накопителя при постоянном напряжении

При постоянном напряжении на вводах накопителя, можно произвести опыт заряда и опыт разряда. Для опыта заряда накопителя необходимо подать напряжение, заведомо более высокое, чем напряжение холостого хода батареи. Это нужно для обеспечения устойчивого заряда батареи в течении всего времени эксперимента. Предварительно проведём опыт холостого хода, воспользовавшись ранее подготовленным режимом расчёта с заданным током. В режиме холостого хода ток батареи равен току утечки, который принимает очень малые значения. В рамках временного промежутка, рассматриваемого в предложенной модели (~ 3000 секунд), током утечки можно пренебречь. Таким образом, напряжение холостого хода принимает вид следующей кривой, представленной на рисунке 3.1.



Рисунок 3.1 — Напряжение холостого хода заряженной батареи.

Значение напряжения холостого хода батареи:

$$V_{\text{хх.100}} = 8.41203 \text{ В}$$

Таким образом, установив напряжение на вводах батареи $V = 8.5 \text{ В}$, получим кривые зависимости тока и процента заряда батареи от времени (рисунок 3.2 и рисунок 3.3).

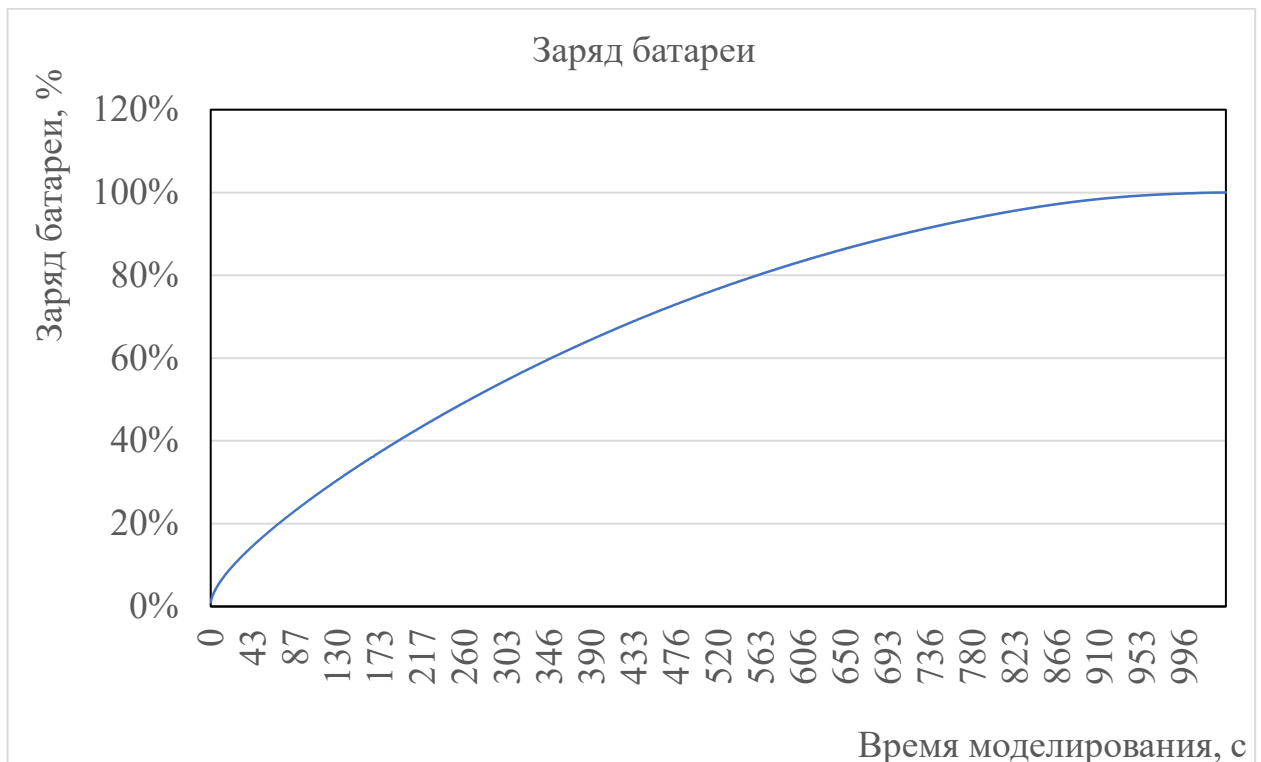


Рисунок 3.2 — Состояние батареи в процессе заряда постоянным напряжением

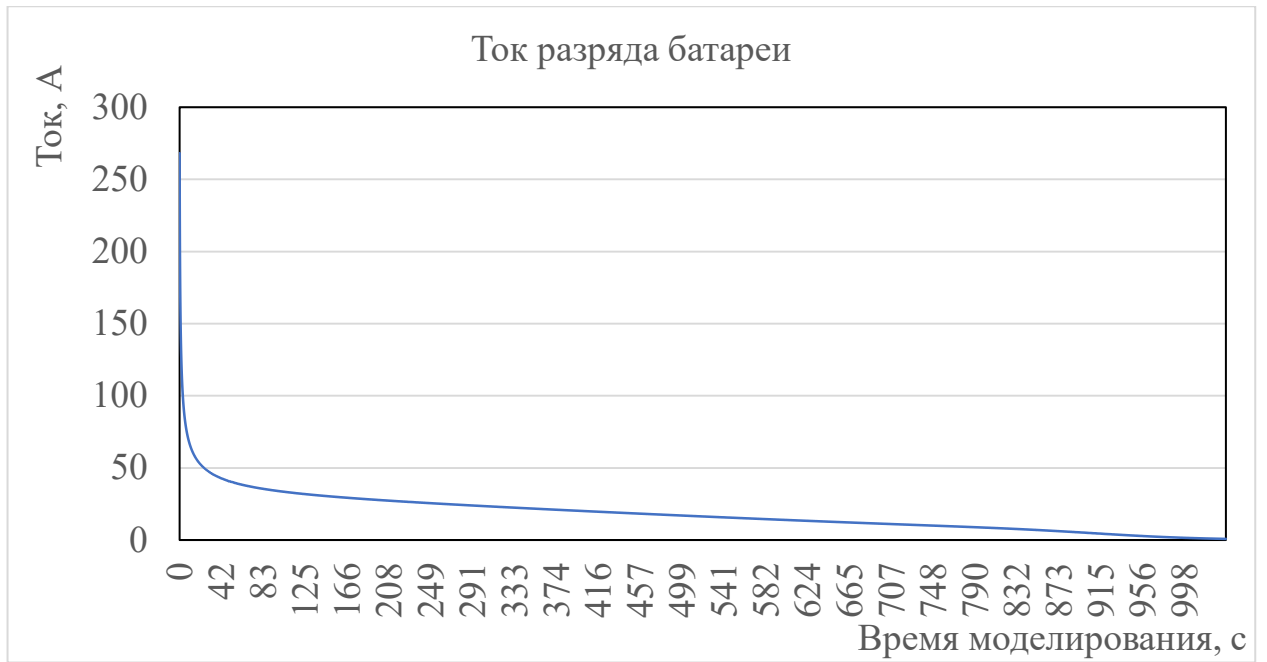


Рисунок 3.3 — Ток батареи в процессе заряда постоянным напряжением

Как видно, направление тока заряда в модели принято в качестве положительного. С ростом заряда батареи её собственное напряжение нарастает, потому его разность с входным напряжением уменьшается, из-за чего ток батареи монотонно убывает по мере заряда. Это поведение соответствует реальным процессам, происходящим при заряде аккумуляторов.

Проведём опыт разряда батареи. Для этого входное постоянное напряжение на клеммах батареи V_{bat} должно быть ниже, чем напряжение холостого хода при глубине разряда 20% $V_{xx,20}$. Определим $V_{xx,20}$ аналогично $V_{xx,100}$ (рисунок 3.4).

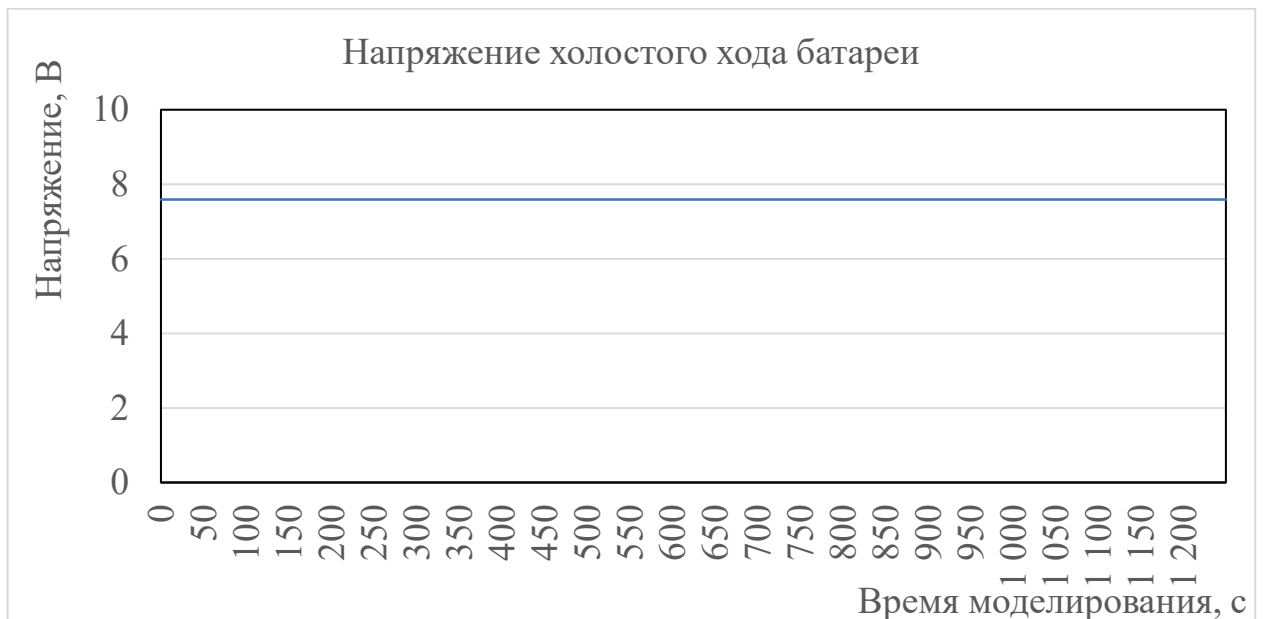


Рисунок 3.4 — Напряжение холостого хода батареи при 20% заряда.

Значение напряжения холостого хода батареи:

$$V_{\text{хх.20}} = 7,59164 \text{ В}$$

Таким образом, установив напряжение на вводах батареи $V = 7.5 \text{ В}$, получим кривые зависимости тока и процента заряда батареи от времени (рисунок 3.5 и рисунок 3.6).

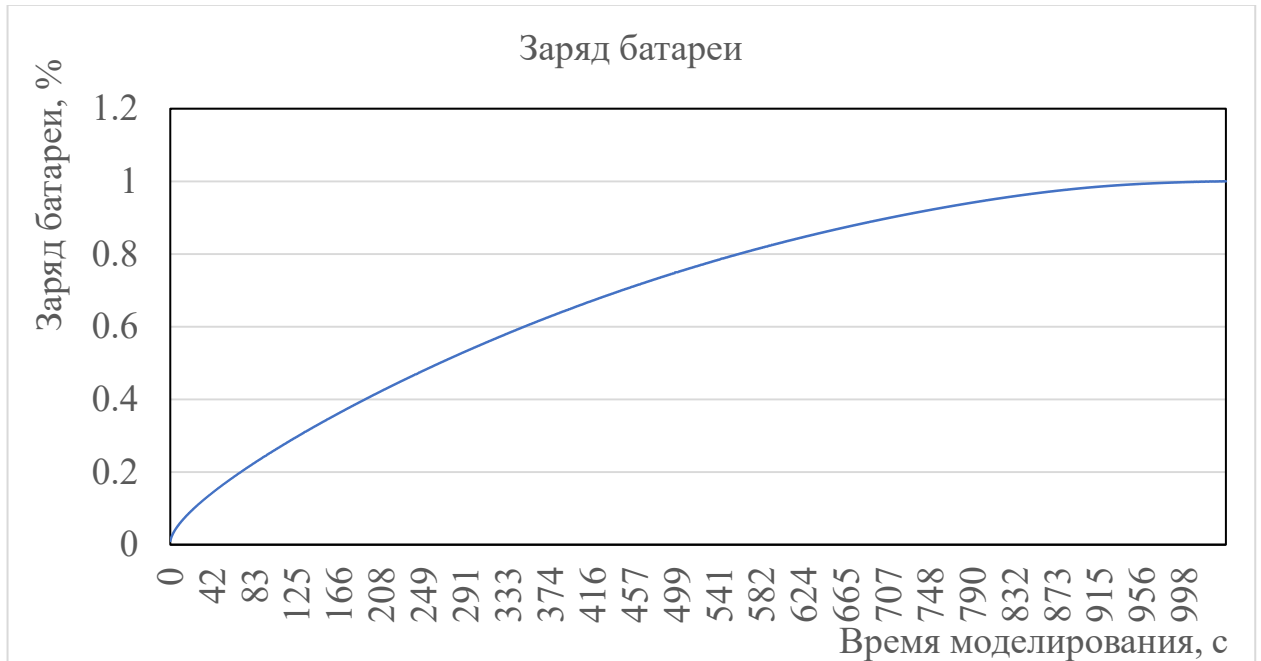


Рисунок 3.5 — Состояние батареи в процессе заряда на постоянном напряжении

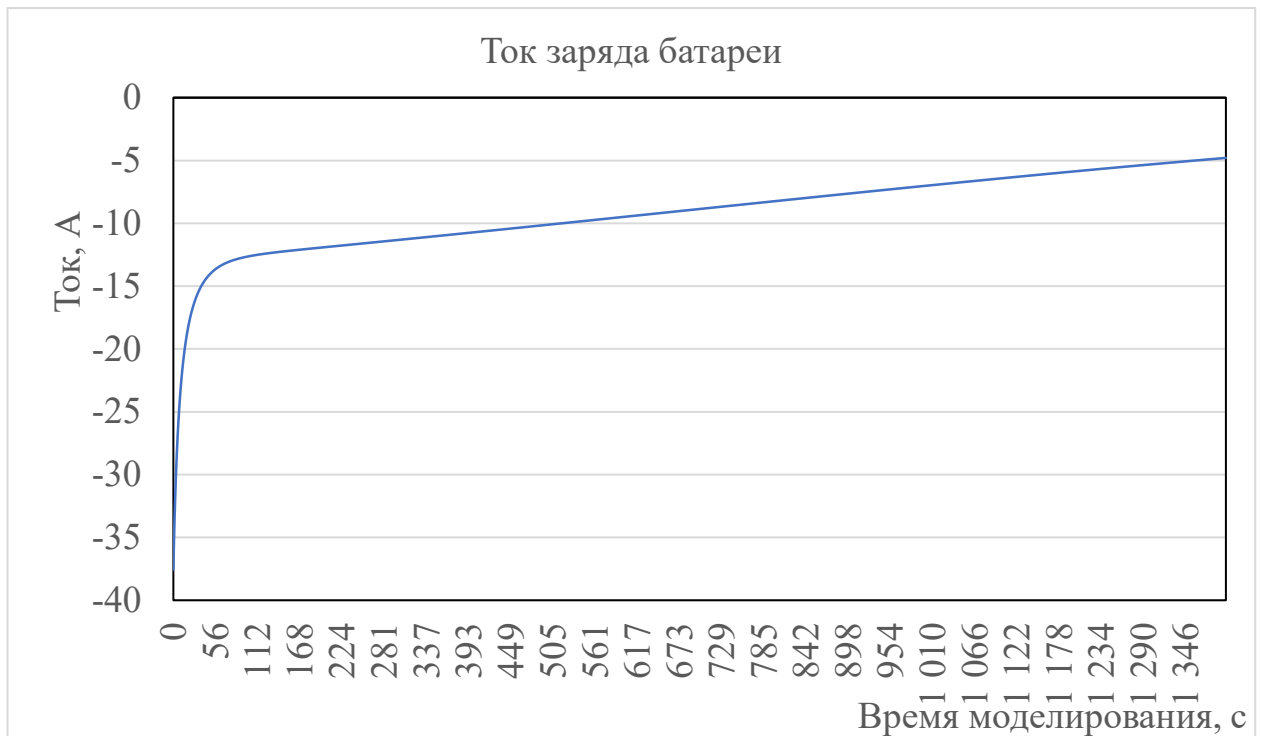


Рисунок 3.6 — Ток батареи в процессе разряда на постоянном напряжении

Из графиков видно, что ток батареи снижается по мере разряда. Собственное напряжение батареи снижается по мере падения заряда, потому снижается разность потенциалов.

3.1.4.2 Опыт разряда батареи при постоянном токе

Зарядно-разрядные характеристики представляют собой серию зависимостей напряжения от времени при разных значениях зарядного тока. Построим кривые для разрядных токов 6.5, 13, 19.5 А (рисунок 3.7).

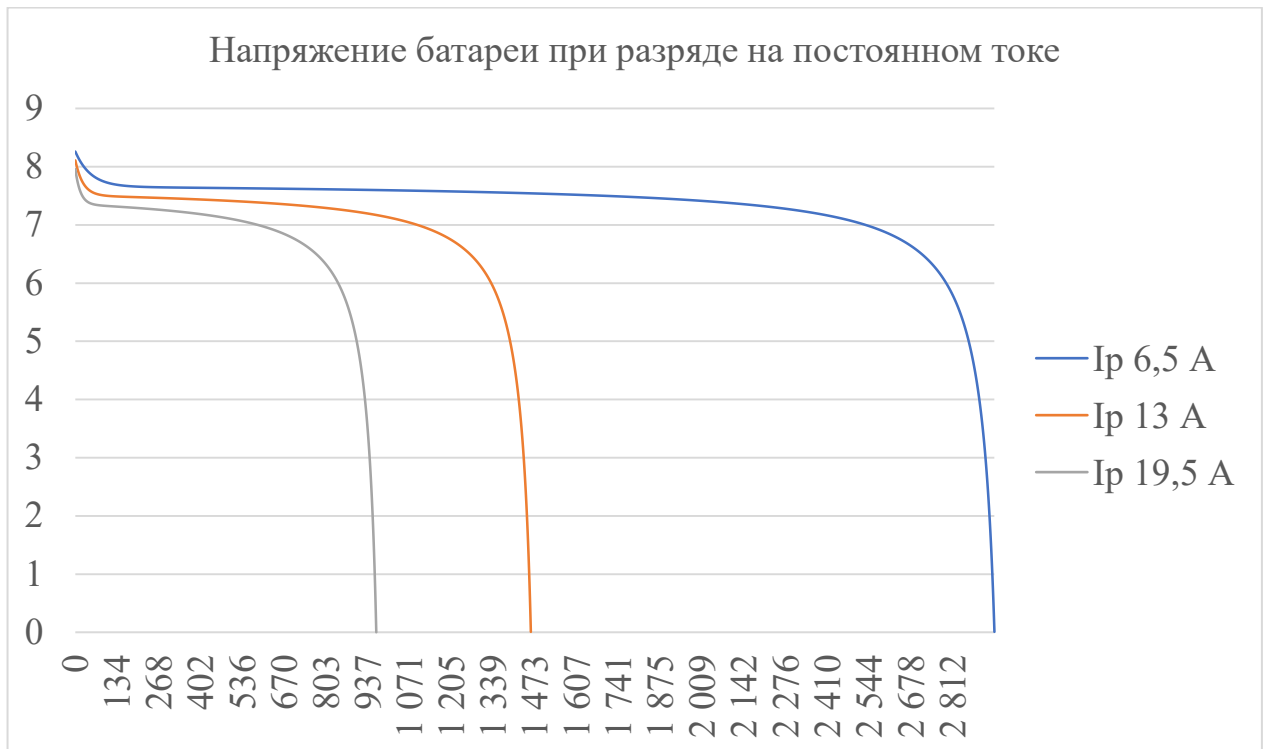


Рисунок 3.7 — Разрядные характеристики смоделированной батареи при токах разряда 6.5, 13, 19.5 А

Как видно из рисунка 3.7, при разных токах разряда, кривые напряжения имеют схожий характер, однако с линейным увеличением тока, время разряда снижается нелинейно. Это объясняется сложностью и нелинейностью внутренних процессов, происходящих внутри батареи. Снижение напряжения по всей длине кривой объясняется возрастающим падением напряжения на внутреннем сопротивлении батареи R .

3.1.4.3 Опыт работы модели с случайным входным напряжением

В реальных условиях эксплуатации накопители энергии зачастую работают в режиме с переменным значением напряжения, поступающими на их клеммы. Для проведения эксперимента можно задать входное напряжение случайным образом. Используя функцию генерации случайных чисел, зададим следующие параметры случайной величины: среднее значение полученной величины установим равным 8,15, а отклонение от среднего значения зададим равным 3. Таким образом будет сгенерирована случайная величина в диапазоне от 5,15 до 11,15 В.

Построим график полученного входного напряжения (рисунок 3.8).



Рисунок 3.8 — Случайно сгенерированные значения входного напряжения.

Произведём расчёт состояния батареи с полученным входным напряжением. Установим начальное значение заряда батареи равным 90%, чтобы батарея могла заряжаться или разряжаться в зависимости от приложенного напряжения.

Построим график зависимости заряда (рисунок 3.9) и тока (рисунок 3.10) батареи от времени.

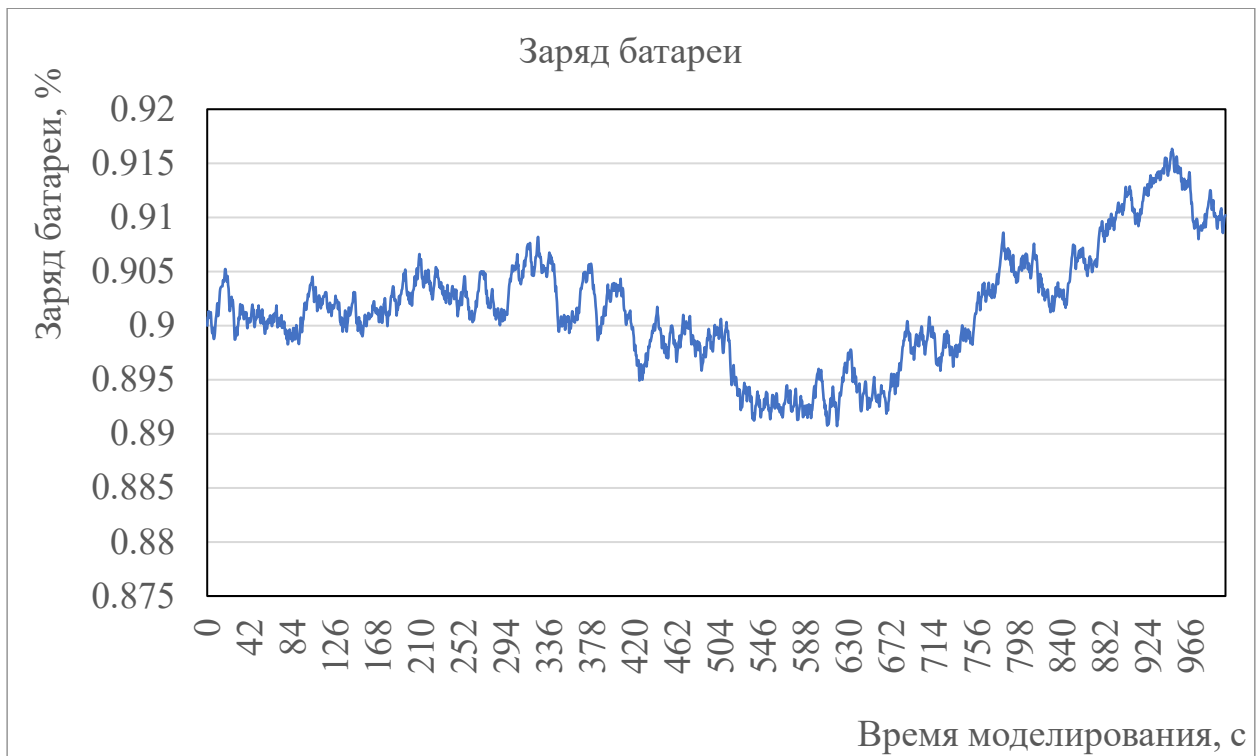


Рисунок 3.9 — Состояние батареи в процессе работы на переменном напряжении

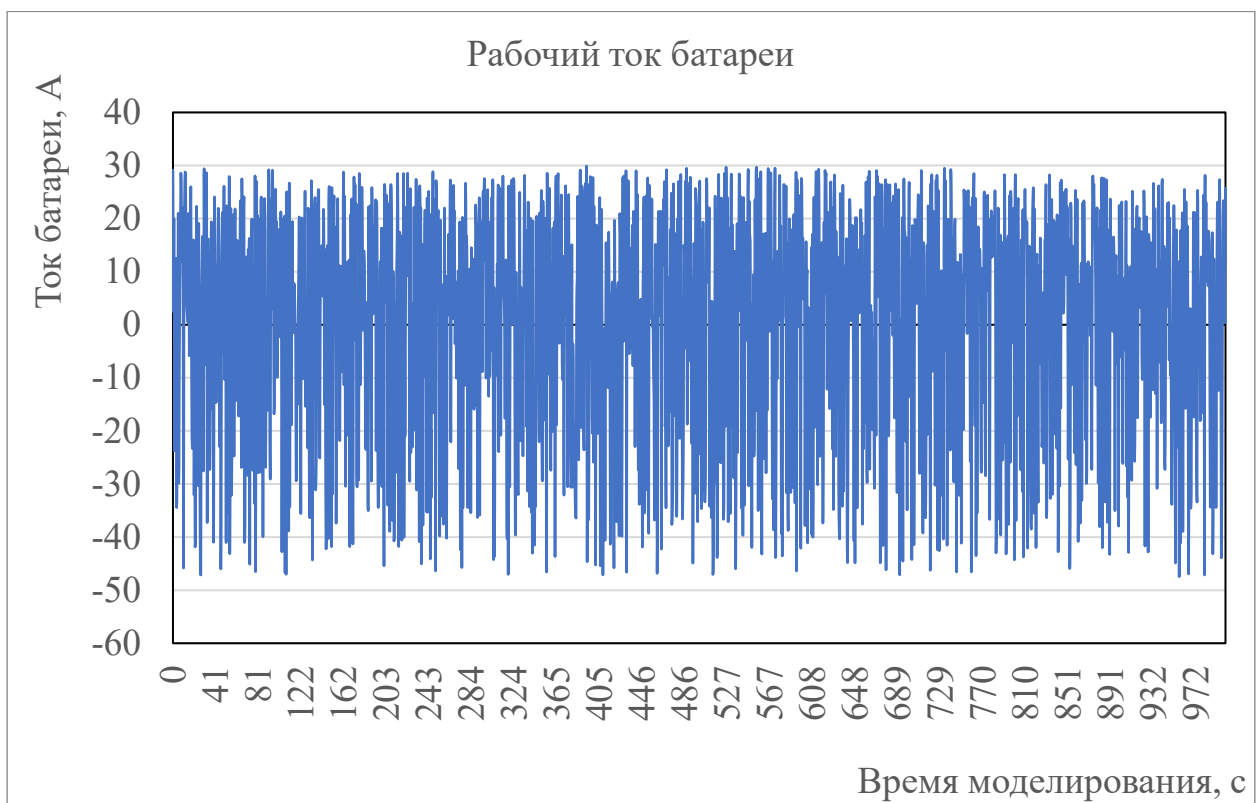


Рисунок 3.10 — Ток батареи в процессе работы на переменном напряжении

Из-за частых изменений напряжения состояния заряда и разряда постоянно сменяют друг друга. Из-за того, что среднее значение случайно заданного напряжения близко к напряжению холостого хода батареи при 90% заряда, график

заряда батареи сконцентрирован возле 90% заряда. Эту картину подтверждает и диаграмма тока батареи, представленная на рисунке 3.10. При заряде ток батареи находится в положительной полуплоскости графика, при разряде, соответственно, принимает отрицательные значения. Такое поведение батареи соответствует замерам, произведённым в реальных условиях эксплуатации [64].

Разница между максимумами зарядных и разрядных токов объясняется разным сопротивлением цепей заряда и разряда (сопротивление цепи разряда несколько меньше, чем зарядное), что отражает реальные процессы в электрохимических батареях.

3.1.5 Верификация результатов имитационного моделирования

Для верификации результатов моделирования нужно использовать модель аналогичного устройства в сертифицированной программе для имитационного моделирования, например MatLab Simulink. В семействе электрических компонентов (Simscape/Electrical/Specialized Power Systems) представлен компонент Battery, представляющий собой комплексную модель электрохимической аккумуляторной батареи. В рамках этой подпрограммы реализованы имитационные модели свинцово-кислотного, литий-ионного, никель-кадмиевого и никель-металлогибридного семейств накопительных устройств (рисунок 3.11 и рисунок 3.12).

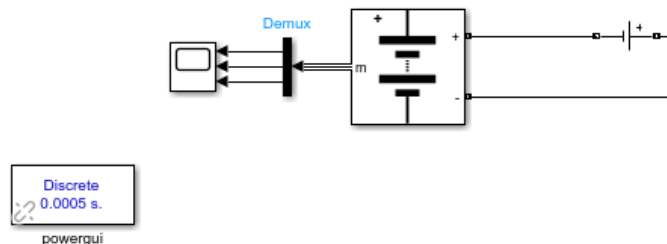


Рисунок 3.11 — Визуальное представление расчётной модели в MatLab Simulink

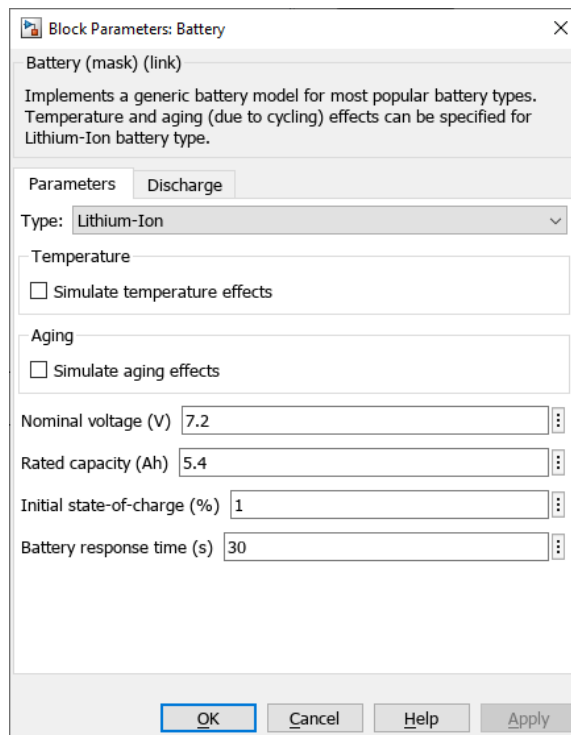


Рисунок 3.12 — Меню настроек компонента Battery с внесёнными параметрами батареи

Расчётная схема включает в себя непосредственно компонент Battery, DC Voltage Source, для моделирования внешнего напряжения и Scope для вывода информации в графическом виде.

Компонент позволяет учитывать влияние температурных и возрастных процессов на состояние батареи и имеет на выходе m соответствующий набор сигналов в зависимости от режима моделирования. Т.к. данные функции отключены, на информационный выход компонента поступают три сигнала:

1. Значение SoC батареи, %;
2. Значение тока батареи, А;
3. Значение напряжения между выводами + и –, В.

Эти сигналы поступают на демультиплексер Demux и разделяются для последующего отображения в компоненте Scope в разных осях.

В компоненте powergui задаются параметры расчёта для имитационных моделей, имитирующих некоторые области физики, включая элементы для расчёта электрических цепей. В нем можно выбрать параметры представления некоторых компонентов модели. Выбран тип моделирования дискретный, с фиксированным

шагом между соседними измерениями равным 0,0005 секунды. Изменения этих параметров может привести к изменению времени расчёта и повлиять на точность полученных результатов.

Компонент Battery позволяет построить разрядные характеристики относительно постоянного разрядного тока (рисунок 3.13). Эти кривые соответствуют зависимостям напряжения батареи от времени при разряде на постоянном напряжении (рисунок 3.7). Кривые будут построены, если нажать соответствующую кнопку в меню настроек компонента.

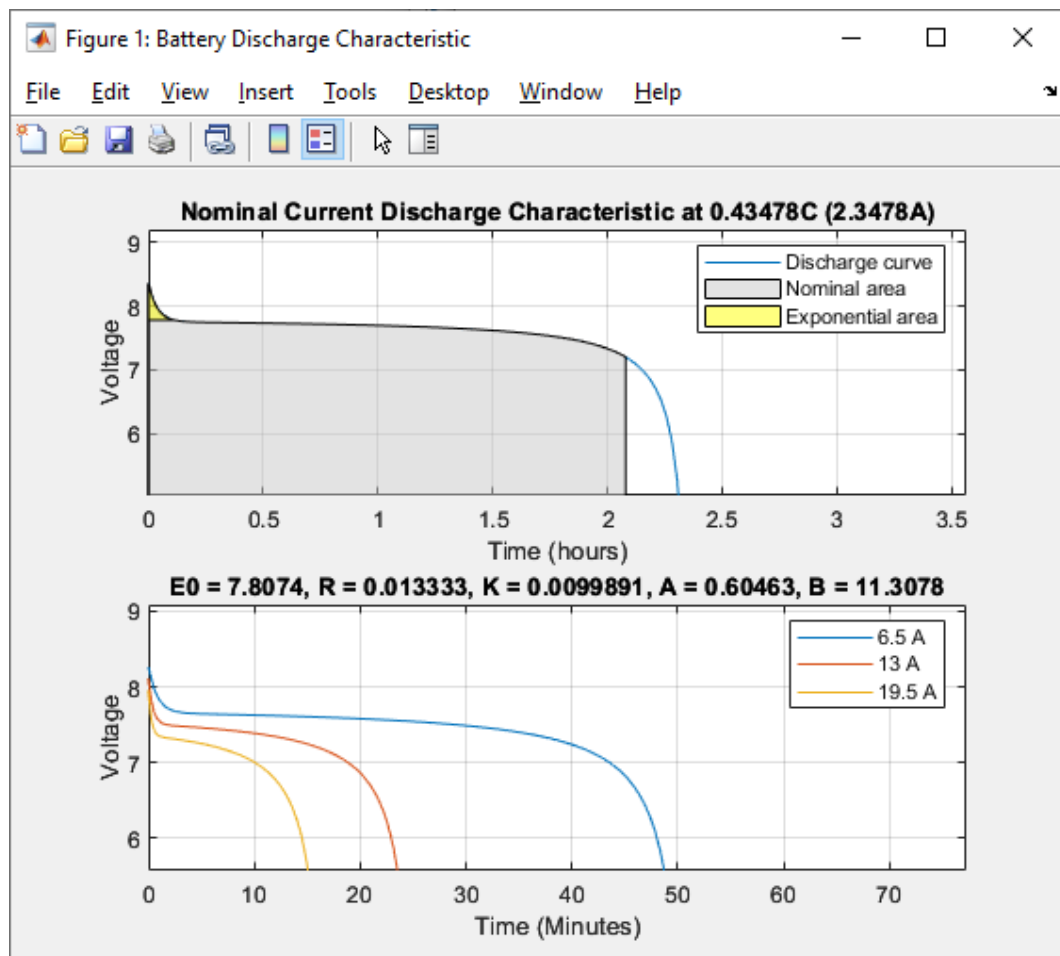


Рисунок 3.13 — Разрядные характеристики батареи, смоделированной в MatLab Simulink при токах разряда 6.5, 13, 19.5 А

Кривые, полученные при запуске модели из подпараграфа 3.1.2 при равных условиях, совпадают с точностью до 98%. Из этого следует, что модель процесса разряда приблизительно совпадает с моделью, представленной в MatLab. Для того, чтобы удостовериться в этом, повторим опыты из подпараграфа 3.1.4.

3.1.5.1 Опыт заряда и разряда накопителя при постоянном напряжении

Произведём моделирование тока заряда накопителя с 1% напряжением 8.5 В. Для этого установим значение Initial state-of-charge (%) в блоке Battery равным 1 и значение амплитуды напряжения в источнике напряжения равным 8.5. Установив соответствующий уровень напряжения, проведём расчёт модели. (рисунки 3.14-3.16)

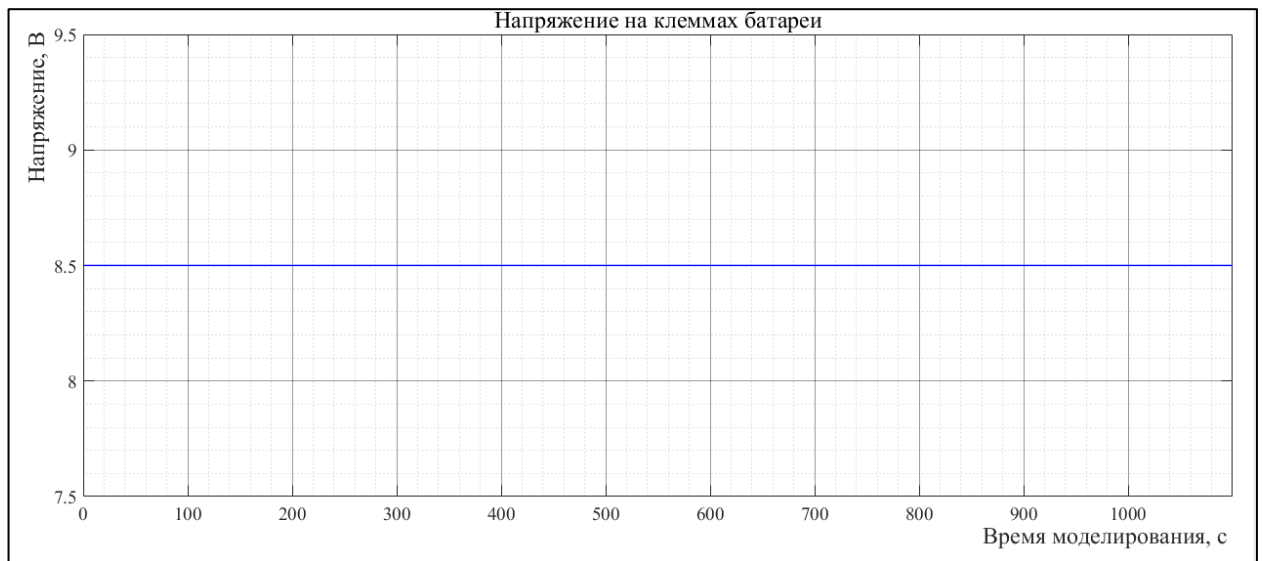


Рисунок 3.14 — Напряжение холостого хода заряженной батареи

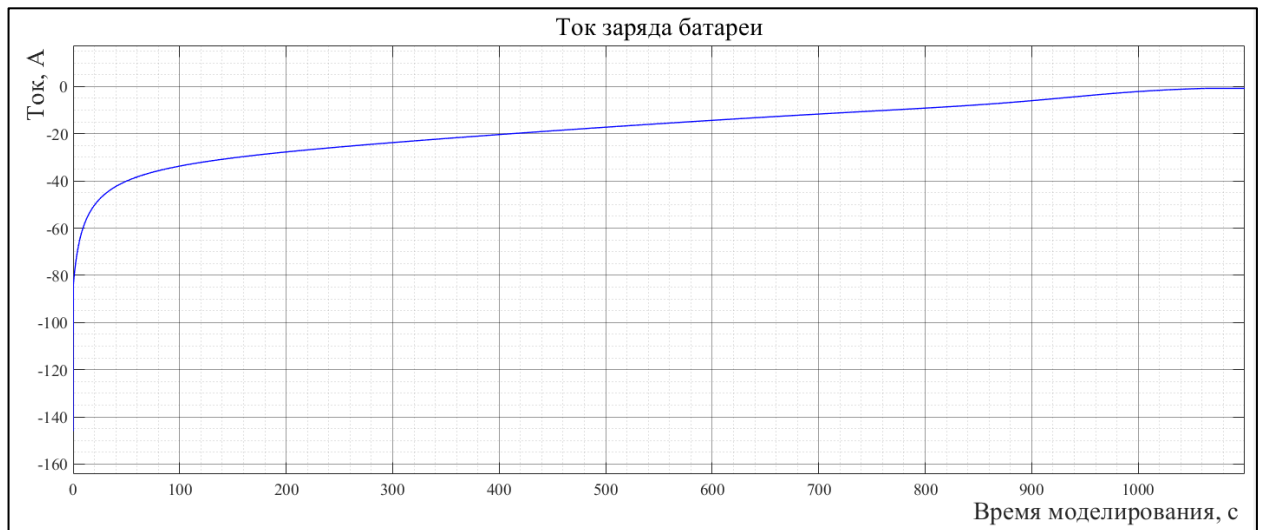


Рисунок 3.15 — Ток в процессе заряда постоянным напряжением

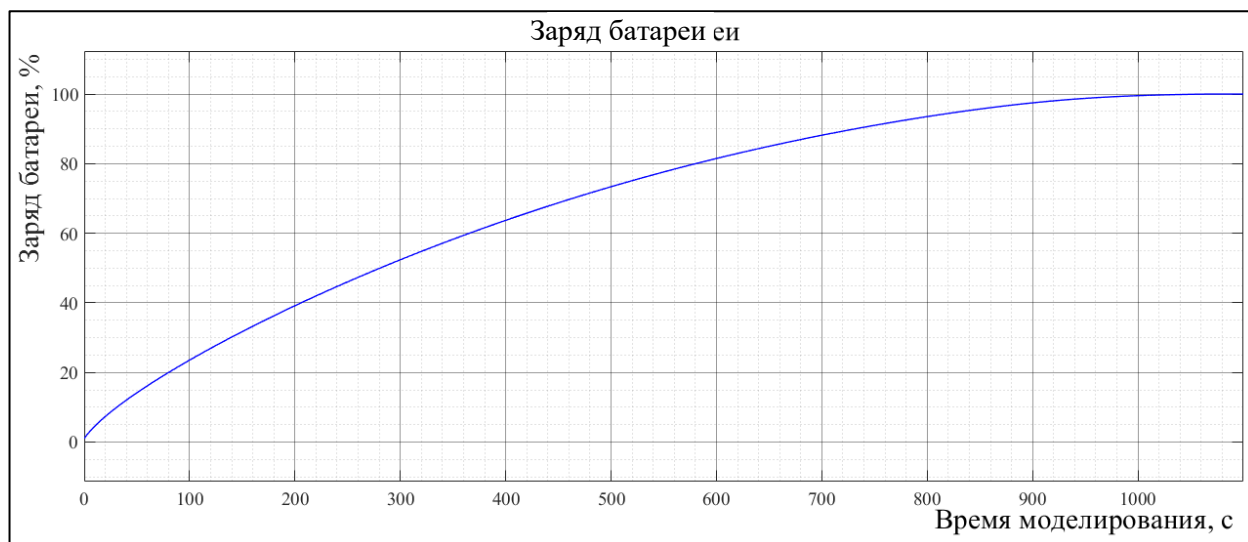


Рисунок 3.16 — Состояние батареи в процессе заряда постоянным напряжением

Из рисунков выше видно, что характер кривых, полученных в результате моделирования идентичен полученным в пункте 3.1.4.1, а значения совпадают. Важно отметить, что в модели батареи в MatLab Simulink ток заряда имеет отрицательное направление, а в модели, представленной в данной работе для него выбрано положительное направление.

Произведём опыт разряда накопителя, для этого приложим напряжение, равное 7,5 В к полностью заряженному накопителю (рисунки 3.17-3.19).

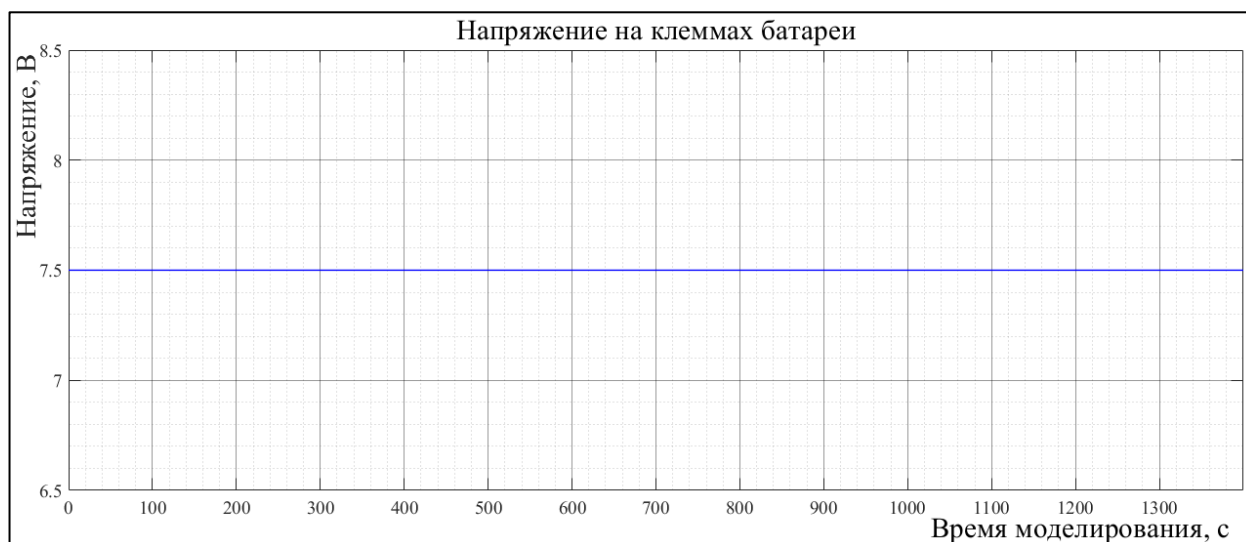


Рисунок 3.17 — Напряжение, приложенное к батарее.

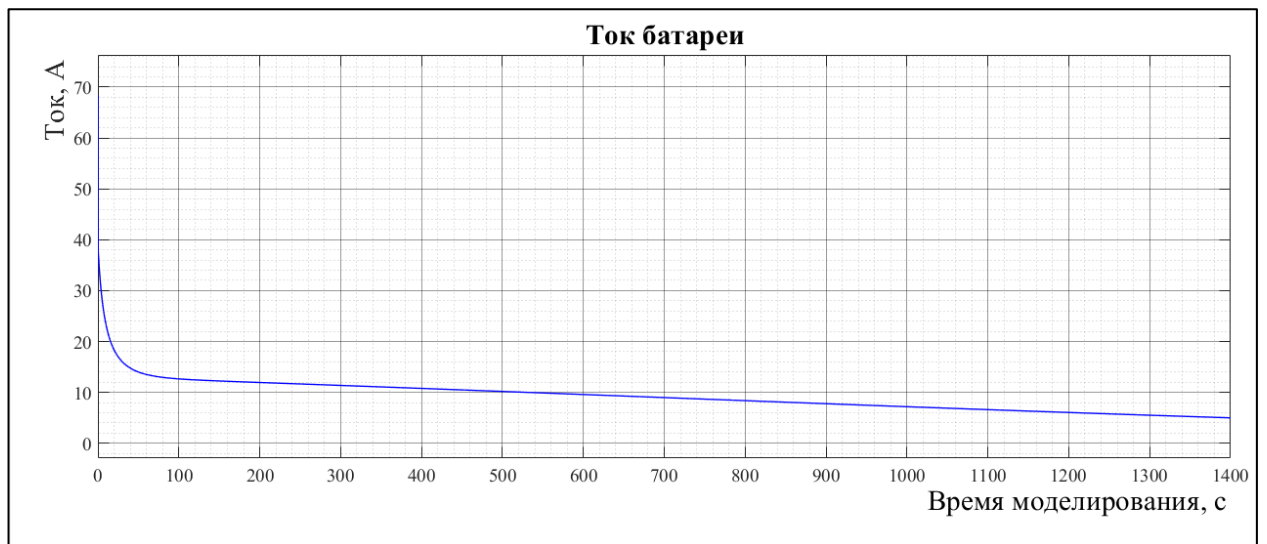


Рисунок 3.18 — Ток в процессе разряда на постоянном напряжении.

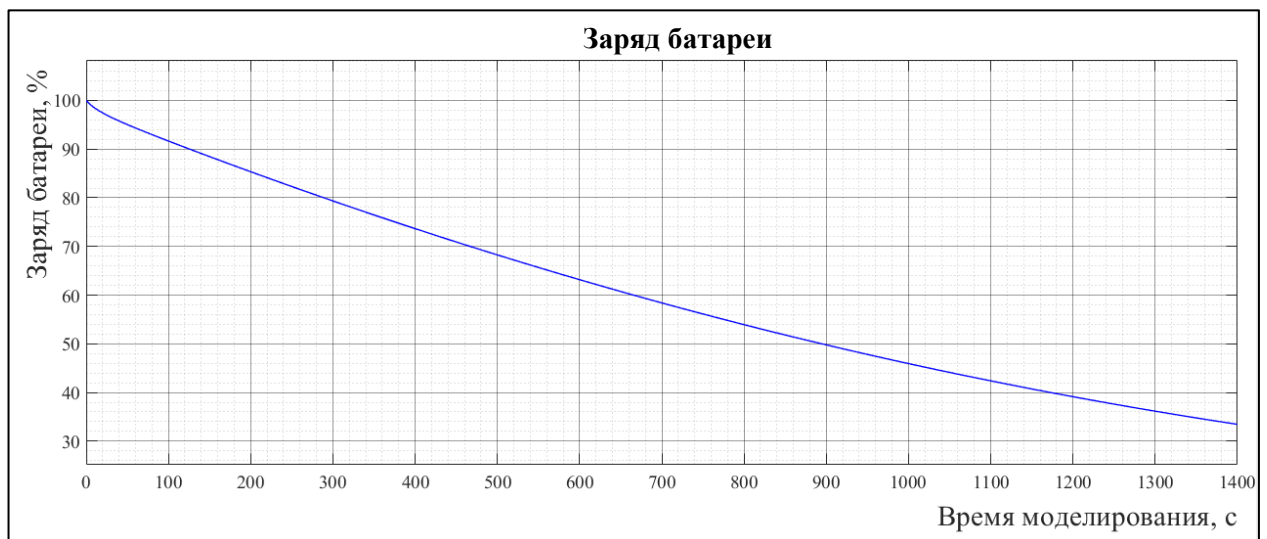


Рисунок 3.19 — Состояние батареи в процессе разряда на постоянном напряжении.

Из рисунков выше видно, что характер кривых, полученных в результате моделирования также идентичен полученным в пункте 3.1.4.1, а значения совпадают.

Из данного ряда компьютерных экспериментов можно сделать вывод, что представленная в данной работе реализация модели литий-ионного накопителя энергии может считаться достоверной и применяться для дальнейшего анализа их применения в комплексных моделях систем тягового электроснабжения.

3.2 Моделирование суперконденсаторной батареи

3.2.1 Описание математической модели

Для моделирования суперконденсаторных батарей обычно используется схема замещения, изображённая на рисунке 3.20 [22, 60, 63].

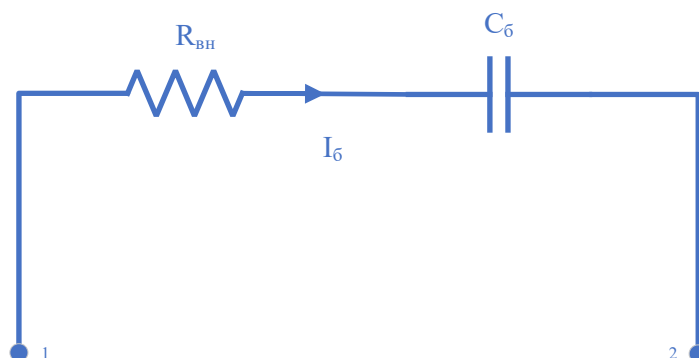


Рисунок 3.20 — Последовательная схема замещения суперконденсаторной батареи.

Здесь:

$R_{вн}$ – внутренне сопротивление батареи, включая сопротивление контактов и электролита, Ом;

$C_{сб}$ – ёмкость накопительного элемента, Ф;

$I_{сб}$ – ток накопительного элемента, положительное направление тока соответствует режиму разряда, А.

Исходя из схемы замещения напряжение $U_{сб}$, приложенное к зажимам 1 и 2 выражается по формуле:

$$U_{сб} = U_c - \Delta U, \quad (3.26)$$

где: U_c – напряжение идеального суперконденсатора, В;

ΔU – потери напряжения на внутреннем сопротивлении контактов и электролита, В.

Напряжение суперконденсатора изменяется по следующему закону:

$$u_c(t) = \frac{1}{C} \int_0^t i_{сб}(t) \cdot dt; \quad (3.27)$$

Выражение $\int_0^t i_{сб}(t) \cdot dt$ выражает заряд $Q(t)$, сохраняемый суперконденсаторной батареей:

$$Q(t) = \int_0^t i_6(t) \cdot dt; \quad (3.28)$$

Заряд, накапливающийся между обкладками суперконденсатора определяется аналогично заряду литий-ионного накопительного элемента (см параграф 4.2). Подставив это уравнение в закон изменения напряжения, получим следующее выражение:

$$u_c(t) = \frac{Q(t)}{C}; \quad (3.29)$$

По аналогии с выводам из пункта 4.2:

$$Q(t) = Q(0) + \Delta Q(t); \quad (3.30)$$

где: $Q(t)$ – текущий заряд батареи, А·ч;

$Q(0)$ – заряд батареи в начальный момент времени, А·ч;

ΔQ – приращение заряда за период времени моделирования, А·ч.

Величина ΔQ учитывает весь заряд, отдаваемый или накапливаемый батареей за время работы накопителя энергии. Таким образом, её можно определить как интеграл от тока батареи за весь рассматриваемый период:

$$\Delta Q(t) = \int_0^t i(t) \cdot dt; \quad (3.31)$$

Потери напряжения на внутреннем сопротивлении контактов и в электролите можно достаточно точно представить в виде линейного (в рамках рабочего диапазона состояний батареи) внутреннего сопротивления суперконденсатора $R_{вн}$. Таким образом, потери напряжения Δu определяются по следующему выражению:

$$\Delta u(t) = i_6(t) \cdot R_{вн}; \quad (3.32)$$

Тогда напряжение суперконденсатора будет определяться согласно выражению:

$$u_{c6}(t) = u_c(t) + \Delta u(t) = \int_0^t (i_6(t) \cdot dt) + i_6(t) \cdot R_{вн}; \quad (3.33)$$

При необходимости полученную модель можно масштабировать аналогично модели электрохимического накопителя.

3.2.2 Реализация метаматематической модели при помощи программного кода

Для реализации цифровой модели перейдём к дискретному уравнению значения напряжения суперконденсатора. Для этого представим заряд батареи в момент времени t_{k+1} через значение времени в предыдущий момент времени t_k и некоторое дискретное приращение за время $dt = t_{k+1} - t_k$:

$$q_{k+1} = q_k + \Delta q_k, \quad (3.34)$$

где Δq_k – приращение заряда за период времени $[t_k; t_{k+1}]$, А·ч. Оно определяется как интеграл от тока батареи за рассматриваемый период времени:

$$\Delta q_k = \int_{t_k}^{t_{k+1}} i_{\text{б}} \cdot dt. \quad (3.35)$$

Примем, что ток между двумя соседними измерениями неизменен (ступенчатая интерполяция), тогда приращение заряда между измерениями можно вычислить по следующей формуле:

$$\Delta q_k = i_{\text{б}k} \cdot dt. \quad (3.36)$$

Отсюда:

$$q_{k+1} = q_k + \Delta q_k = q_k + i_{\text{б}k} \cdot dt. \quad (3.37)$$

Потери напряжения на внутреннем сопротивлении контактов и в электролите можно достаточно точно представить в виде линейного (в рамках рабочего диапазона состояний батареи) внутреннего сопротивления суперконденсатора $R_{\text{вн}}$. Таким образом, потери напряжения Δu определяются по следующему выражению:

$$\Delta u(t) = i_{\text{б}}(t) \cdot R_{\text{вн}}; \quad (3.38)$$

Перейдём к дискретному представлению тока $i_{\text{б}k}$:

$$\Delta U_k = i_{\text{б}k} \cdot R_{\text{вн}}; \quad (3.39)$$

Таким образом, напряжение $U_{сбk}$, приложенное к точкам 1 и 2 схемы замещения в момент времени k определяется следующим выражением:

$$U_{сб(k+1)} = U_{с(k+1)} - \Delta U_k = \frac{q_k}{C} - i_{бk} \cdot R_{вн}; \quad (3.40)$$

В отличие от электрохимических накопителей, внутреннее сопротивление суперконденсаторных элементов практически не зависит от направления тока (ВАХ этих элементов практически прямая на всей рабочей области), потому отсутствует необходимость закладывать в модель определение сопротивления для двух режимов. Однако, процесс заряда и разряда, как и в случае и литий-ионным накопителем, различается за счёт направления тока. Для некоторых экспериментов и задач модели, например, для определения разрядных характеристик, может понадобится построить зависимость тока батареи от напряжения на её зажимах.

Выразим ток батареи из выражения для определения напряжения:

$$i_{бk} = \frac{U_{сб(k+1)} \cdot C - q_k}{R_{вн} \cdot C}; \quad (3.41)$$

В текущем виде формул для вычисления k -того значения тока нужно знать $(k+1)$ -вое значение напряжения. Обычно, это не составит проблемы, ведь кривая напряжения является для модели входными данными. Однако, исходя из необходимости встраивания этой модели накопителя в программный комплекс для расчёта электрических цепей, целесообразным будет представить способ нахождения тока в точке $(k-1)$. Для этого сместим все индексы на одну позицию назад:

$$i_{б(k-1)} = \frac{U_{сбk} \cdot C - q_{(k-1)}}{R_{вн} \cdot C}. \quad (3.42)$$

3.2.3 Оценка результатов моделирования

Для оценки адекватности результатов моделирования требуется провести расчёт нескольких режимов работы батареи: заряд и разряд накопителя при постоянном напряжении, разряд и разряд накопителя при постоянном токе и работа батареи при переменном напряжении. Первые две кривые позволяет оценить

адекватность поведения модели в процессах разряда и заряда, однако они не отражают никакого реалистичного режима работы батареи, особенно когда речь идёт о быстроизменяющейся нагрузке, такой как тяговая сеть рельсового транспорта. Для того, чтобы смоделировать подобный режим работы, была сгенерирована случайная последовательность значений напряжения, которая в общем виде отражает поведение тяговой сети.

В качестве примера для оценки работоспособности и адекватности модели используем характеристики суперконденсатора, аналогичные рассмотренным в MatLab. Примем:

$$C = 33 \text{ Ф};$$

$$U_{max} = 243 \text{ В};$$

$$R_{BH} = 0.050 \text{ Ом}.$$

Выбранные параметры суперконденсатора близки к реальным параметрам модулей, представленных на рынке.

3.2.3.1 Опыт заряда и разряда накопителя при постоянном напряжении

Аналогично пункту 3.1.1 для проведения опыта заряда нужно приложить к батарее напряжение, большее или равное напряжению батареи при 100% заряда. Произведя опыт холостого хода при заряде 100% получим зависимость на рисунке 3.21.



Рисунок 3.21 — Напряжение холостого хода заряженной батареи.

Значение напряжения накопителя в режиме холостого хода:

$$V_{xx.100} = 243 \text{ В}$$

Полученное напряжение численно равно максимальному длительному рабочему напряжению батареи. Установим значение напряжения на клеммах батареи равным 243 В, а начальное значение заряда батареи SoC – 0. Произведя расчёт в течении 10 секунд, получим следующие зависимости, представленные на рисунке 3.22 и рисунке 3.23.

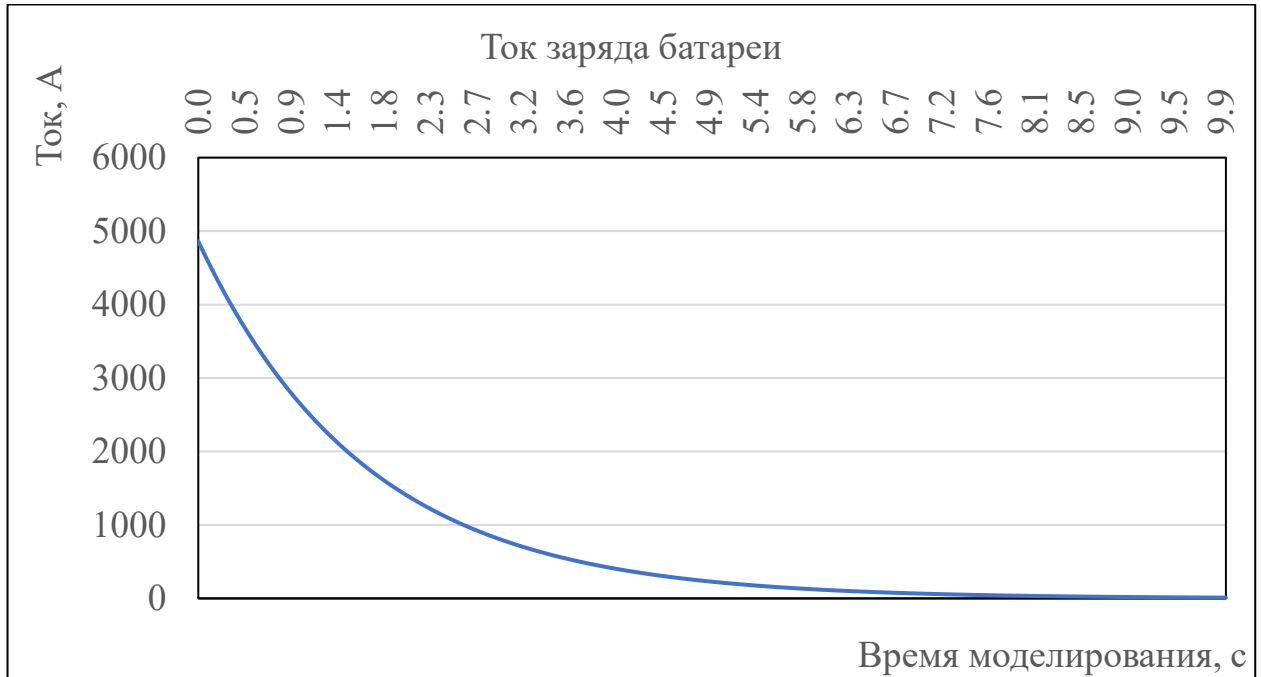


Рисунок 3.22 — Ток батареи в процессе заряда постоянным напряжением

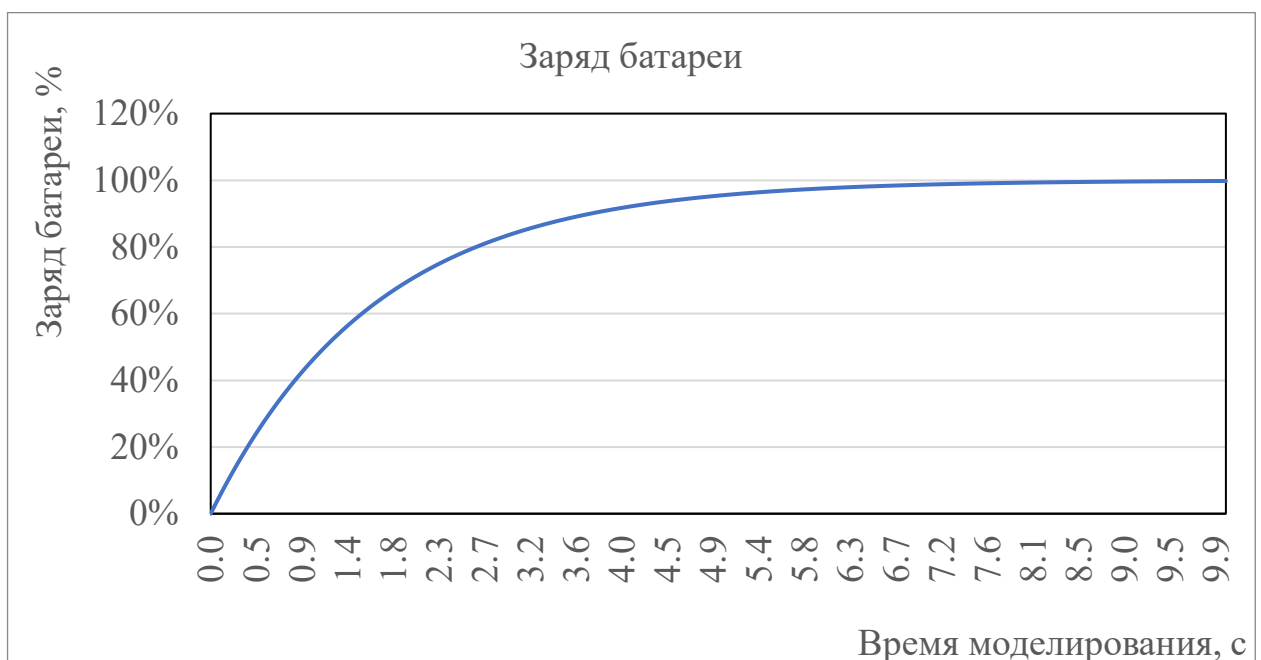


Рисунок 3.23 — Состояние батареи в процессе заряда постоянным напряжением

Полученные зависимости хорошо иллюстрируют техническую разницу между накопительными элементами электрохимического типа и суперконденсаторами. Полный процесс заряда накопителя ёмкостью $\sim 2,2 \text{ А*ч}$ составила порядка 10 секунд (в сравнении с десятками минут для литий-ионного накопителя, рассматриваемого ранее). Вышеназванное свойство открывает новые возможности при работе в сложных условиях.

Для проведения опыта разряда нужно определить величину напряжения, соответствующую допустимой его глубине разряда. Суперконденсаторы можно полностью разряжать, то есть их глубина разряда составляет 100%. В таком случае, в качестве входного напряжения для проведения разряда можно установить значение 0. Произведя такой опыт получим зависимости, представленные на рисунке 3.24 и рисунке 3.25):

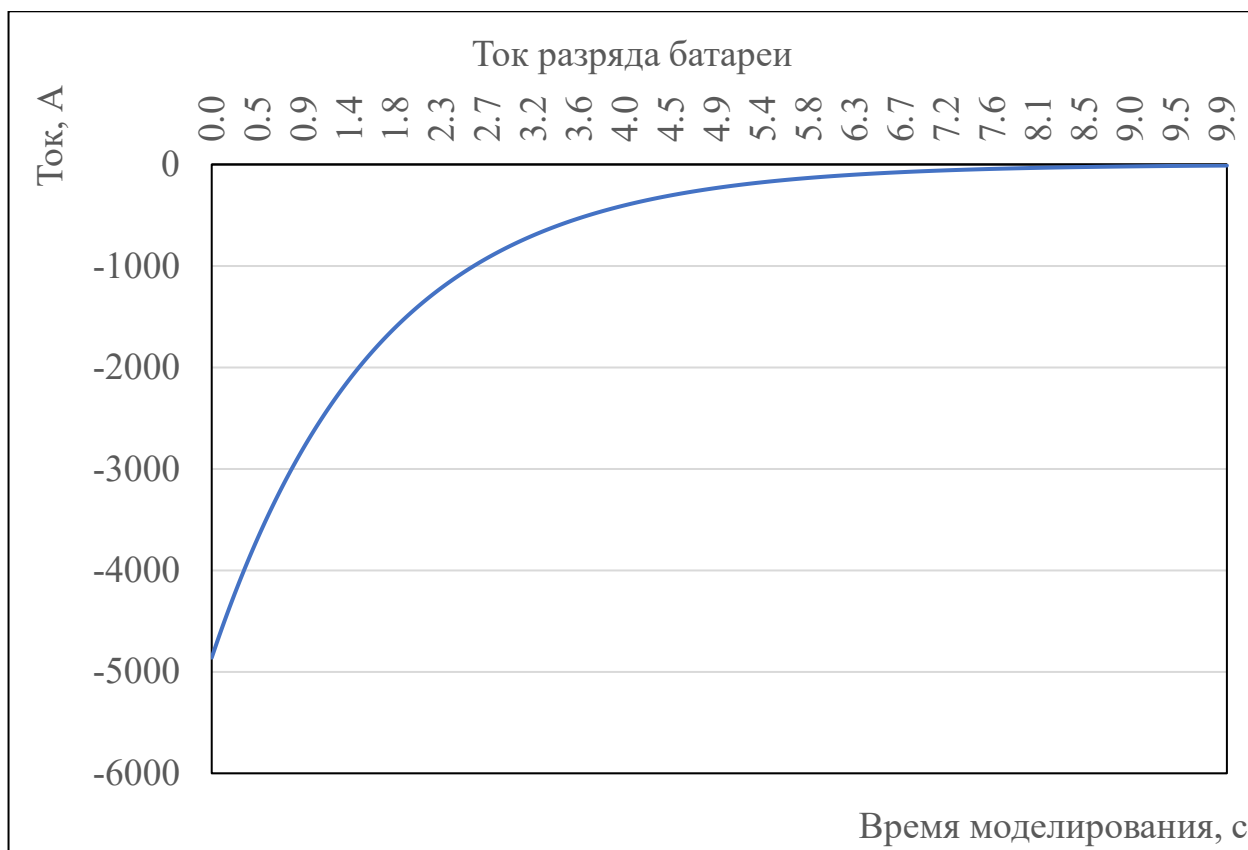


Рисунок 3.24 — Ток батареи в процессе разряда на постоянном напряжении

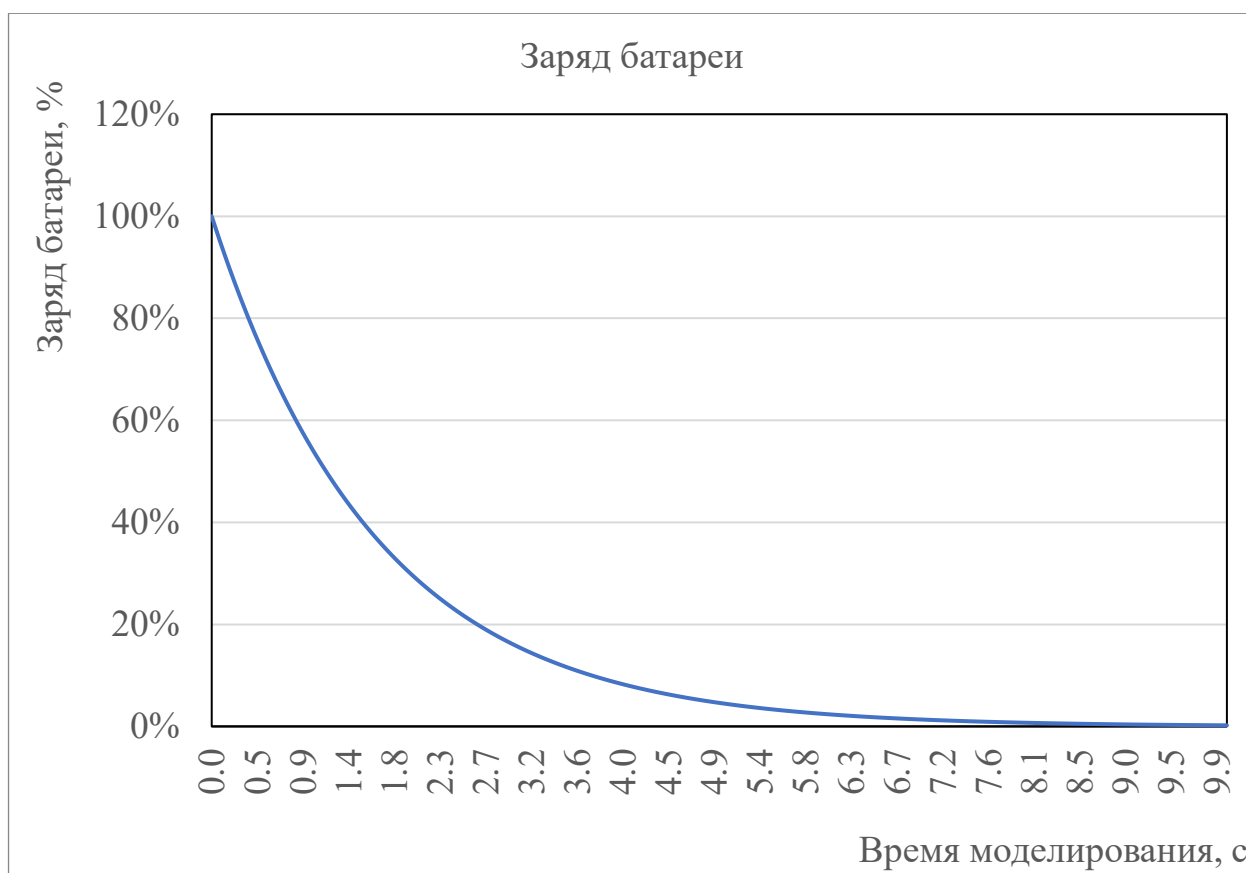


Рисунок 3.25 — Состояние батареи в процессе разряда постоянным напряжением

Из полученных графиков видно, что в отличие от модели литий-ионной батареи, представленной выше, полученные графики в режимах заряда и разряда симметричны.

3.2.3.2 Опыт разряда батареи при постоянном токе

Зарядно-разрядные характеристики суперконденсаторных батарей имеют линейный характер в рабочей области (то есть в диапазоне рабочих напряжений).

Построим разрядные прямые для токов разряда 20, 40 и 60 А (рисунок 3.26).

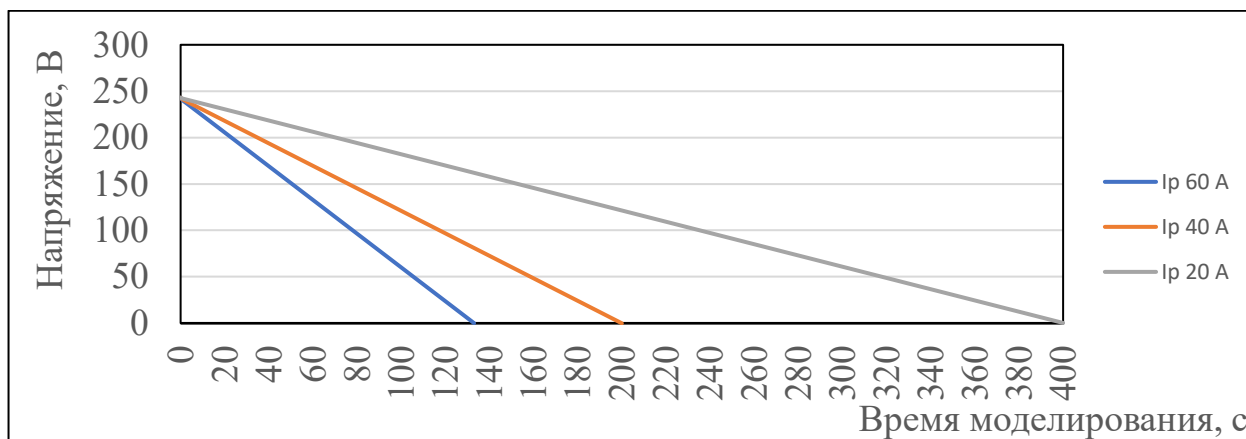


Рисунок 3.26 — Разрядные прямые для токов разряда 20, 40 и 60 А

3.2.3.3 Опыт работы модели с случайным входным напряжением

Сгенерируем случайную последовательность значений входного напряжения суперконденсатора как равномерно распределённое в диапазоне от 200 до 250 В. Кривая напряжения примет вид, представленный на рисунке 3.27.

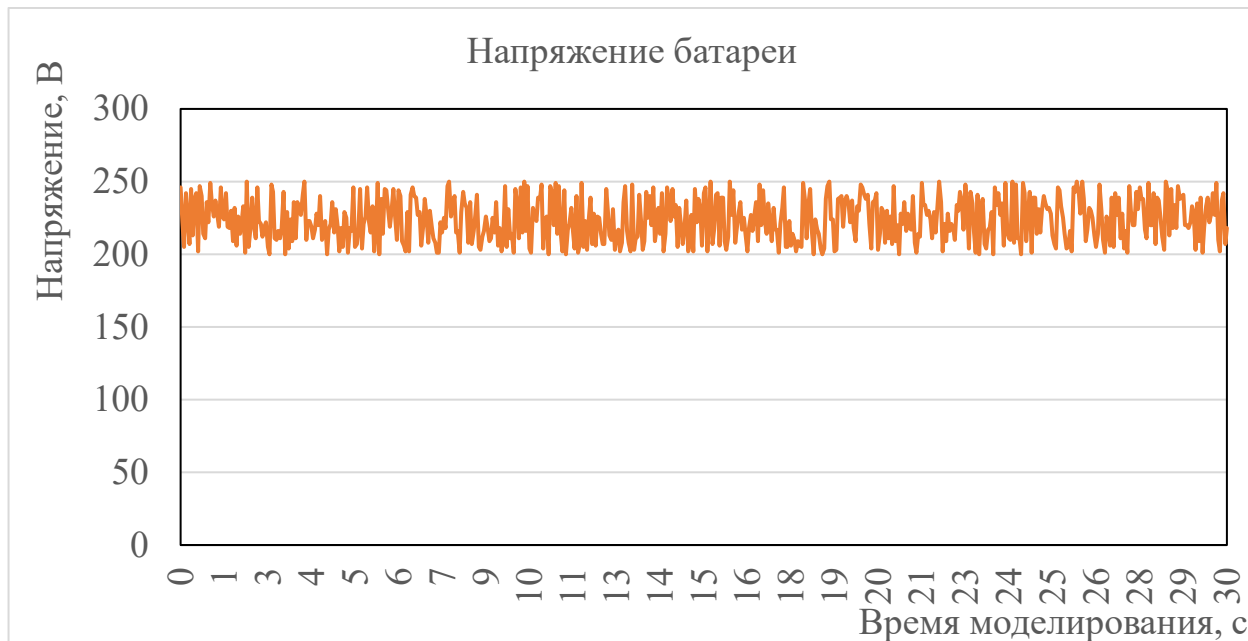


Рисунок 3.27 — Случайная последовательность значений входного напряжения суперконденсатора

Подставив значения полученного набора входных напряжений, получим зависимости тока и заряда батареи от времени работы (рисунок 3.28 и рисунок 3.29).

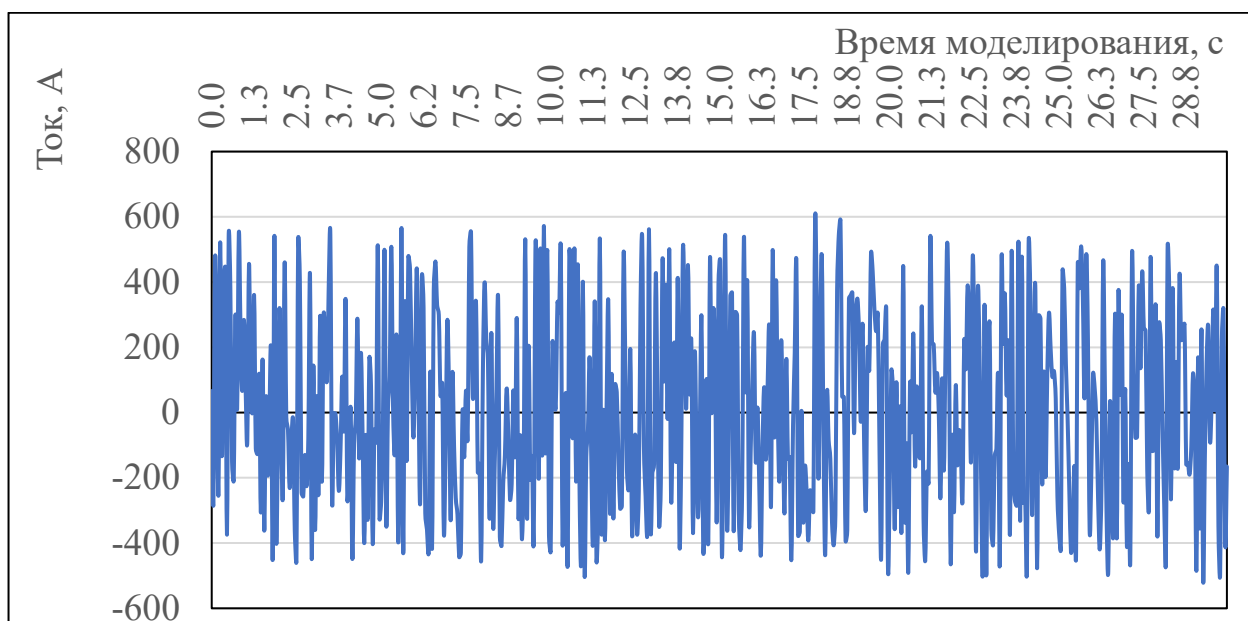


Рисунок 3.28 — Ток батареи в процессе работы на переменном напряжении

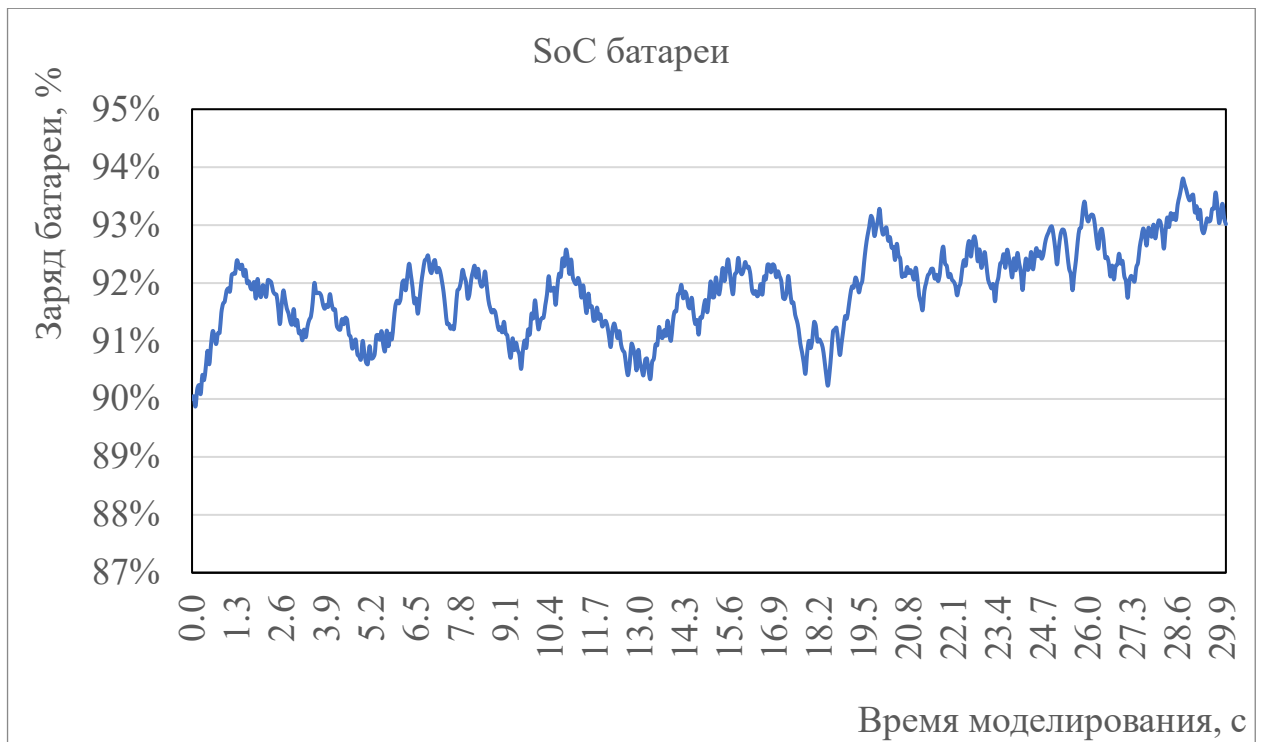


Рисунок 3.29 — Состояние заряда батареи в процессе работы на переменном напряжении

Положительное направление токов соответствует заряду накопителя, отрицательный – разряду.

3.2.4 Верификация результатов имитационного моделирования суперконденсатора

Для проверки произведём аналогичные опыты, построив модель накопителя в сертифицированном программном комплексе MATLAB Simulink. В библиотеке комплекса присутствует компонент Supercapacitor, представляющий собой модель суперконденсаторной батареи (рисунок 3.30 и рисунок 3.31).

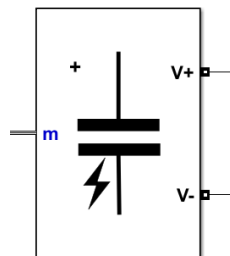


Рисунок 3.30 — визуальная маска компонента Supercapacitor в MatLab Simulink

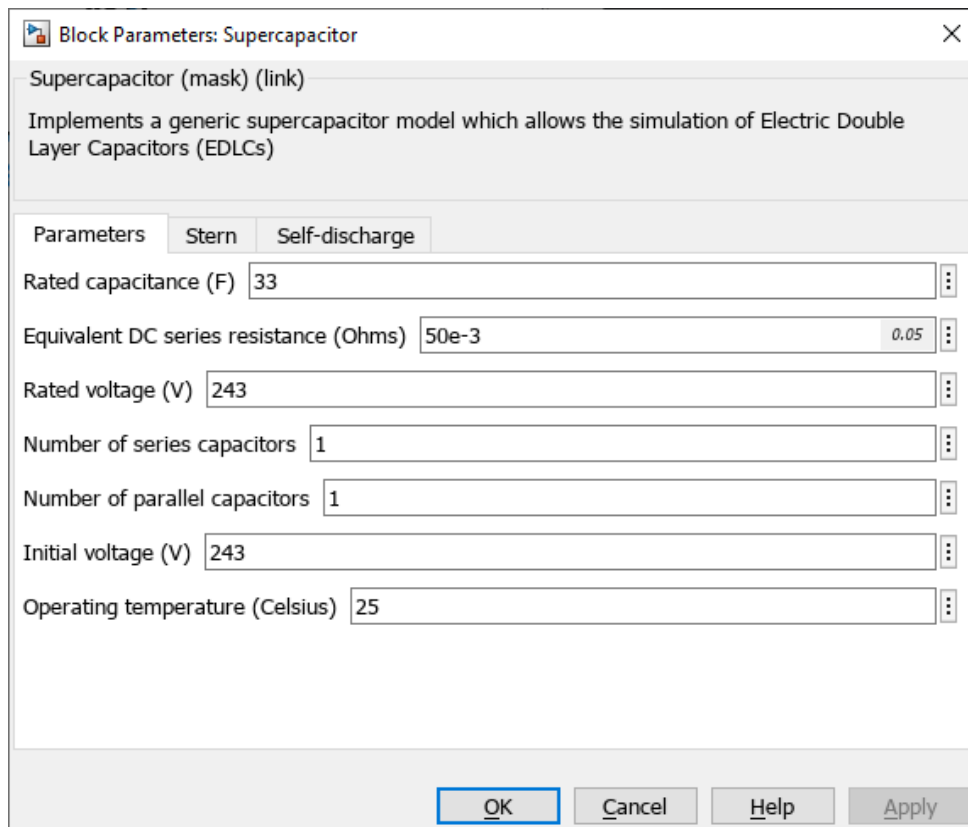


Рисунок 3.31 — панель настроек компонента Supercapacitor в MatLab Simulink

Установим параметры модели в меню блока в соответствии с принятыми ранее для тестирования модели в подпараграфе 3.2.1. В меню отсутствует параметр, описывающий состояния заряда батареи в начале моделирования. Его функцию может выполнять начальное значение напряжения. Для симулирования разных режимов работы будем устанавливать соответствующие им значения начального уровня напряжения.

Компонент Supercapacitor позволяет построить зарядные кривые, отражающие время заряда батареи при работе с разным постоянным током. Так как процессы разряда и заряда суперконденсаторов симметричны, эти кривые совпадают с характеристиками, полученными ранее, но отражены относительно оси абсцисс. Кривые обрываются на максимально допустимом значении напряжения 243 В (рисунок 3.32).

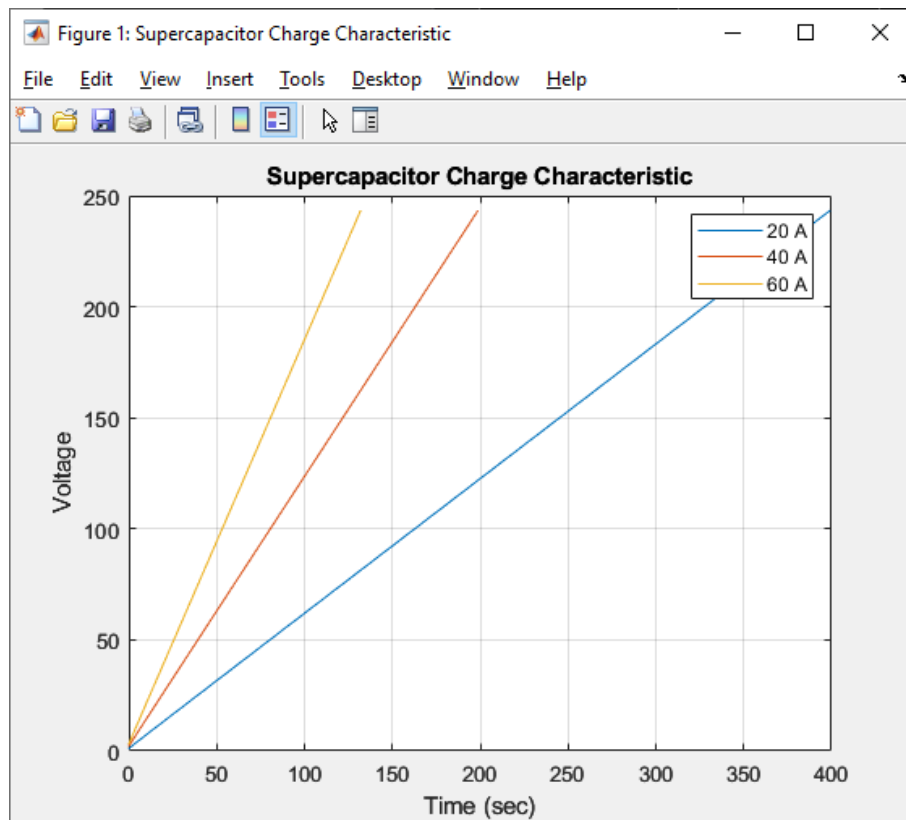


Рисунок 3.32 — зарядные характеристики суперконденсатора, построенные при помощи инструментария MatLab

Построим модель для проведения опытов. Источник напряжения, по аналогии с предыдущими опытами, служит для установки необходимого уровня входного напряжения батареи (рисунок 3.33).

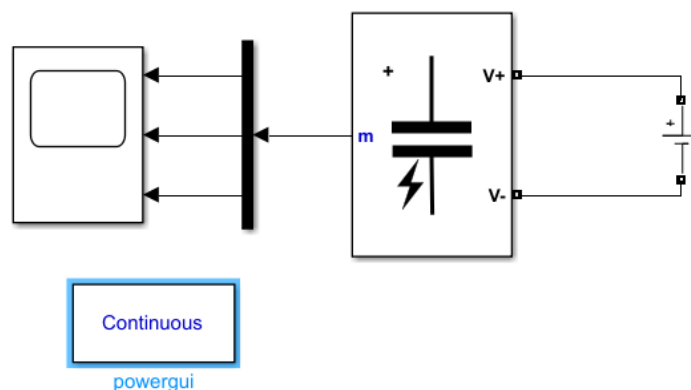


Рисунок 3.33 — расчётная схема в MatLab

Измерения, выводимые через информационный выход *m* содержат в себе три контролируемые величины: ток батареи, напряжение между зажимами *V+* и *V-* и процент заряда батареи, поэтому для их раздельного вывода в панель осциллографа, сигналы необходимо разделить при помощи демультиплексера.

При помощи расчётной схемы (рисунок 3.33) проведём опыты, аналогичные подпараграфу 3.2.1.

3.2.4.1 Опыт заряда и разряда суперконденсаторного накопителя при постоянном напряжении

Для проведения опыта заряда установим начальное напряжение батареи равным нулю, а напряжение на вводах, напротив, равным 243 В (рисунок 3.34 и рисунок 3.35).

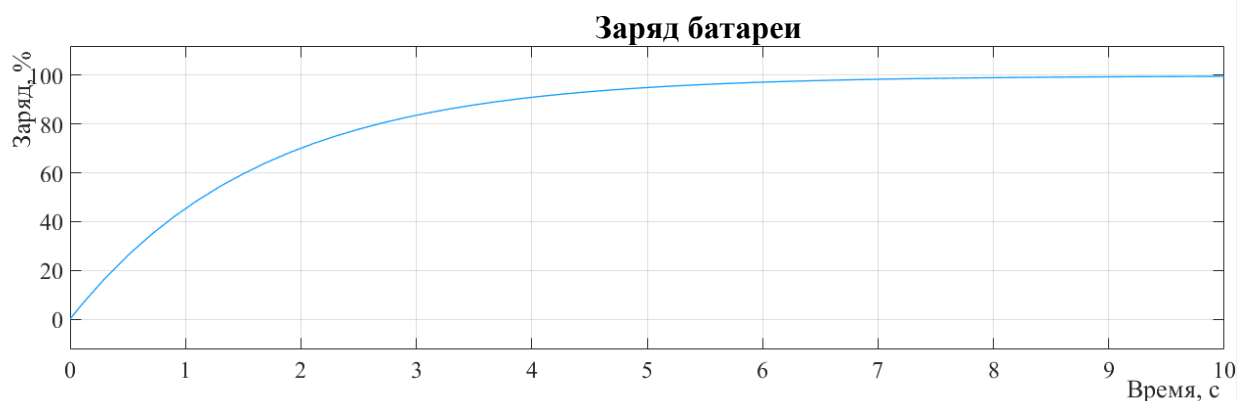


Рисунок 3.34 — Состояние заряда батареи в процессе заряда на постоянном напряжении

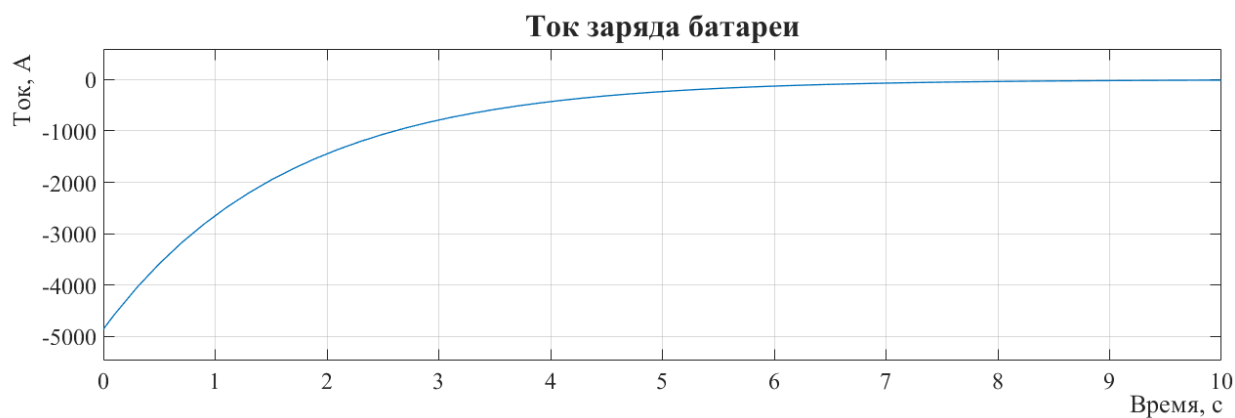


Рисунок 3.35 — Ток батареи в процессе заряда на переменном напряжении

В опыте заряда установим начальное напряжение батареи равным 243 В, напряжение на вводах блока – нулю (рисунок 3.36 и рисунок 3.37).

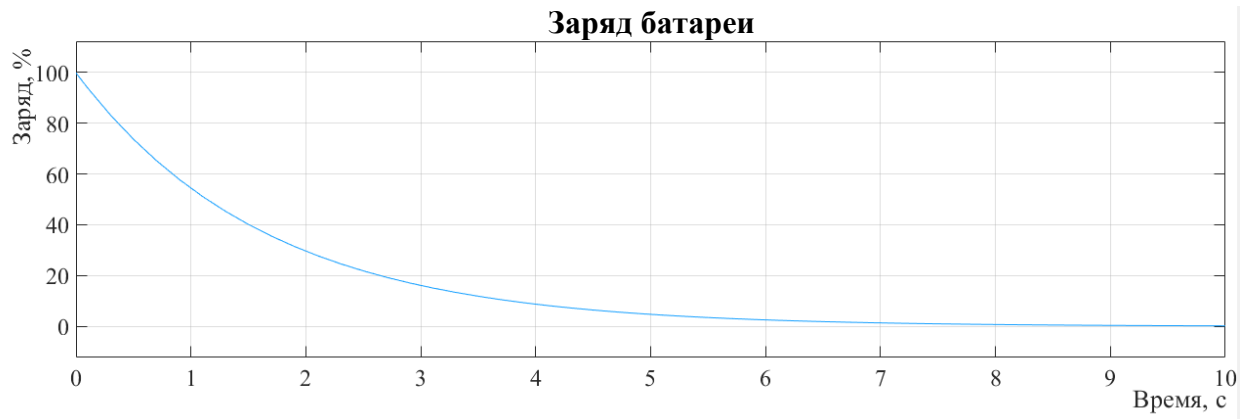


Рисунок 3.36 — Состояние заряда батареи в процессе разряда на постоянном напряжении

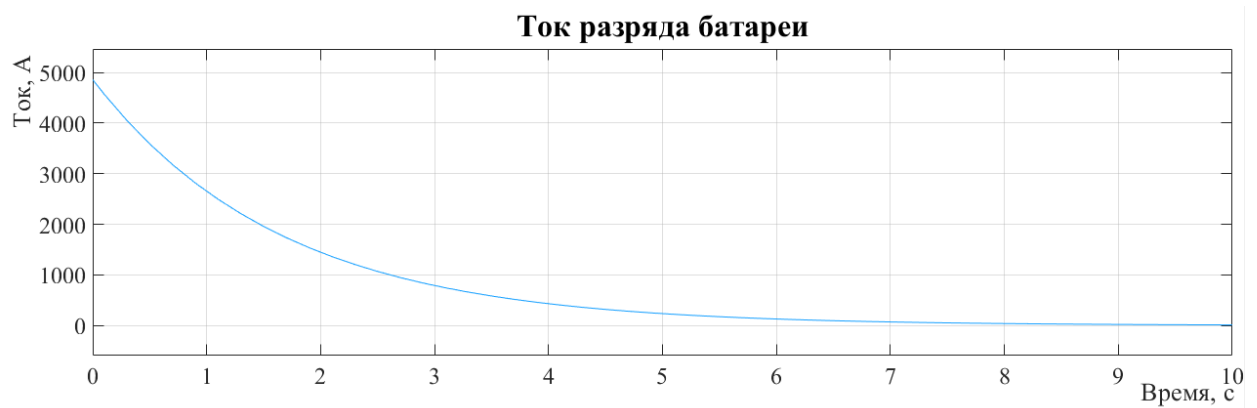


Рисунок 3.37 — Ток батареи в процессе разряда на постоянном напряжении

Полученные кривые соответствуют аналогичным из пункта 3.2.1.1, из чего можно сделать вывод, что подготовленная в рамках исследования модель отражает свойства реального суперконденсатора с точностью, достаточной для применения её результатов в анализе режимов работы накопителей энергии в системах тягового электроснабжения.

3.3 Моделирование системы управления накопителями энергии в составе системы тягового электроснабжения

3.3.1 Система управления накопителем энергии в режиме принятия энергии рекуперации

Система управления литий-ионных накопителей и суперконденсаторных батарей при работе в СТЭ рельсового транспорта принципиально не отличаются друг от друга, поэтому их можно описать одной математической моделью. В

качестве постановки задачи, следует определить необходимые свойства выходной модели:

Основной задачей разрабатываемого блока является обеспечение процесса разряда накопителя при снижении напряжения контролируемой шины ниже установленного уровня и заряда при превышении напряжения контролируемой шины.

Исходя из задачи можно представить это сложное устройство в виде идеальной модели. Рассмотрим подробнее алгоритм работы устройства. Система управления может находиться в одном из нескольких возможных состояний и переходить между ними в зависимости от состояния сети или степени заряда накопителя энергий. Таким образом, можно заключить, что система управления накопителем энергии представляет собой «конечный автомат».

Конечным автоматом называется математическая абстракция устройства, характеризующееся конечным набором известных состояний и множеством переходов между ними [25].

Наиболее полноценным и наглядным способом описания конечных автоматов является составление графа. Для начала нужно определить множество состояний устройства. Можно выделить три состояния, в которых может находиться система управления накопителем энергии: «Заряд», «Разряд» и «Простой».

Состояние «Заряд» характеризует процесс накопления энергии. Система управления должна принимать его в том случае, если напряжение на контролируемом узле системы тягового электроснабжения превышает установленный номинальный уровень напряжения U_n . Если в качестве этого значения установить напряжение на данном узле в режиме холостого хода контролируемой шины, то накопительная установка будет принимать энергию только когда в СТЭ происходят выбросы повышенного напряжения, например в процессе рекуперативного торможения ЭПС. Такая настройка не позволяет заряжать накопитель энергии от сети в моменты простоя.

Для того, чтобы обеспечить такую возможность, уровень U_n нужно выбрать ниже напряжения холостого хода в узле, но выше напряжения, при котором

накопитель должен вступать в работу параллельно с подстанцией. Такой режим работы имеет место быть при использовании накопителей большего объёма для компенсации провалов напряжения в сети. Очевидно, что выбор этих уровней зависит от конкретных параметров систем тягового электроснабжения, а, следовательно, производится исходя из результатов имитационного моделирования или инструментального обследования тяговых подстанций.

Другим фактором, обуславливающим переход из этого состояния, является заряд накопителя. При достижении 100% заряда, система должна отключить накопитель от цепи, во избежание аварийной ситуации до тех пор, пока не наступят условия для перехода в состояние разряда.

Состояние «Разряд» характеризует процесс отдачи энергии. Автомат должен переходить к нему в том случае, если напряжение на контролируемом узле становится ниже некоторого пограничного значения. Если подзарядка от сети не подразумевается, в качестве такого уровня можно выбрать U_n , однако с точки зрения математической реализации алгоритмов системы является целесообразным установить это значение немного меньше, для избегания ошибок в расчётах.

Состояние разряда должно поддерживаться, пока напряжение на контролируемом узле не достигнет или превысит выбранный уровень напряжения или пока напряжение батареи U_b не достигнет минимально допустимого напряжения, что будет соответствовать установленной глубине разряда.

Состояние «Простой» характеризует состояние, при котором батарея отключена от схемы. Это состояние возникает, когда батарея полностью заряжена, однако не может отдать запасённую энергию в сеть, или напротив, когда батарея разряжена до установленного минимума, но не может перейти в состояние заряда, потому что напряжение на контролируемом узле ниже установленного уровня.

Из описания состояний следует, что условием перехода между состояниями является изменение двух управляющих параметров: напряжение контролирующего узла ($U_{ин}$, В), и заряд батареи (Q_b , %). Этих параметров достаточно, чтобы составить простейшую систему управления накопителем энергии, однако в реальной

практике могут быть востребованы дополнительные условия. Например, ограничение тока для защиты аккумуляторных элементов от перегрева.

Составим полный перечень вариантов переходов между состояниями. Из аналитики выше видно, что контролируемые параметры, которые строго определяют переходы между состояниями автомата, можно описать ограниченным числом вариантов, 2 варианта для $U_{ш}$ и 3 для Q_6 . В итоге получится 6 комбинаций входных параметров:

$$\begin{cases} U_{ш} \geq U_{н}; Q_{min} < Q_6 \leq Q_{max}; (1) \\ U_{ш} \geq U_{н}; Q_6 > Q_{max}; (2) \\ U_{ш} \geq U_{н}; Q_{min} \geq Q_6; (3) \\ U_{ш} < U_{н}; Q_{min} < Q_6 \leq Q_{max}; (4) \\ U_{ш} < U_{н}; Q_6 > Q_{max}; (5) \\ U_{ш} < U_{н}; Q_{min} \geq Q_6; (6) \end{cases}$$

где:

$U_{н}$ – номинальный уровень напряжения батареи, В;

Q_{min} – минимально допустимый уровень заряда батареи (глубина разряда), %;

Q_{max} – максимальный уровень заряда батареи, %.

Пограничные параметры $U_{н}$, Q_{min} и Q_{max} определяются применительно к каждой задаче отдельно.

Построим граф в соответствии с описанными состояниями (рисунок 3.38).

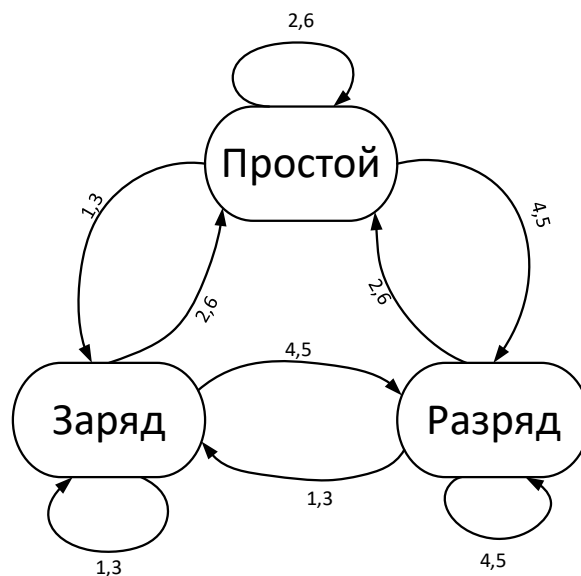


Рисунок 3.38 — Граф состояний модели системы управления накопителем энергии в режиме принятия энергии рекуперации

Реализация переходов между состояниями выполняется при помощи сравнений параметров при каждой итерации. Для разделения состояний между собой, выделена отдельная целочисленная переменная, которая принимает значения от 0 до 2. Перед проведением сравнений управляющих параметров каждый раз необходимо считать код предыдущего состояния автомата, чтобы определить множество допустимых переходов между состояниями.

Составим блок-схему определения состояния данного автомата. Предварительно можно упростить составные условия переходов между состояниями. При внимательном изучении графа можно сделать два наблюдения:

1. Условия сгруппированы по два и отсутствуют ситуации, при которых эти группы были бы нарушены. Условия 4 и 5, 1 и 3 и 2 и 6 всегда приводят к одинаковым переходам вне зависимости от изначального состояния.
2. Группы условий всегда приводят к переходу в одни и те же состояния, вне зависимости от исходного состояния. Условия 4 и 5 всегда приводят к состоянию разряда, условия 1 и 3 всегда приводят к состоянию заряда, условия 2 и 6 всегда ведут к простою.

Исходя из первого наблюдения условия 4 и 5 и условия 1 и 3 можно объединить в условия a и b соответственно:

$$\begin{cases} U_{ш} < U_{н}; Q_{min} < Q_{б}; & (a) \\ U_{ш} \geq U_{н}; Q_{б} \leq Q_{max}; & (b) \end{cases}$$

Условия 2 и 6 сократить невозможно, поскольку они не пересекаются. Однако, можно заметить, что т.к. набор условий 1-6 описывает всё множество возможных сочетаний контролируемых параметров, условие

$$U_{ш} \geq U_{н}; Q_{б} > Q_{max} \cup U_{ш} < U_{н}; Q_{min} \geq Q_{б}; (c)$$

описывает множество сочетаний, не удовлетворяющих ни множеству a ни множеству b .

Исходя из второго наблюдения, можно сделать вывод, что определение состояния системы управления не основывается на предыдущем состоянии. Таким образом, входными параметрами подпрограммы будут являться контролируемые параметры $U_{ш}$ и $Q_{б}$. Назовём переменную, описывающую состояния S . Пусть при S

$= 0$ устройство находится в состоянии «Простой», при $S = 1$ – «Разряд», при $S = 2$ – «Заряд». Составим блок-схему, описывающую данный алгоритм (рисунок 3.39).

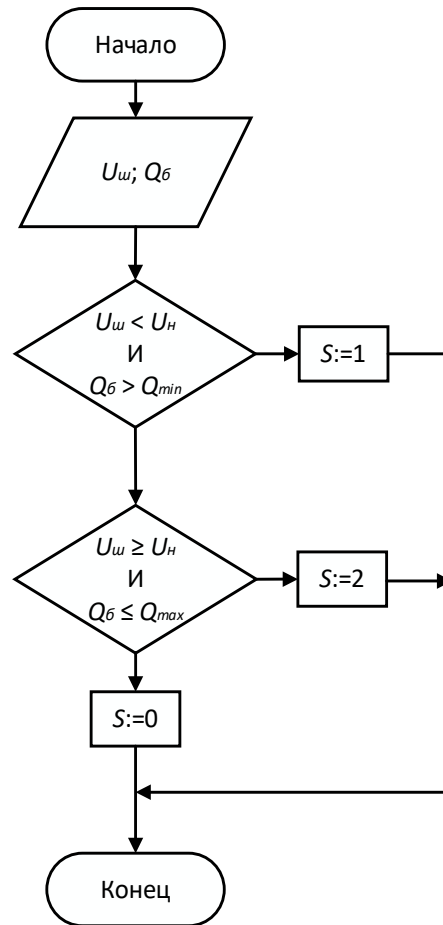


Рисунок 3.39 — Блок-схема алгоритма определения состояния системы управления управляемого накопителя энергии в режиме принятия избыточной энергии рекуперации

3.3.2 Система управления накопителем энергии в режиме снижения установленной мощности тяговой подстанции

Основные принципы построения системы управления для данного случая принципиально не отличаются от режима принятия энергии рекуперации, включая основные состояния автомата. Однако, основным управляющим параметром вместо $U_{ш}$ становится ток тяговой подстанции I_{mn} .

Сформулируем основную задачу для построения системы управления в данном режиме: разрабатываемый блок должен обеспечить разряд накопителя энергии при превышении током подстанции заданного уровня и заряд при снижении тока подстанции ниже заданного уровня.

Данный режим работы подразумевает, что батарея переходит в состояние «Разряд» только в том случае, когда к подстанции приложена существенная нагрузка, и её ток превышает некоторое заранее заданное значение предельного тока $I_{пр}$. В обратном случае система должна подзаряжать накопитель малыми (относительно токов нагрузки) токами.

Составим полный перечень вариантов переходов между состояниями:

$$I_{тп} > I_{пр}; Q_{min} < Q_6 \leq Q_{max}; (1)$$

$$I_{тп} > I_{пр}; Q_6 > Q_{max}; (2)$$

$$I_{тп} > I_{пр}; Q_{min} \geq Q_6; (3)$$

$$I_{тп} \leq I_{пр}; Q_{min} < Q_6 \leq Q_{max}; (4)$$

$$I_{тп} \leq I_{пр}; Q_6 > Q_{max}; (5)$$

$$I_{тп} \leq I_{пр}; Q_{min} \geq Q_6; (6)$$

где:

$I_{пр}$ – предельный уровень тока подстанции, В;

Q_{min} – минимально допустимый уровень заряда батареи (глубина разряда), %;

Q_{max} – максимальный уровень заряда батареи, %.

Пограничные параметры $I_{пр}$, Q_{min} и Q_{max} определяются применительно к каждой задаче отдельно.

Построим граф в соответствии с описанными состояниями (рисунок 3.40):

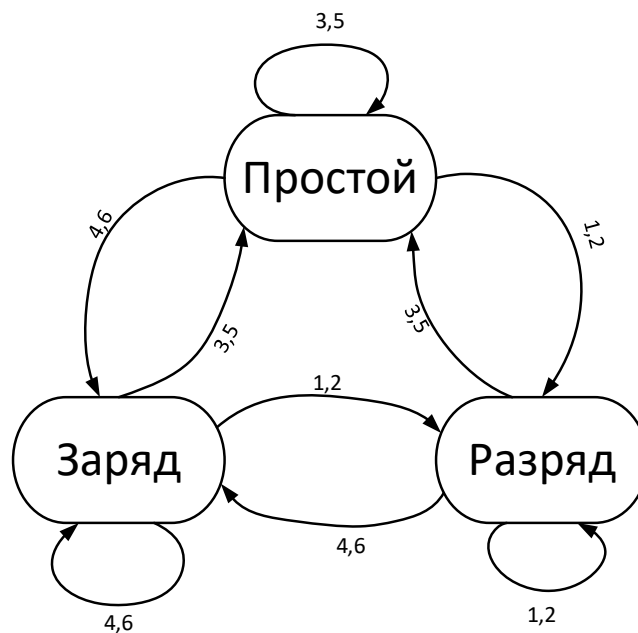


Рисунок 3.40 — Граф состояний модели системы управления накопителем энергии в режиме снижения установленной мощности

Аналогично подпараграфу 3.3.1, упростим условия переходов. Условия 1 и 2 и условия 4 и 6 пересекаются, так что их можно объединить в условия a и b соответственно:

$$\begin{cases} I_{\text{тп}} > I_{\text{пр}}; Q_{\text{min}} < Q_{\text{б}}; (a) \\ I_{\text{тп}} \leq I_{\text{пр}}; Q_{\text{б}} \leq Q_{\text{max}}; (b) \end{cases}$$

Условия 3 и 5, в свою очередь, описывают всё множество состояний, не попадающих ни в множество a ни в множество b . Обозначим состояния автомата переменной S . Пусть при $S = 0$ устройство находится в состоянии «Простой», при $S = 1$ – «Разряд», при $S = 2$ – «Заряд». Составим блок-схему, описывающую данный алгоритм (3.41).

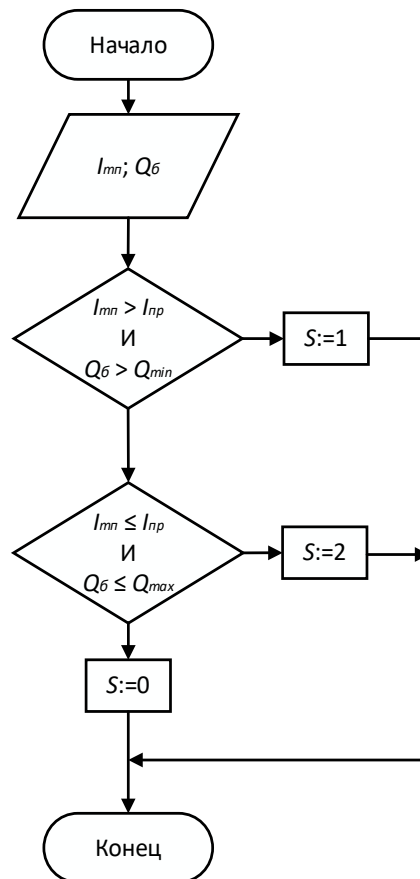


Рисунок 3.41 — Блок-схема алгоритма определения состояния системы управления управляемого накопителя энергии в режиме снижения установленной мощности

Разработанные модели накопителей энергии двух типов и система управления накопительной установки реализованы в качестве автономных программных блоков, а также интегрированы в вычислительно-измерительный

комплекс, разработанный на кафедре «Электроэнергетики транспорта» Российского университета транспорта.

3.4 Моделирование DC-DC преобразователя в составе УНЭ

Для реализации модели DC-DC преобразователя использовалась система визуального моделирования MatLab Simulink, библиотека SimPowerSystems. Визуально блочная модель (рисунок 3.43) воспроизводит схему замещения одноцепного преобразователя (рисунок 3.42).

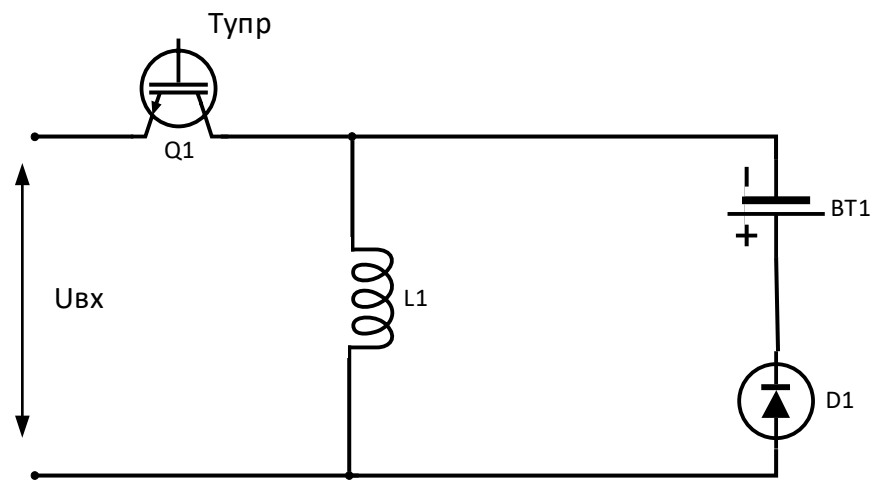


Рисунок 3.42 — Схема замещения одноцепного DC-DC преобразователя

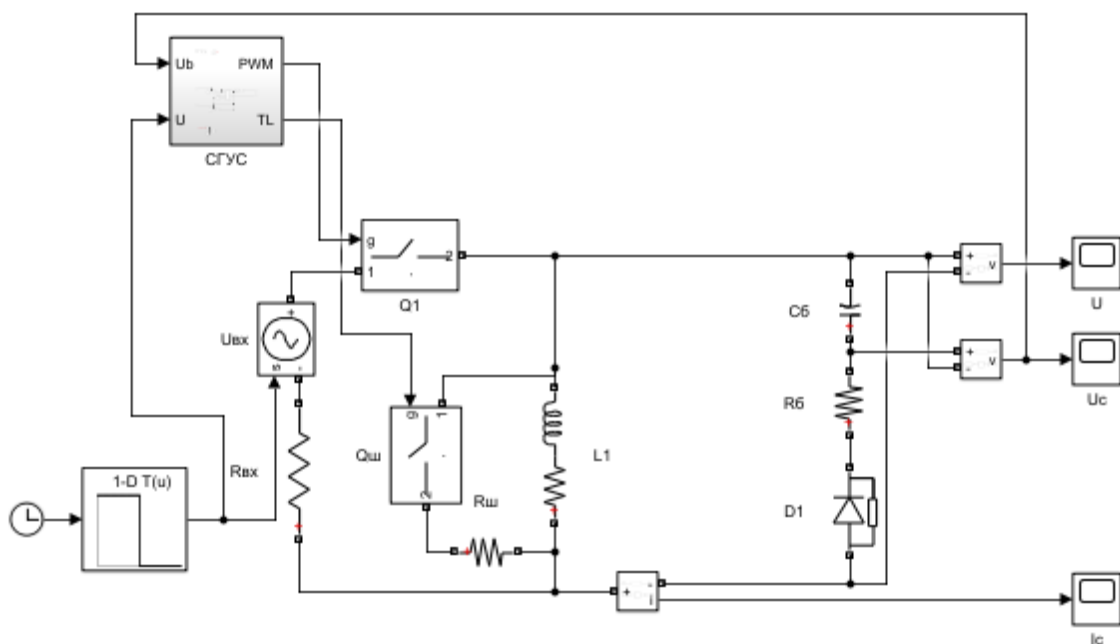


Рисунок 3.43 — Модель заряда накопителя энергии одноцепным DC-DC преобразователем в MatLab Simulink

IGBT-транзистор Q1 представлен в модели в виде идеального ключа Q1, управляемого системой генерации управляющего сигнала (СГУС) (рисунок 3.44). Батарея BT1 смоделирована своими ёмкостью Cб и активным сопротивлением Rб в соответствии со схемой замещения (рисунок 3.20). Встречно включенный диод D1 ограничивает заряд накопителя непосредственно от сети и образование колебательного процесса в контуре Cб-L1. Ветвь L1 моделирует зарядную катушку индуктивностью как последовательную RL ветвь и соединена с защитным сопротивлением Rш посредством идеального выключателя Qш. При полном отключении индуктивность зарядной катушки будет разряжаться высоким сопротивлением Rш. Входное питающее напряжение установки представлено в виде управляемого источника напряжения Uвх и входного сопротивления Rвх. Для регистрации осциллограмм графиков тока и напряжения в схему внедрены датчик тока батареи Ic и датчики напряжения батареи Uс и контура U [20, 58, 114].

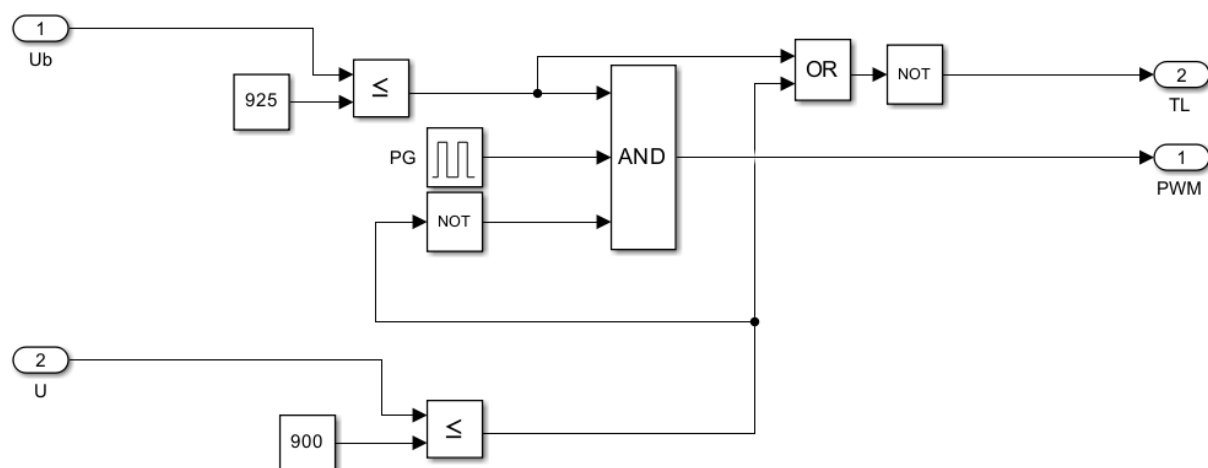


Рисунок 3.44 — Логическая схема системы генерации управляющего сигнала

Представленная система предназначена для ограничения заряда батареи при превышении максимального допустимого уровня напряжения (925 В). Для этого входными данными в блок выступает напряжение на заряжаемой батарее, измеренное соответствующим датчиком напряжения. Помимо этого, в модели установлены пограничные значения, упрощённо симулирующие работу внешней системы управления накопительной установкой: уровень напряжения на

контролируемой шине, до достижения которого накопитель не должен переходить в состояние заряда (900 В).

Логическая система построена на базовых логических элементах (AND, OR и NOT) и элементах сравнения, на выходе которых регистрируется единица только при соблюдении условия ($u_{\text{вх1}} \leq u_{\text{вх2}}$).

Основную роль в формировании управляющего сигнала занимает тактовый генератор прямоугольных импульсов PG. При соблюдении пограничных условий, на выключатель (выход PWM) подаётся отключающий сигнал длительностью 0,5 мс с периодичностью 1 мс. Таким образом в течении половины периода через ветвь дросселя протекает ток, заряжающий индуктивность L1. В течении второй половины периода ветвь зарядной катушки отключена от источника питания, однако протекающий по ней ток не может измениться мгновенно, поэтому он протекает по цепи накопителя, заряжая его.

Сигнал TL служит для управления выключателем защитного сопротивления. Защитная цепь замыкается только после окончания процесса заряда, для обеспечения снижения тока в заряжающей катушке, что не требует использования высокочастотных ключей.

Примем следующие параметры установки:

- Частота открытия ключа: 1 кГц;
- Индуктивность дросселя: 0,5 Гн;
- Ёмкость суперконденсатора: 144 Ф.

Снимем осциллограммы напряжения батареи (рисунок 3.45) и зарядного тока (рисунок 3.46). Преобразователь с предложенными характеристиками заряжает накопитель энергии до напряжения в 925 В за 55 секунд. При этом пиковый ток заряда превышает 3 тысячи ампер, поскольку данная схема не управляется по уровню тока. В условиях эксплуатации в составе СТЭ метрополитенов быстроедействие данного преобразователя недостаточно. Рассмотрим способы увеличения мощности преобразователя.

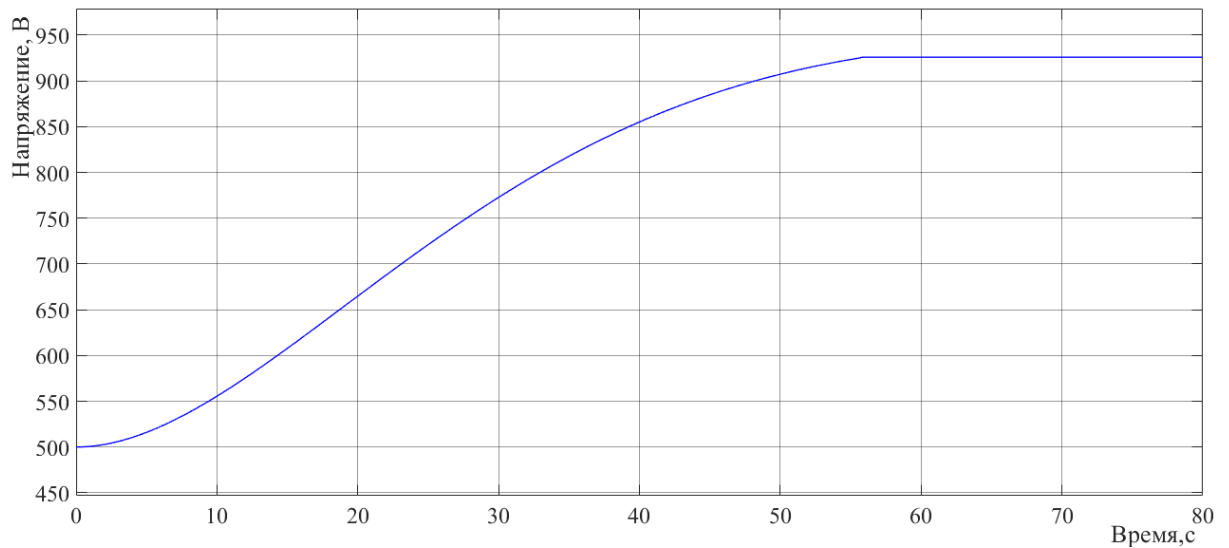


Рисунок 3.45 — Осциллограмма напряжения на суперконденсаторном накопителе энергии в процессе заряда DC-DC преобразователем

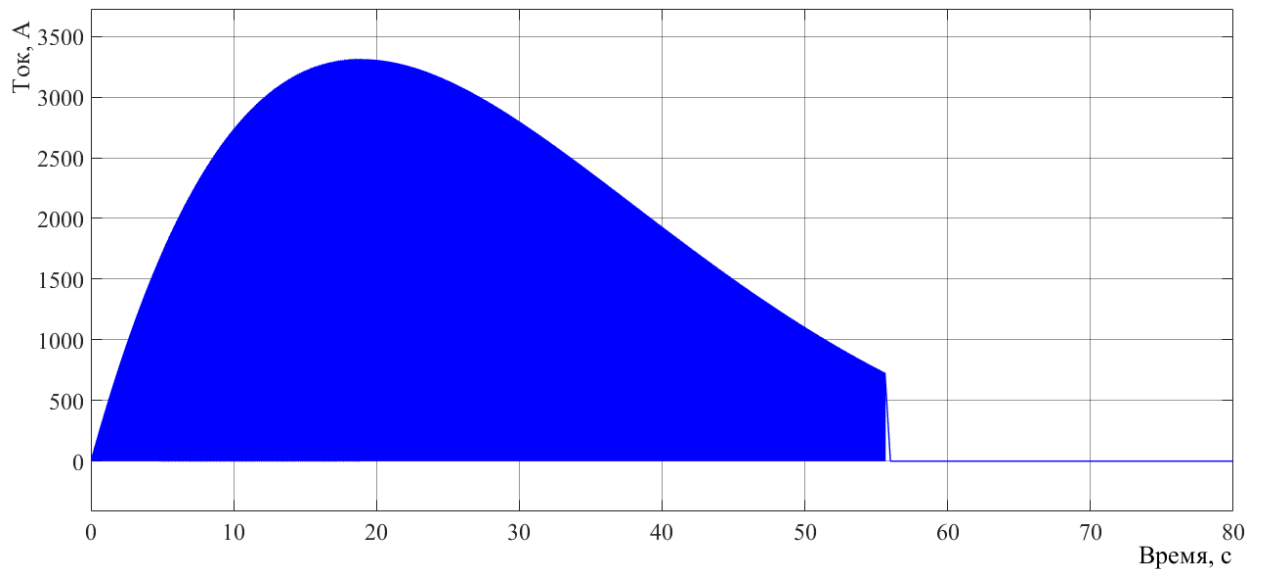


Рисунок 3.46 — Осциллограмма тока на суперконденсаторном накопителе энергии в процессе заряда DC-DC преобразователем

Применим более сложные методы образования управляющего сигнала. Введём изменение шириты импульса в зависимости от тока в цепи накопителя. Для этого усложним систему генерации управляющего сигнала (рисунок 3.47). Система управления теперь имеет дополнительный информационный вход I_b , на который поступает информация с датчика тока батареи I_c . Этот сигнал проходит сквозь блок «модуль», регистрирующий его амплитуду безотносительно знака (рисунок 3.48).

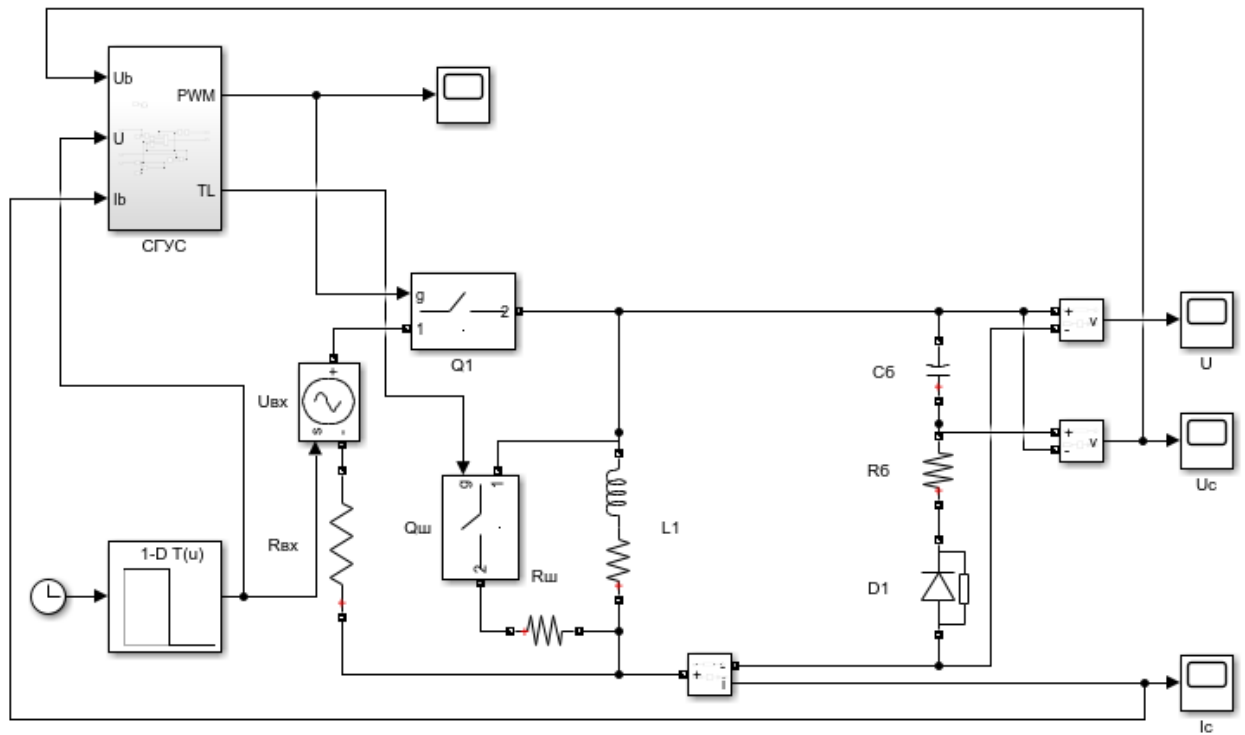


Рисунок 3.47 — Модель заряда накопителя энергии одноцепным DC-DC преобразователем с регулированием широты управляющего импульса в MatLab

Simulink

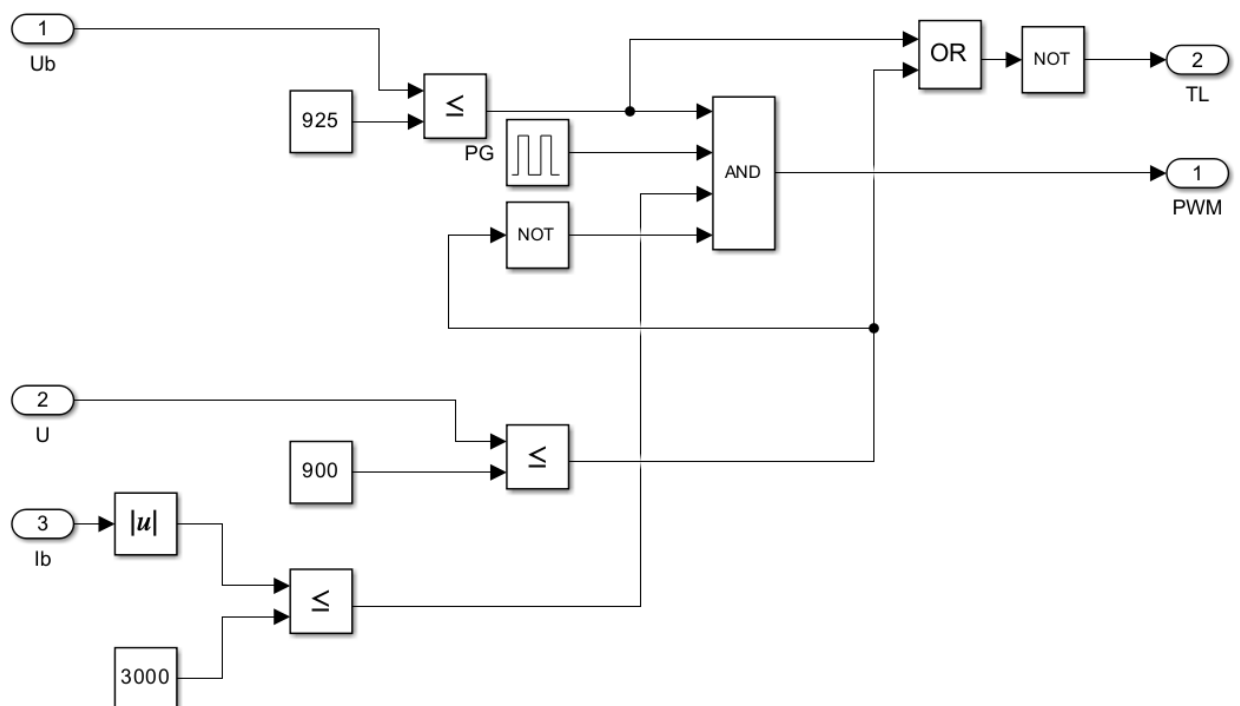


Рисунок 3.48 — логическая схема системы генерации управляющего сигнала с регулированием широты управляющего импульса

Внесение управляющего сигнала от сравнения тока в цепи накопителя с заданным максимальным допустимым током позволяет управлять шириной

контролирующего импульса. Благодаря регулированию уровня тока, появляется возможность изменить соотношение положений ключа в зависимости от величины тока, отключая управляющий IGBT-транзистор при превышении.

Из осциллограмм тока и напряжения (рисунок 3.50) видно, что время заряда сократилось на 20% (с 55 с до 45 с). Применение более эффективного управления позволяет более точно регулировать мощность преобразовательного агрегата, повышая его эффективность. Осциллограммы управляющего сигнала (рисунки 3.51-3.52) иллюстрируют изменение ширины импульса (более широкие при токах, меньших предельного значения тока и более узкие при достижении предельного значения тока).

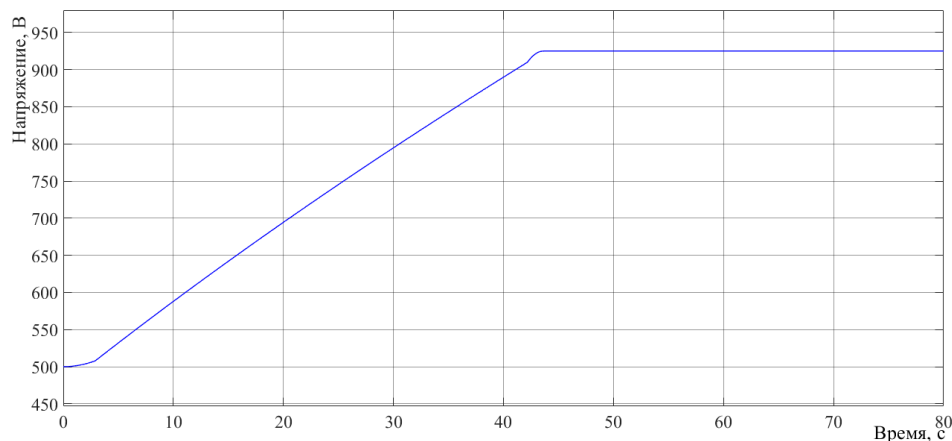


Рисунок 3.49 — осциллограмма напряжения на суперконденсаторном накопителе энергии в процессе заряда DC-DC преобразователем с регулированием ширины управляющего сигнала

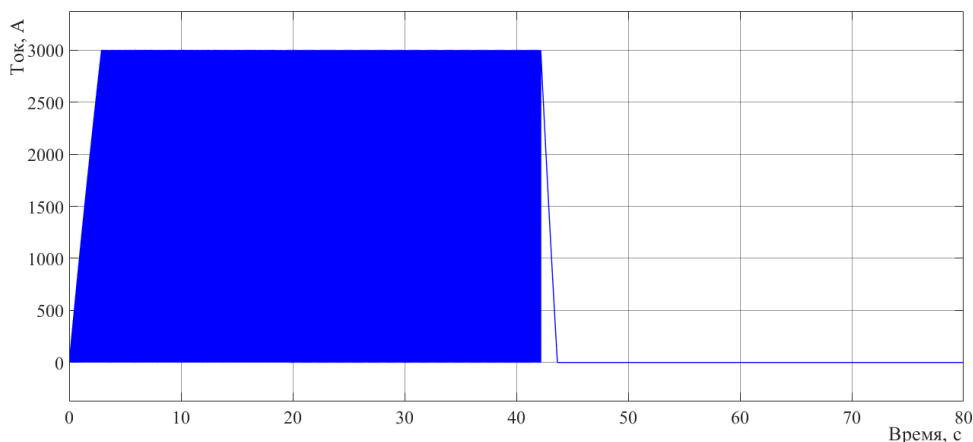


Рисунок 3.50 — осциллограмма тока на суперконденсаторном накопителе энергии в процессе заряда DC-DC преобразователем с регулированием ширины управляющего сигнала

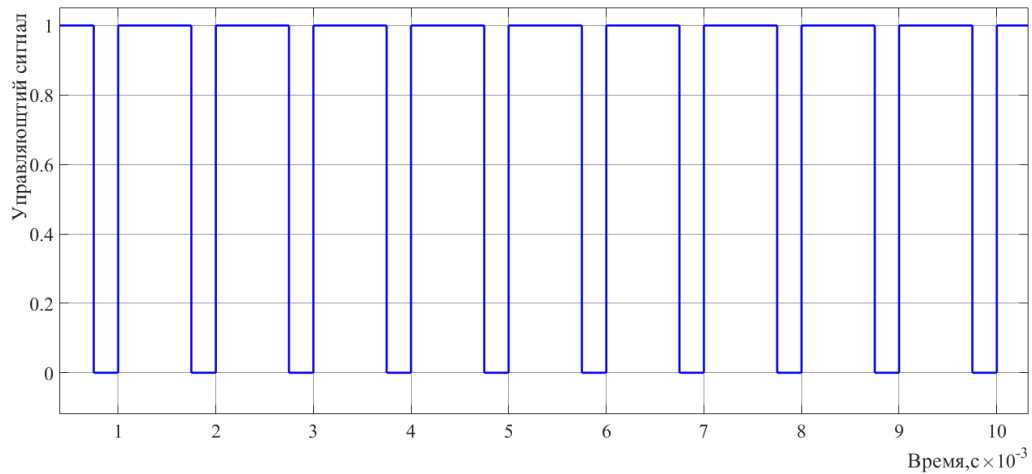


Рисунок 3.51 — фрагмент осциллограммы управляющего сигнала в начале моделирования (ток меньше предельного значения)

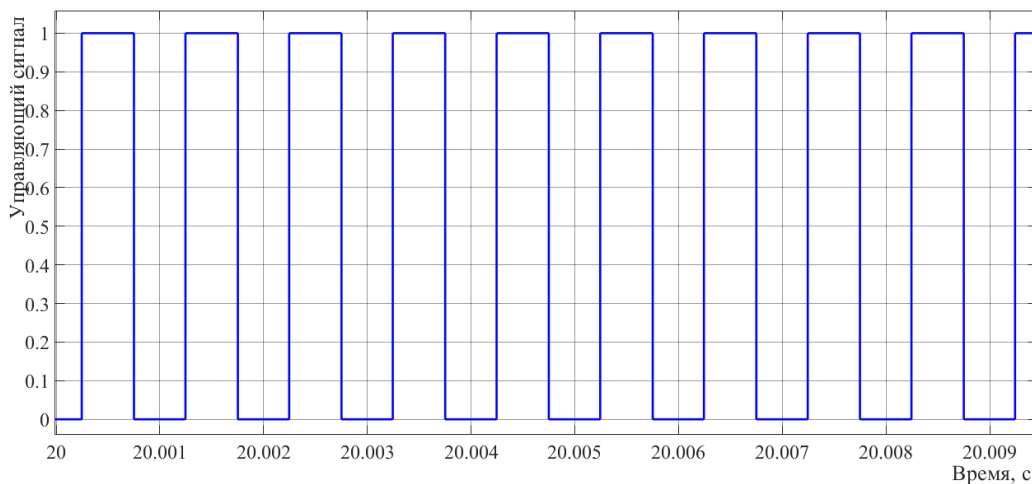


Рисунок 3.52 — фрагмент осциллограммы управляющего сигнала (ток достигает предельного значения)

Рассмотрим двухцепный DC-DC преобразователь (рисунок 3.53). Вторая ветвь с дросселем работает в режиме, противоположенном первой, заполняя промежутки, когда ток в одноцепной схеме опускался до нуля. Таким образом, средний ток преобразователя увеличивается вдвое, значительно ускоряя заряд накопителя. Для корректной работы преобразователя необходимо соблюдать следующее условие: плечи с дросселями не должны быть включены одновременно. Если это произойдёт, между ветвями установится ток, вызванный разницей ЭДС самоиндукции индуктивностей, что приведёт к нарушению работы устройства. Для решения этой задачи, контролирующие сигналы для управления транзисторами Q_1 – Q_4 должны быть попарно инверсны в любой момент времени.

$$\begin{cases} Q_1 = \overline{Q_2} \\ Q_1 = \overline{Q_3} \\ Q_2 = \overline{Q_4} \\ Q_3 = \overline{Q_4} \end{cases} \quad (3.43)$$

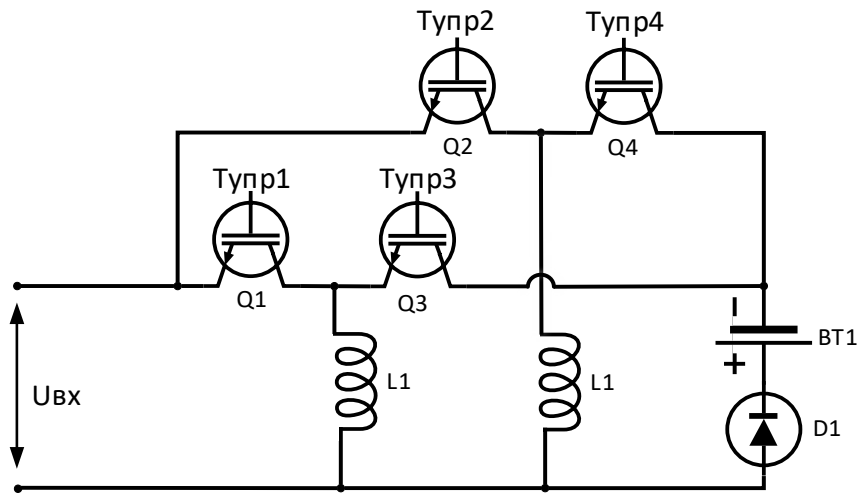


Рисунок 3.53 — Схема замещения двухцепного DC-DC преобразователя

Построена модель двухцепного преобразователя в MatLab Simulink (рисунок 3.54).

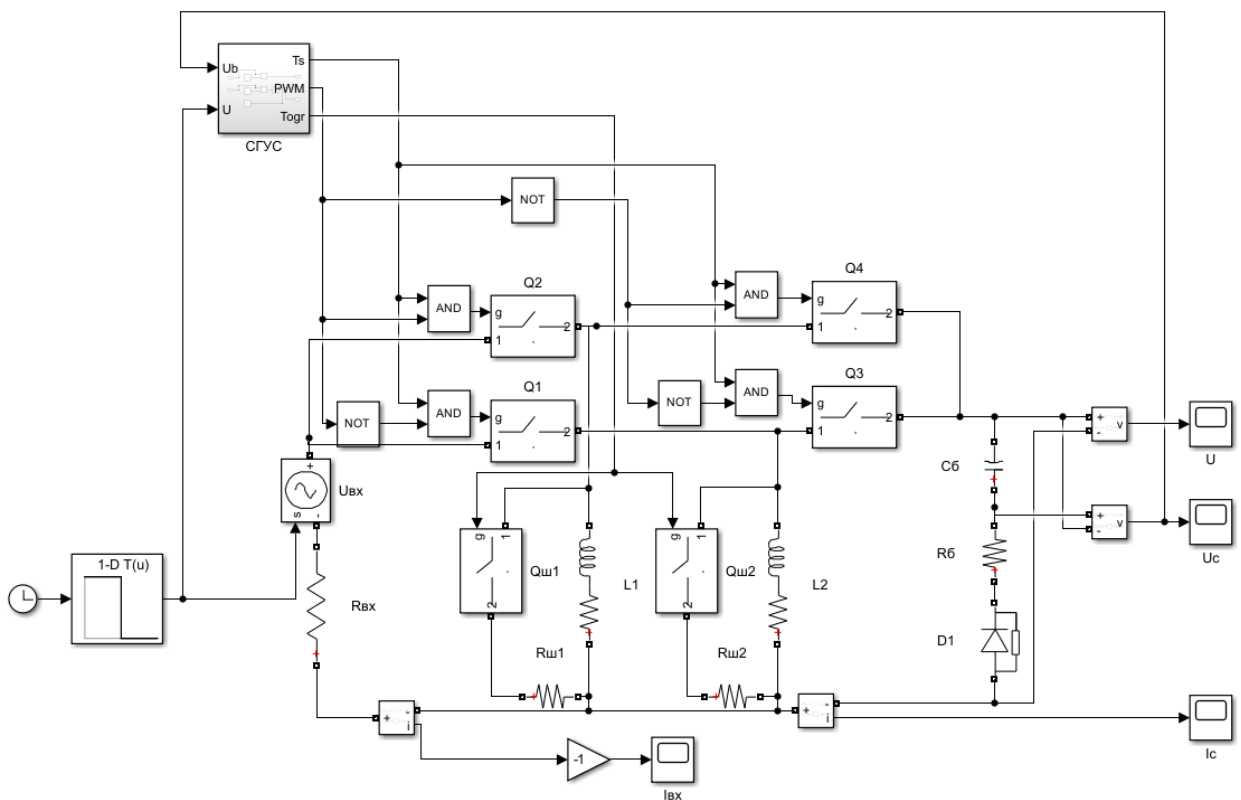


Рисунок 3.54 — Модель заряда накопителя энергии двухцепным DC-DC преобразователем в MatLab Simulink

Основные элементы схемы остались неизменны. Зарядные индуктивности $L1$ и $L2$ имеют аналогичные схемы разряда через переключатель $Qш1$ и сопротивление $Rш1$ и $Qш2$ и сопротивление $Rш2$ соответственно. Выключатели $Q1-Q4$ управляются системой генерации управляющего сигнала (СГУС) (рисунок 3.55) в соответствии с системой условий 3.43, для чего подключены через систему логических элементов.

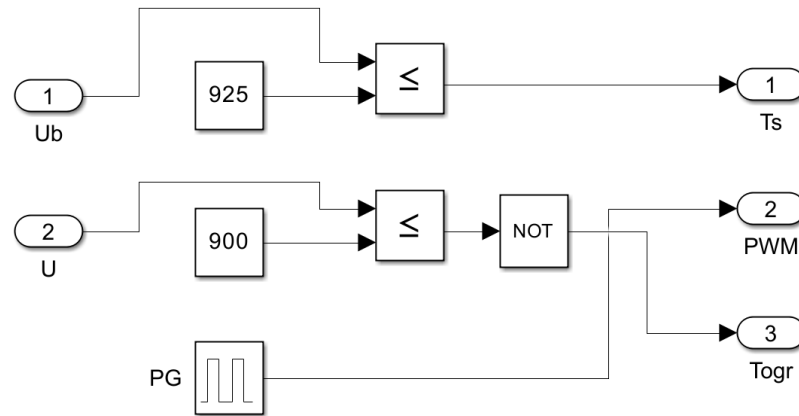


Рисунок 3.55 — Логическая схема системы генерации управляющего сигнала для двухцепной схемы DC-DC преобразователя.

Для релевантного сравнения режимов заряда двух преобразователей, индуктивность и внутреннее сопротивление каждого дросселя вдвое меньше, чем в одноцепной схеме. Таким образом, геометрические размеры данной установки изменятся незначительно. Построим осциллограммы токов и напряжений накопителя энергии в процессе заряда (рисунки 3.56 - 3.58).

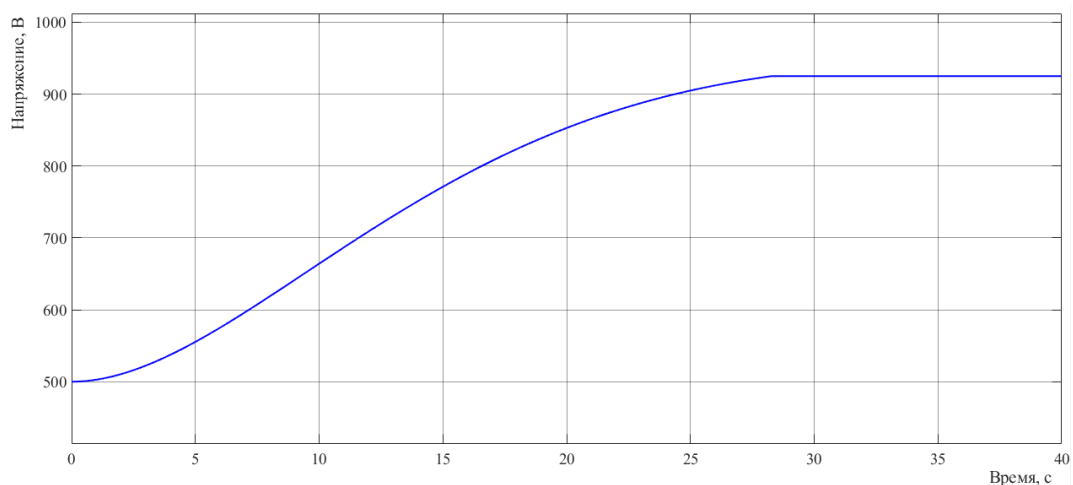


Рисунок 3.56 — Осциллограмма напряжения на суперконденсаторном накопителе энергии в процессе заряда двухцепным DC-DC преобразователем

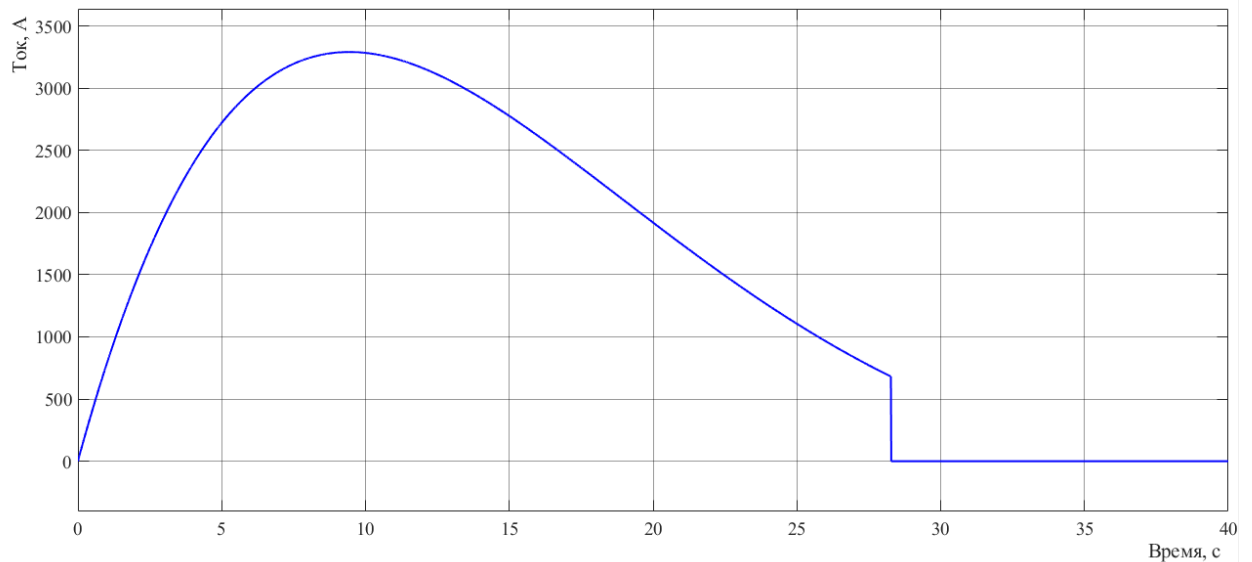


Рисунок 3.57 — Осциллограмма тока на суперконденсаторном накопителе энергии в процессе заряда двухцепным DC-DC преобразователем

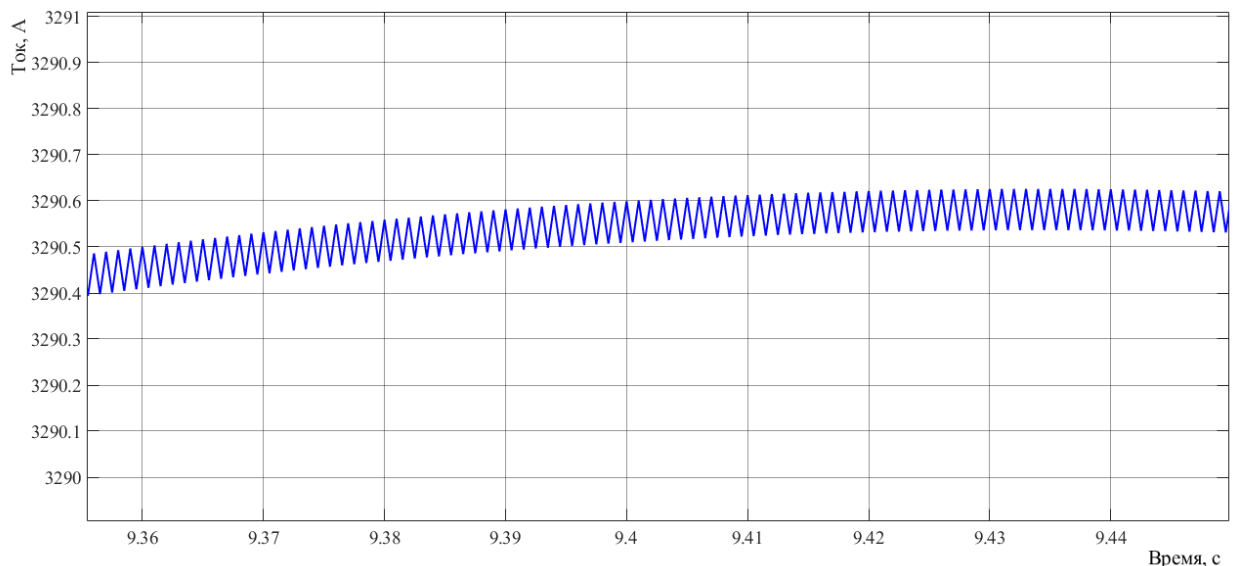


Рисунок 3.58 — Увеличенный фрагмент осциллограммы тока на суперконденсаторном накопителе энергии в процессе заряда двухцепным DC-DC преобразователем

Благодаря увеличению среднего тока (при сохранении максимального неизменным) процесс заряда значительно ускорился. Полный заряд батареи занял 27.5 секунд, то есть в два раза быстрее, чем при использовании одноцепной схемы.

Помимо более высокой мощности, неоспоримым преимуществом такой схемы является значительно меньшие колебания сетевого тока и тока батареи. Как видно из осциллограммы (рисунок 3.58), колебания амплитуды тока при

переключении звеньев преобразователя не превышают 0,1 А, что позволяет говорить о незначительности таких колебаний. При таком незначительном отклонении тока нет необходимости в применении дополнительных фильтрующих устройств.

В двухцепной схеме также возможно применить управление по току, однако это сопряжено с некоторыми ограничениями. Из-за необходимости строгой синхронизации плечей отсутствует возможность изменять ширину открывающего импульса в большую сторону. Однако, предложенное ранее управление по току подразумевает сокращение длины управляющего импульса, что приводит к появлению моментов времени, в которые ток заряда батареи равен нулю. В таком случае часть преимуществ двухцепной схемы будет утеряно, снова будет необходимо применить фильтр устройство.

Альтернативой такому методу управления является управление по уровню тока. Определим некоторую рабочую область допустимого колебания тока, порядка одного процента от номинального тока установки (30 А). До достижения током зарядных индуктивностей середины этого промежутка (уровня 2985 А) СГУС переходит в новый режим работы: переключение плечей происходит при достижении ими пороговых значений тока: $I_{\text{раб min}}$ соответствующее минимально допустимому рабочему току в процессе заряда накопителя от соответствующего плеча (2970 А) и $I_{\text{раб max}}$ — максимально допустимый рабочий ток (3000 А). Число переключений в такой схеме возрастает, поскольку больше не нормировано по времени. Этот факт может потребовать применения электронных ключей с большей максимальной частотой включения. Благодаря данной схеме ток накопителя будет приближен к постоянному, а значимые провалы тока в процессе заряда не будут возникать.

4 ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ УНЭ В СТЭ МЕТРОПОЛИТЕНА

4.1 Разработка имитационной модели

4.1.1 Объект моделирования

В качестве основы для исследования была выбрана Серпуховско-Тимирязевская линия Московского метрополитена. Эта линия метрополитена находится в эксплуатации не настолько давно, как так называемые линии первого запуска: первый участок был заложен в 1983 году, 8-го ноября. На данный момент, линия включает 25 станций и имеет общую протяжённость 41,2 километра. Средняя длительность прохода поезда от начальной станции до конечной составляет 58 мин. На 2016 год в среднем пассажиропоток в сутки составлял 1035,4 тысячи человек. На линии присутствуют участки как глубокого, так и мелкого заложения, а небольшая часть линии проходит по поверхности (рисунок 4.1) [21, 26, 29-36, 48, 51-57, 59].



Рисунок 4.1 — Принципиальное изображение плана пути Серпуховско-Тимирязевской линии Московского Метрополитена.

4.1.2 Формирование баз исходных данных

Внешнее питание тяговых подстанций реализовано линиями 10 кВ от городских питающих центров. Схема питания метрополитена подразумевает питание всех тяговых подстанций от, как минимум, трёх независимых источников, а для резервации питания в аварийной ситуации применяются кабельные перемычки.

Высокое напряжение подведено к распределительному устройству 10 кВ, которое служит для питания основных тяговых агрегатов, состоящих из пар трансформатор-выпрямитель, силовых трансформаторов, питающих не тяговую нагрузку, а также для размещения разного рода коммутационного и измерительного оборудования. На обмотке низкого напряжения тягового трансформатора номинальное напряжение составляет 670 В трёхфазного переменного тока, после преобразования которого в постоянный ток выпрямительными агрегатами к распределительному устройству постоянного тока подводится номинальное напряжение 825 В постоянного тока.

На большей части подстанций установлены трансформаторы ТСЗП мощностью от 1515 до 2315 кВА. Часто они установлены спарено, что увеличивает их мощность до 3030 кВА. На подстанциях СТП-164 и более новых устанавливают современный аналог трансформаторов ТСЗП: ТРСЗП мощностью 1600 кВА. Выпрямительные агрегаты представлены моделями УВКМ, ВД или В-МПП-Д с шестипульсовой мостовой схемой выпрямления.

Освещение и вентиляция станций, а также собственные нужды подстанции, включая измерительные приборы и устройства телемеханики и связи питаются от системы собственных нужд 0,4 кВ переменного тока. В исторической части линии (в историческом центре города) тяговые и понизительные подстанции разделены и их питание осуществляется отдельно, что также необходимо было учитывать при моделировании [1-6].

Тяговая сеть представлена стандартным стальным контактным рельсом и ходовыми рельсами типа Р-65, соединёнными с тяговыми подстанциями посредством питающих линий постоянного тока. Межподстанционные зоны

получают двухстороннее питание от соседних тяговых подстанций и разделены на секции, но электрически соединены через шины постоянного тяговых подстанций [8-12, 14].

Все исходные данные получены в результате сотрудничества РУТ (МИИТ) с Московским метрополитеном. В рамках этого сотрудничества были предоставлены:

- однолинейные схемы СТП;
- кабельные журналы;
- схема тяговой сети с расположением точек подключения питающих и отсасывающих кабелей к контактному рельсу;
- перечни оборудования СТП;
- график движения поездов на линии и характеристики подвижного состава;
- сведения о нормальных режимах работы СТЭ.

В качестве накопителя энергии выбрана модульная установка. В качестве аккумулирующего элемента выступают суперконденсаторные батареи, параметры которых приближены к реальным. Ячейка рассчитана на номинальное напряжение 225 В, потому для обеспечения работы на напряжении до 1000 вольт они соединяются последовательно по пять штук. Далее в тексте такое соединение назовём «цепочка». Внутреннее сопротивление одного модуля составляет 50 мОм, номинальная ёмкость – 33 Ф.

Преобразовательный агрегат, представленный в модели, представлен своей внешней характеристикой для состояний заряда и разряда. Его работа определяется графом, рассмотренным в пункте 3.3 (рисунок 3.38 и рисунок 3.39).

4.1.3 Структурная и принципиальная схемы имитационной модели

Математической моделью схемы соединения электроэнергетической сети служит структура, которая представляет собой систему, состоящую из узлов и линий, соединяющих их. Построим структурную схему рассматриваемой линии. В представленной математической модели СТП заменяются своими внутренними

сопротивлениями $R_{\text{тпN}}$ и ЭДС $E_{\text{тпN}}$. Внутреннее сопротивление подстанции учитывает сопротивление всего комплекса подводящего оборудования, приведённое к уровню напряжения 900 В, соответствующему напряжению холостого хода выпрямительных агрегатов подстанций. Сопротивления $R_{\text{плN}}$ и $R_{\text{олN}}$ в свою очередь соответствуют сопротивлениям питающих и обратных кабельных линий. Жирной линией выделены распределённые проводники: сверху – контактный рельс КР, ниже – ходовые рельсы Р. Значения их сопротивлений рассчитаны с учётом особенностей, отражённых на предоставленных схемах подключений. Из схемы видно, что вся тяговая сеть является единой системой, участки которой соединены электрически. Это соответствует реальной схеме питания тяговой сети, где все межподстанционные зоны и оба пути соединены между собой через шины подстанции. Подобная схема позволяет учитывать перетоки мощности между подстанциями [39, 47, 62, 66, 68, 69, 73, 75, 76, 78, 79, 101, 102, 116, 119, 136, 138-141, 148, 149]. Схема системы тягового электроснабжения рассматриваемой линии метрополитена представлена на рисунках 4.2-4.9.

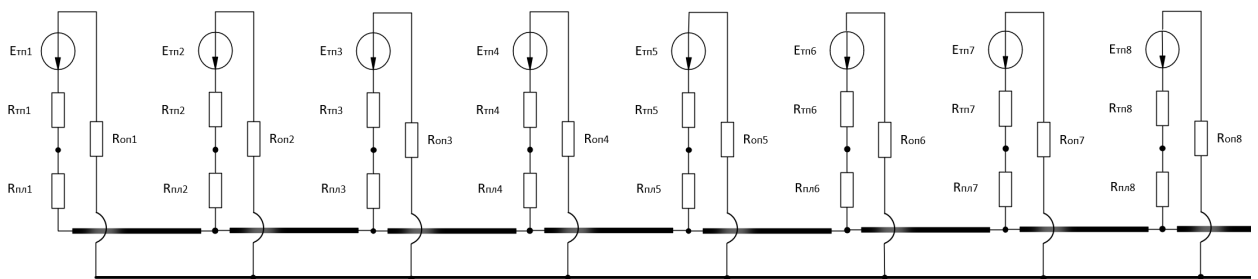


Рисунок 4.2 — Схема замещения СТЭ (ч. 1)

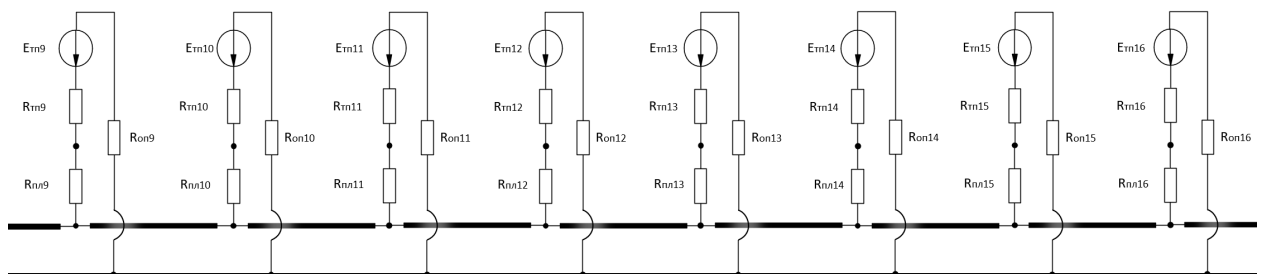


Рисунок 4.3 — Схема замещения СТЭ (ч. 2)

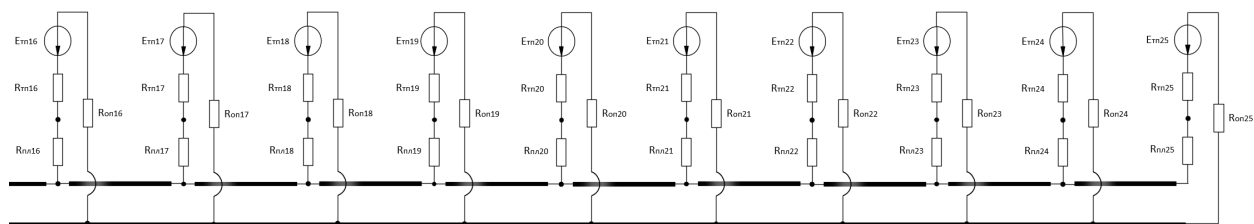


Рисунок 4.4 — Схема замещения СТЭ (ч. 3)

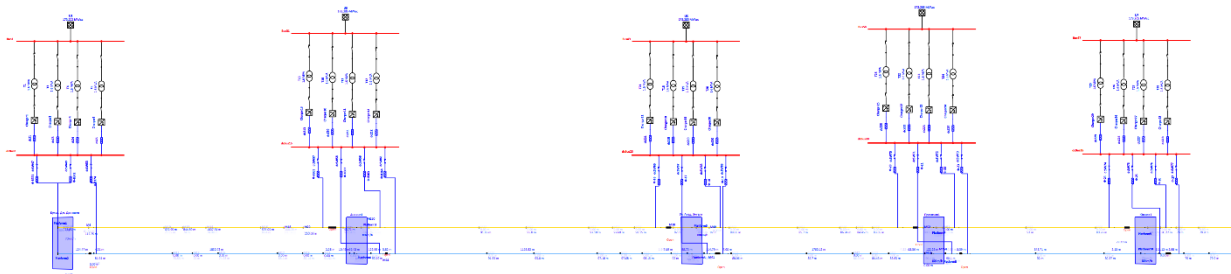


Рисунок 4.5 — Принципиальная схема СТЭ исследуемой линии (ч.1)

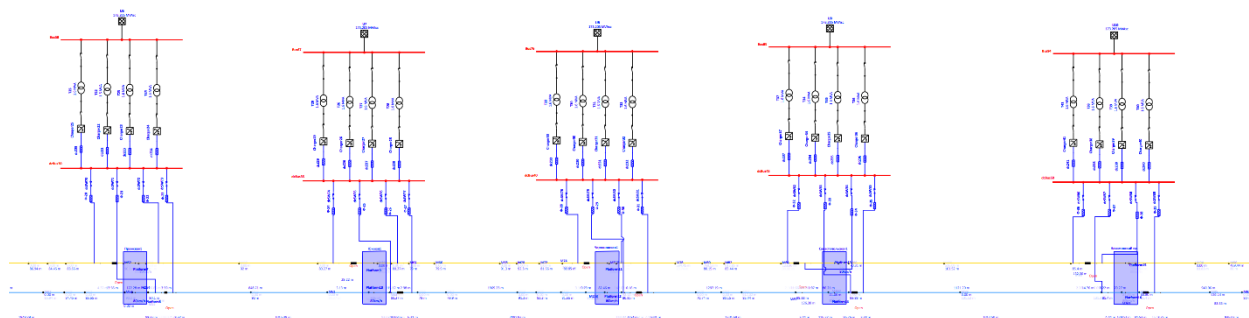


Рисунок 4.6 — Принципиальная схема СТЭ исследуемой линии (ч.2)

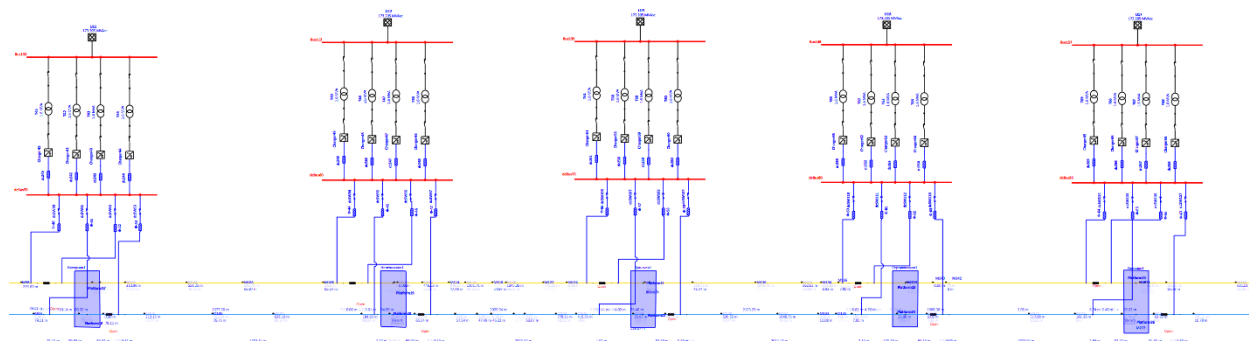


Рисунок 4.7 — Принципиальная схема СТЭ исследуемой линии (ч.3)

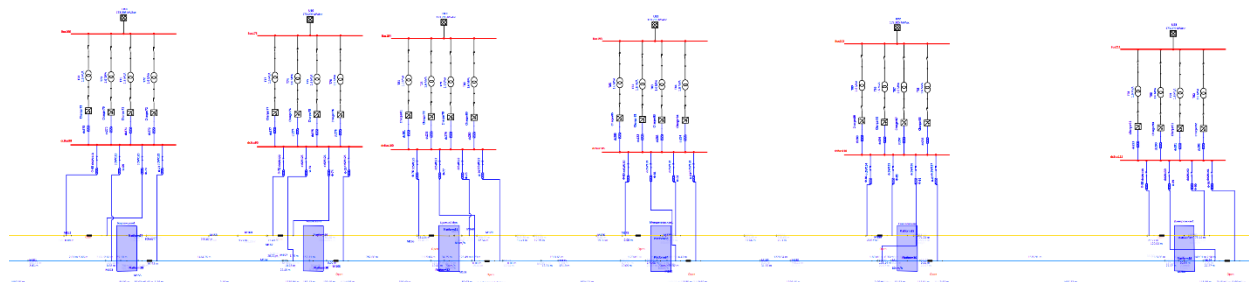


Рисунок 4.8 — Принципиальная схема СТЭ исследуемой линии (ч.4)

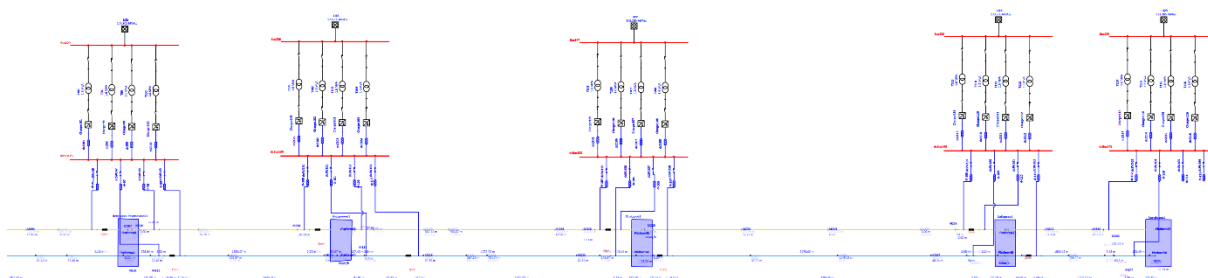


Рисунок 4.9 — Принципиальная схема СТЭ исследуемой линии (ч.5)

4.1.4 Режимы расчёта

После построения основной модели требуется определить режимы расчёта, необходимые для проведения данного исследования. Базовым расчётным режимом является нормальный. В этом режиме работы электрическая схема объектов соответствует проектным параметрам. Относительно полученных расчётных параметров можно оценить эффект от внедрения новых устройств для усиления СТЭ.

Вторым расчётным режимом является модель с рекуперативным торможением поездов. Для расчёта систем тягового электроснабжения в нормальном режиме рекуперация отключена, однако в реальной эксплуатации на большинство линий Московского метрополитена, включая Серпуховско-Тимирязевскую, параметры которой заложены в данную модель, поезда вырабатывают энергию при торможении. Так что экономию, получаемую от внедрения накопителей энергии, нужно рассчитывать относительно режима с рекуперацией. К тому же, с некоторой точки зрения, накопители энергии являются устройством для увеличения эффективности использования энергии рекуперации.

Следующей серией расчётов является ряд опытов по определению объёма накопителя для конкретной подстанции (рассмотренная подстанция выбрана в качестве примера). Решение задачи по выбору набора параметров накопителя аналитическим путём является сложной, в связи с большим количеством параметров, требующих учёта. Для решения задачи была проведена масса расчётов СТЭ и УНЭ в различных конфигурациях, построены зависимости, отражающие

показатели работы системы и определены соотношения параметров установки с наилучшим экономическим эффектом.

Затем, используя полученные результаты расчётов, сравним приращение полезного эффекта относительно приращения стоимости установки, чтобы определить наиболее целесообразную комплектность УНЭ. Определённую комплектность используем для дальнейших расчётов в качестве типового блока накопителя.

Последняя серия расчётных режимов иллюстрирует влияние количества оборудованных накопителями подстанций на положительный экономический эффект. Для этого постепенно увеличим число оборудованных подстанций от рассчитанного ранее режима с одной подстанцией до установки накопителя на каждой подстанции.

4.2 Результаты имитационного моделирования системы тягового электроснабжения

4.2.1 Моделирование работы СТЭ без рекуперации и УНЭ

В результате моделирования был рассчитан нормальный режим работы СТЭ и получены результаты моделирования движения поезда без учёта рекуперативного торможения ЭПС.

Группа поездов выходит из начальных станций каждого пути с установленным интервалом и проходит до конечной за 58 минут. После выхода на линию 45-того поезда по каждому из путей наблюдается полное перекрытие, то есть такая ситуация, когда на каждом перегоне наблюдается как минимум один поезд по каждому из путей. С этого момента графики нагрузок выравниваются, и система переходит в периодический режим, сохраняющийся неизменным, пока сохраняется полное перекрытие. Именно этот промежуток времени моделирования можно принять за нормальный режим работы системы тягового электроснабжения [96-100, 104, 107-110].

Результатами моделирования могут служить критерии оценки эффективности системы электроснабжения. К ним относятся средние значения

токов и напряжений подстанций, потребляемая энергия, а также эффективное значение тока, которое отражает тепловое воздействие на оборудование подстанции. Дополнительно применительно к данной задаче имеет значение минимальный уровень напряжения, фиксируемый на шинах подстанции, поскольку этот параметр является критическим для эксплуатации и иллюстративным. В таблице 4.1 приведены вышеназванные критерии для каждой подстанции рассматриваемой линии. Вместо реальных наименований подстанций используются условные обозначения, принятые при моделировании.

В последней строке таблицы размещены результирующие значения для всей линии: средние значения токов и напряжений и суммарная потреблённая энергия. Благодаря этим показателям в дальнейшем будет произведена оценка эффективности внедрения УНЭ относительно всей линии целиком. Эта оценка необходима, поскольку из результатов расчётов становится очевидно, что размещение накопителя на подстанции оказывает заметное влияние не только на непосредственно эту подстанцию, но и по крайней мере на соседние две.

Ниже приведено графическое отображение мгновенных значений показателей работы подстанции СТП-6 (рисунки 4.10-4.12).

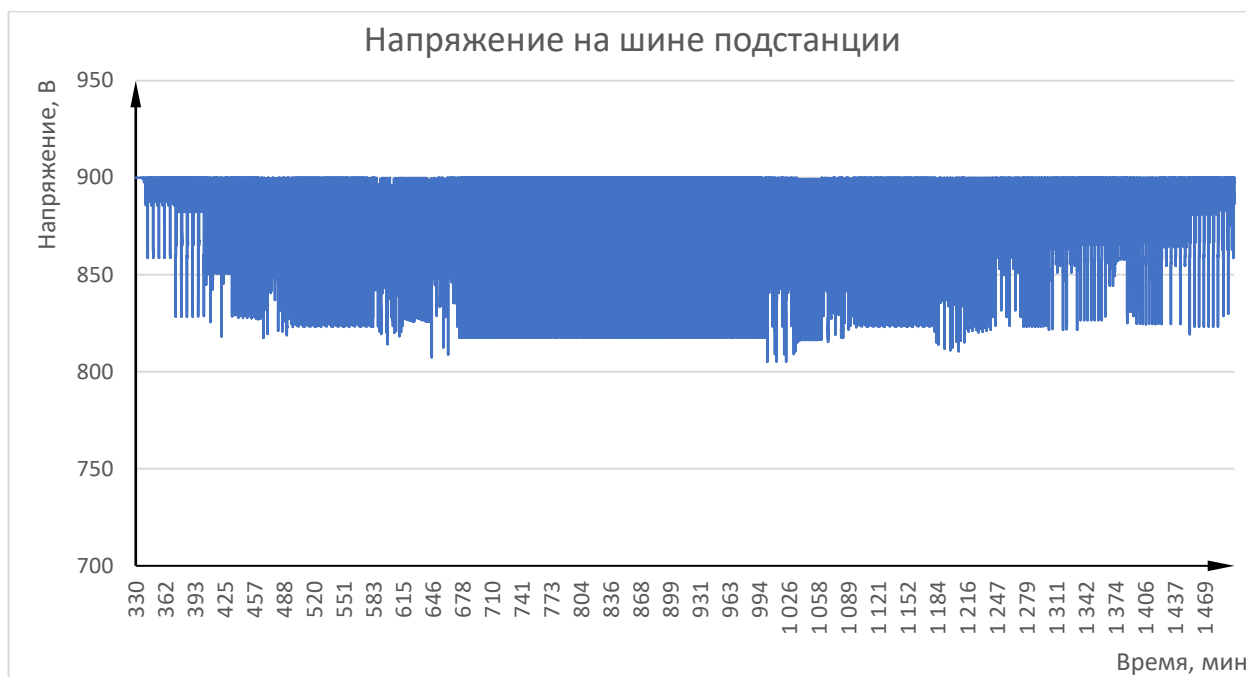


Рисунок 4.10 — Напряжение на шине тяговой подстанции СТП-6 (без рекуперации)

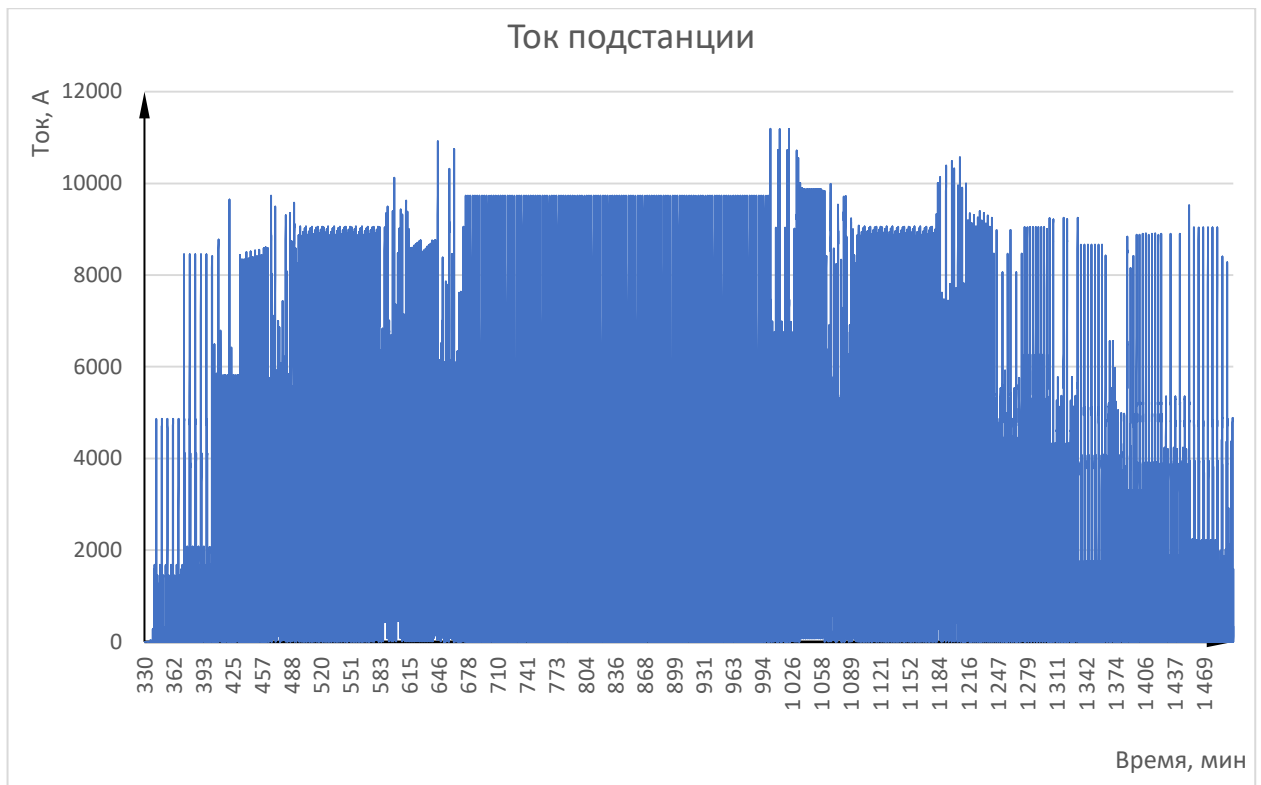


Рисунок 4.11 — Ток тяговой подстанции СТП-6 (без рекуперации)

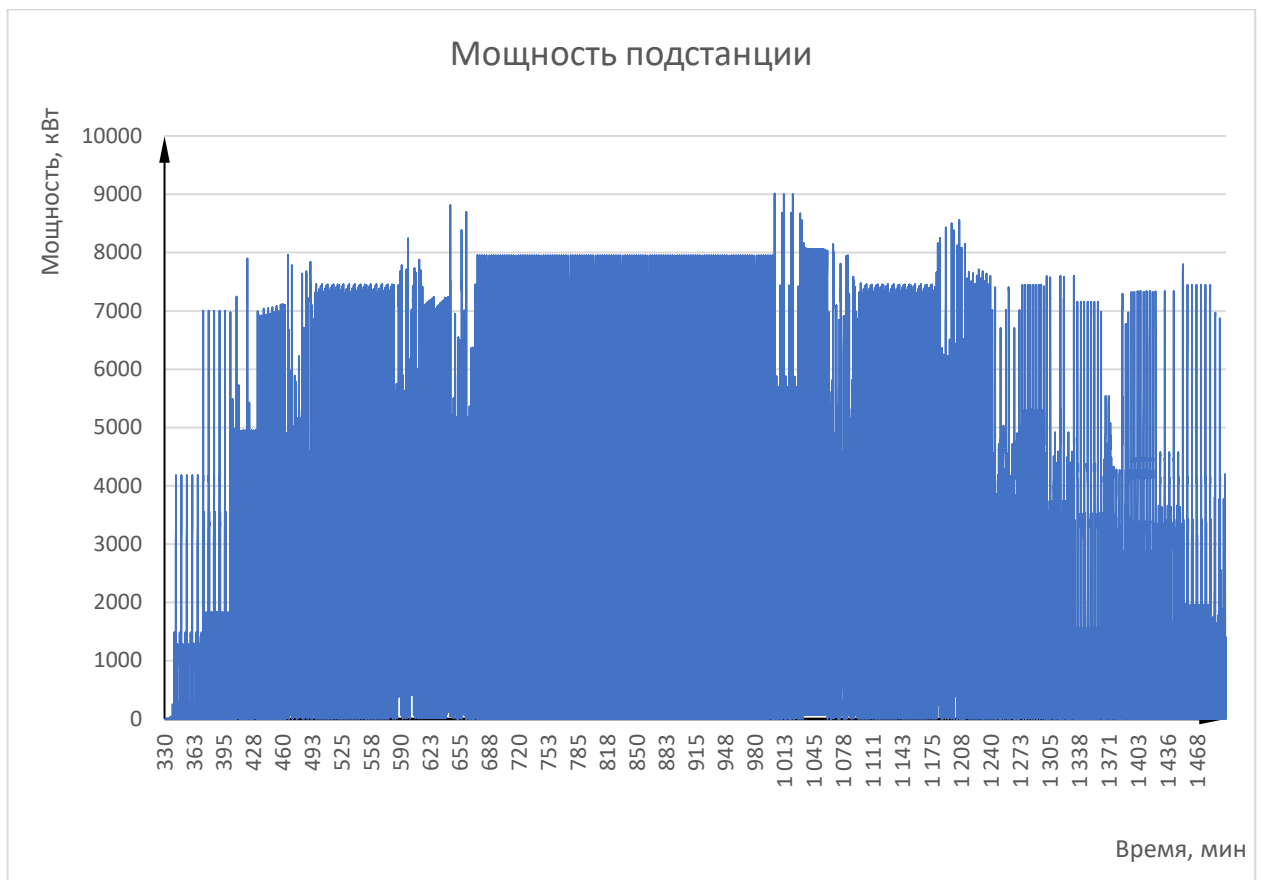


Рисунок 4.12 — Мощность тяговой подстанции СТП-6 (без рекуперации)

Таблица 4.1 — Результаты моделирования СТЭ в нормальном режиме (без рекуперации)

Тяговая подстанция	Средний ток подстанции, А	Эффективный ток подстанции, А	Среднее напряжение на шине +825 В, В	Минимальное напряжение на шине +825 В, В	Потреблённая энергия, кВт·ч
СТП-1	1802,681	3171,642	880,151	737,504	29454,156
СТП-2	2325,464	3501,978	880,792	793,191	38820,579
СТП-3	2109,293	3390,418	882,396	793,285	35137,104
СТП-4	2667,593	3691,952	877,867	779,966	44597,785
СТП-5	2791,937	3976,024	876,746	780,854	46415,881
СТП-6	2019,884	3001,301	882,884	805,167	33947,493
СТП-7	1387,804	2050,655	888,512	807,938	23668,407
СТП-8	1417,073	2238,024	888,690	797,150	24080,075
СТП-9	1791,193	2817,575	884,805	789,317	30108,136
СТП-10	2409,117	3269,625	879,573	800,886	40503,938
СТП-11	2211,882	2980,736	881,882	810,175	37384,357
СТП-12	1784,961	2672,379	884,999	804,386	30130,945
СТП-13	1973,729	2895,622	883,515	804,964	33258,399
СТП-14	2101,263	3124,689	882,171	809,218	35246,488
СТП-15	2604,466	3908,607	877,706	771,660	43136,248
СТП-16	2599,914	3698,571	877,693	760,734	43317,040
СТП-17	2206,580	3208,015	874,858	771,008	36422,067
СТП-18	2148,709	3024,978	875,958	783,327	35700,068
СТП-19	2661,149	3598,057	877,173	787,695	44523,604
СТП-20	2699,482	3744,857	876,801	795,047	45012,592
СТП-21	2229,978	3263,954	880,809	781,091	37336,343
СТП-22	1826,475	2712,931	885,235	799,872	30876,446
СТП-23	1818,731	2787,918	887,142	803,570	30838,601
СТП-24	2461,909	3761,641	883,028	789,688	41293,529
СТП-25	2109,343	3360,417	885,941	782,695	35530,881
Линия:	2166,424	3194,103	881,493	789,616	906741,163

Как можно видеть из суточных графиков тока, напряжения и мощности приведённой подстанции, большая часть рабочего диапазона делится на ряд периодических процессов, полностью повторяющих друг друга. Это объясняется одним из допущений, принятых при моделировании движения поезда: режимы ведения поезда детерминированы и одинаковы для всего процесса моделирования. Очевидно, это не в полной мере соответствует действительности, поскольку не

учитывает человеческий фактор, вносимый машинистом и пассажирами во время остановок.

4.2.2 Моделирование работы СТЭ с рекуперацией, без УНЭ

Произведём аналогичные расчёты с учётом рекуперативного торможения подвижного состава. Показатели работы СТЭ приведены в таблице 4.2

Таблица 4.2 — Результаты моделирования СТЭ с рекуперативным торможением поездов

Тяговая подстанция	Средний ток подстанции, А	Эффективный ток подстанции, А	Среднее напряжение на шине +825 В, В	Минимальное напряжение на шине +825 В, В	Потреблённая энергия, кВт·ч
СТП-1	1632,067	3028,403	888,028	737,508	26649,359
СТП-2	2053,369	3247,484	887,826	793,191	34320,776
СТП-3	1761,609	3147,230	889,138	793,285	29292,683
СТП-4	2309,229	3334,977	884,767	781,465	38711,799
СТП-5	2389,994	3631,033	884,236	783,260	39785,541
СТП-6	1764,029	2793,759	888,915	805,167	29653,856
СТП-7	1174,477	1896,023	894,454	808,549	20021,749
СТП-8	1188,000	2056,706	894,218	797,150	20180,112
СТП-9	1516,542	2572,624	890,729	789,317	25504,156
СТП-10	1979,557	2892,223	886,693	800,895	33345,383
СТП-11	1836,805	2654,805	888,489	810,969	31093,563
СТП-12	1415,115	2314,604	892,099	808,597	23932,483
СТП-13	1669,171	2562,942	890,234	805,051	28205,111
СТП-14	1833,396	2826,295	888,400	809,240	30836,295
СТП-15	2277,417	3553,731	884,324	774,413	37836,828
СТП-16	2242,778	3404,566	884,615	762,124	37397,768
СТП-17	1878,082	2975,140	882,313	771,805	30974,594
СТП-18	1798,884	2700,169	883,055	783,444	29963,331
СТП-19	2261,028	3222,896	883,637	792,870	37925,661
СТП-20	2265,291	3381,056	884,066	795,047	37819,839
СТП-21	1869,911	2888,368	887,727	782,264	31401,469
СТП-22	1564,918	2495,103	890,811	800,143	26464,129
СТП-23	1598,252	2598,583	892,997	803,570	27108,889
СТП-24	2204,252	3562,375	889,834	789,688	36965,463
СТП-25	1898,112	3184,930	893,737	783,664	31970,463
Линия:	1855,291	2917,041	888,214	790,507	777361,300

Ниже приведено графическое отображение мгновенных значений показателей работы СТП-6 (рисунки 4.13-4.15).

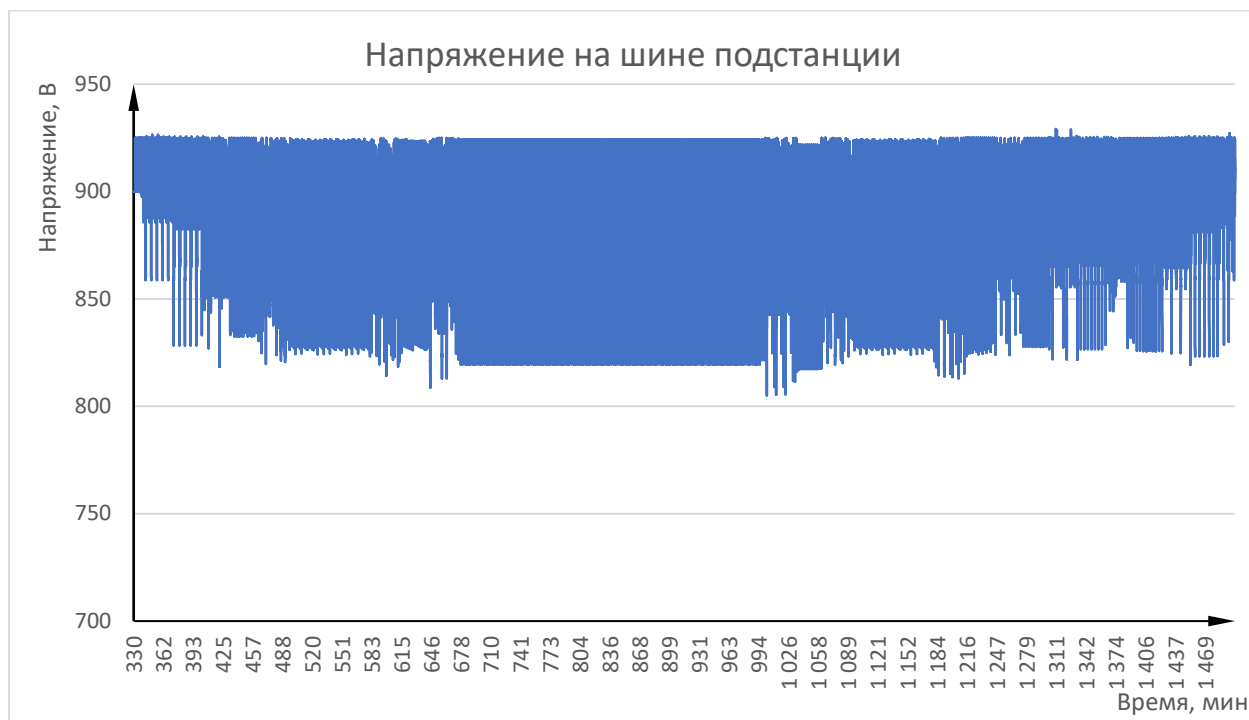


Рисунок 4.13 — Напряжение на шине тяговой подстанции СТП-6 (с рекуперацией)

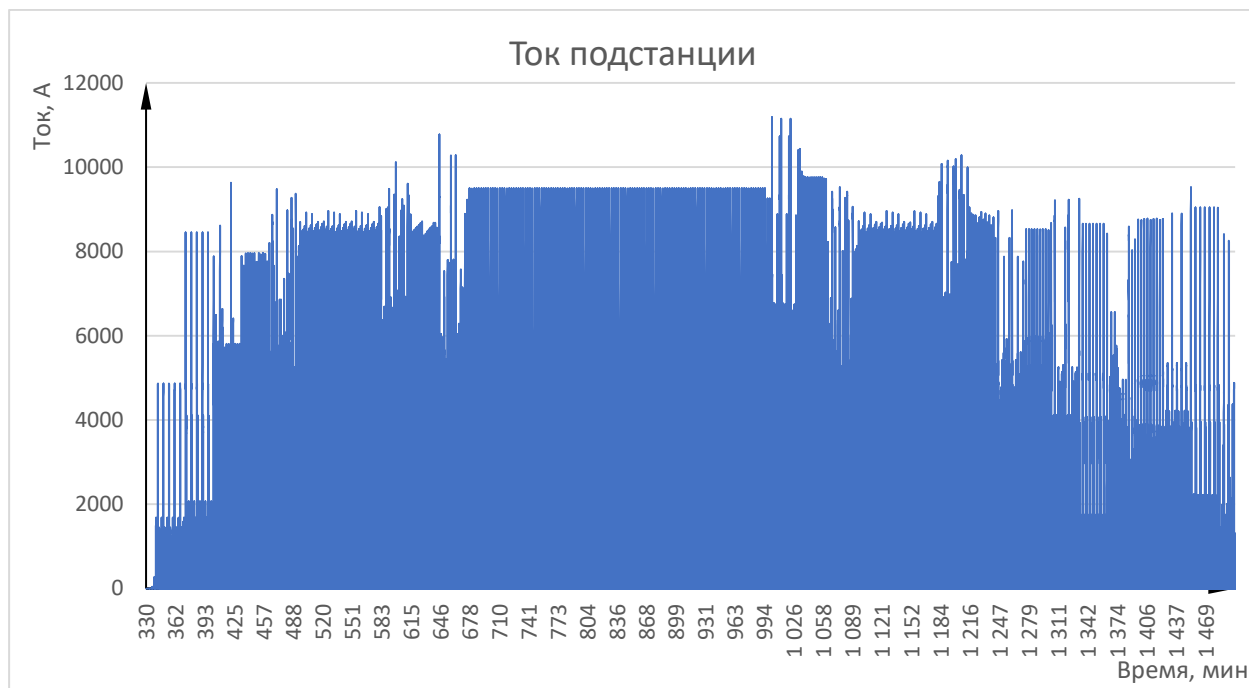


Рисунок 4.14 — Ток тяговой подстанции СТП-6 (с рекуперацией)

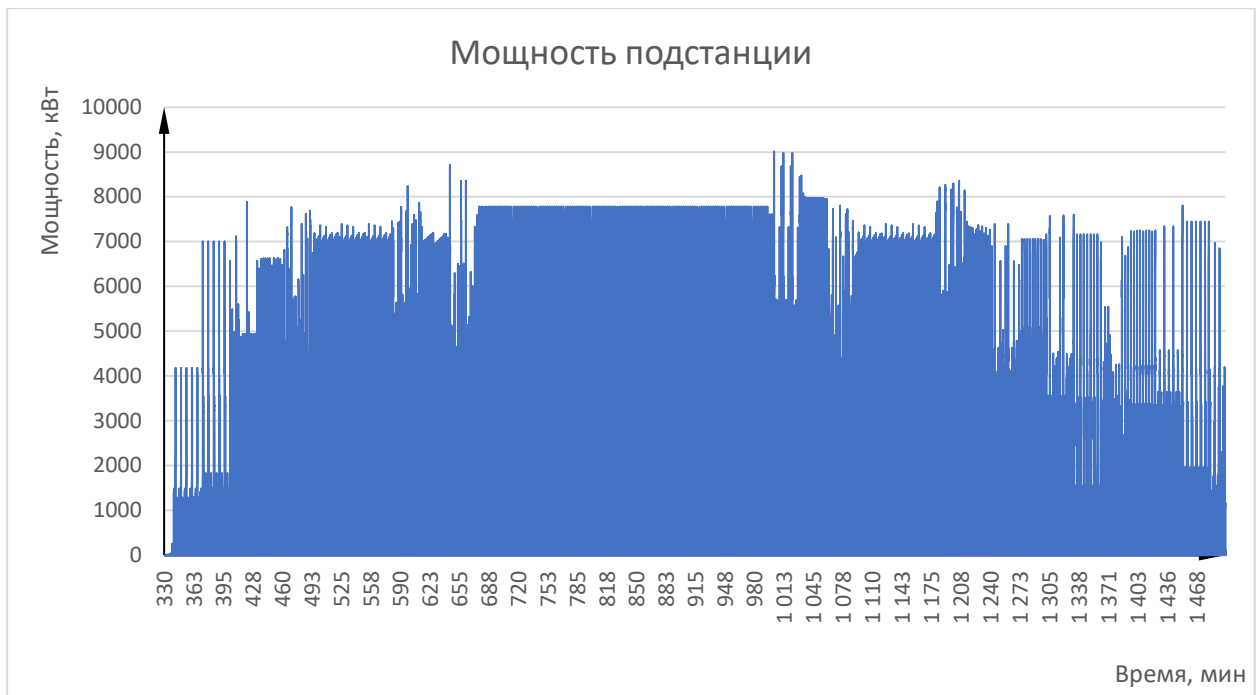


Рисунок 4.15 — Мощность тяговой подстанции СТП-6 (с рекуперацией)

Проведём оценку изменений показателей работы СТЭ с применением рекуперативного торможения и без. Наблюдается снижение среднего тока подстанций на 14,4%, снижение эффективного тока подстанции на 8,7%. В свою очередь, на средние и минимальные уровни напряжения введение рекуперации оказало незначительное воздействие: повышение составило менее одного процента по обоим показателям. Итоговая экономия электроэнергии составила 14,3% или 129 379,9 кВт·ч.

Изменение среднего значения напряжения на шинах подстанций объясняется в первую очередь появлением составляющей, превышающей напряжение холостого хода (900 В). Наличие этого превышения свидетельствует о корректной работе модели рекуперации. Напряжение рекуперации поезда не превышает 925 В, что соответствует реально действующим нормам, принятым в Московском метрополитене.

Для большей наглядности, сведём полученные данные в таблицу 4.3 соответствующей размерности таблиц 4.1 и 4.2.

Таблица 4.3 — Результаты сравнительного анализа результатов моделирования СТЭ с рекуперативным торможением поездов и без него

Тяговая подстанция	Снижение среднего тока подстанции	Снижение эффективного тока подстанции	Повышение среднего напряжения на шине +825 В	Повышение Минимального напряжения на шине +825 В	Снижение потреблённой энергии
СТП-1	9,464%	4,516%	0,895%	0,001%	9,523%
СТП-2	11,701%	7,267%	0,799%	0,000%	11,591%
СТП-3	16,483%	7,173%	0,764%	0,000%	16,633%
СТП-4	13,434%	9,669%	0,786%	0,192%	13,198%
СТП-5	14,397%	8,677%	0,854%	0,308%	14,285%
СТП-6	12,667%	6,915%	0,683%	0,000%	12,648%
СТП-7	15,372%	7,541%	0,669%	0,076%	15,407%
СТП-8	16,165%	8,102%	0,622%	0,000%	16,196%
СТП-9	15,333%	8,694%	0,669%	0,000%	15,291%
СТП-10	17,831%	11,543%	0,809%	0,001%	17,674%
СТП-11	16,957%	10,935%	0,749%	0,098%	16,827%
СТП-12	20,720%	13,388%	0,802%	0,524%	20,572%
СТП-13	15,431%	11,489%	0,760%	0,011%	15,194%
СТП-14	12,748%	9,550%	0,706%	0,003%	12,512%
СТП-15	12,557%	9,079%	0,754%	0,357%	12,285%
СТП-16	13,736%	7,949%	0,789%	0,183%	13,665%
СТП-17	14,887%	7,259%	0,852%	0,103%	14,957%
СТП-18	16,281%	10,738%	0,810%	0,015%	16,069%
СТП-19	15,036%	10,427%	0,737%	0,657%	14,819%
СТП-20	16,084%	9,715%	0,829%	0,000%	15,979%
СТП-21	16,147%	11,507%	0,785%	0,150%	15,896%
СТП-22	14,320%	8,029%	0,630%	0,034%	14,290%
СТП-23	12,123%	6,791%	0,660%	0,000%	12,094%
СТП-24	10,466%	5,297%	0,771%	0,000%	10,481%
СТП-25	10,014%	5,222%	0,880%	0,124%	10,021%
Линия:	14,362%	8,674%	0,762%	0,113%	14,269%

4.2.2.1 Верификация результатов моделирования

Для построения дальнейших выводов необходимо верифицировать результаты моделирования. Для этих целей сравним один из полученных показателей работы с результатами замеров, произведённых на действующем объекте исследования. Ток исследуемой подстанции (по результатам замеров) представлен на рисунке (рисунок 4.16).

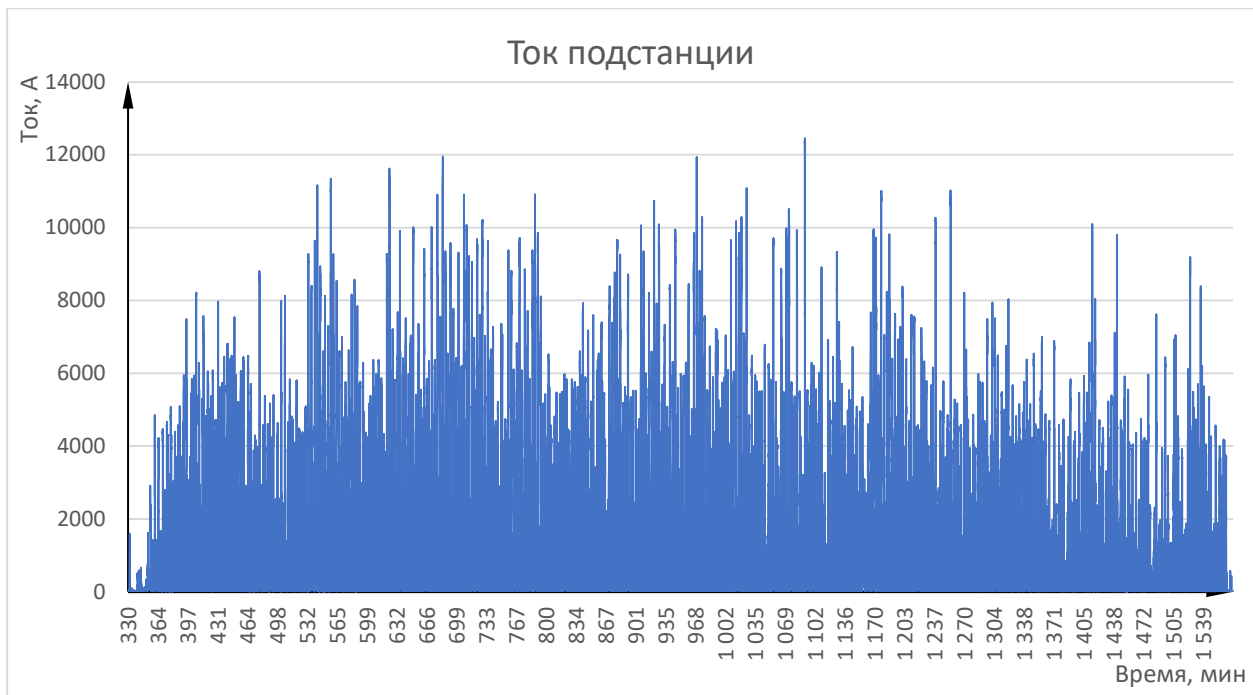


Рисунок 4.16 — Осциллограмма тока исследуемой подстанции по результатам замеров

Сравнение произведём посредством Т-критерия Стьюдента.

Определим средние значения выборок:

$$m_3 = 1768,971;$$

$$m_M = 1\,764.458.$$

Определим среднеквадратические значения выборок:

$$s_1 = 2504,482;$$

$$s_2 = 2502,727.$$

Определим число степеней свободы при комбинировании двух средних:

$$v = n_1 + n_2 - 2 = 141230, \quad (4.1)$$

где: n_1 и n_2 – число значений в первой и второй выборках соответственно.

Определим среднеквадратическую ошибку расхождения в наборах данных:

$$s = \sqrt{\frac{(n_1 - 1) \cdot s_1^2 + (n_2 - 1) \cdot s_2^2}{v} \cdot \left(\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}\right)} = 10,099 \quad (4.2)$$

Для дальнейшего сравнения зададимся допустимым различием между выборками – уровнем значимости α .

$$\alpha = 0,05$$

Вычислим критерий значимости t :

$$t = \frac{m_3 - m_m}{s} = 0,335 \quad (4.3)$$

Выдвинем гипотезу H_0 : **выборки, полученные в результате расчётов и замеров однородны.**

Рассчитаем p -значение и проверим гипотезу. Логические выражения возвращают единицу, в случае если нулевая гипотеза не отбрасывается.

$$p = 2 \cdot (1 - pt(|t|, v)) = 0,738, \quad (4.4)$$

$$p \geq \alpha = 1$$

где: $pt(x, v)$ - кумулятивное распределение вероятности для значения x .

Функция распределения вероятности Стьюдента:

$$p_{\tau n}(x) = \frac{1}{\sqrt{v\pi}} \frac{\Gamma\left(\frac{v+1}{2}\right)}{\Gamma\left(\frac{v}{2}\right)} \left(1 + \frac{x^2}{v}\right)^{-\frac{v+1}{2}} \quad (4.5)$$

Существует вероятность 0,738, что критерий значимости превышает наблюдаемый критерий, при условии, что нулевая гипотеза истинна. Сравнение p -значения с уровнем значимости показывает, что альтернативная гипотеза не может быть истинной.

Рассчитаем предел критической области и проверим гипотезу:

$$c = \left| qt\left(\frac{\alpha}{2}, v\right) \right| = 1,96 \quad (4.6)$$

$$|t| < c = 1$$

Следовательно, гипотеза об однородности выборок может быть принята (рисунок 4.17).

Нанесём на график распределение Стьюдента (синий), границу критической области (красный) и статистику критерия (чёрный).

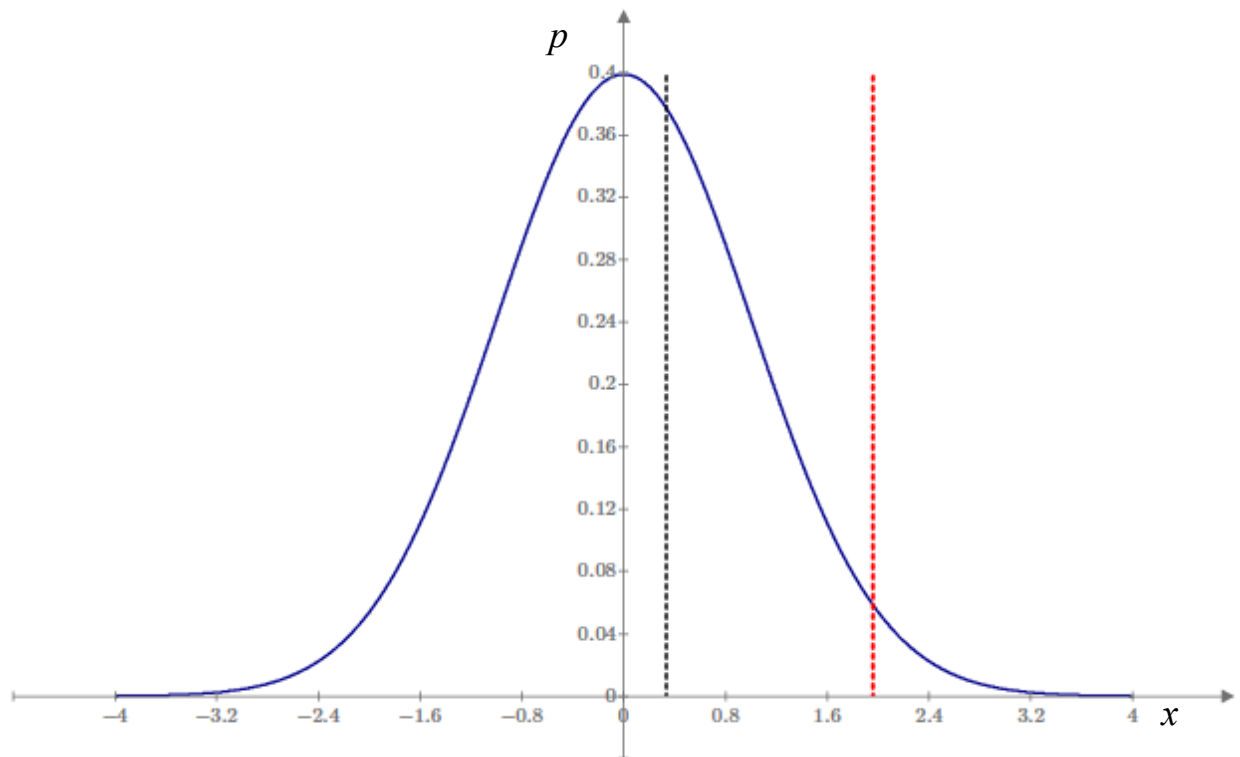


Рисунок 4.17 — Распределение вероятности по закону Стьюдента

4.2.3 Моделирование работы СТЭ с рекуперацией и различными конфигурациями УНЭ

4.2.3.1 Моделирование работы СТЭ с рекуперацией и УНЭ на СТП в режиме принятия избыточной рекуперации

Во время исследования было проведено множество вариантов опытов с накопителями энергии, для оценки работы разных комбинаций параметров УНЭ. В качестве результатов в таблице 4.4 приведена оценка эффективности установки разного объёма на одной исследуемой подстанции (СТП-6). Объём выражен в числе цепочек накопителя, подключенных параллельно. Каждая цепочка состоит из пяти последовательно включённых накопителей напряжением 225 В каждая ёмкостью 33Ф и внутренним сопротивлением 50 мОм.

Таблица 4.4 — Результаты моделирования подстанции СТП-6 в СТЭ с разными конфигурациями УНЭ

Число параллельных цепочек накопителя	Снижение среднего тока подстанции	Снижение эффективного тока подстанции	Повышение среднего напряжения на шине +825 В	Повышение Минимального напряжения на шине +825 В	Снижение потреблённой энергии
0	0%	0%	0%	0%	0%
3	1.39%	1.33%	0.07%	-0.44%	1.34%
6	2.27%	2.29%	0.10%	-0.04%	2.47%
9	3.80%	3.29%	0.12%	0.36%	3.68%
12	4.54%	3.48%	0.13%	-0.02%	4.44%
15	4.58%	4.15%	0.14%	0.93%	4.96%
18	5.13%	2.53%	0.15%	0.18%	5.23%
21	5.55%	3.60%	0.15%	0.43%	5.48%
24	5.27%	4.19%	0.16%	0.01%	5.64%
27	5.77%	4.24%	0.17%	0.81%	5.65%
30	6.29%	2.63%	0.17%	0.22%	5.69%

Графический вид зависимости снижения потреблённой энергии от количества цепочек накопителей энергии изображён на графике (рисунок 4.18).

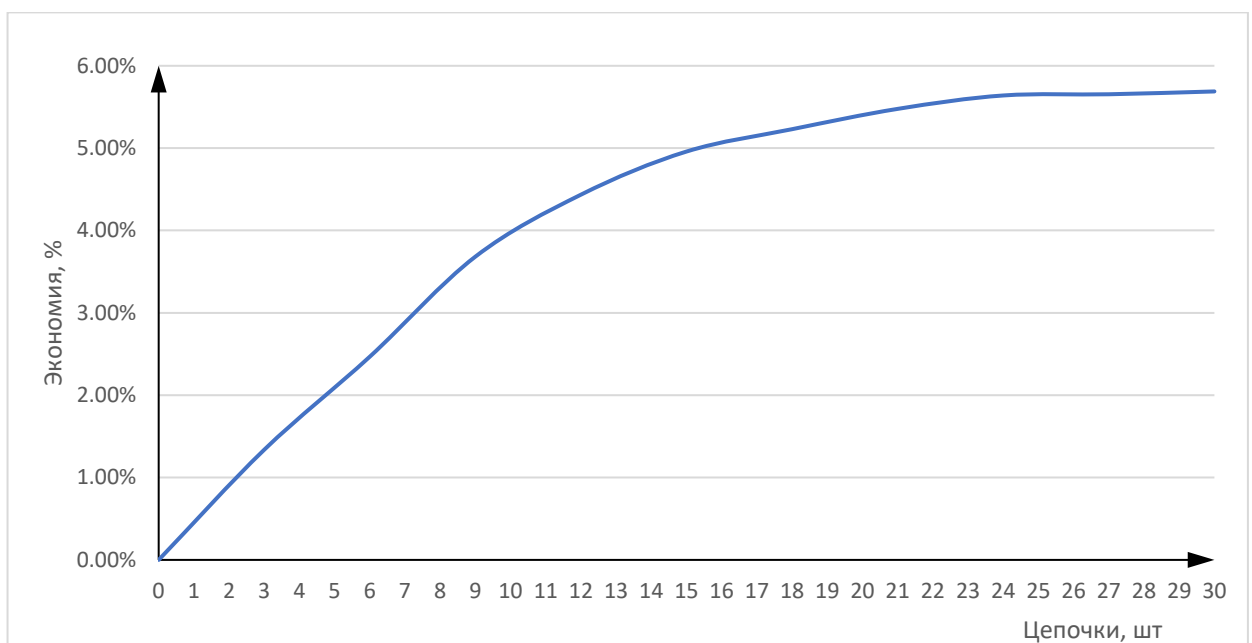


Рисунок 4.18 — Зависимость снижения потребления энергии подстанцией СТП-6 от количества установленных цепочек накопителей энергии

С увеличением числа цепочек накопителей наблюдается неравномерный рост экономии. Этот фактор необходимо учитывать при выборе объёма накопителей в составе установки.

Межподстанционные зоны СТЭ метрополитенов имеют электрическую связь через шины питающих СТП. Из этого следует, что существует взаимовлияние между всеми узлами рассматриваемой электрической схемы. Рассмотрим влияние накопителя энергии, установленного на одной СТП на энергопотребление всей линии. Результаты моделирования сведены в таблицу Таблица 4.5, по которой построена зависимость снижения потребления энергии линией на рисунке 4.19.

Таблица 4.5 — Результаты моделирования СТЭ линии метрополитена с разными конфигурациями УНЭ, расположенного на СТП-6

Число параллельных цепочек накопителя	Снижение среднего тока подстанции	Снижение эффективного тока подстанции	Повышение среднего напряжения на шине +825 В	Повышение Минимального напряжения на шине +825 В	Снижение потреблённой энергии
0	0%	0%	0%	0%	0%
3	0.08%	0.07%	0.02%	-0.02%	0.07%
6	0.12%	0.12%	0.02%	0.00%	0.12%
9	0.60%	0.13%	0.02%	1.02%	0.59%
12	0.75%	-0.19%	0.01%	1.02%	0.77%
15	0.88%	0.38%	0.01%	0.94%	0.86%
18	0.92%	0.03%	0.01%	1.04%	0.93%
21	0.91%	0.04%	0.01%	1.28%	0.95%
24	0.68%	-0.04%	0.02%	0.73%	0.99%
27	0.81%	-0.06%	0.02%	0.93%	1.02%
30	1.09%	0.09%	0.02%	1.05%	1.04%

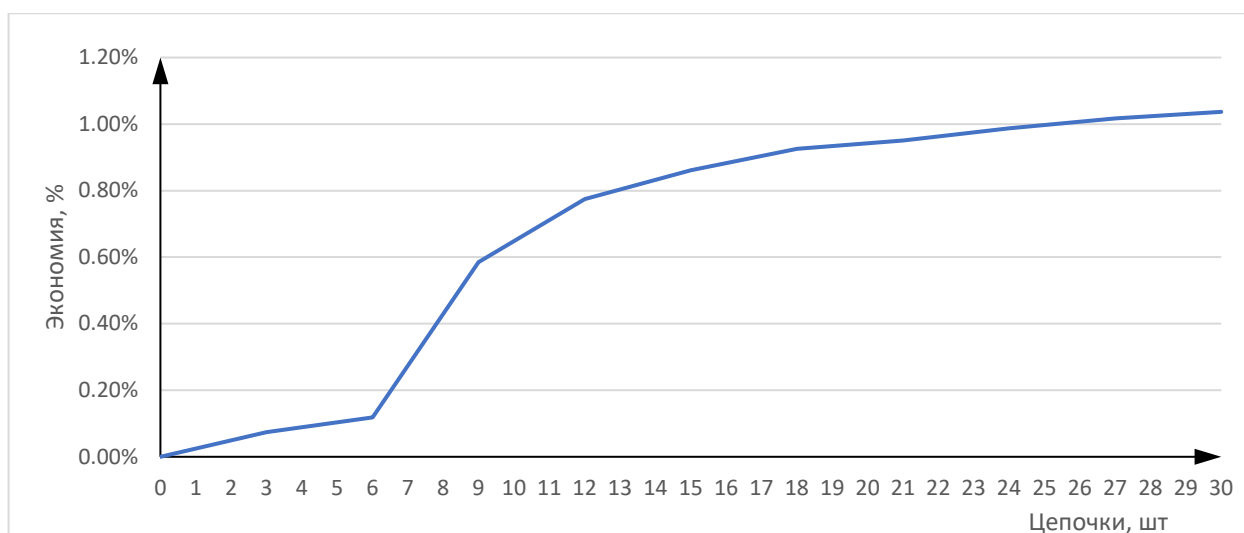


Рисунок 4.19 — Зависимость снижения потребления энергии линией от количества цепочек накопителей энергии на подстанции СТП-6.

По результатам технико-экономической оценки (См. глава 5) установлено, что наиболее эффективно применить установку с 15-ю параллельными цепочками накопителя.

В реальной практике применение накопителя энергии на одной подстанции является малоэффективным решением в рамках ветки метрополитена. Проведём ряд расчётов СТЭ с разным количеством подстанций, оборудованных одинаковыми УНЭ с 15-ю цепочками накопителей. Сведём полученные результаты в таблицу 4.6.

Таблица 4.6 — Результаты моделирования СТЭ с УНЭ в разных конфигурациях

Тяговая подстанция	Средний ток подстанции, А	Эффективный ток подстанции, А	Среднее напряжение на шине +825 В, В	Минимальное напряжение на шине +825 В, В	Потреблённая энергия, кВт·ч
Эталон	2166,424	3194,103	881,493	789,616	906741,163
0	1855,291	2917,041	888,214	790,507	777361,300
3	1835,597	2910,343	887,678	784,398	769074,301
5	1831,199	2901,765	887,508	781,650	767435,451
9	1813,744	2882,215	887,290	782,483	760234,465
13	1799,936	2869,185	887,163	781,302	754538,373
15	1796,049	2853,054	887,026	782,824	753134,043
18	1789,981	2856,681	887,013	781,959	750436,152
21	1786,377	2854,962	886,901	783,138	748813,530
25	1772,228	2828,356	886,786	783,624	743228,177

Для анализа будет удобнее представить результаты в относительных единицах (см. таблицу 4.7).

Таблица 4.7 — Результаты моделирования СТЭ с УНЭ в относительных единицах

Тяговая подстанция	Снижение среднего тока подстанции	Снижение эффективного тока подстанции	Повышение среднего напряжения на шине +825 В	Повышение Минимального напряжения на шине +825 В	Снижение потреблённой энергия
Эталон	0,000%	0,000%	0,000%	0,000%	0,000%
0	14,362%	8,674%	-0,762%	-0,113%	14,269%
1	14,533%	8,838%	-0,736%	-0,120%	14,436%
3	15,271%	8,884%	-0,702%	0,661%	15,183%
5	15,474%	9,152%	-0,682%	1,009%	15,363%
9	16,279%	9,764%	-0,658%	0,903%	16,157%
13	16,917%	10,172%	-0,643%	1,053%	16,786%
15	17,096%	10,677%	-0,628%	0,860%	16,941%
18	17,376%	10,564%	-0,626%	0,970%	17,238%
21	17,543%	10,618%	-0,614%	0,820%	17,417%
25	18,196%	11,451%	-0,600%	0,759%	18,033%

В электроснабжении современного рельсового транспорта рекуперативное торможение является повсеместно распространённым. Большая часть парка подвижного состава Московского метрополитена, например, с начала 2000-ных планомерно заменялась на более современные метropоезда, оборудованные устройствами для осуществления рекуперативного торможения. Исходя из этого, информативным в вопросе оценки эффективности внедрения накопителей будет увеличение эффективности сверх рекуперативного торможения. В таком случае, примем строку «0» таблицы 4.5 за 100%. Полученные результаты представлены в таблице 4.7 и на графике (рисунок 4.20).

Таблица 4.8 — Относительная энергоэффективность применения УНЭ в СТЭ с рекуперацией в разных конфигурациях

Тяговая подстанция	Снижение среднего тока подстанции	Снижение эффективного тока подстанции	Повышение среднего напряжения на шине +825 В	Повышение Минимального напряжения на шине +825 В	Снижение потреблённой энергия
0	100,000%	100,000%	100,000%	100,000%	100,000%
1	100,200%	100,180%	100,027%	99,993%	100,195%
3	101,062%	100,230%	100,060%	100,773%	101,066%
5	101,299%	100,524%	100,079%	101,120%	101,277%
9	102,239%	101,194%	100,104%	101,015%	102,203%
13	102,984%	101,641%	100,118%	101,164%	102,936%
15	103,193%	102,194%	100,134%	100,972%	103,117%
18	103,520%	102,069%	100,135%	101,081%	103,464%
21	103,714%	102,128%	100,148%	100,932%	103,672%
25	104,477%	103,040%	100,161%	100,871%	104,391%

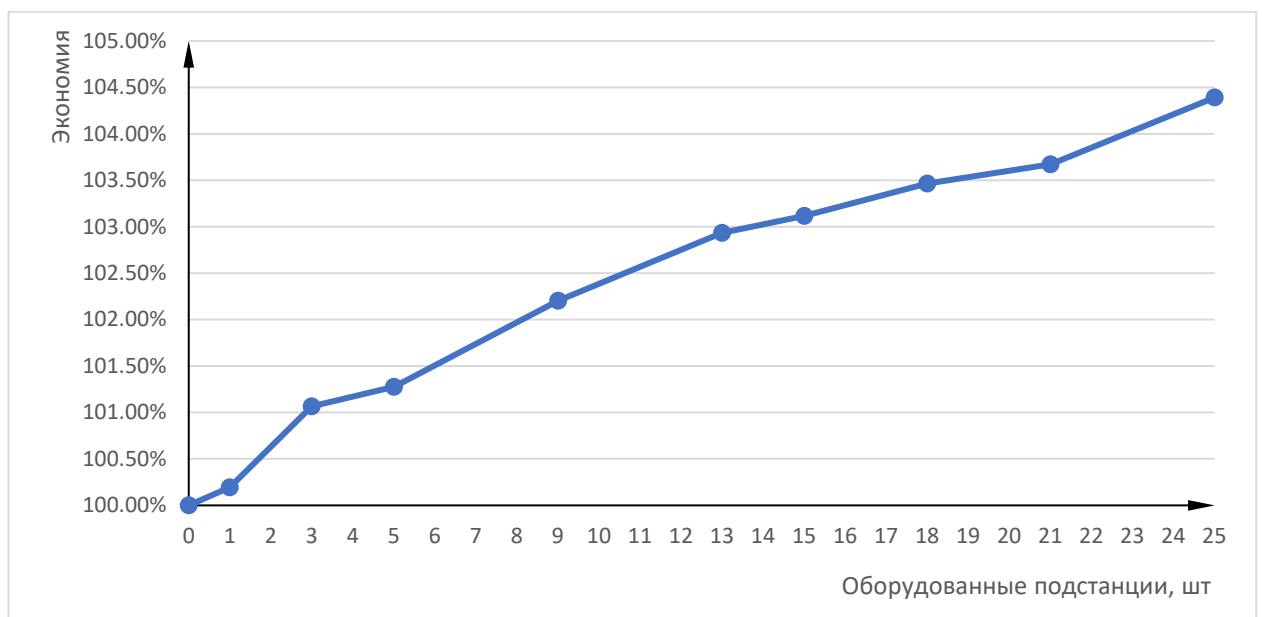


Рисунок 4.20 — Изменение энергоэффективности рекуперации от числа подстанций с накопителями.

Проанализировав полученный график, можно прийти к выводу, что зависимость имеет логарифмический характер. Из этого следует, что с каждой следующей оборудованной подстанцией прирост энергоэффективности снижается. Стоит отметить, что параллельно с этим возрастают и капитальные затраты.

Приведём оценку работы накопителей для случая с девятью оборудованными подстанциями. Результаты представим в абсолютных и относительных значениях (таблицы 4.9 и 4.10). Подстанции, оборудованные УНЭ выделены серым цветом. Так же для некоторых подстанций построим графики тока подстанции, напряжения на шинах подстанции, мощности, а также мгновенного тока накопителя энергии (рисунки 4.21-4.24).

Таблица 4.9 — Результаты моделирования СТЭ с девятью СТП, оборудованными УНЭ

Тяговая подстанция	Средний ток подстанции, А	Эффективный ток подстанции, А	Среднее напряжение на шине +825 В, В	Минимальное напряжение на шине +825 В, В	Потреблённая энергия, кВт·ч
СТП-1	1611,855	2881,687	886,273	728,708	26482,836
СТП-2	1967,017	3230,290	885,972	785,804	32825,141
СТП-3	1770,413	2922,893	887,858	795,640	29669,546
СТП-4	2247,166	3421,622	883,367	779,079	37528,971
СТП-5	2380,724	3497,246	883,020	782,942	39778,246
СТП-6	1690,243	2685,223	887,628	797,776	28458,317
СТП-7	1152,686	1926,866	893,320	806,897	19620,491
СТП-8	1200,142	2054,494	893,396	804,671	20395,230
СТП-9	1525,943	2526,450	890,155	792,502	25709,330
СТП-10	1935,433	2957,280	886,297	797,897	32507,934
СТП-11	1820,768	2743,947	888,110	807,722	30735,366
СТП-12	1422,349	2394,192	891,307	794,952	24000,606
СТП-13	1616,792	2635,878	888,747	779,333	27227,947
СТП-14	1806,897	2774,102	887,197	789,714	30422,001
СТП-15	2245,955	3577,913	883,460	758,822	37256,523
СТП-16	2093,743	3216,486	884,084	760,881	34992,377
СТП-17	1817,902	2717,381	881,890	757,650	30247,201
СТП-18	1737,925	2662,939	882,502	756,469	28937,953
СТП-19	2235,523	3289,325	883,401	779,377	37406,802
СТП-20	2203,984	3249,793	884,128	785,190	36890,664
СТП-21	1804,253	2947,306	887,209	774,274	30193,378
СТП-22	1560,627	2648,608	890,384	788,034	26265,103
СТП-23	1556,993	2689,980	892,091	801,103	26317,745
СТП-24	2088,225	3310,395	888,401	784,811	35163,121
СТП-25	1850,036	3093,076	892,059	771,840	31201,636
Линия:	1813,744	2882,215	887,290	782,483	760234,465

Таблица 4.10 — Результаты моделирования СТЭ с девятью СТП, оборудованными УНЭ, в относительных единицах

Тяговая подстанция	Снижение среднего тока подстанции	Снижение эффективного тока подстанции	Повышение среднего напряжения на шине +825 В	Повышение Минимального напряжения на шине +825 В	Снижение потреблённой энергия
СТП-1	1,238%	4,845%	0,198%	1,193%	0,625%
СТП-2	4,205%	0,529%	0,209%	0,931%	4,358%
СТП-3	-0,500%	7,128%	0,144%	-0,297%	-1,287%
СТП-4	2,688%	-2,598%	0,158%	0,305%	3,055%
СТП-5	0,388%	3,685%	0,138%	0,041%	0,018%
СТП-6	4,183%	3,885%	0,145%	0,918%	4,032%
СТП-7	1,855%	-1,627%	0,127%	0,204%	2,004%
СТП-8	-1,022%	0,108%	0,092%	-0,943%	-1,066%
СТП-9	-0,620%	1,795%	0,064%	-0,403%	-0,804%
СТП-10	2,229%	-2,249%	0,045%	0,374%	2,511%
СТП-11	0,873%	-3,358%	0,043%	0,400%	1,152%
СТП-12	-0,511%	-3,439%	0,089%	1,688%	-0,285%
СТП-13	3,138%	-2,846%	0,167%	3,195%	3,464%
СТП-14	1,445%	1,847%	0,135%	2,413%	1,344%
СТП-15	1,381%	-0,680%	0,098%	2,013%	1,534%
СТП-16	6,645%	5,524%	0,060%	0,163%	6,432%
СТП-17	3,204%	8,664%	0,048%	1,834%	2,348%
СТП-18	3,389%	1,379%	0,063%	3,443%	3,422%
СТП-19	1,128%	-2,061%	0,027%	1,702%	1,368%
СТП-20	2,706%	3,882%	-0,007%	1,240%	2,457%
СТП-21	3,511%	-2,041%	0,058%	1,021%	3,847%
СТП-22	0,274%	-6,152%	0,048%	1,513%	0,752%
СТП-23	2,582%	-3,517%	0,101%	0,307%	2,918%
СТП-24	5,264%	7,073%	0,161%	0,618%	4,876%
СТП-25	2,533%	2,884%	0,188%	1,509%	2,405%
Линия:	2,239%	1,194%	0,104%	1,015%	2,203%

У некоторых подстанций при установке накопителей на соседних СТП наблюдается не падение, а напротив, рост потребления энергии. Это объясняется перераспределением энергий в СТЭ.

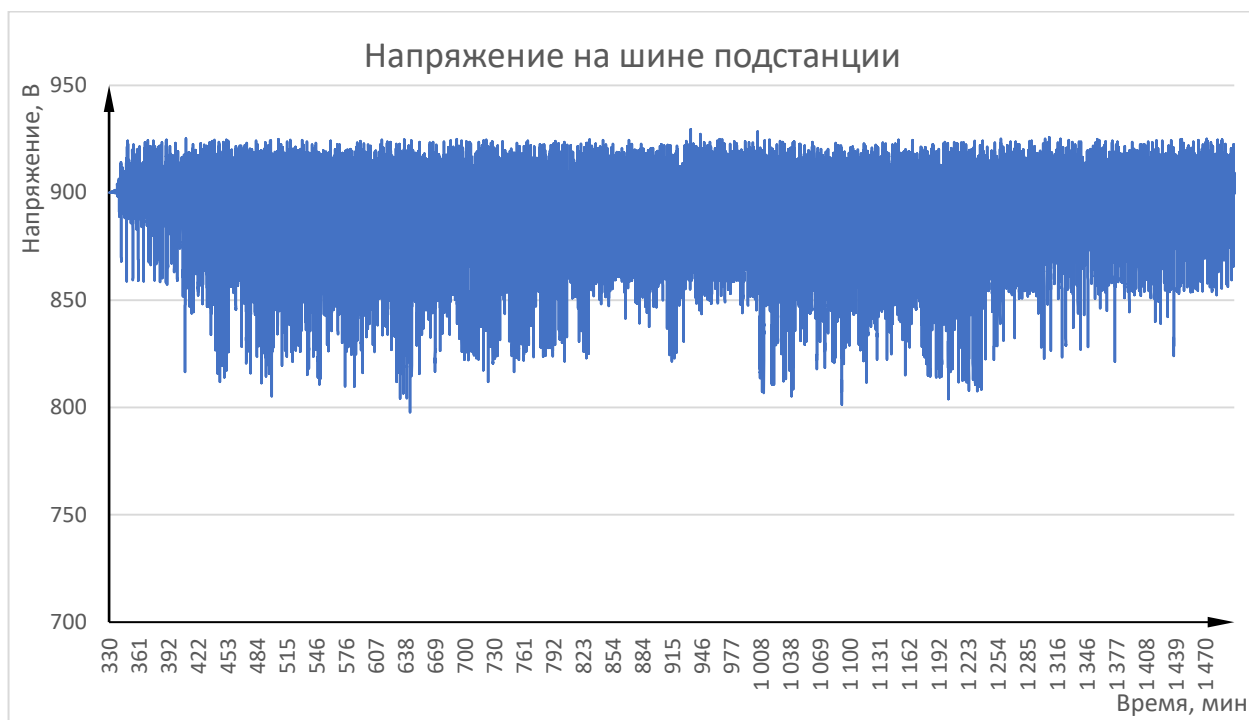


Рисунок 4.21 — Напряжение на шине тяговой подстанции СТП-6 (С УНЭ)

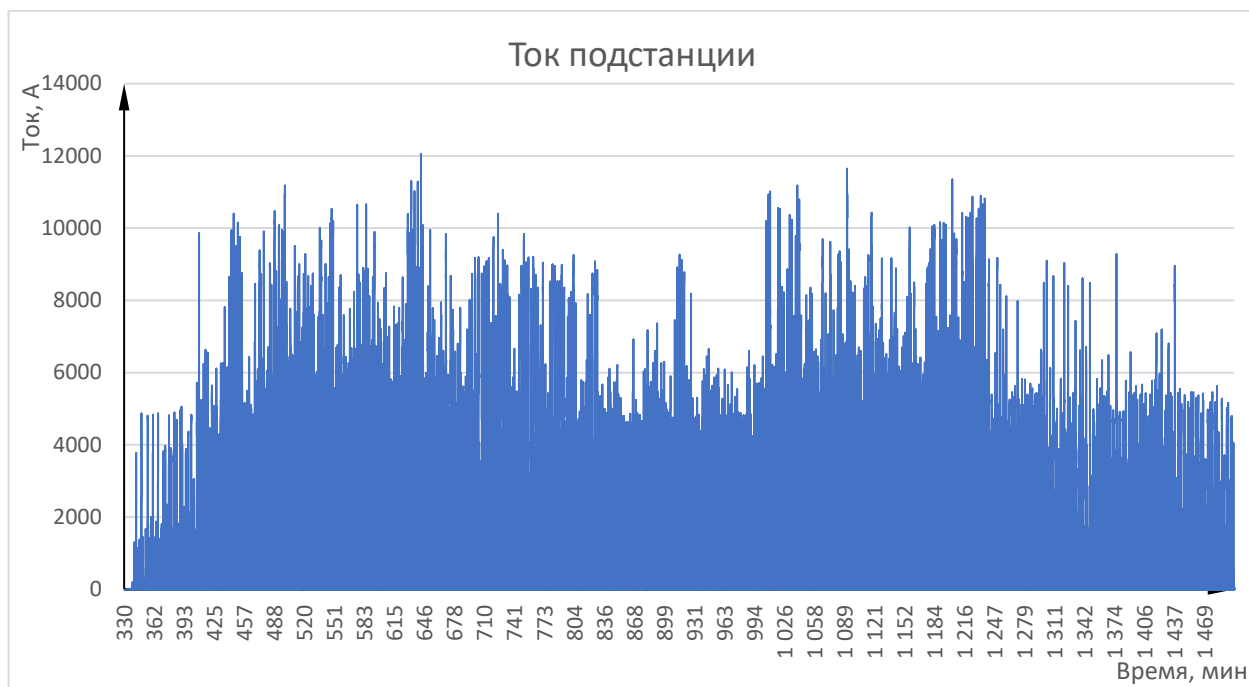


Рисунок 4.22 — Ток тяговой подстанции СТП-6 (С УНЭ)



Рисунок 4.23 — Мощность тяговой подстанции СТП-6 (С УНЭ)

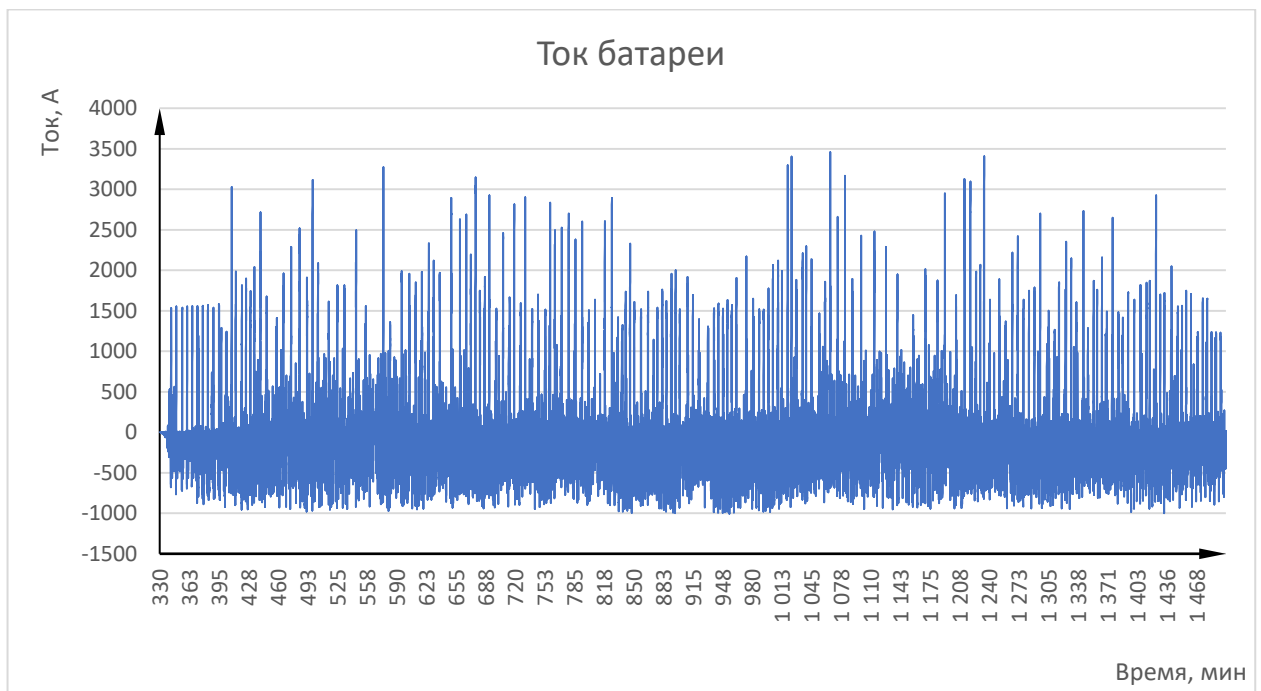


Рисунок 4.24 — Ток накопителя энергии подстанции СТП-6

4.2.3.2 Анализ влияния расположения накопителей энергии на эффективность использования энергии рекуперации

Для данного опыта были произведены расчёты для одного накопителя энергии, расположенного на разных подстанциях исследуемой линии. Полученные

зависимости коррелируют с выводами, приведёнными в подпараграфе 2.4.3 (рисунок 4.25 и рисунок 4.26).

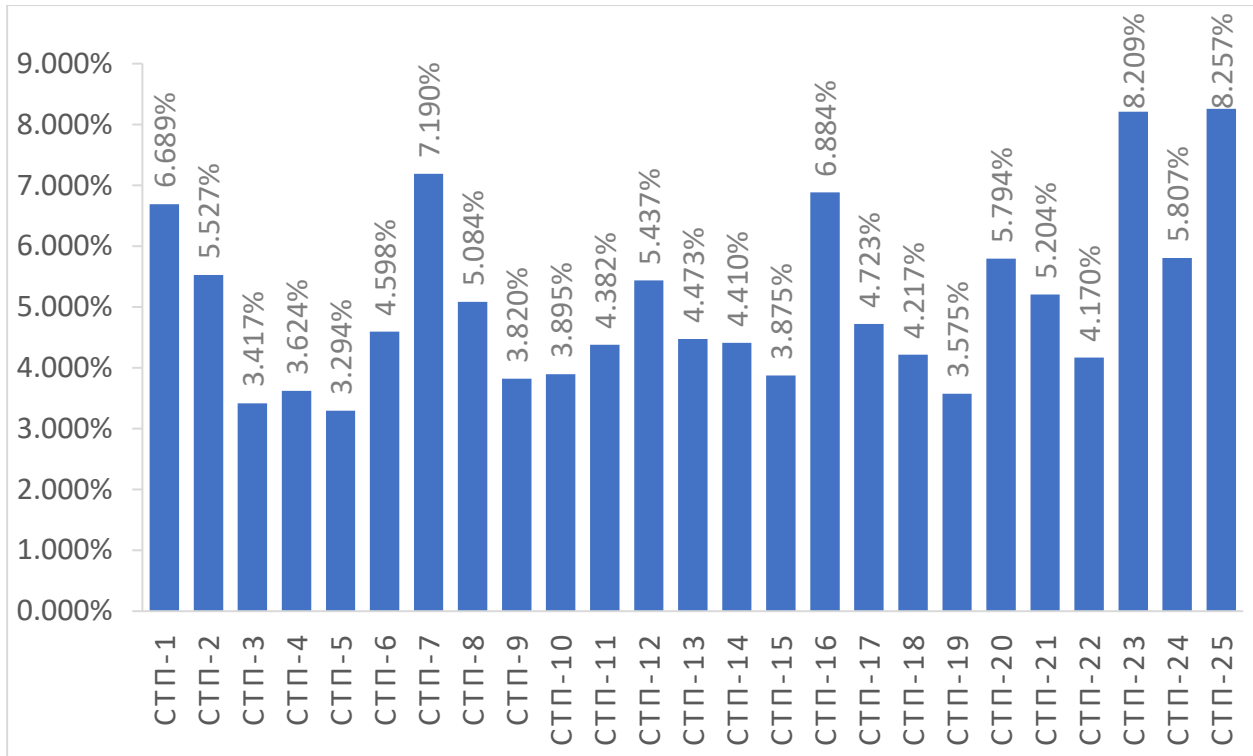


Рисунок 4.25 — Зависимость снижения потребления энергии оборудованной подстанцией от выбранного места установки УНЭ

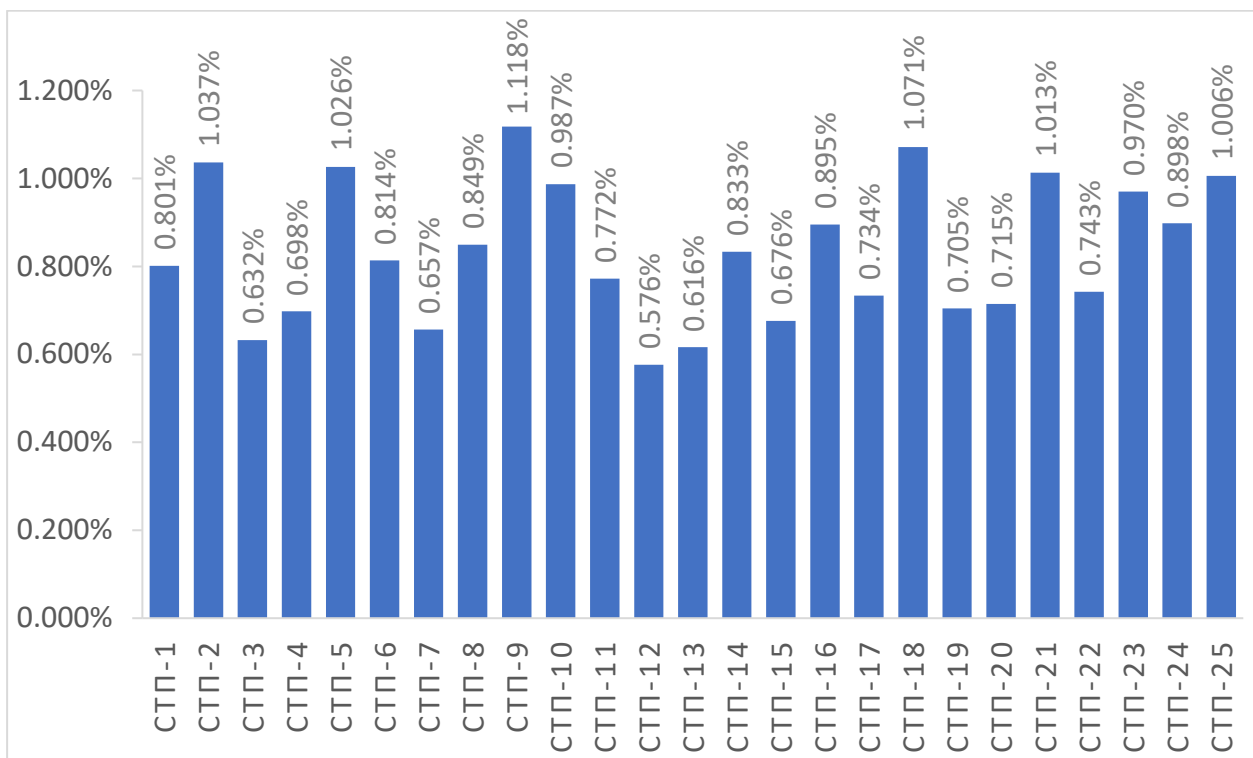


Рисунок 4.26 — Зависимость снижения потребления энергии исследованной линией от выбранного места установки УНЭ

4.2.3.3 Моделирование работы СТЭ с рекуперацией и УНЭ на СТП в середине перегона

Модель, рассмотренная в данном пункте основана на схеме, изображённой на рисунке 2.5. Для данного эксперимента была разработана отдельная модель участка линии с централизованной системой тягового электроснабжения, поскольку на рассматриваемой ранее линии отсутствуют участки, удовлетворяющие условиям опыта. В качестве опытной модели был выбран участок метрополитена с параметрами, приближенными к реальным данным Сокольнической линии Московского метрополитена. Длина выбранного участка составляет порядка 2600 м, средняя скорость установлена на значении 65 км/ч. Профиль участка средней крутости, средний уклон составляет порядка 10 промилле. Опытная цифровая модель была выполнена в программном комплексе ЕТАР.

Для обеспечения чистоты эксперимента были рассмотрены три случая при анализе данной модели. Первый опыт, являющийся контрольным, состоит в расчете исходной схемы до применения мер по энергосбережению. Рассмотренный участок, который будет использоваться на полигоне Московского метрополитена в предлагаемом решении, представляет собой параллельную двухпутную схему питания. В таком случае электрическое соединение между путями двухпутного участка происходит только на тяговых подстанциях и осуществляется через шину 825 В.

Типичным решением в случае метрополитенов является размещение подстанций непосредственно рядом с остановочными пунктами. Однако в некоторых ситуациях такое расположение может быть невозможным или неэкономичным. Другой вариант модели предусматривает установку накопителя энергии рядом с одним из промежуточных остановочных пунктов. Экономически целесообразнее всего установить накопитель, который будет питать оба пути одновременно. Однако в этом случае потребуются создание дополнительной общей шины между путями, что приведет к изменению схемы питания на «узловую».

Таким образом, основным предметом исследования является определение эффективности данного решения.

Для проведения исследования необходимо также рассмотреть промежуточный случай, в котором точки пути будут дополнительно соединены, но накопитель энергии не будет включен в сеть. Таким образом, мы сможем выделить влияние изменения схемы питания и подключения накопителя энергии.

Модель накопителя представляет собой литий-ионную накопительную батарею общей ёмкостью $100 \text{ А} \cdot \text{ч}$ с номинальным напряжением 774 В , набранное из $3,6$ вольтовых ячеек.

В итоге в рамках исследования было рассмотрено три расчётные схемы (рисунки 4.27-4.29).

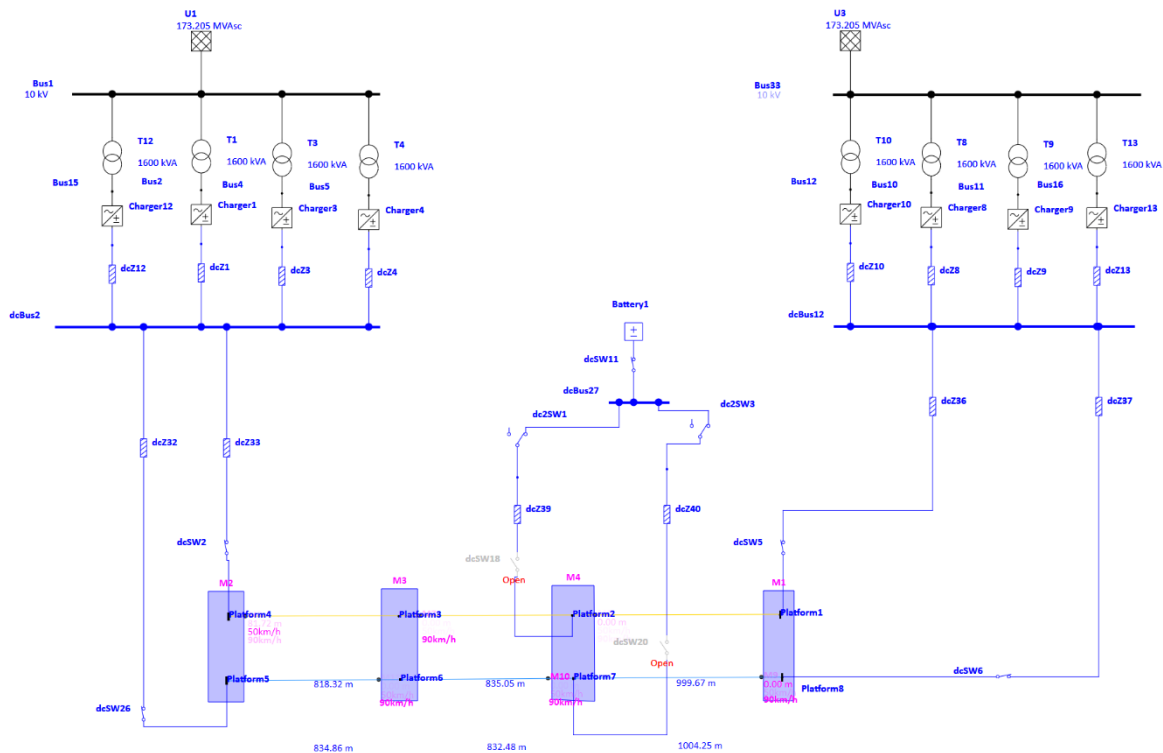


Рисунок 4.27 — Расчётная схема для контрольного опыта

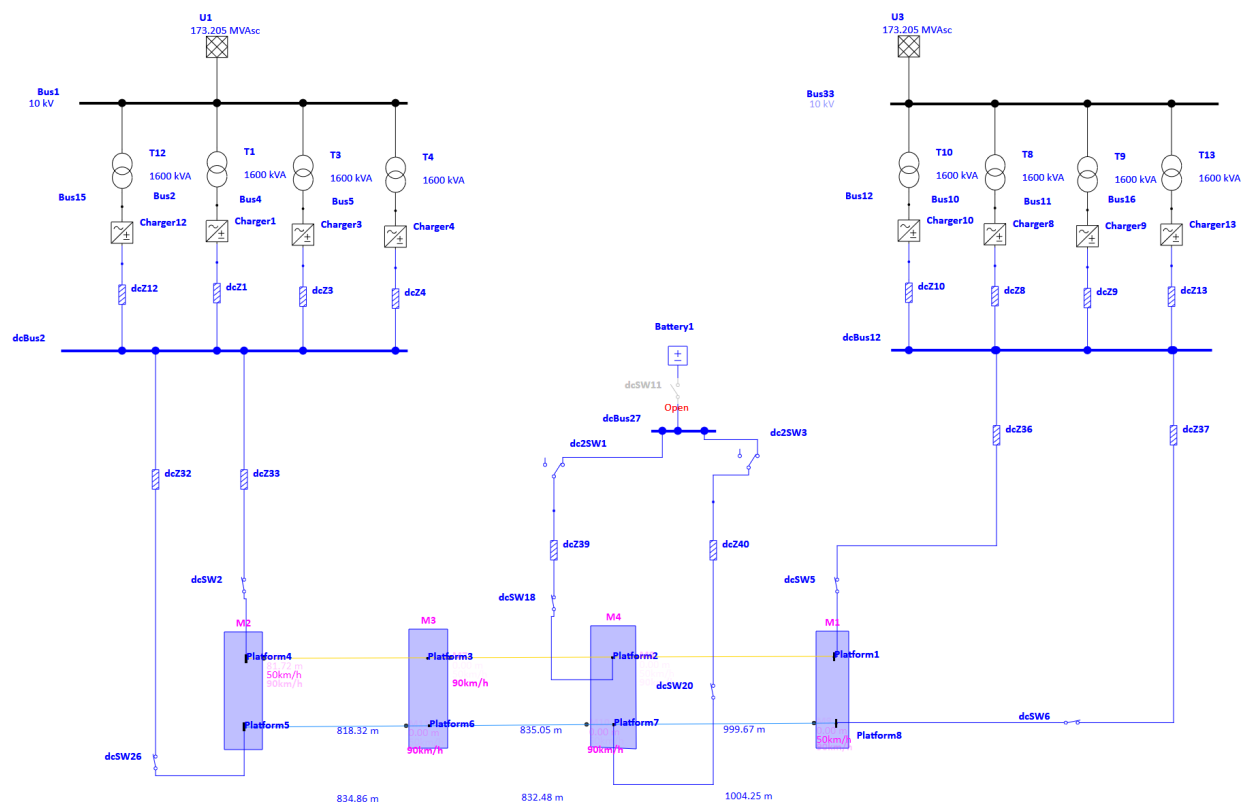


Рисунок 4.28 — Расчётная схема для параллельной схемы питания без включения накопителя энергии

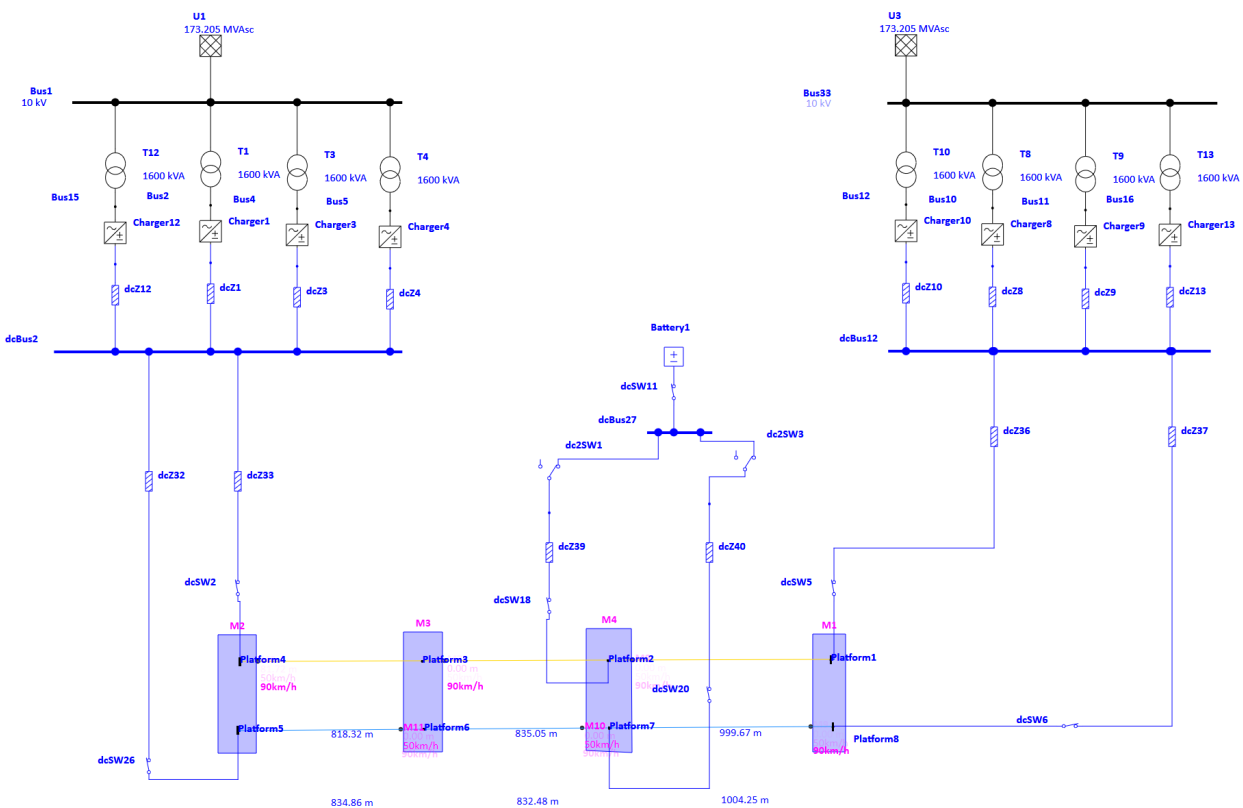


Рисунок 4.29 — Расчётная схема для параллельной схемы питания с включением накопителя энергии

Главным результатом внедрения накопителей энергии в данном случае является повышение напряжения в тяговой сети, потому производить оценку эффективности стоит производить по уровню напряжения на исследуемых шинах вблизи станции М4 (рисунок 4.30).

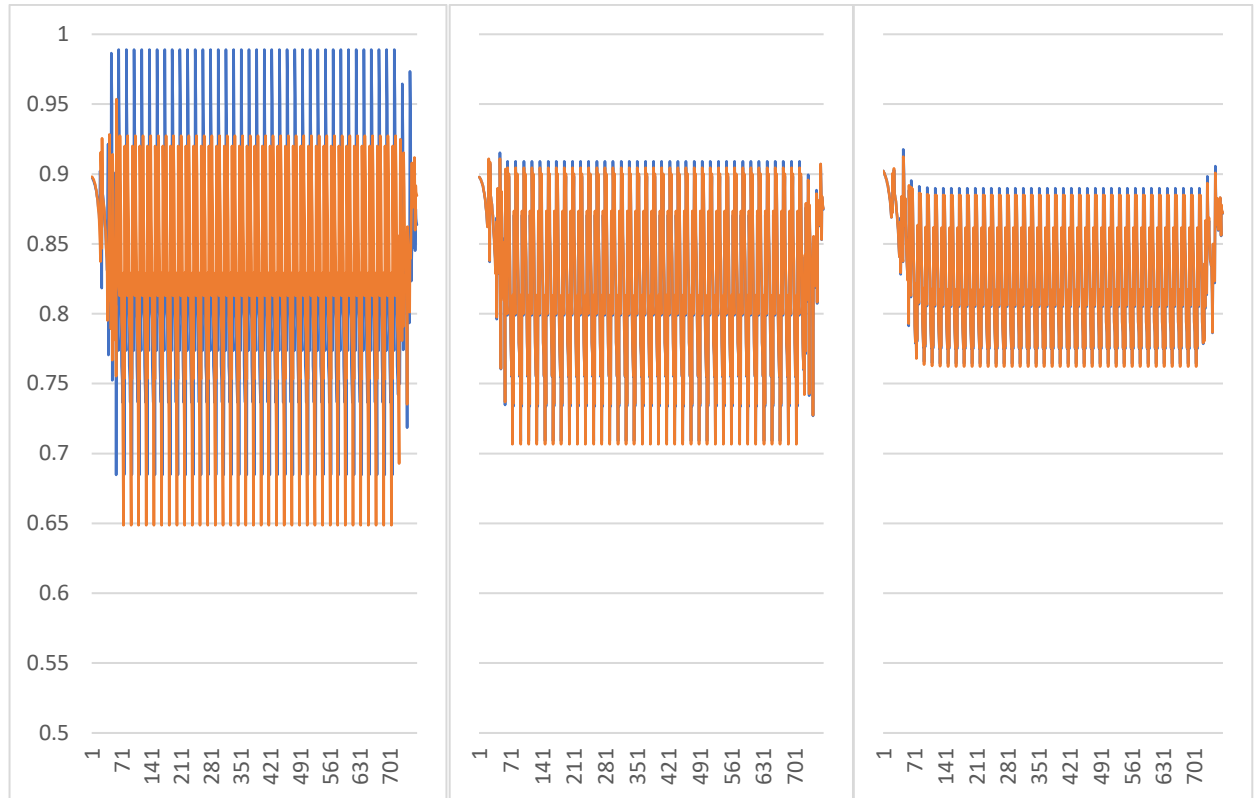


Рисунок 4.30. — Напряжение на усиливаемой платформе в трёх исследованных режимах

Как можно видеть из рисунка 4.30 несмотря на то, что координаты расположения точек на путях практически одинаковы, в нормальном режиме работы минимальное напряжение при прохождении поезда различается на ~ 40 В. При соединении этих двух точек посредством общей шины, напряжение на них не только выравнивается, но и увеличится. Повышение напряжения происходит из-за снижения общих потерь из-за перераспределения токов в новой схеме питания (узловой).

При подключении накопителя напряжение на исследуемой платформе повысится ещё больше. Т. к. необходимая для движения поезда мощность не изменяется в зависимости от уровня напряжения, при повышении напряжения уменьшается ток, а, следовательно, и падение напряжения.

Отследим изменения токов подстанций в каждом из трёх режимов. Синим на графиках ниже обозначается график мгновенного тока, оранжевым – эффективное значение тока, серым – усреднённое (рисунки 4.31-4.33).

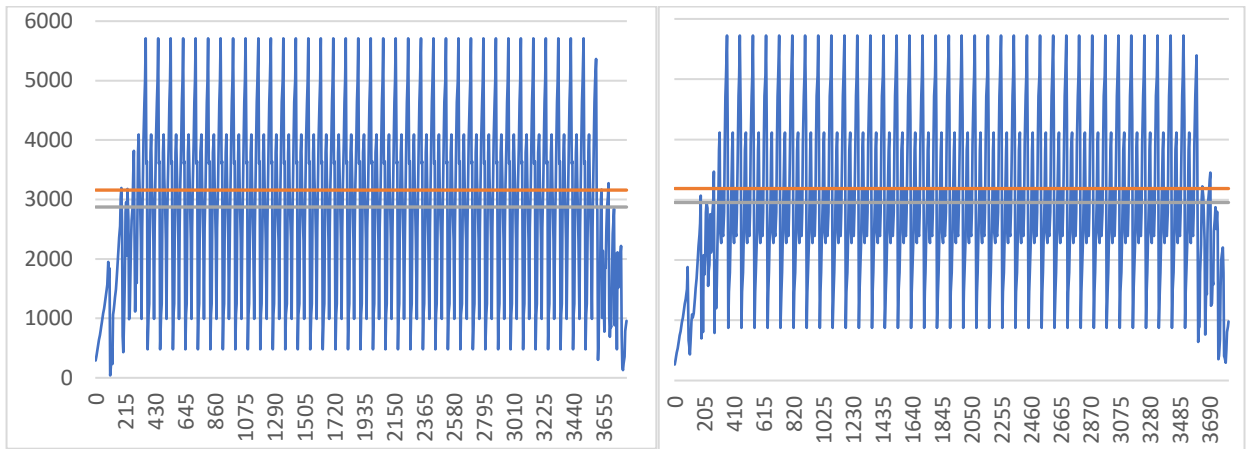


Рисунок 4.31. — Общий ток первой и второй подстанций в исходном режиме.

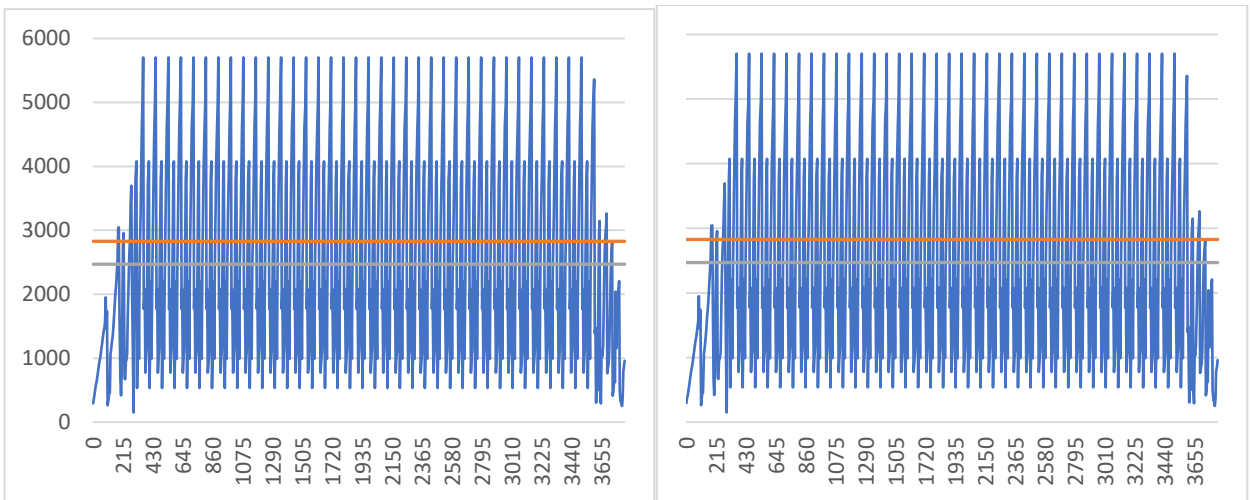


Рисунок 4.32. — Общий ток первой и второй подстанций без накопителей с пунктом параллельного соединения первого и второго путей.

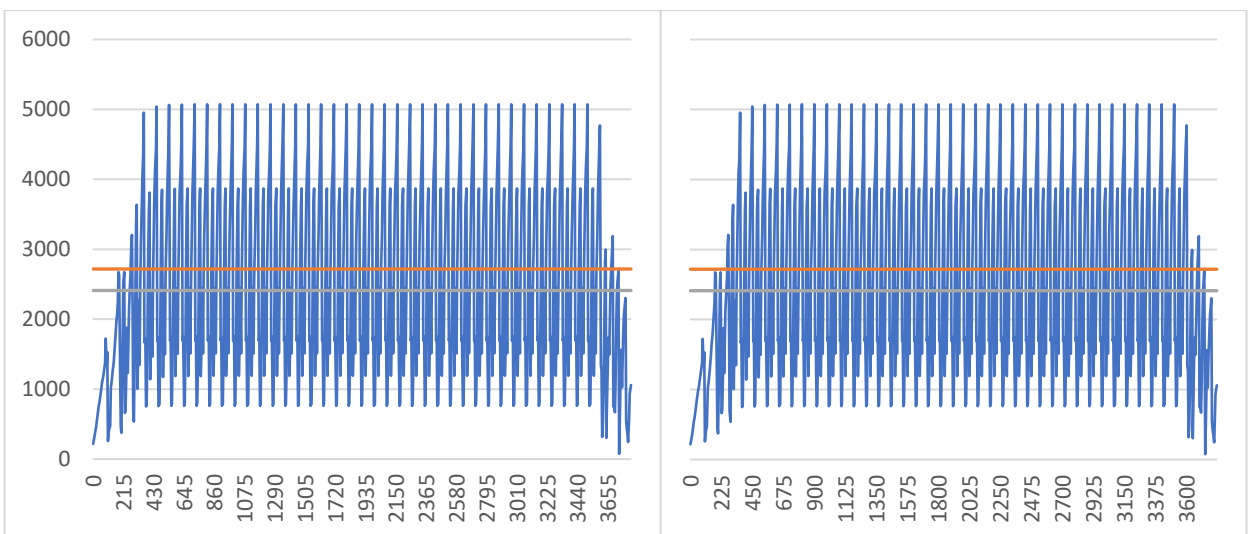


Рисунок 4.33 — Общий ток первой и второй подстанций с накопителем.

Для наглядности сведём полученные результаты расчёта токов в таблицы 4.11 и 4.12.

Таблица 4.11 — Абсолютные значения токов подстанций в трёх расчётных режимах

Эксперимент	Ток Тп№1, А			Ток Тп№2, А		
	Эффективный	Средний	Пиковый	Эффективный	Средний	Пиковый
Контрольный	3158.32	2873.45	5710.70	3185.59	2954.24	5724.33
С ПС	2826.98	2469.11	5702.46	3009.14	2691.11	5701.14
С НЭ	2718.17	2411.34	5072.88	2918.36	2601.12	5244.35

Таблица 4.12 — Относительные значения токов подстанций в трёх расчётных режимах, приведённые к контрольному примеру

Эксперимент	Ток Тп№1, А			Ток Тп№2, А		
	Эффективный	Средний	Пиковый	Эффективный	Средний	Пиковый
Контрольный	100%	100%	100%	100%	100%	100%
С ПС	90%	86%	100%	94%	91%	100%
С НЭ	86%	84%	89%	92%	88%	92%

Из таблицы видно, что включение накопителей оказывает значительный эффект на уровни токов в питающих линиях подстанций. Этот ток берёт на себя накопитель энергии. Благодаря этому снижаются общие затраты энергии на движение поезда, что отражено в таблице 4.13.

Таблица 4.13 — Экономия энергии

Эксперимент	Затраты энергии			
	Тп№1	Тп№2	Сумма	В отн. единицах
Контрольный	2552.40 кВт*ч	2328.83 кВт*ч	4881.23 кВт*ч	100%
С ПС	2501.79 кВт*ч	2274.71 кВт*ч	4776.50 кВт*ч	98%
С НЭ	2472.98 кВт*ч	2268.48 кВт*ч	4741.46 кВт*ч	97%

4.2.3.4 Моделирование работы консольного участка СТЭ с УНЭ в конце зоны

В данном эксперименте рассмотрен участок СТЭ метрополитена с консольным питанием и возможность его усиления при помощи включения УНЭ в конце фидерной зоны. Составим расчётную схему участка длиной 1040 метров. К точкам подключения возле платформы «Станция 1» подключена подстанция ТП 1,

оборудованная четырьмя трансформаторами Т мощностью 1600 кВА и четырьмя выпрямительными агрегатами КВ с номинальным током 1600 А. Профиль спрямлённый. Возле платформы «Станция 2» оборудована шина для подключения УНЭ энергоёмкостью 5 А·ч и номинальным напряжением 756 В, состоящий из 210 последовательно включенных ячеек напряжением 3,6 В. По участку от Станции 2 к Станции 1 перемещается модель семи вагонного подвижного состава «Москва 2020». Расчётная схема представлена на рисунках 4.34-4.35.

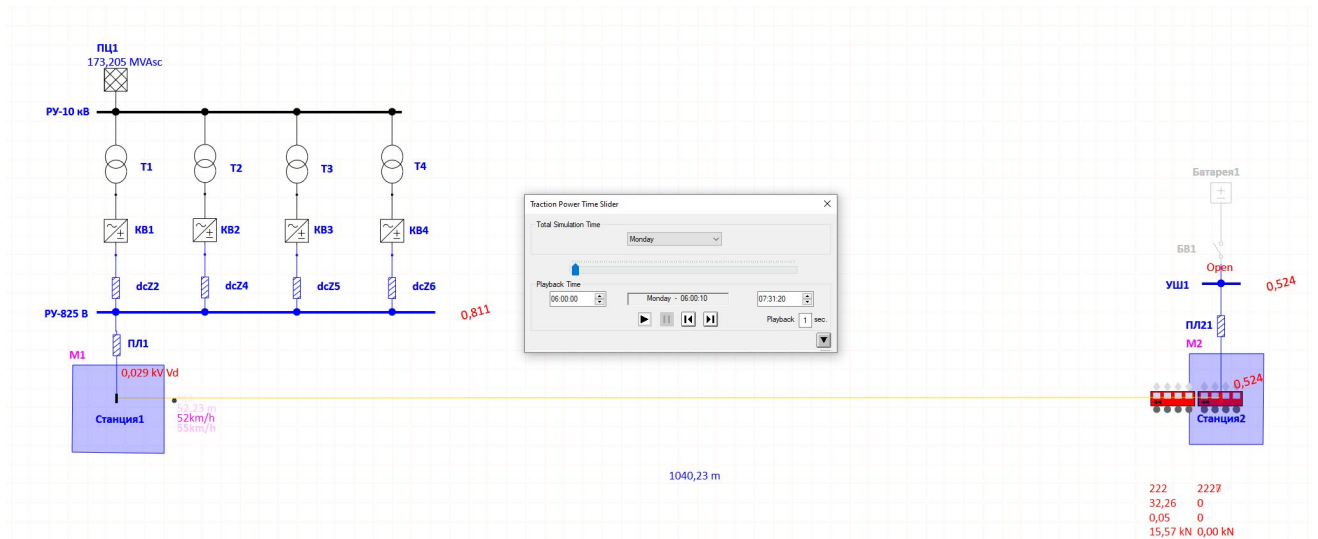


Рисунок 4.34 — Расчётная схема консольного участка (накопитель отключён)



Рисунок 4.35 — Расчётная схема консольного участка (накопитель включён)

Таблица 4.14 — Результаты моделирования консольного участка СТЭ

Исследуемый параметр	Без накопителя	С накопителем	Эффект	
			В абс. величинах	В отн. величины
Максимальный ток подстанции, А	5795,53	4025,48	-1770,05	-31%
Напряжение на удалённой платформе, кВ	0,524	0,640	0,116	22%
Энергопотребление, кВт·ч	265,733	246,015	-19,718	-7%

В таблице выше приведены результаты моделирования рассматриваемого участка по схеме без накопителя (рисунок 4.34) и с включённым накопителем энергии (рисунок 4.35). В графе эффект приведена разница показателей между первым и вторым исследуемым режимом. Отрицательное значение указывает на снижение параметра во втором опыте, положительное – на его увеличение.

Из опыта видно, что за прохождение по участку десяти поездов экономия электроэнергии составила 7%, а снижение пускового тока (максимального тока подстанции) – 31%. Значительное снижение тока вызвано повышением напряжения на отдалённой платформе (а, следовательно, и на токоприёмнике ЭПС) на 116 В (22%). Ниже приведены графики токов подстанции и напряжений на конце консольного участка (рисунок 4.36 и рисунок 4.37 соответственно). Синим изображены значения токов и напряжений в исходном режиме, оранжевым – с применением накопителя энергии.

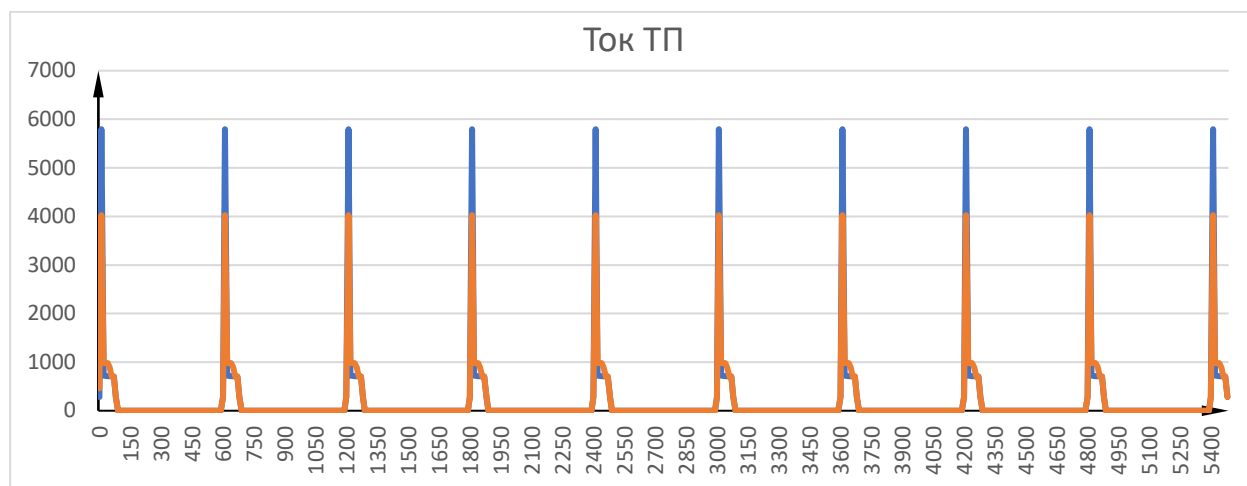


Рисунок 4.36 — Ток тяговой подстанции в двух режимах расчёта

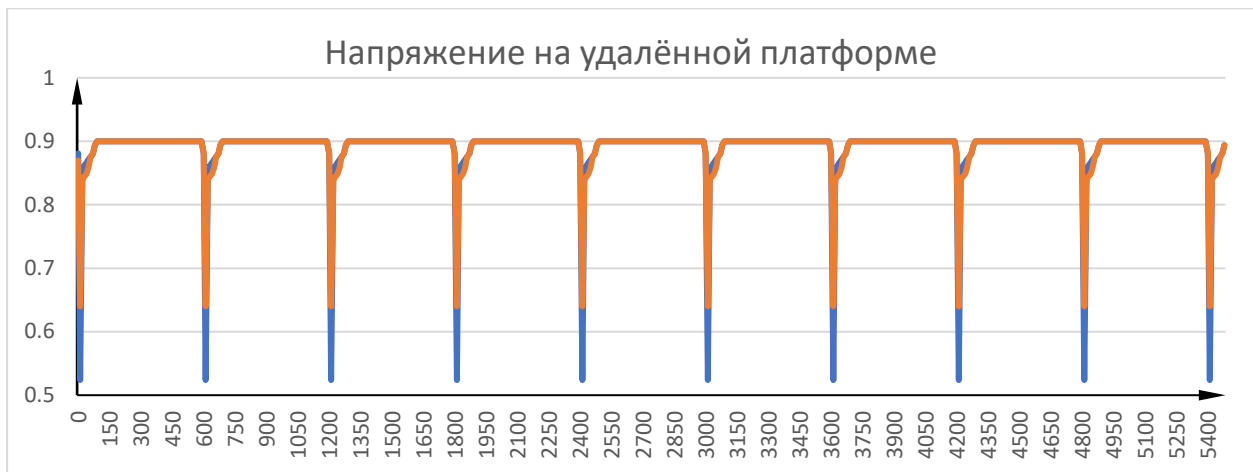


Рисунок 4.37 — Напряжение на удалённой платформе в двух режимах расчёта

Более длительное затухание тока и нарастание напряжения с применением накопителя энергии объясняется режимами его работы. После прохождения поезда накопитель восполняет потраченную на поддержание высокого уровня напряжения энергию, заряжаясь сравнительно небольшим током через систему тягового электроснабжения. В данной модели максимальный ток заряда составляет 260 А. Данное ограничение установлено для снижения потерь в тяговой сети. Показатели работы батареи приведены на рисунках 4.38 - 4.40.



Рисунок 4.38 — Напряжение батареи



Рисунок 4.39 — Ток батареи

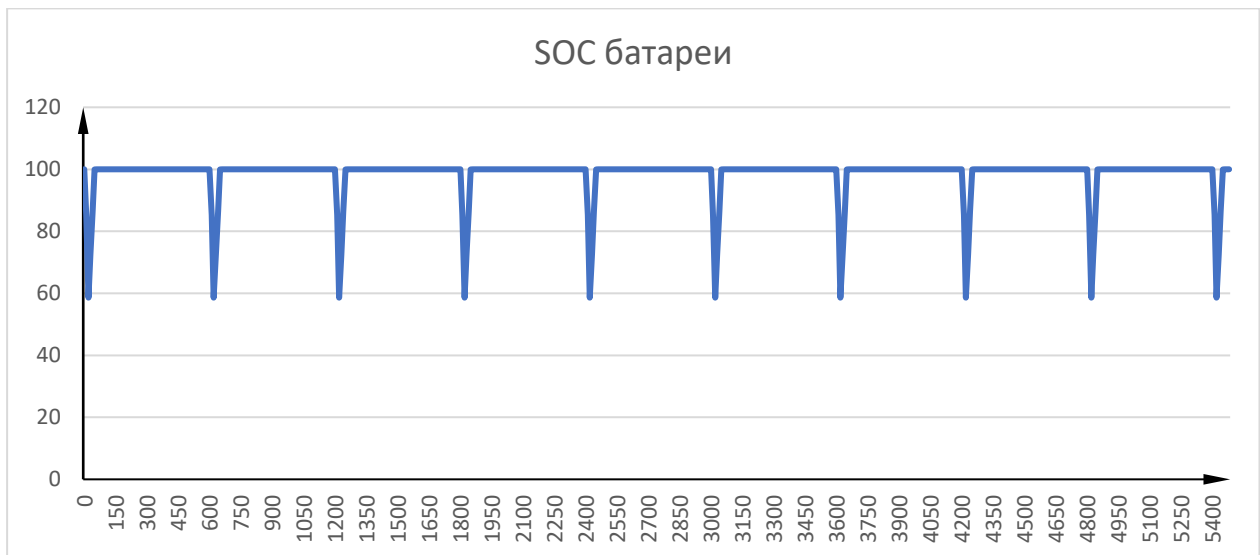


Рисунок 4.40 — Состояние заряда батареи

В опыте был использован накопитель сравнительно небольшой энергоёмкости (3,8 кВт·ч), что может соответствовать применению мобильной управляемой накопительной установки для временного обеспечения прохода поезда по консольному участку в случае необходимости производства ремонтных работ. Впрочем, стоит отметить, что данное решение может быть использовано и для долговременного усиления системы тягового электроснабжения постоянного тока на участках с консольным питанием. Такие участки нередко встречаются на полигоне РЖД для связи с некоторыми отдалёнными населёнными пунктами и аэропортами.

4.2.4 Проверка методики выбора мест установки накопителей

Для проверки гипотезы, выдвинутой в подпараграфе 2.4.3, проанализируем данные, полученные в ходе имитационного моделирования.

В соответствии с предложенной методикой, получим матрицы C, Z_y . В связи с тем, что для анализа по выбранной методике в граф схемы были добавлены дополнительные узлы в ходовом и контактном рельсе, соответствующие точкам начала торможения состава, размерности анализируемых матриц составляют 366×486 . Точки начала торможения можно определить по результатам моделирования или на основе данных бортовых устройств записи реальных поездов.

По значениям матриц C, Z_y были оценены влияния всех рекуперирующих составов на ветви с накопителями каждой из тяговых подстанций.

$$\text{Влияние}C = \sum_{i=1}^{N_{\text{вет на к}}} \sum_{j=1}^{N_{\text{узлов ЭПС}}} C_{i,j}, \quad (4.7)$$

$$\text{Влияние}CZ_y = \sum_{i=1}^{N_{\text{вет на к}}} \sum_{j=1}^{N_{\text{узлов ЭПС}}} C_{i,j} \cdot Z_{y_{i,j}}, \quad (4.8)$$

$$\text{Влияние}Z_y = \sum_{i=1}^{N_{\text{узел шин ТП}}} \sum_{j=1}^{N_{\text{узлов ЭПС}}} Z_{y_{i,j}}. \quad (4.9)$$

Число узлов схемы, соответствующих шинам тяговых подстанций и ветвей с накопителем энергии одинаково, поскольку накопители энергии подключаются к «+» шинам тяговых подстанций. Полученные результаты представим в процентах эффективности накопления энергии рекуперации в зависимости от числа тяговых подстанций, оборудованных накопителями.

$$\text{Процент}C = \forall_i \left(\text{Влияние}C_i / \max_i(\text{Влияние}C_i) \cdot 100\% \right), \quad (4.10)$$

$$\text{Процент}CZ_y = \forall_i \left(\text{Влияние}CZ_{y_i} / \max_i(\text{Влияние}CZ_{y_i}) \cdot 100\% \right), \quad (4.11)$$

$$\text{Процент}Z_y = \forall_i \left(\text{Влияние}Z_{y_i} / \max_i(\text{Влияние}Z_{y_i}) \cdot 100\% \right). \quad (4.12)$$

Результаты представлены в графической форме (рисунок 4.41).

Исходя из диаграммы, очевидно, что наилучшее совпадение с результатами моделирования показывает критерий Z_y . И этого можно сделать вывод, что распределение напряжений в схеме в значительной мере влияет на эффективность работы накопителей энергии. Предложенный критерий позволяет с приемлемой точностью определить наиболее предпочтительные места установки накопителей энергии.

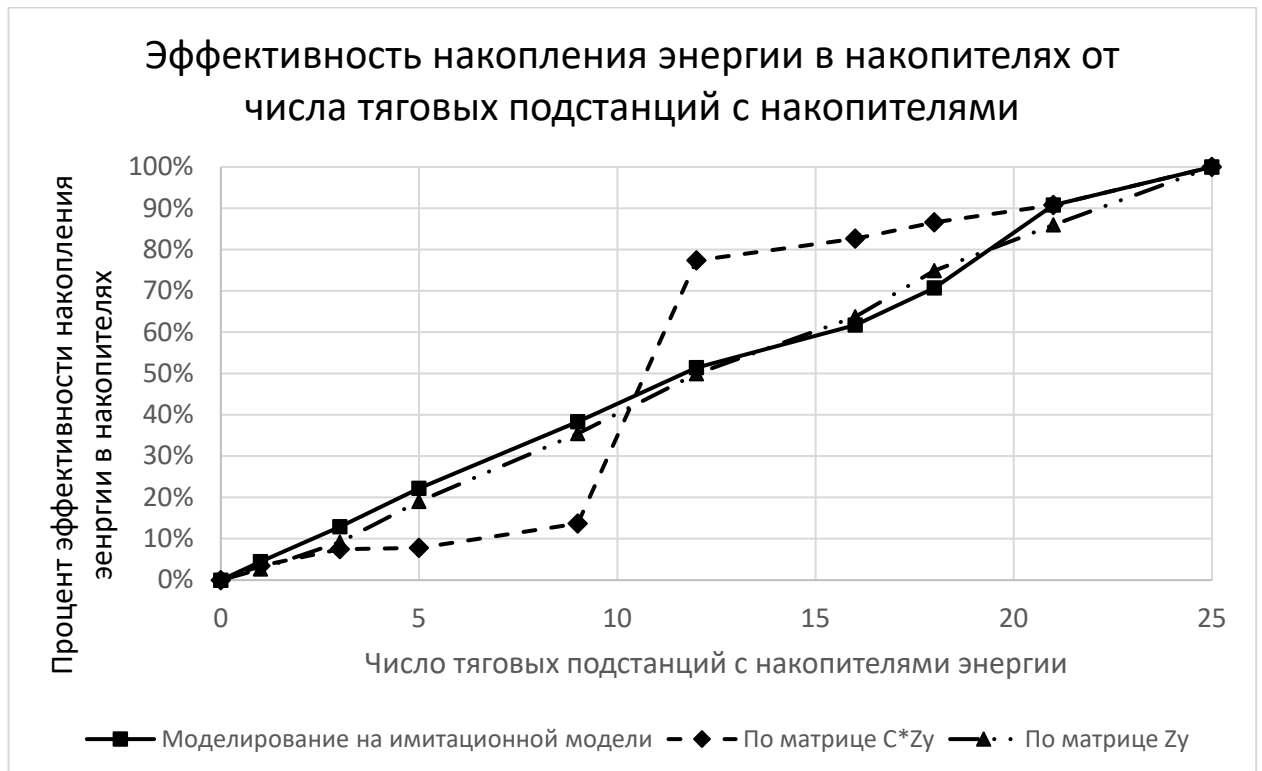


Рисунок 4.41 – Графики зависимости эффективности накопления энергии рекуперации накопителями в зависимости от числа тяговых подстанций, оборудованных накопителями

5 ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ УНЭ

Как известно из опыта внедрения, специфика метрополитена накладывает некоторые ограничения на применение накопителей энергии. Особенно сильно влияет отсутствие свободного пространства для установки оборудования. Накопители энергии с высокой плотностью энергии значительно удорожают установку, что может усложнить окупаемость.

Из-за вышеназванных факторов при разработке накопительной установки для Московского метрополитена в качестве аккумулирующего элемента были выбраны суперконденсаторные батареи. В ходе анализа и поиска вариантов, наиболее полно удовлетворяющих поставленной задаче, рассматривались так же и другие варианты, включая высокотехнологичные современные литий-полимерные аккумуляторы, СПИНЭ и накопители кинетической энергии. Однако, анализ показал, что в связи с современными политическими ограничениями и ненадёжностью большинства иностранных поставщиков высокотехнологичных электроустановок, необходимо ориентироваться на отечественного производителя. Российский рынок на момент проведения анализа (2022 – 2023 гг.) предлагает конкурентоспособные решения только в области суперконденсаторных накопительных элементов.

В ходе проведения инструментального обследования подстанций рассматриваемой линии метрополитена было выявлено, что часть совмещённых тяговых подстанций (СТП) располагает свободным пространством от 10 до 13 м², с учётом необходимости соблюдения технологические расстояния. Данные площади на различных ТП отмечены на рисунках 5.1 - 5.3 синими рамками. На каждой фотографии обозначены две зоны, большая соответствует месту расположения накопительных элементов, меньшая – преобразовательного агрегата.

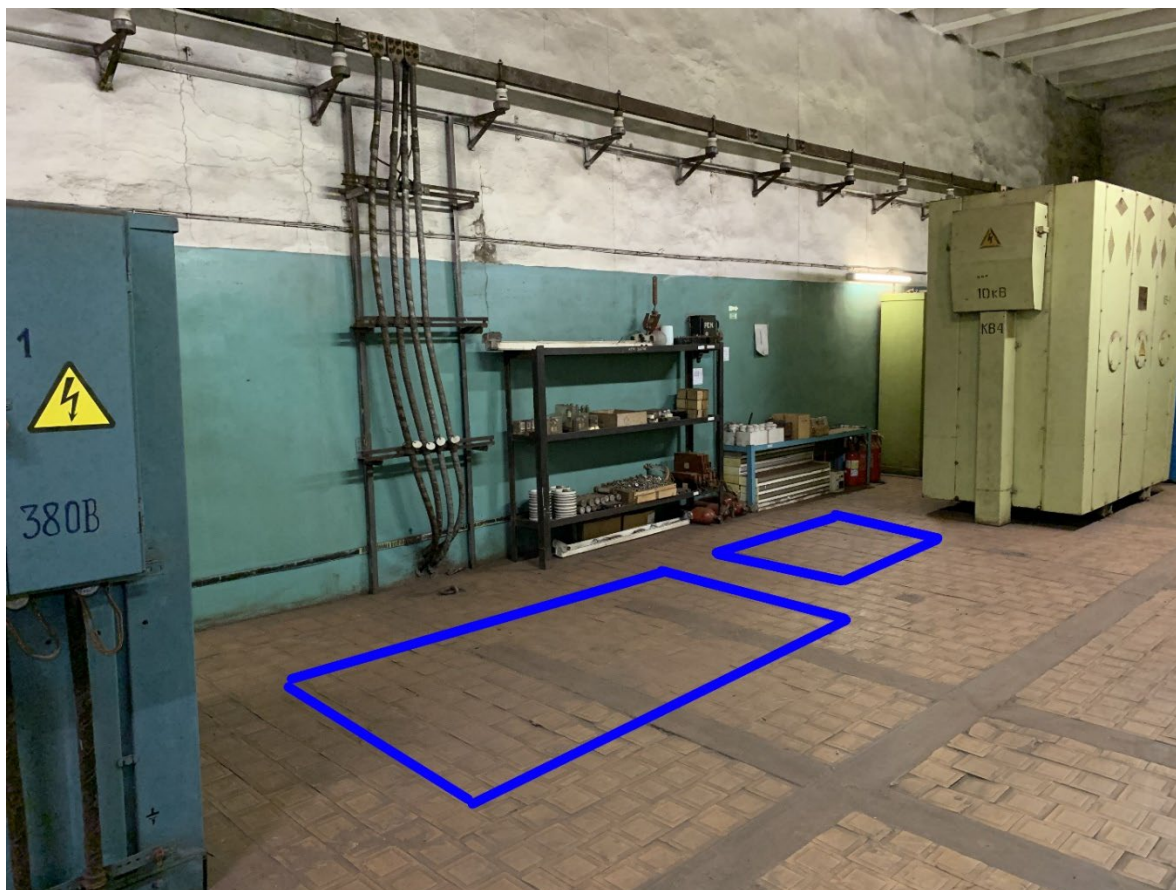


Рисунок 5.1 — свободные площади на тяговых подстанциях (ч. 1)



Рисунок 5.2 — свободные площади на тяговых подстанциях (ч. 2)



Рисунок 5.3 — свободные площади на тяговых подстанциях (ч. 3)

Экономический эффект от внедрения накопителей можно классифицировать в зависимости от способа экономии. Накопительные установки оказывают широкий спектр положительных воздействий на систему тягового электроснабжения:

- Увеличение процента полезного использования энергии рекуперации.
- Усиление существующей системы тягового электроснабжения без необходимости усиления питания со стороны внешнего энергоснабжения.
- Повышение срока службы действующего тягового оборудования подстанций, такого как трансформаторы и выпрямительные агрегаты, за счёт снижения пиковых токов нагрузки.
- Значительное облегчение проектов по реконструкции тяговых подстанций централизованной СТЭ.

- Локальное усиление СТЭ в рамках проблемных участков без установки новых тяговых подстанций.

Большую часть из этой экономии нельзя оценить только изменениями в показаниях приборов учёта, установленных на вводах подстанций, а некоторые, более того, проявляются только спустя длительное время эксплуатации. Неявный характер некоторых факторов экономии подразумевает необходимость их дополнительного учёта при подсчёте экономического эффекта и технико-экономической оценки эффективности внедрения нового оборудования в систему тягового электроснабжения. Часть из нижеописанных параметров в значительной степени зависит от исходных параметров СТЭ. Основываясь на опыте прошлого, можно казать, что в таком случае эффективным способом оценки является основанные на опыте эксплуатации статистически обработанные коэффициенты, позволяющие учесть неявные факторы экономии. К сожалению, получение реальных данных, на основе которых можно оценить эти величины не представляется возможным из-за малого распространения систем накопления энергии в рамках железнодорожно-транспортной отрасли в целом, и в метрополитенах в частности.

Отдельно стоит отметить, что и с экономической, и с технической точек зрения эффективнее серийное, типовое применение накопителей энергии, поскольку это снижает затраты на производство отдельных комплектующих установок и увеличивает полезную работу установок, как это было рассмотрено в главе 4.

В стоимость накопительной установки входит:

1. Затраты на накопительные элементы;
2. Затраты систему подключения зарядное устройство, систему диагностики, управления и сигнализации;
3. Затраты на систему защиты:
 - а. плавкие вставки для ограничения тока нагрузки накопителей;
 - б. система мониторинга показателей накопителей;

4. Затраты на проектирование;
5. Затраты на строительные-монтажные работы;
6. Затраты на пуско-наладочные работы;
7. Эксплуатационные затраты.

Источником данных для оценки служат результаты имитационного моделирования.

Срок окупаемости УНЭ на ТП можно оценить по следующей формуле:

$$T_{OK} = \frac{K - C_{ум}}{\mathcal{E} - P_{\mathcal{E}}} = \frac{K_{НЭ} - \Delta P_{ум} \cdot C_{ум}}{(A_{РекГод} + A_{Клим} + \Delta A_{потТП}) \cdot C_{элЭн} - P_{\mathcal{E}}} \quad (5.1)$$

где: $K_{НЭ}$ – Капитальные затраты на НЭ;

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

$C_{ум}$ – Цена подводимой установленной мощности от питающего центра;

$C_{элЭн}$ – Цена электроэнергии;

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

$P_{\mathcal{E}}$ – Расходы на эксплуатацию НЭ;

$A_{РекГод}$ – 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.

На основании результатов моделирования из пункта 4.2.3.1 выразим экономический эффект от внедрения накопителя энергии разных конфигураций в денежном эквиваленте и построим кривую срока окупаемости накопителя энергии. Примем стоимость преобразовательного агрегата ~30 млн. рублей, стоимость одной цепочки из пяти накопителей (включая коммутационное и прочее сопутствующее оборудование) ~2339000.00 рублей. Цены выявлены путём анализа рынка устройств накопления энергии в России на 2023 г.

Из полученной в результате расчёта кривой окупаемости (рисунок 5.4) можно сделать два вывода:

Во-первых, срок окупаемости, рассчитанный данным способом, даже в наиболее благоприятных условиях превышает срок эксплуатации накопительной установки (15 лет);

Во-вторых, по соотношению затраченных средств и экономии, наиболее эффективно применять установку с 15-ю параллельными цепочками накопителей энергии.

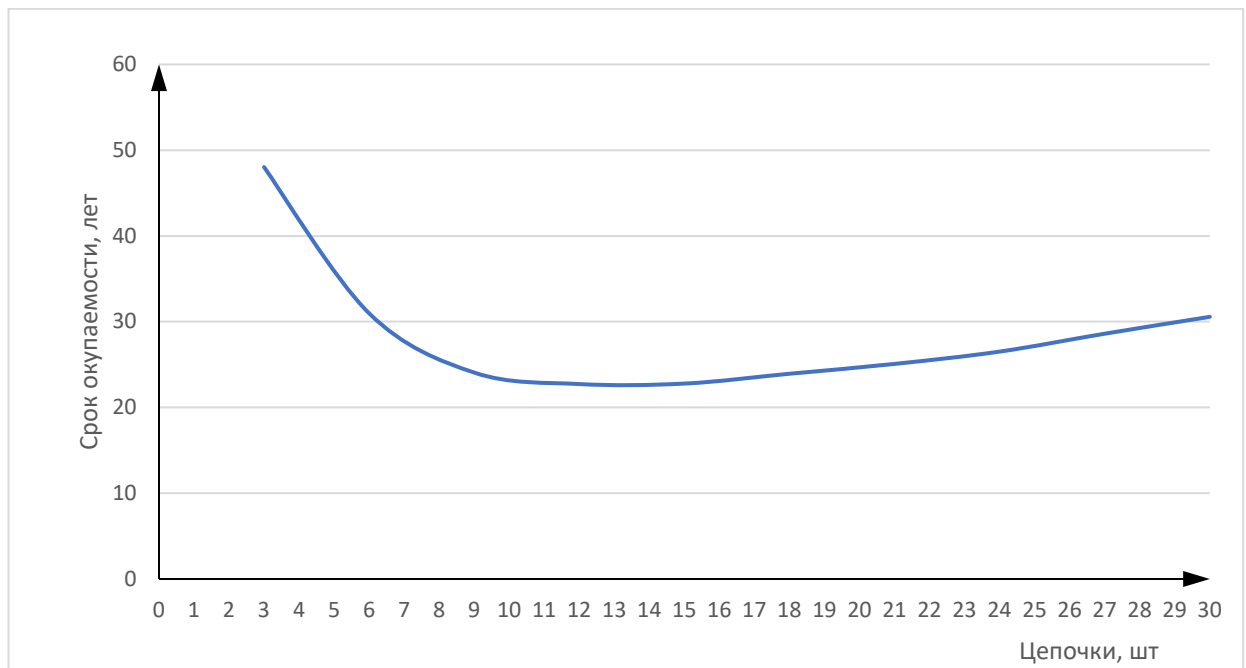


Рисунок 5.4 — Срок окупаемости накопителя энергии (в пересчёте на одну подстанцию)

Использованная выше методика оценки эффективности НЭ и срока окупаемости учитывает влияние накопителя энергии только непосредственно на подстанцию, оборудованную ими. Рассмотрим экономический эффект от внедрения УНЭ на одной подстанции относительно всей рассматриваемой линии и скорректируем кривую срока окупаемости (рисунок 5.5).

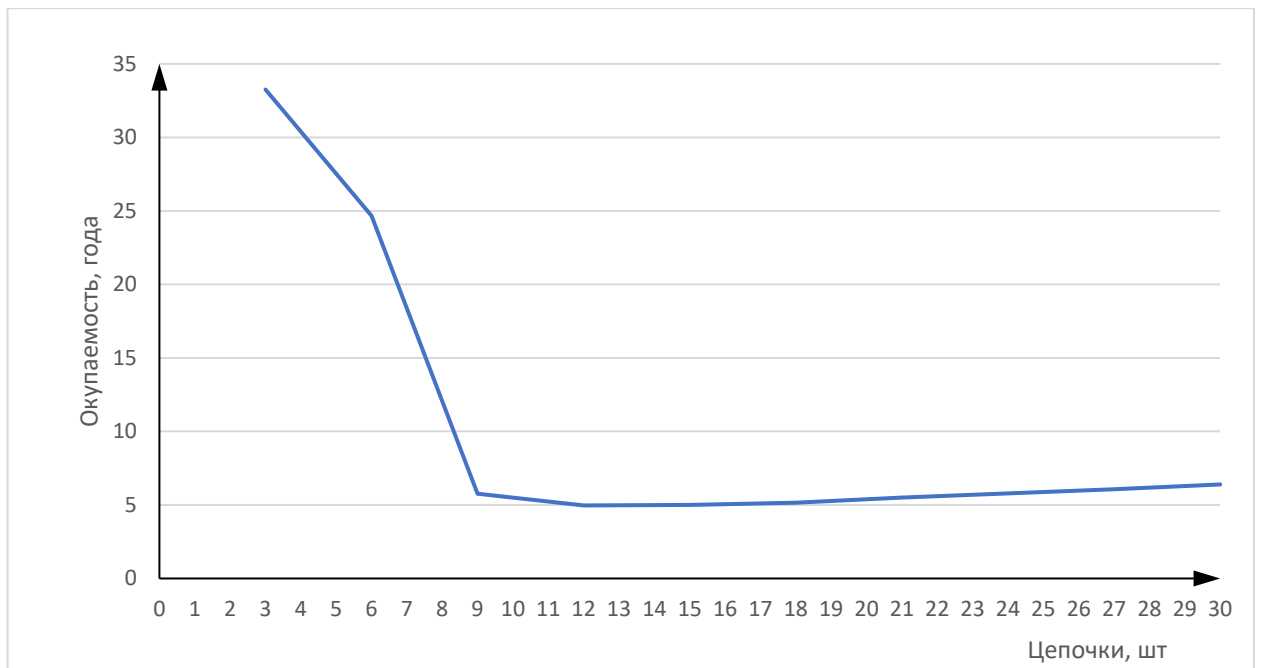


Рисунок 5.5 — Срок окупаемости накопителя энергии (в пересчёте на всю линию)

Из графика очевидно, что наименьший срок окупаемости (5 лет) достигается при том же объёме накопителя, что и при расчёте для одной подстанции – 15 цепочек в установке.

На основании предшествующих вычислений построим график чистого дисконтированного дохода от установки УНЭ на одной подстанции метрополитена с учётом предполагаемого ежегодного роста стоимости электроэнергии (рисунок 5.6).



Рисунок 5.6 — Чистый дисконтированный доход с учётом предполагаемого роста стоимости электроэнергии

Провал на графике между 15-тым и 16-тым годами эксплуатации связан с необходимостью замены накопительной установки. В среднем, преобразовательные агрегаты служат около 35 лет и более, в свою очередь, накопительные элементы обычно выходят из строя через порядка 15-ти лет и подлежат замене.

Из представленного графика видно, что несмотря на дополнительные капитальные затраты в середине эксплуатационного периода, установка выходит на окупаемость спустя ~5 лет после введения в эксплуатацию, а до окончания срока эксплуатации доход превысит стоимость новой установки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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

- 1) Разработана конструкция УНЭ модульного типа для стационарного применения в составе СТЭ метрополитенов;
- 2) Разработаны несколько вариантов системы управления накопительной установкой для разных режимов работы УНЭ;
- 3) Произведена технико-экономическая оценка эффекта от применения УНЭ предложенной конструкции в СТЭ метрополитена с различными вариантами размещения: в составе оборудования тяговой подстанции, в межподстанционной зоне на участках с централизованной системой электроснабжения, в наиболее удалённой точке участка с консольным питанием (в качестве временного и постоянного технического решения);
- 4) Предложена методика определения мест расположения НЭ в составе СТЭ посредством матричного анализа схемы, с приложением практического подтверждения её достоверности и применимости для решения реальных задач;
- 5) Показано качественно и количественно, что использование УНЭ в составе СТЭ повышает качество электроэнергии по уровню напряжения и эффективность использования энергии рекуперации, а именно:
 - снижаются средние и эффективные токи подстанций метрополитенов (вплоть до 30%);
 - снижается потребление энергии системой тягового электроснабжения (от 7%);
 - повышается уровень напряжения сети на проблемных участках (вплоть до 22%);
 - увеличивается пропускная способность проблемных участков СТЭ метрополитенов;
- 6) Разработана новая конструкция УНЭ, основанная на принципах модульности, универсальности и компактности, производство которой может быть локализовано на территории Российской Федерации.

7) Разработаны программные блоки-модули для моделирования работы электрохимических и суперконденсаторных накопителей энергии. Полученные модели интегрированы в вычислительно-измерительный комплекс, разработанный на кафедре «Электроэнергетика транспорта» РУТ (МИИТ).

8) Рекомендуется внедрение УНЭ в различных узлах СТЭ в качестве усиливающей меры или в составе вновь проектируемых СТП, что приведёт к повышению эффективности системы электроснабжения метрополитенов, повышению надёжности основных узлов тяговых подстанций, увеличению срока службы ответственного оборудования, увеличению пропускной способности проблемных участков СТЭ, повышению безопасности перевозок.

9) Перспективой дальнейшей работы по теме диссертационных исследований является разработка методик, позволяющих с допустимой точностью определить наиболее подходящую энергоёмкость УНЭ в СТП.

СПИСОК УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

В диссертации применяется следующий перечень условных обозначений и сокращений:

НЭ – накопитель энергии

СНЭ – система накопления энергии

УНЭ – управляемый накопитель энергии

ННЭ – неуправляемый накопитель энергии

СУН – система управления накопителем/накоплением

ПНС – передвижная накопительная станция

СПИНЭ – сверхпроводниковые индуктивные накопители энергии

ЭПС – электроподвижной состав

ПА – преобразовательный агрегат

СГУС – система генерации управляющего сигнала

СТП – совмещённая тяговая подстанция

ТПП – тягово-понижительная подстанция

СТЭ – система тягового электроснабжения

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Андреев, В. В. Развитие методологии расчета систем тягового электроснабжения. [Текст] / В. В. Андреев, В. А. Гречишников, Ю. Н. Король, М. В. Шевлюгин // Железнодорожный транспорт. – 2014. – № 8. – С. 32–34.
2. Андреев, В. В. Расчёт относительной реализуемой мощности трансформатора тяговой подстанции по старению изоляции. [Текст] / В. В. Андреев, В. А. Гречишников, Н. Н. Привезенцев, М. В. Шевлюгин // Электротехника. – 2011. – № 8. – С. 46–49.
3. Андреев, В.В. Расчёт интегральных показателей работы разветвленных систем тягового электроснабжения. [Текст] / В. В. Андреев, М. В. Шевлюгин, В. А. Гречишников // Электротехника. – 2012. – № 12. – С. 32–36.
4. Бадёр, М. П. Анализ показателей работы силового оборудования системы тягового оборудования электроснабжения ОАО «РЖД» на основе мониторинга тяговых подстанций в режиме реального времени. [Текст] / М. П. Бадёр, В. А. Гречишников, М. В. Шевлюгин, Ю. Н. Король [Текст] // Электроника и электрооборудование транспорта. – 2011. – № 5–6. – С. 5–8.
5. Бадёр, М. П. Оценка гармонических составляющих тягового тока в системе электроснабжения метрополитена при работе 12-пульсовых выпрямительных агрегатов. [Текст] / М. П. Бадёр, В. А. Гречишников, М. В. Шевлюгин, Данг Вьет Фук. // Электроника и электрооборудование транспорта. – 2016. – № 1. – С. 17–21.
6. Бадер, М.П. Повышение качества электрической энергии в системе тягового электроснабжения метрополитена с использованием 12-пульсовых преобразовательных агрегатов. [Текст] / М. П. Бадер, П. Ф. Бестемьянов, В. А. Гречишников, М. В. Шевлюгин, В. Ф. Данг // Практическая силовая электроника. – 2016. – № 2 (62). – С. 38–43.
7. Баранов, Л.А. Показатели работы стационарного накопителя энергии на тяговых подстанциях Московского метрополитена. [Текст] / Л. А. Баранов, В. А. Гречишников, А. В. Ершов, М. Д. Родионов, М. В. Шевлюгин // Электротехника. – 2014. – № 8. – С. 18–21.

8. Баранов, Л.А. Оценка гармонических составляющих тягового тока в Московском метрополитене на основе экспериментальных замеров. [Текст] / Л. А. Баранов, В. А. Гречишников, М. В. Шевлюгин, В. Ф. Данг // Наука и техника транспорта. – 2016. – № 2. – С. 8–13.

9. Баранов, Л. А. Оценка эффективности использования стационарных ёмкостных накопителей энергии в метрополитене на основе экспериментальных замеров показателей работы системы тягового электроснабжения [Текст] / Л. А. Баранов, Ю. А. Бродский, В. А. Гречишников, А. И. Подаруев, В. Н. Пупынин, М. В. Шевлюгин // Электротехника. – 2010. – № 1. – С. 62–65.

10. Бродский, Ю. А. Стационарная система аккумулирования энергии рекуперации электроподвижного состава метрополитена на базе ёмкостных накопителей энергии. [Текст] / Ю. А. Бродский, А. И. Подаруев, В. Н. Пупынин, М. В. Шевлюгин // Электротехника. – 2008. – № 7. – С. 38–41.

11. Вагнер, К.Ф. Метод симметричных составляющих в применении к анализу несимметричных электрических цепей [Текст]. Учеб. пособие для энергетич. вузов / К. Ф. Вагнер, Р. Д. Эванс. – Л.: Главная редакция энергетической литературы, 1936. – 48 с.

12. Власов, С.П. Совместная работа шести и двенадцати пульсовых выпрямительных агрегатов при модернизации тяговых подстанций [Текст] / С.П. Власов, А.Е. Голицына, В.А. Гречишников, Н.Д. Куров // Электротехника. – 2021. – № 9. – С. 15–19.

13. Вольдек, А.И. Электрические машины [Текст]. Учебник для студентов высш. техн. учебн. заведений. – 3–е изд., перераб. / А.И. Вольдек. – Л.: Энергия, 1978. – 832 с.

14. Воронин, А.В. Электроснабжение электрифицированных железных дорог. [Текст] / А.В. Воронин. – М.: Транспорт, 1971. – 296 с.

15. Высоковольтные молекулярные накопители энергии: Основная номенклатура ЗАО НПО «ТехноКор»: М., 1997–2014. URL: <http://tehnokor.com/mnev.php>. (Дата обращения: 18.11.2020).

16. Гаев, Д. Внедрение энергосберегающих технологий. [Текст] / Д. Гаев, А. Ершов, Л. Баранов, В. Гречишников, М. Шевлюгин – 2010. – Т. 8. – № 3 (31). – С. 3–8.
17. Годяева, М. В. Проточные батареи на основе органических редокс-систем для крупномасштабного хранения электрической энергии, современные проблемы теоретической и экспериментальной химии [Текст] / М. В. Годяева, Д. Е. Воронков, И. А. Казаринов // Межвузовский сборник научных трудов XIV Всероссийской конференции молодых ученых с международным участием. – 2020. – с. 163–166.
18. Гребенникова, Н. А. Применение гидроаккумулирующих станций для выравнивания графика электрической нагрузки [Текст] / Н. А. Гребенникова, И. В. Черкашин, Н. А. Прописнов, Е. Ю. Бурденкова // Тенденции развития науки и образования. – № 42-5 – 2018 – с. 35–37.
19. Гречишников, В. А. Выбор мест установки накопителей энергии на тяговых подстанциях линий метрополитена. / В. А. Гречишников, Д. С. Плетнев, Белов М. Н., М. В. Шевлюгин // Электротехника. – 2023. – № 9. – С. 45–50.
20. Гречишников, В. А. Преобразовательный агрегат ёмкостного накопителя энергии для системы тягового электроснабжения метрополитена. [Текст] / В. А. Гречишников, А. И. Подаруев, М. В. Шевлюгин // Электротехника. – 2011. – № 5. – С. 17–22.
21. Гречишников, В.А. Расширение функций разграничения рабочих и аварийных режимов метрополитенов в системе тягового электроснабжения постоянного тока /В.А. Гречишников, Н.Д. Куров, А.Е. Голицына // Труды XIX Всероссийской научно–практической конференции «Безопасность движения поездов». – 2018. – С. III – 4 – III – 6.
22. Гречишников, В. А. Теоретическое обоснование эффективности использования накопителей энергии неуправляемого типа в системе тягового электроснабжения метрополитена [Текст] / В. А. Гречишников, М. В. Шевлюгин // Электроника и электрооборудование транспорта. – 2013. – № 5. – С. 17–19.

23. Гречишников, В. А. Эксплуатация накопителя энергии на метрополитене [Текст] / В. А. Гречишников, М. В. Шевлюгин // Мир транспорта. – 2013. – Т. 11. – № 5 (49). – С. 54-58.

24. Гуревич, В. И. Свинцово-кислотные аккумуляторы: устройство, принцип действия, применение. [Текст] / В. И. Гуревич // Силовая Электроника. – 2012. – № 5. – с. 68–74.

25. Деньщиков, К.К. Комбинированные энергетические установки на основе суперконденсаторов/ К.К. Деньщиков // Конференция ОИВТ РАН «Результаты фундаментальных исследований в области энергетики и их практическое значение», Москва, 24 –26 марта 2008г.

26. Долгов, А. П., Качество электроэнергии в электрических системах с распределенными искажающими потребителями [Текст] / А.П. Долгов, Г.В. Рогов // Энергия единой сети. – 2014. – № 5. – С. 94–102.

27. Долгов, А. П. Повышение качества электроэнергии в системах электроснабжения железных дорог Восточной Сибири [Текст] / А.П. Долгов, С.А. Кандаков, М.А. Осадчев // Управление, информация и оптимизация в электроэнергетических системах: Тез. докл. Междунар. молодёжной научно– техн. конф. – Новосибирск, 2011. – С. 70.

28. Елисеев, Ю.Н. Анализ пожарной опасности литий-ионных аккумуляторных батарей / Ю. Н. Елисеев, А. В. Мокряк // Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России. – 2020. – №3. – с. 14–17.

29. Железко, Ю. С. Потери электроэнергии. Реактивная мощность. Качество электроэнергии [Текст]. Руководство для практических расчетов. /Ю.С. Железко. – Москва: ЭНАС, 2009. – 456 с.

30. Закарюкин, В.П. Анализ схем симметрирования тяговых нагрузок железных дорог переменного тока [Текст] / В.П. Закарюкин, А.В. Крюков, Е.С. Иванова // Системы. Методы. Технологии. – 2013. – №4 (20) – С. 68–73.

31. Закарюкин, В.П. Методы совместного моделирования систем тягового и внешнего электроснабжения железных дорог переменного тока [Текст] / под ред. Закарюкин В.П., Крюков А.В. – Иркутск: ИрГУПС. – 2010. – 160 с.
32. Закарюкин, В.П. Качество электроэнергии в линиях электропередачи «Два провода – рельс» [Текст] / В.П. Закарюкин, А.В. Крюков // Электрификация транспорта. – 2014. – №14. – С.84–90.
33. Закарюкин, В.П. Моделирование систем тягового электроснабжения, оснащенных симметрирующими устройствами [Текст] / В.П. Закарюкин, А.В. Крюков, И.М. Авдиенко // Информационные и математические технологии в науке и управлении. – 2016. – № 4–2. – С. 70–79.
34. Закарюкин, В.П. Сложнонесимметричные режимы электрических систем [Текст] / В.П. Закарюкин, А.В. – Иркутск: Изд-во Иркут. ун-та., 2005. – 273 с.
35. Закарюкин, В.П. Устранение несимметрии в электрических сетях, питающих тяговые подстанции железных дорог [Текст] / В.П. Закарюкин, А.В. Крюков, И.М. Авдиенко // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2016 – № 1 (49) – С. 189–195.
36. Иванов–Смоленский, А.В. Электрические машины [Текст]. В 2-х т. Учебник для вузов. Том 1. – 3-е изд. / А. В. Иванов–Смоленский.– М.: Издательский дом МЭИ, 2006. – 652 с.
37. Каминский, М.Д. Характеристики асинхронных двигателей при асимметрии напряжений [Текст] /М.Д. Каминский, С.Д. Лебедев // Электричество, 1936. – С. 15–16.
38. Калинин, В. В. Обоснование применения проточных батарей в электромобилях [Текст] / В. В. Калинин // Международный научный журнал. – 2016. – № 1. – с. 66–70.
39. Кацай, А. В. Активная загрузка 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.

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.

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.

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

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.

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.

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.

46. Клинов, В. Ю. Емкостные накопители в системе электроснабжения метрополитена. [Текст] / В. Ю. Клинов, Ю. А. Бродский, А. И. Подаруев, В. Н. Пупынин, М. В. Шевлюгин // Русский инженер. – 2008. – № 17. – С. 62–64.

47. Клячко, Л. М. Модель совмещенной тяговой подстанции метрополитена с учетом тяговой нагрузки и потребителей собственных нужд.

[Текст] / Л. М. Клячко, М. В. Шевлюгин, М. Н. Белов, А. Е. Голицына // Электротехника. – 2021. – № 9. – С. 22–25.

48. Котельников, А. В. Распределенная генерация электроэнергии в системе тягового электроснабжения железных дорог на основе ветровых электроустановок. [Текст] / А. В. Котельников, М. В. Шевлюгин, А. А. Жуматова // Электротехника. – 2017. – № 9. – С. 40–45.

49. Мельничук, О. В. Особенности заряда и разряда литиевых аккумуляторных батарей и современные технические средства управления этими процессами [Текст] / О. В. Мельничук, В. С. Фетисов // Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2016. – т. 12. – № 2. – с. 41–48.

50. Морачевский, А. Г. Натрий-серный аккумулятор: новые направления развития [Текст] / А. Г. Морачевский, А. А. Попович, А. И. Демидов // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки: журнал. – 2017. – Т. 23. – вып. 4. – С. 110–117.

51. Нанев, С. М. Теоретическое и экспериментальное исследование вибрации и шумов трёхфазных асинхронных двигателей [Текст]: Дисс. ... канд. техн. наук: 05.00.00 / Нанев Спас Митев. – Москва, 1972. – 248 с.

52. Наумов, И.В. Выбор параметров симметрирующего устройства в зависимости от изменяющихся показателей несимметрии в распределительных сетях 0,38 кВ с сосредоточенной нагрузкой [Текст] / И.В. Наумов, А.В. Пруткина // Вестник КрасГАУ, Красноярск. – 2014. – №11. – С.186– 195.

53. Наумов, И.В. Качество электрической энергии и снижение дополнительных потерь мощности в электрических сетях [Текст] / И.В. Наумов, С.В. Подъячих, Д.А. Иванов // Вестник ИрГСХА. – 2009. – №37. – С. 83–88.

54. Наумов, И.В. Оптимизация мощности симметрирующих устройств в распределительных сетях 0,38 кВ [Текст] / И.В. Наумов, С.В. Подъячих, Д.А. Иванов // Научно–практический журнал «Вестник ИрГСХА» – март 2011. – №42.

55. Наумов, И.В. Симметрирующее устройство для трехфазной четырехпроводной сети с регулируемыми параметрами [Текст] / И.В. Наумов, Д.А. Иванов // Вестник КрасГАУ –2007. –№4.

56. Наумов, И.В. Управление режимами работы асинхронного двигателя в условиях несимметрии напряжений питающей сети [Текст] / И.В. Наумов, М.В. Шевченко, Е.А. Белоусова // Энергетика и информационные технологии / Сборник научных трудов / отв.ред. Пустовая О.А. Благовещенск: Дальневосточный государственный аграрный университет. – 2017. – Т.10 – С. 89–96.

57. Невретдинов, Ю.М. Анализ регистрации показателей качества электроэнергии на шинах питающих подстанций [Текст] / Ю.М. Невретдинов. и др. // Вестник Мурманского государственного технического университета. – 2009. – Том 12. – №1. – С.58–64.

58. Новоселов Б.Н. DC конверторы в системах оперативного постоянного тока [Текст] / Б.Н. Новоселов // Энергоэксперт, – М., 2013. – №5. – С. 74–76.

59. Радин, В. И. Электрические машины: Асинхронные машины [Текст]. Учеб. для электромех. спец. вузов / В.И. Радин, Д.Э. Брускин, А.Е. Зорохович; Под. ред. И. П. Копылова. – М.: Высш. шк., 1988. – 328 с.

60. Ребров, И. А. Интеллектуальная энергетика на транспорте и в промышленности. Накопители электрической энергии в системе тягового электроснабжения железных дорог постоянного тока. [Текст] / И. А. Ребров, М. В. Шевлюгин, А. В. Котельников, Д. В. Ермоленко // Материалы всероссийской молодежной научно-практической конференции с международным участием. – 2018. – С. 67-79.

61. Соколова М.А. Сравнительный анализ систем запасания энергии и определение оптимальных областей применения современных супермаховиков. [Текст] / М. А. Соколова, В. С. Томасова, R. P. Jastrzębski // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2014. – № 4 (92). – с. 149–155.

62. Таран, В. Н. Точность численных методов анализа электростатических полей. [Текст] / В. Н. Таран, М. В. Шевлюгин, А. В. Шандыбин // Транспортные системы и технологии. – 2021. – Т. 7. – № 1. – С. 59–70.

63. Устройство накопления электроэнергии для аварийного питания электроподвижного состава [Текст]: патент на полезную модель RU 56736 U1 /

Шевлюгин М. В., Желтов К. С.; заявитель и патентообладатель Шевлюгин М. В., Желтов К. С. – № 2006116186/22; заявл. 12.05.2006; опубл. 10.09.2006.

64. Хрусталёв Д. А. Аккумуляторы [Текст]. / Д. А. Хрусталёв – М.: Изумруд, 2003. – 224 с.

65. Шевлюгин, М. В. Возможность использования возобновляемых источников энергии в системе тягового электроснабжения железных дорог. [Текст] / М. В. Шевлюгин, А. А. Жуматова // Наука и техника транспорта. – 2008. – № 4. – С. 25–28.

66. Шевлюгин, М. В. Гармонические помехи тягового тока в системе электроснабжения метрополитена. [Текст] / М. В. Шевлюгин, В. Ф. Данг // Мир транспорта. – 2015. – Т. 13. – № 6 (61). – С. 88–101.

67. Шевлюгин, М. В. ЕНЭ на борту метropоезда [Текст]. / М. В. Шевлюгин // Мир транспорта. – 2007. – Т. 5. – № 1 (17). – С. 46–49.

68. 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.

69. 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.

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

71. Шевлюгин, М. В. Опыт пуска электроподвижного состава при помощи "накопительных" тяговых подстанций на Московском метрополитене. [Текст] В. Шевлюгин, Д. В. Ермоленко, А. Н. Стадников, А. Е. Голицына // Электротехника. – 2017. – № 11. – С. 75–80.

72. Шевлюгин, М. В. Опытная эксплуатация накопителей энергии неуправляемого типа на тяговых подстанциях московского метрополитена. [Текст]

/ М. В. Шевлюгин, А. Е. Голицына, А. Н. Стадников // Электропитание. – 2019. – № 4. – С. 51–60.

73. Шевлюгин, М. В. Оценка повышения энергетических показателей при внедрении двенадцати-преобразователей агрегатов на тяговых подстанциях. [Текст] / М. В. Шевлюгин, В. Ф. Данг // Практическая силовая электроника. – 2020. – № 3 (79). – С. 51–55.

74. Шевлюгин, М. В. Оценка повышения энергетических показателей при внедрении двенадцатипульсовых преобразовательных агрегатов на тяговых подстанциях. [Текст] / М. В. Шевлюгин, В. Ф. Данг // Практическая силовая электроника. – 2020. – № 3 (79). – С. 51–55.

75. Шевлюгин, М. В. Повышение качества электрической энергии при электроснабжении собственных нужд совмещенной тяговой подстанции метрополитена [Текст] / М. В. Шевлюгин, А. Е. Голицына // Энергобезопасность и энергосбережение. – 2022. – № 5. – С. 37–41.

76. Шевлюгин, М. В. Повышение надёжности работы контактной сети высокоскоростных магистралей, электрифицированных на переменном токе [Текст] / М. В. Шевлюгин, Д. В. Семенова // В сборнике: Транспорт России: проблемы и перспективы - 2021. Материалы Международной научно-практической конференции. – Санкт-Петербург, 2021. – С. 266–268.

77. Шевлюгин, М. В. Повышение надёжности 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.

78. Шевлюгин, М. В. Повышение энергетических показателей работы системы тягового электроснабжения железных дорог с помощью накопителей энергии [Текст]. / М. В. Шевлюгин // Наука и техника транспорта. – 2007. – № 1. – С. 68–73.

79. Шевлюгин, М. В. Повышение эффективности высокоскоростной контактной подвески на переменном токе. [Текст] / Шевлюгин М.В., Семенова Д.В. // Электричество. – 2021. – № 5. – С. 39–43.

80. 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.

81. Шевлюгин, М. В. Система накопления энергии на вагоне метро для аварийного выхода поезда из туннеля. [Текст] / М. В. Шевлюгин // Наука и техника транспорта. – 2006. – № 3. – С. 29–33.

82. Шевлюгин, М. В. Снижение расхода электроэнергии на движение поездов в Московском метрополитене при использовании емкостных накопителей энергии [Текст] / М. В. Шевлюгин, К. С. Желтов // Наука и техника транспорта. – 2008. – № 1. – С. 15–20.

83. Шевлюгин, М. В. Снижение расхода энергии и рабочей мощности основного силового оборудования тяговых подстанций электрических железных дорог с помощью накопителей энергии [Текст]: монография / М. В. Шевлюгин; – М.: МГУПС, 2007.

84. Шевлюгин, М. В. Совершенствование системы тягового электроснабжения с помощью накопителей энергии [Текст] / М. В. Шевлюгин // Соискатель – приложение к журналу Мир транспорта. – 2007. – Т. 04. – № 1. – С. 35–38.

85. Шевлюгин, М. В. Современные подходы к проектированию устройств тяговой сети железных дорог с помощью *bim*-технологий [Текст] / М. В. Шевлюгин, В. С. Антонов, Н. В. Максименко // Мир транспорта. – 2022. – Т. 20. – № 1 (98). – С. 6–12.

86. Шевлюгин, М. В. Цифровая модель тяговой подстанции двух родов тока. [Текст] / Шевлюгин М.В., Королев А.А., Королев А.О., Александров И.А. // Электротехника. – 2018. – № 9. – С. 40–44.

87. 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.

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

89. 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.

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

91. Шевлюгин, М. В. Эксплуатация энергопринимающих устройств промышленной сети с учётом влияния тяговой нагрузки на несимметрию напряжений. [Текст] / М. В. Шевлюгин, Е. В. Щегловитова // Энергетик. – 2023. – № 3. – С. 28–30.

92. Шевлюгин, М.В. Энергосберегающие технологии на железнодорожном транспорте и метрополитенах, реализуемые с использованием накопителей энергии автореферат дис. ... доктора технических наук [Текст] / Моск. гос. ун-т путей сообщ. (МИИТ) МПС РФ. Москва, 2013.

93. Шевлюгин, М. В. Энергосбережение на железнодорожном транспорте с помощью сверхпроводниковых индуктивных накопителей энергии [Текст] / М. В. Шевлюгин // Наука и техника транспорта. – 2008. – № 2. – С. 67–70.

94. Шумаков, К. Г. Схемные решения распределительных устройств питающего напряжения опорных подстанций на современном оборудовании [Текст] / К.Г. Шумаков // Разработка и совершенствование электрооборудования для систем тягового электроснабжения железных дорог. Екатеринбург: Изд-во УрГУПС; Вып. 70 (153), 2009. – С. 110–116.

95. Шурыгина, В. Суперконденсаторы. Размеры меньше, мощность выше [Текст] / В. Шурыгина // Электроника Наука Технологии Бизнес. – 2009. – № 7. – с. 10–20

96. Щегловитова, Е.В. Некоторые вопросы оценки влияния на показатели качества электрической энергии системы тягового электроснабжения переменного тока [Текст] / Е.В. Щегловитова // Сборник научных трудов Всероссийской научно–технической конференции с международным участием посвященной 60–летию кафедры «Системы электроснабжения» и 100–летию плана ГОЭЛРО/ отв. ред. Игнатенко И.В., Власенко С.А. Хабаровск: Дальневосточный государственный университет путей сообщения. – 2020. – С. 68–73.

97. Щегловитова, Е.В. Некоторые способы корректировки несимметрии напряжений в сети при влиянии тяговой нагрузки электрифицированных железных дорог переменного тока [Текст] / Е.В. Щегловитова // Вопросы устойчивого развития общества. Махачкала: Институт развития образования и консалтинга. – 2022. – №1. – С. 189 – 191.

98. Щегловитова, Е.В. Несимметрия напряжений в системе тягового электроснабжения и технические решения для ее снижения [Текст] / Е.В. Щегловитова // Молодой исследователь: вызовы и перспективы: сб. ст. по материалам ССLXIII Международной научно–практической конференции «Молодой исследователь: вызовы и перспективы. Москва: Изд. «Интернаука». – 2022. – № 21(263). – С. 335 – 340.

99. Щегловитова, Е.В. Несимметрия напряжений как негативный фактор в электроснабжении потребителей электрической энергии [Текст] / Е.В. Щегловитова // Молодой исследователь: вызовы и перспективы: сб. ст. по материалам ССХС Международной научно–практической конференции «Молодой исследователь: вызовы и перспективы. Москва: Изд. «Интернаука». – 2023. – № 1(290). – С. 325 – 328.

100. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах

электроснабжения общего назначения [Текст]: ГОСТ 13109–97. – Введ.1999.01.01. – Минск: ИПК Издательство стандартов, 1998. – 35 с.

101. Andreev, V. V. Calculation of a relative actualized transformer power of a traction substation on insulation aging. / V. V. Andreev, V. A. Grechishnikov, N. N. Privezentsev, M. V. Shevlyugin // Russian Electrical Engineering. – 2011. – 82(8). – стр. 441–444.

102. Andreev, V. V. Integral characteristics of branched tractional power-supply systems. / V. V. Andreev, M. V. Shevlyugin, V. A. Grechishnikov // Russian Electrical Engineering. – 2012. – 83(12). – стр. 672–675.

103. Arai Y., Seino H., Yoshizawa K., Nagashima K., Development of superconducting magnetic bearing with superconducting coil and bulk superconductor for flywheel energy storage system. / Y. Arai, H. Seino, K. Yoshizawa, K. Nagashima // Physica C: Superconductivity. – 2013. – T. 494. – P. 250–254

104. Baranov, L.A. Estimation of efficiency of stationary capacitor storage in subway based on experimental measurements of the operation of traction power-supply system / L. A. Baranov, Yu. A. Brodskii, V. A. Grechishnikov, V. N. Pupynin, M. V. Shevlyugin // Russian Electrical Engineering. – 2010. – 81(1). – P. 42–44.

105. Baranov, L. A. Performance indices of stationary energy storage in the traction substations of the Moscow Metro / L. A. Baranov, V. A. Grechishnikov, A. V. Ershov, M. D. Rodionov, M. V. Shevlyugin // Russian Electrical Engineering. – 2014. – 85(8). – P. 493–497.

106. Becker, H.I.: Low voltage electrolytic capacitor, U.S.-Patent 2800616 33./ H.I. Becker, R.A. Rightmire // «Electrical energy storage apparatus», U.S. Patent 3288641.

107. Benamira Nadir The investigation of induction motors under abnormal condition / Nadir Benamira, Rachedi Mohamed Faouzi, Ahmed Bouraiou // The Online Journal of Science and Technology. 2013. –Vol. 3. – Issue 4. – P. 150 —158.

108. Berndt, M.M. Derating of polyphase induction motors operated with unbalanced line voltages / M.M. Berndt, N.L. Schmitz // AIEE Trans. Power Apparatus Syst. –1963. – Vol. 81. – pp. 680—686.

109. Bhargava., B. Railway electrification systems and configurations / B Bhargava // IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, 1999. – Vol. 1. – P. 445—450.
110. Brodskii, Yu. A. Stationary system based on capacitive energy storage units to accumulate energy recuperation of metro electric rolling stock. / Yu. A. Brodskii, A. I. Podaruev, V. N. Pupynin, M. V. Shevlyugin // Russian Electrical Engineering. – 2008. – 79(7). – p. 385–388.
111. Filatov Alexei Flywheel Energy Storage System with Homopolar Electrodynamic Magnetic Bearing / Alexei Filatov, Patrick McMullen, Kent Davey, Richard Thompson // Tenth International Symposium on Magnetic Bearings. – 2006.
112. Genta, G. Kinetic Energy Storage: Theory and Practice of Advanced Flywheel Systems. / G Genta. – London, UK: Butterworth-Heinemann, 1995. – 374 c.
113. Gillespie, A. J. Energy storage in Pennsylvania: SEPTA's novel and innovative integration of emerging smart grid technologies. / A. J. Gillespie, E. S. Johanson, D. T. Montvydas // IEEE Veh. Technol. Mag. – 2014. – vol. 9. – № 2. – pp. 76–86.
114. Grechishnikov, V. A. Converting unit of capacitor reserves for metro power-supply system. / V. A. Grechishnikov, A. I. Podaruev, M. V. Shevlyugin // Russian Electrical Engineering. – 2011. – 82(5). – c. 248–252.
115. Hope, R. UltraCaps Win Out in energy storage. / R. Hope // Railway Gazette International. – 2006. – vol. 162 (7). – pp. 405–406.
116. Klyachko, L. M. A model of a combined subway traction substation taking traction load and consumers' auxiliaries into account / L. M. Klyachko, M. V. Shevlyugin, M. N. Belov, A. E. Golitsyna // Russian Electrical Engineering. – 2021. – T. 92. – № 9. – C. 488-491.
117. Konishi, T. Fixed energy storage technology applied for DC electrified railway. / T. Konishi, H. Morimoto, T. Aihara, M. Tsutakawa // IEEJ Trans. Electr. Electron. – 2010. – vol. 5. – no. 3. – pp. 270–277.
118. Korolev, A. Modeling of energy saving in substations feeding dc metro systems based on appropriate location of energy storage elements / A. Korolev, M.

Shevlyugin, M. Belov, D. Pletnev, A. Murzintsev, K. Zhgun // Proceedings of the 3rd 2021 international youth conference on radio electronics, electrical and power engineering, reepe. – 2021. – p. 9388021.

119. Kotel'nikov, A. V. Distributed generation of electric energy in traction power-supply systems of railways based on wind-power plants. / A. V. Kotel'nikov, M. V. Shevlyugin, A. A. Zhumatova // Russian Electrical Engineering. – 2017. – 88(9). – c. 586–591.

120. Lee Hanmin, Field Tests of DC 1500 V Stationary Energy Storage System / Lee Hanmin, Kim Gildong, Lee Changmu, Joung Euijin // IJR International Journal of Railway. – 2012. – Vol. 5. – No. 3. – pp. 124-128.

121. Liu, Shuai Review on reliability of supercapacitors in energy storage applications / Shuai Liu, Li Wei, Huai Wang // Applied Energy. – 2020. – vol. 278.

122. Mustafa E. Amiryar A Review of Flywheel Energy Storage System Technologies and Their Applications / Mustafa E. Amiryar, Keith R. Pullen // Applied Sciences. – 2017. – Vol. 7. – pp. 286.

123. Okui, A. Application of energy storage system for railway transportation in Japan / A. Okui, S. Hase, H. Shigeeda, T. Konishi, T. Yoshi // in Power Electronics Conference (IPEC). – 2010. – pp. 3117–3123.

124. Tremblay, Olivier Experimental Validation of a Battery Dynamic Model for EV Applications / Olivier Tremblay, Louis-A. Dessaint // World Electric Vehicle Journal. – 2009. – Vol. 3. – p. 289–298.

125. Omid Palizban Energy storage systems in modern grids—Matrix of technologies and applications / Omid Palizban, Kimmo Kauhaniemi // Journal of Energy Storage. – 2016. – №6. – p. 248–259.

126. Qiang, Z. Ultra-long cycle life, low-cost room temperature sodium-sulfur batteries established by highly doped (N,S) nanoporous carbons. / Z. Qiang, Y.-M. Chen, Y. Xia // Nano Energy. – 2017. – Vol. 32. – P. 59–66.

127. Radcliffe, P. Stationary applications of energy storage technologies for transit systems / P. Radcliffe, J. S. Wallace, L. H. Shu // 2010 IEEE Electr. Power Energy Conf. – 2010. – pp. 1–7.

128. Rebrov, I. Electric power accumulators in system of supplying railways with traction energy by direct current. / I. Rebrov, M. Shevlyugin, A. Kotelnikov, D. Ermolenko // MATEC Web of Conferences. – 2018. – P. 239.

129. Ryabchik, T. A. Quality assessment of electric energy of compatible traction underground substation / T. A. Ryabchik, E. E. Smirnova, M. N. Belov, A. A. Sidrakov, A. E. Golitsyna, M. V. Shevliugin // В сборнике: Proceedings of the 2022 Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, ElConRus 2022. – 2022. – P. 1257–1259.

130. Ryabchik, T. A. Digital monitoring and assessment of lifetime of underground substation traction units / T. A. Ryabchik, E. E. Smirnova, V. A. Grechishnikov, A. A. Sidrakov, Y. N. Korol, M. V. Shevliugin // В сборнике: Proceedings of the 2022 Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, ElConRus 2022. – 2022. – С. 1254-1256.

131. Sabihuddin, S. A Numerical and Graphical Review of Energy Storage Technologies. / S. Sabihuddin, A. Kiprakis, M. Mueller // Energies. – 2014. – №8. – с. 172–216.

132. Samarjeet Singh Siwal Carbon-Based Polymer Nanocomposite for High-Performance Energy Storage Applications / Samarjeet Singh Siwal, Qibo Zhang, Nishu Devi, Vijay Kumar Thakur // Polymers. – 2020. – №12. – p. 505.

133. SEPTA's (Southeastern Pennsylvania Transit Authority) Wayside Energy Storage Project // [Официальный сайт организации:] URL: <https://www.septa.org>. (дата обращения: 11.11.2022).

134. Shepherd, C. M. Design of Primary and Secondary Cells. Part 2. An Equation Describing Battery Discharge / C. M. Shepherd // Journal of Electrochemical Society. – 1965. – Vol. 112. – Iss. 7. – P. 657–664.

135. Shevlyugin, M. Energy-saving technologies in rail transportation using energy receptacles. / M. Shevlyugin // Scientific Papers of the Institute of Electrical Engineering Fundamentals of Wroclaw Technical University Conferences. – 2006. – №43. – стр. 67–76.

136. Shevlyugin, M. V. Experimental Estimation of the Quality of Electric Power in the Auxiliary Networks of a Combined Traction Substation of the Subway / M. V. Shevlyugin, A. E. Golitsyna, M. N. Belov, D. S. Pletnev // RUSSIAN ELECTRICAL ENGINEERING. – 2022. – Vol. 93. – No. 9. – C. 616-620.

137. Shevlyugin, M. V. Power-saving circuits of railway traction power supply based on superconducting inductive energy storage. / M. V. Shevlyugin // Russian Electrical Engineering. – 2008. – №79(7). – c. 377–381.

138. Shevlyugin, M. V. Experimental Estimation of the Quality of Electric Power in the Auxiliary Networks of a Combined Traction Substation of the Subway / M. V. Shevlyugin, A. E. Golitsyna, M. N. Belov, D. S. Pletnev // RUSSIAN ELECTRICAL ENGINEERING. – 2022. – Vol. 93. – No. 9.– C. 616–620.

139. Shevlyugin, M.V. Increasing power supply reliability for auxiliaries of subway traction substations using energy storage devices. / M. V. Shevlyugin, A. E. Golitsyna, M. N. Belov, D. S. Pletnev // Russian Electrical Engineering. – 2020. – T. 91. – № 9. – C. 552–556.

140. Shevlyugin M.V. Electric Stock Digital Twin in a Subway Traction Power System. / M. V. Shevlyugin, A. A. Korolev, A. E. Golitsyna, D. S. Pletnev // Russian Electrical Engineering. – 2019. – №90(9). – c. 647–652.

141. Shevlyugin, M. V. A Digital Model of a Traction Substation with Two Types of Current. / M. V. Shevlyugin, A. A. Korolev, A. O. Korolev, I. A. Aleksandrov // Russian Electrical Engineering. – 2018. – №89(9). – c. 540–545.

142. Shevlyugin M.V. An experimental study of the autonomous operation of subway electric rolling stock / M. V. Shevlyugin, D. S. Pletnev, M. D. Glushchenko, K. S. Zheltov // Russian Electrical Engineering. – 2021. – T. 92. – № 9. – C. 485–487.

143. Siemens Transportation Systems – Shaping Tomorrow’s Railways, Japan Railway & Transport Review. – 2005. – pp. 27–28.

144. Shunt power capacitors of the self-healing type for a.c. systems having a rated voltage up to and including 1 000 V - Part 1: General - Performance, testing and rating - Safety requirements - Guide for installation and operation IEC 60831- 1:2014.

145. Smith, A.C. Calculation and measurement of unbalanced magnetic pull in cage induction motors with eccentric rotors. I. Analytical model / A.C. Smith, D.G. Dorrell // IEE Proceedings Electric Power Applications, 1996. – Vol.143. – №3. – P. 193–201.

146. Souto, O. Induction motors thermal behavior and life expectancy under nonideal supply conditions / O. Souto, J. Oliveira, L. Neto // IX Int. Conf. Harmonics and Quality of Power, Orlando, FL, 2000.

147. Spyros, I. Control strategy for enhancing the Fault Ride-Through capability of a microgrid during balanced and unbalanced grid voltage sags / I. Spyros, Gkavanoudis, S. Charis, A. Demoulias // Sustainable Energy, Grids and Networks. – 2015– Vol. 3. – P. 1–11.

148. Tulskey, V. Application of ETAPtm ETRAXtm software package for digital simulation of distribution network that feeds an ac traction power supply system. / V. Tulskey, A. Murzintsev, K. Zhgun, M. Silaev, N. Khripushkin, M. Shevlyugin, A. Korolev, K. Subhanverdiev, R. Baembitov // В сборнике: E3S Web of Conferences. Сер. "ENERGY-21 - Sustainable Development and Smart Management" – 2020. – С. 07011.

149. Tulskey, V. Application of ETAPTMeTraXTM software package for digital simulation of distribution network that feeds an AC traction power supply system. / V. Tulskey, M. Shevlyugin, A. Korolev, N. Khripushkin, R. Baembitov // E3S Web of Conferences. – 2020. – С. 209.

150. Xuan Liu Energy storage devices in electrified railway systems: A review / Xuan Liu, Kang Li // Transportation Safety and Environment. – 2020. – Vol. 00. – No. 0 – p. 1–19.

151. Елшібеков А. Энергия жинақтағыштарды электржылжымалы құрамының өзінеқажетті қондырғыларды қоректендіру жүйесіне пайдалану мүмкіндігін талдау / А. Елшібеков, С. Абдуллаев, М. Шевлюгин, Ғ. Бақыт // Вестник Казахской академии транспорта и коммуникаций им. М. Тынышпаева. – 2022. – № 2 (121). – С. 88-96.