

На правах рукописи



БЕЛОВ Михаил Николаевич

**СТАЦИОНАРНЫЙ УПРАВЛЯЕМЫЙ НАКОПИТЕЛЬ ЭНЕРГИИ В  
СИСТЕМЕ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ МЕТРОПОЛИТЕНА**

2.4.2. Электротехнические комплексы и системы

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Москва – 2024

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

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

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

**Заруцкая Татьяна Алексеевна,**  
кандидат технических наук, доцент,  
заведующая кафедрой «Автоматизированные  
системы электроснабжения» федерального  
государственного бюджетного образовательного  
учреждения высшего образования «Ростовский  
государственный университет путей  
сообщения».

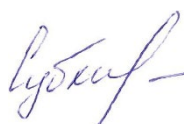
Ведущее предприятие: Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего  
образования «Петербургский государственный  
университет путей сообщения Императора  
Александра I».

Защита диссертации состоится «17» апреля 2024 г. в 15:00 часов  
на заседании диссертационного совета 40.2.002.11 на базе федерального  
государственного автономного образовательного учреждения высшего  
образования «Российский университет транспорта» по адресу: 127994, г. Москва,  
ул. Образцова, д. 9, стр.9., ауд. 2505.

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

Автореферат разослан «\_\_» февраля 2024 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Субханвердиев Камиль Субханвердиевич

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

### **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, 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. Феоктистов, 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 двухпутный 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 совмещенных 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.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка используемых источников. Общий объем диссертации составляет 183 страницы, включая 129 иллюстраций, 15 таблиц, список использованных источников из 151 наименования.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе произведён сравнительный анализ различных типов накопителей и определены критерии, на основании которых можно произвести подбор накопителей энергии. Выделено 6 основных критериев выбора типа накопителей:

- Удельная энергоёмкость;
- Удельная мощность;
- Величина саморазряда;
- Цикличность;
- Коэффициент полезного действия (КПД) цикла заряд/разряд;
- Срок службы.

Также был проанализирован российский и мировой опыт внедрения накопителей энергии различных систем в системы тягового электроснабжения городского транспорта.

Во второй главе была предложена схема и конструкция управляемого накопителя энергии, предназначенная для применения в московском метрополитене, определены потенциальные места его подключения в системе тягового электроснабжения и предложена методика определения подстанций, оборудование которых управляемыми накопителями энергии наиболее эффективно. На рисунке 1 изображена принципиальная схема управляемой накопительной установки.

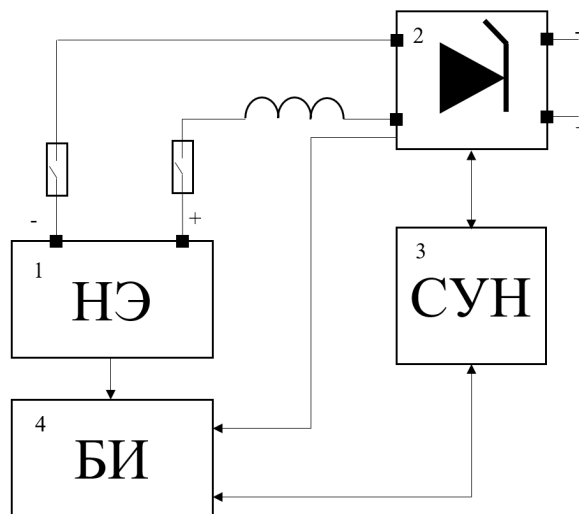


Рисунок 1 — Принципиальная схема управляемой накопительной установки: 1 – накопительный элемент, 2 – DC-DC преобразователь, 3 – система управления накопителем (СУН), 4 – блок измерений.

Предлагается использовать конструкцию, отвечающую следующим принципам:

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

Были выявлены основные положительные эффекты от внедрения УНЭ в качестве оборудования СТП метрополитенов в зависимости от выполняемых ими

функций. Схема расположения УНЭ в составе оборудования СТП представлена на рисунке 2.

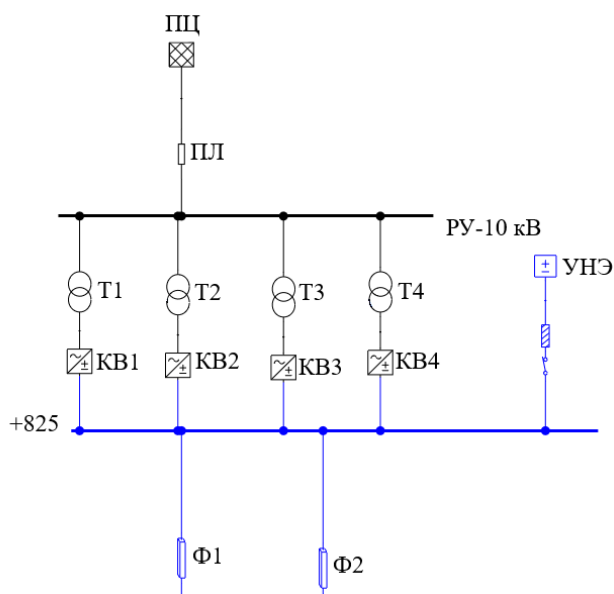


Рисунок 2 — Принципиальная схема расположения накопителя энергии в программной среде ЕТАР

Накопитель энергии может располагаться и вне тяговой подстанции. В таком случае он, обычно, выполняет усиливающую функцию, избавляя от необходимости в установке дополнительной 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 3).

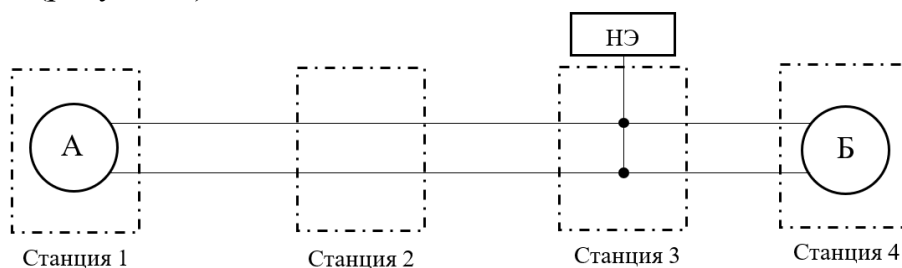


Рисунок 3 — Принципиальная схема подключения накопителя энергии

На железных дорогах и в метро иногда можно встретить консольные режимы питания. Часто эти режимы являются временными 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 и повышая риск возникновения новых чрезвычайных ситуаций. Это 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.

Из проанализированного опыта применения накопителей энергии в России и мире, а также исходя из произведённой оценки технических свойств различных типов накопителей энергии были выявлены наиболее перспективные для использования в СТЭ метрополитенов: электрохимические аккумуляторные батареи литий-ионной системы с высокой цикличностью, батареи суперконденсаторов и маховиковые накопители кинетической энергии.

Предложена 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.

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:

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

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. Матрица  $Z_y$  может быть определена следующим выражением:

$$Z_y = (M \cdot Z_B^{-1} \cdot M_t)^{-1} = (M \cdot Y_B \cdot M_t)^{-1} \quad (2)$$

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.

В рамках исследования было произведено обследование межподстанционных зон Т-12 – Т-6 и Т-6 – Т-718 Арбатско-Покровской линии Московского метрополитена для оценки возможности установки УНЭ, в ходе которого было выявлено наличие

площадей, потенциально пригодных для размещения оборудования в канализационных камерах.

**В третьей главе** представлены математические модели основных узлов управляемого накопителя энергии. Разработаны модели накопительных элементов для литий-ионного и суперконденсаторного типов батарей, одноцепного и двухцепного преобразователя постоянного напряжения с управлением по уровню напряжения и уровню тока, представлены алгоритмы работы системы управления управляемого накопителя энергии для работы в режимах принятия энергии рекуперации и снижения установленной мощности подстанции.

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 функция тока батареи принимает следующий вид:

$$i(V, it) = \frac{V - E_0 - C + V_{poll}}{R}, \quad (3)$$

где:

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

$$it = \frac{SoD}{Q_{Max}}; \quad (4)$$

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

$$C = A \cdot e^{(-B \cdot it)}; \quad (5)$$

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

$$V_{poll} = K \frac{Q_{Max}}{Q_{Max} - it} \cdot it; \quad (6)$$

- $R$  – сопротивление батареи, Ом;

$$R = K \frac{Q_{Max}}{it - 0,001 \cdot Q_{Max}} + R_0 \text{ для режима заряда}; \quad (7)$$

$$R = K \frac{Q_{Max}}{Q_{Max} - it} + R_0 \text{ для режима разряда}; \quad (8)$$

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.

$$V(i, it) = E_0 - V_{poll} + C - R \cdot i, \quad (9)$$

где:

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

$$it = \frac{SoD}{Q_{Max}}; \quad (10)$$

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

$$C = A \cdot e^{(-B \cdot it)}; \quad (11)$$

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

$$V_{poll} = K \frac{Q_{Max}}{Q_{Max} - it} \cdot it \quad (12)$$

- $R$  – сопротивление батареи, Ом;

$$R = K \frac{Q_{Max}}{it - 0,001 \cdot Q_{Max}} + R_0 \text{ для режима заряда}; \quad (13)$$

$$R = K \frac{Q_{Max}}{Q_{Max} - it} + R_0 \text{ для режима разряда}; \quad (14)$$

Результаты моделирования литий ионной батареи представлены на рисунках 6–

8:

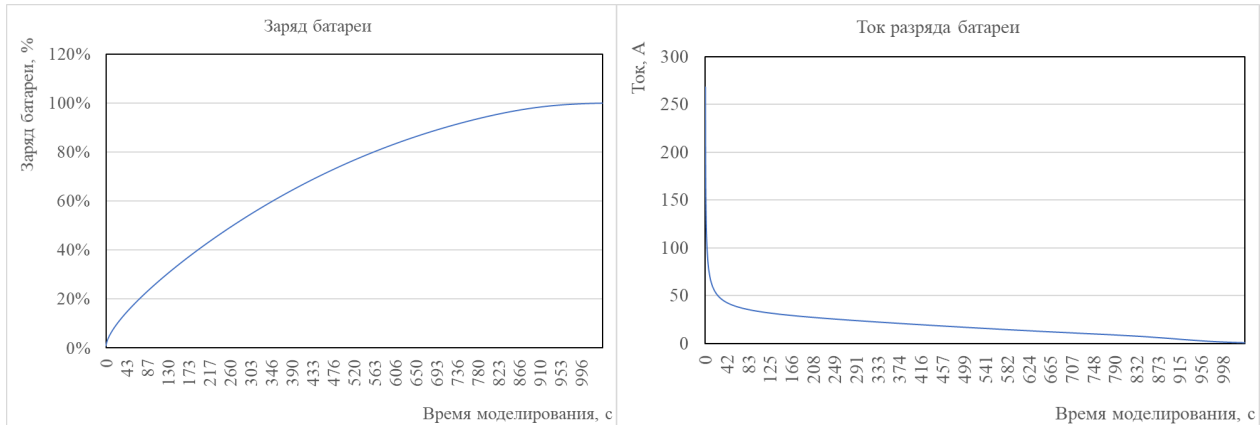


Рисунок 6 — Заряд и ток литий-ионной батареи в процессе заряда постоянным напряжением

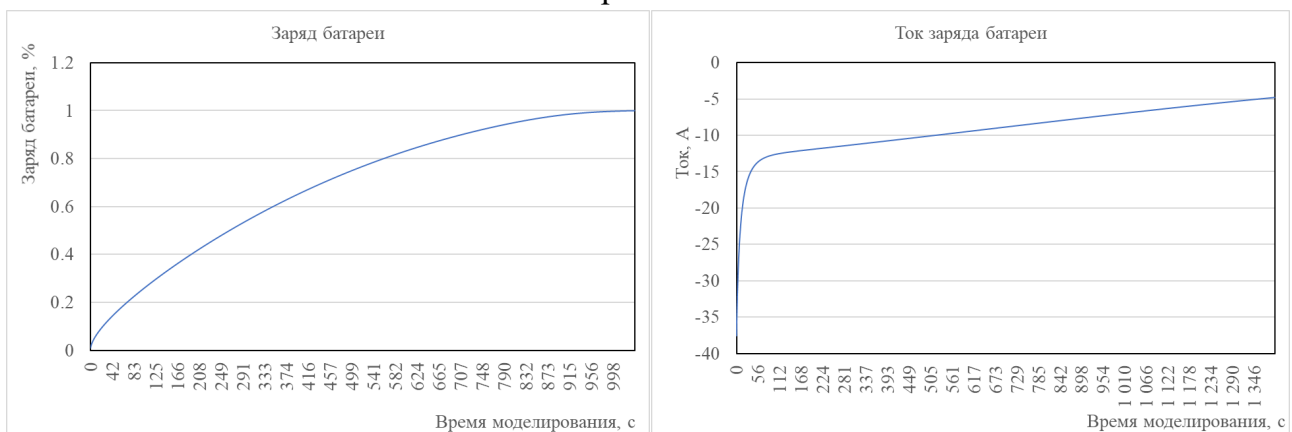


Рисунок 7 — Заряд и ток литий-ионной батареи в процессе разряда на постоянном напряжении

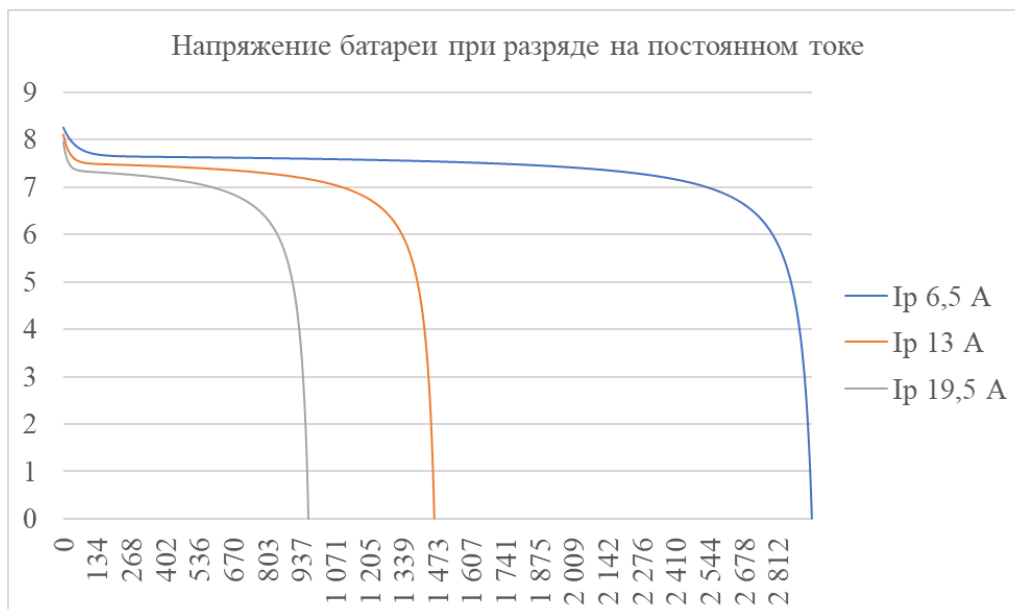


Рисунок 8 — разрядные характеристики литий-ионной батареи при токах разряда 6.5, 13, 19.5 А

Для моделирования суперконденсаторных батарей использована схема замещения из последовательно соединённых внутреннего сопротивления батареи  $R_{вн}$ , Ом, и ёмкости накопительного элемента  $C_б$ , Ф. Положительное направление тока накопительного элемента  $I_б$  соответствует режиму разряда.

Напряжение суперконденсатора определяется согласно выражению 15:

$$u_{сб}(t) = u_c(t) + \Delta u(t) = \int_0^t (i_б(t) \cdot dt) + i_б(t) \cdot R_{вн}; \quad (15)$$

Ток суперконденсатора определяется согласно выражению 16:

$$i_б(k-1) = \frac{U_{сбk} \cdot C - q(k-1)}{R_{вн} \cdot C}. \quad (16)$$

Результаты моделирования литий ионной батареи представлены на рисунках 10–12:

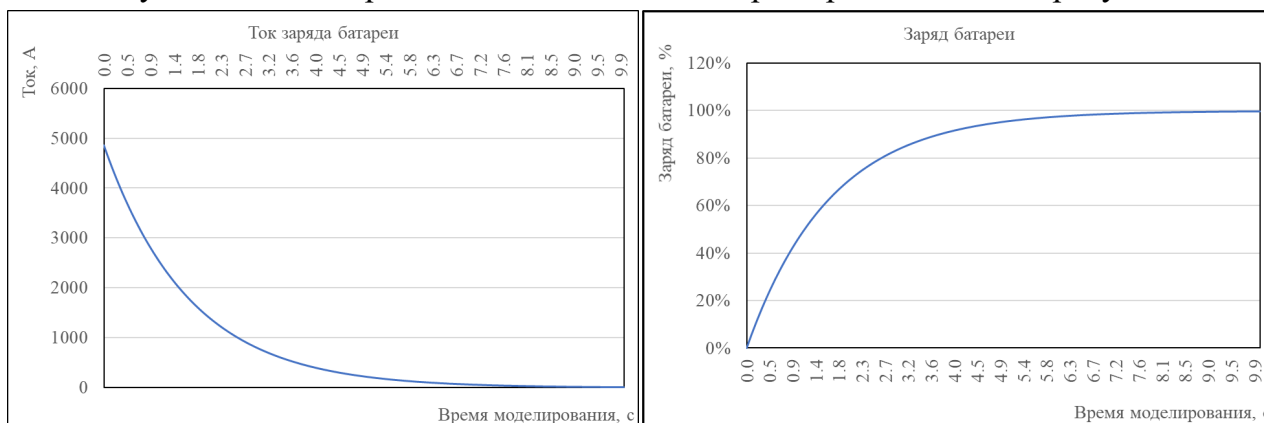


Рисунок 10 — Заряд и ток суперконденсаторной батареи в процессе заряда постоянным напряжением

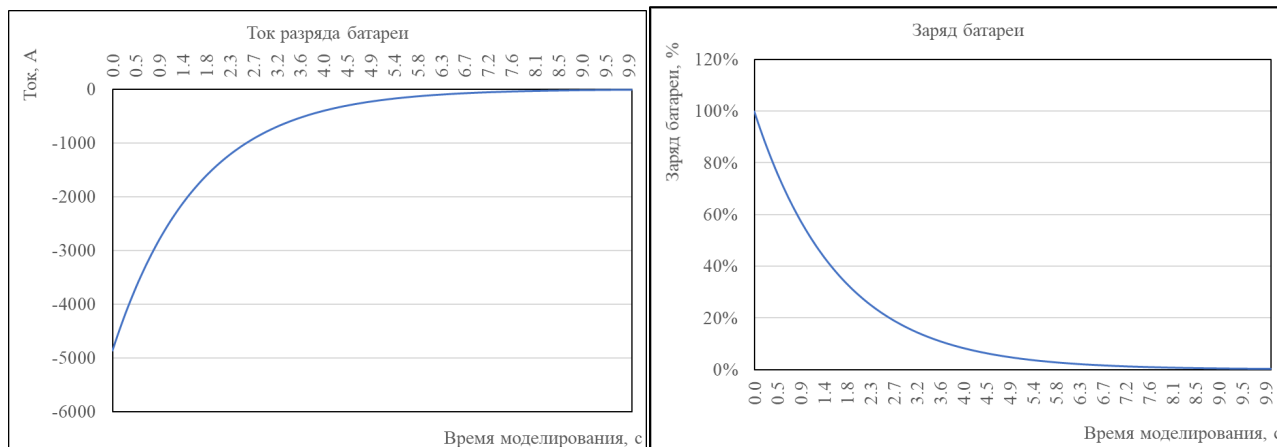


Рисунок 11 — Заряд и ток суперконденсаторной батареи в процессе разряда на постоянном напряжении

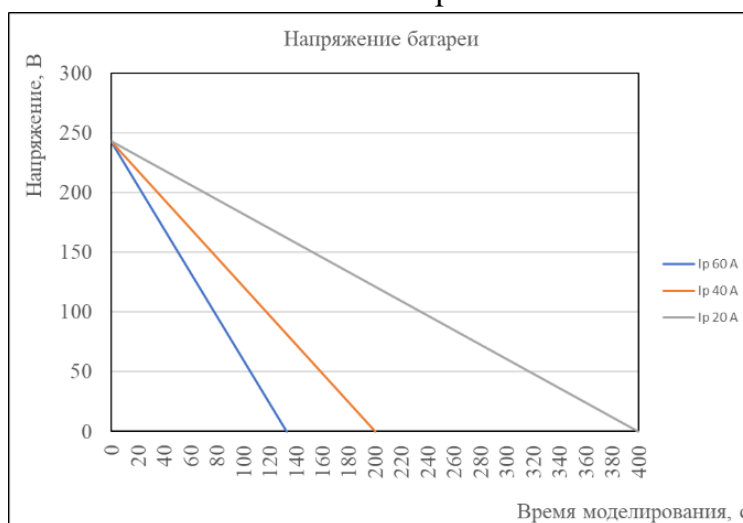


Рисунок 12 — разрядные характеристики литий-ионной батареи при токах разряда 20, 40, 60 А

Система управления литий-ионных накопителей и суперконденсаторных батарей принципиально не отличаются друг от друга, потому их можно описать одной математической моделью. Была описана модель системы управления УНЭ в режиме принятия избыточной энергии рекуперации. В качестве постановки задачи, определены 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.

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**. Можно выделить три состояния, в которых может находиться система управления накопителем энергии: «Заряд», «Разряд» и «Простой».

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  $Q_{б}$ . 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 13):

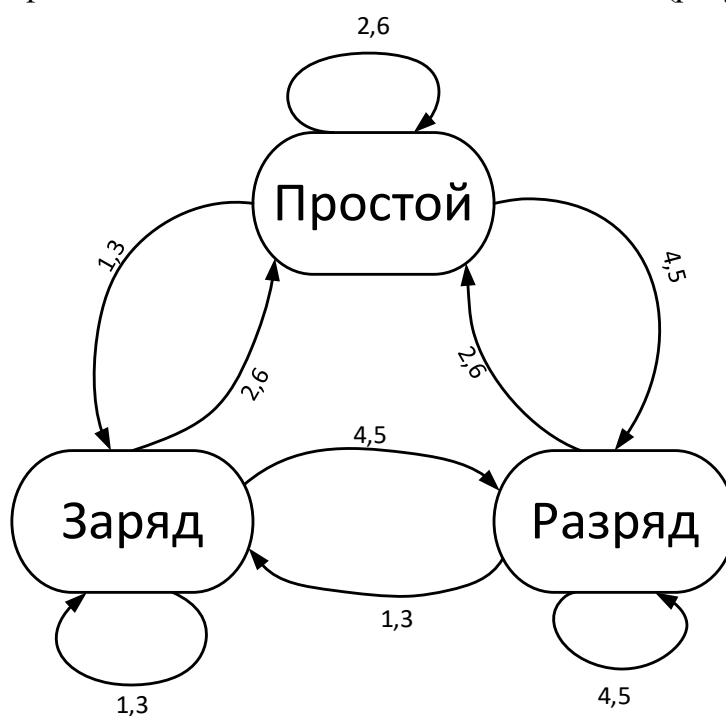


Рисунок 13 — Граф состояний модели системы управления накопителем энергии в режиме принятия энергии рекуперации.

Сформулируем основную задачу для построения системы управления в режиме снижения установленной мощности: 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  $I_{np}$ . В обратном случае система должна подзаряжать накопитель малыми токами.

Составим полный перечень вариантов переходов между состояниями:

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

$$I_{\text{ТП}} > I_{\text{пр}}; Q_6 > Q_{\text{max}}; (2)$$

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

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

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

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

где:

$I_{\text{пр}}$  — предельный уровень тока подстанции, В;

$Q_{\text{min}}$  — минимально допустимый уровень заряда батареи (глубина разряда), %;

$Q_{\text{max}}$  — максимальный уровень заряда батареи, %.

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

Построим граф в соответствии с описанными состояниями (рисунок 14):

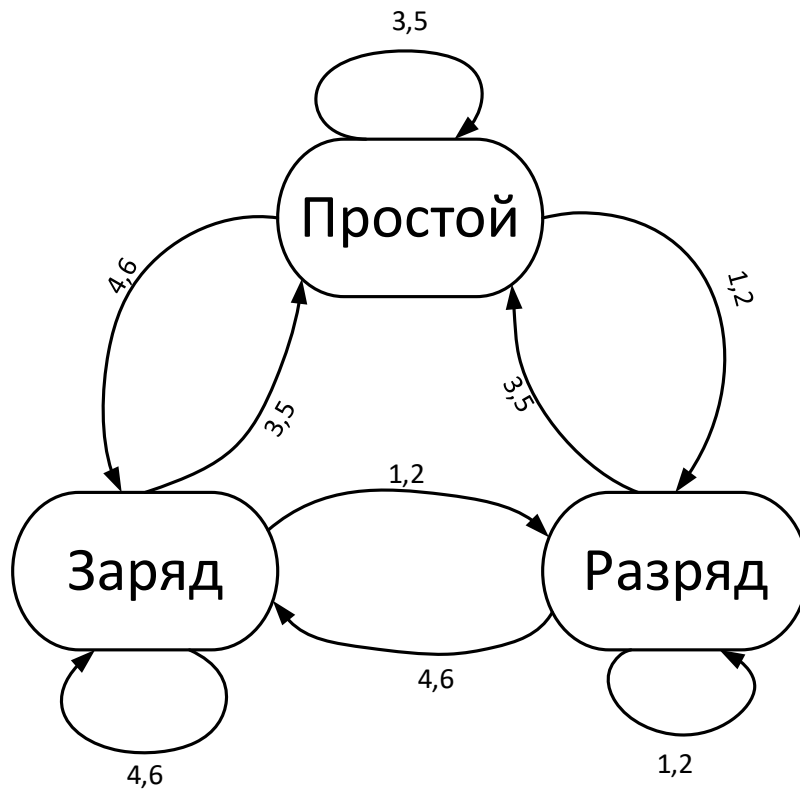


Рисунок 14 — Граф состояний модели системы управления накопителем энергии в режиме снижения установленной мощности.

Для реализации модели DC-DC преобразователя использовалась система визуального моделирования MatLab Simulink, библиотека SimPowerSystems. Визуально блочная модель (рисунок 15) воспроизводит схему замещения одноцепного преобразователя. Управляющий сигнал генерируется системой генерации управляющего сигнала (СГУС) (рисунок 16).

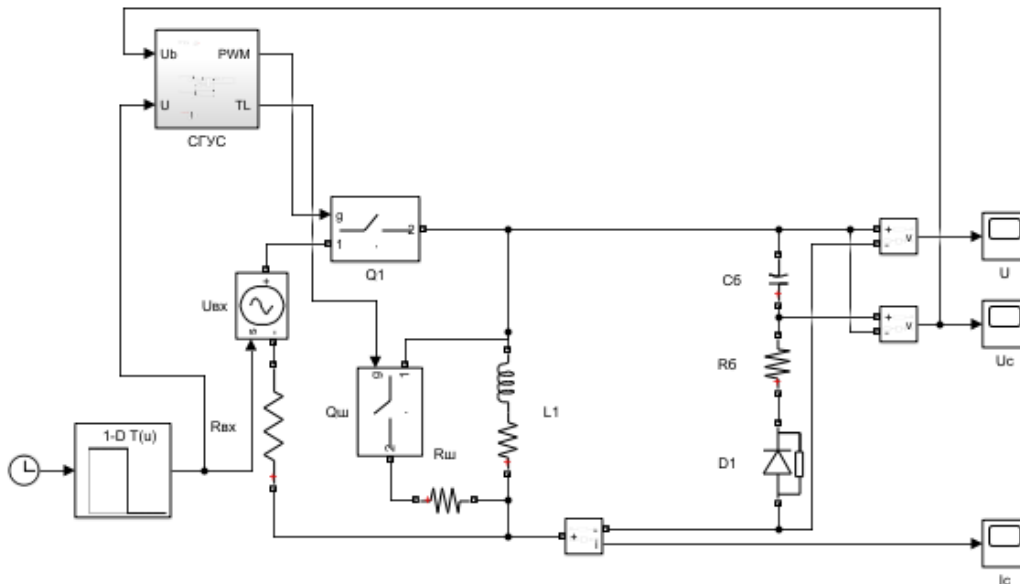


Рисунок 15 — Модель заряда накопителя энергии одноцепным DC-DC преобразователем в MatLab Simulink.

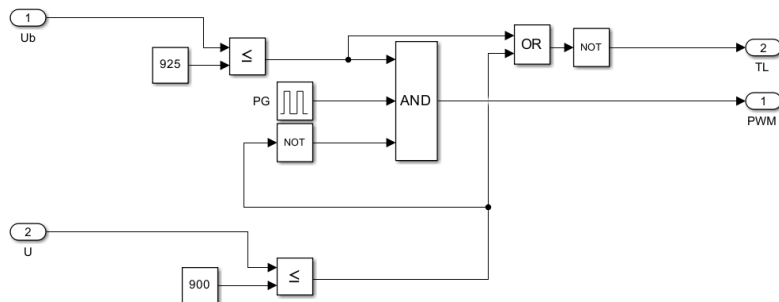


Рисунок 16 — Логическая схема системы генерации управляющего сигнала.

Построены осциллограммы напряжения батареи и зарядного тока (рисунок 17). 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 быстрдействие данного преобразователя недостаточно. Рассмотрим способы увеличения мощности преобразователя.

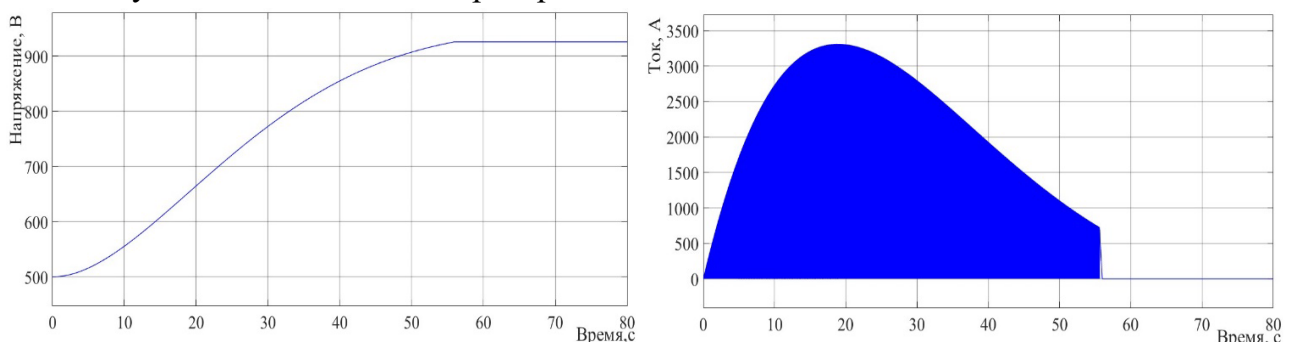


Рисунок 17 — Осциллограммы напряжения и тока суперконденсаторного накопителя энергии в процессе заряда DC-DC преобразователем.

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 18). 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 19).

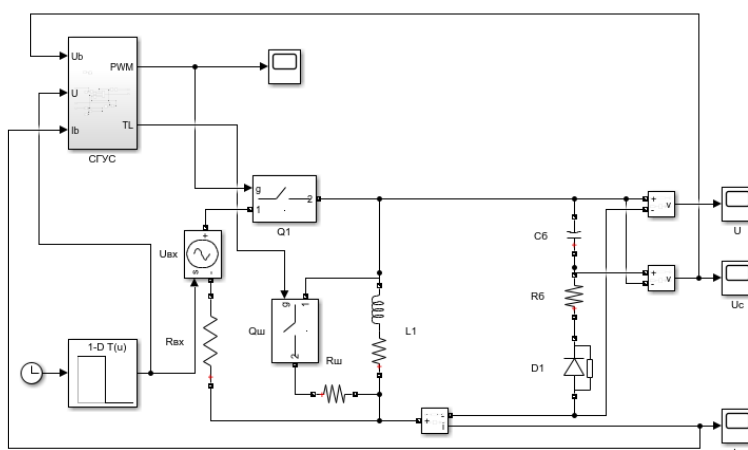


Рисунок 18 — Модель заряда накопителя энергии одноцепным DC-DC преобразователем с регулированием шириты управляющего импульса в MatLab Simulink.

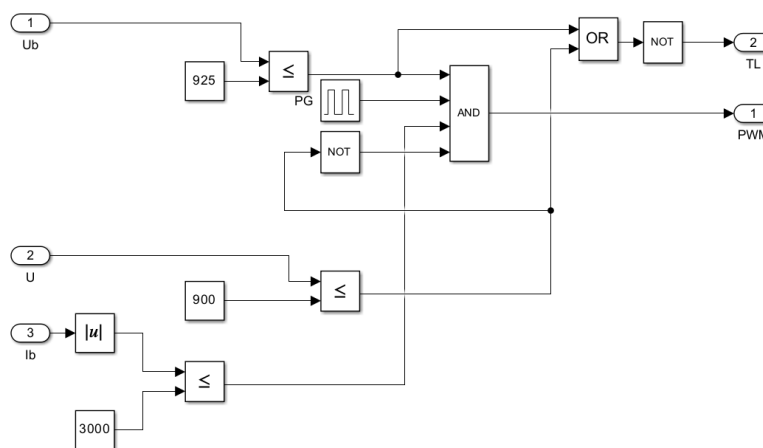


Рисунок 19 — Логическая схема системы генерации управляющего сигнала с регулированием шириты управляющего импульса.

Из осциллограмм тока и напряжения (рисунки 20) 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.

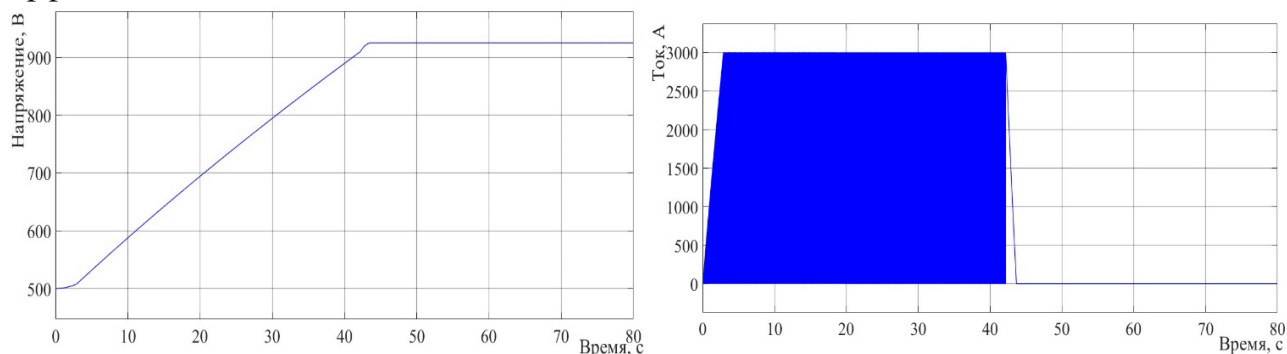


Рисунок 20 — Осциллограммы напряжения и тока суперконденсаторного накопителя энергии в процессе заряда DC-DC преобразователем с регулированием ширины управляющего сигнала.

Построена модель двухцепного преобразователя в MatLab Simulink (рисунки 25, 26).

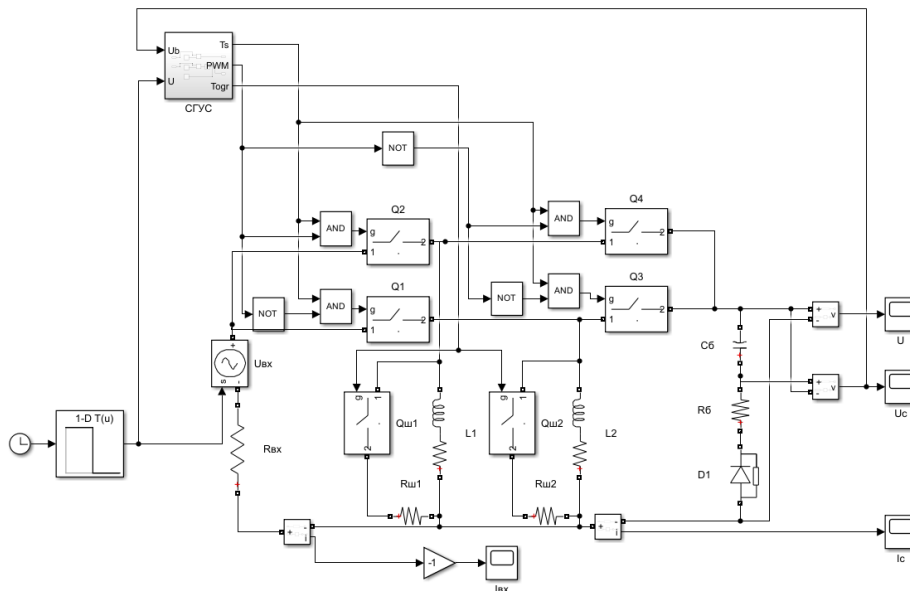


Рисунок 21 — Модель заряда накопителя энергии двухцепным DC-DC преобразователем в MatLab Simulink.

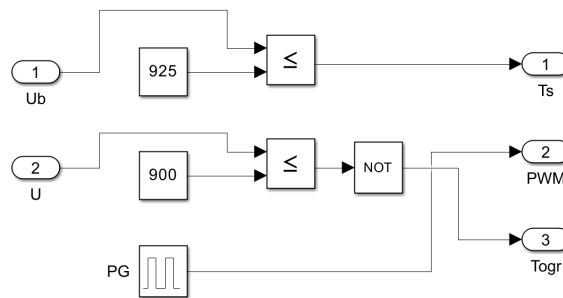


Рисунок 22 — Логическая схема системы генерации управляющего сигнала для двухцепной схемы DC-DC преобразователя.

Для релевантного сравнения режимов заряда двух преобразователей, индуктивность 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 (рисунок 23).

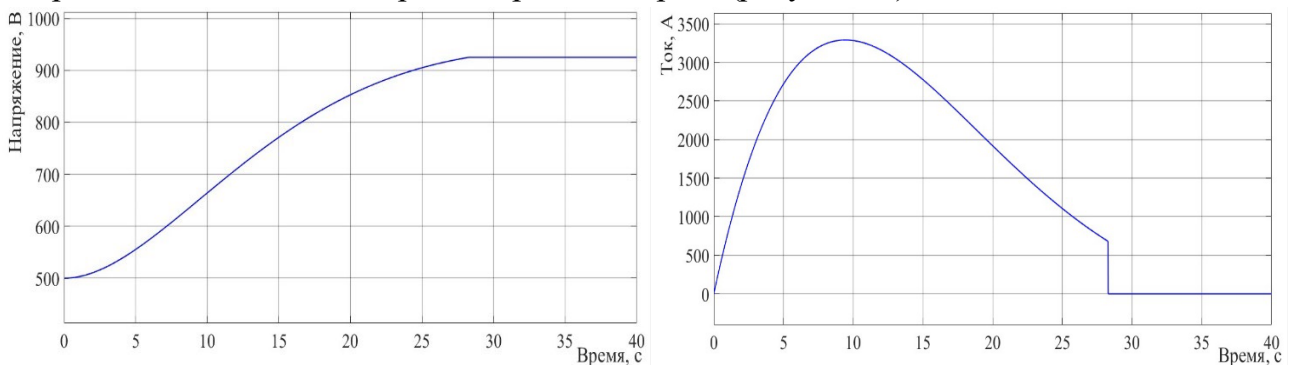


Рисунок 23 — Осциллограммы напряжения и тока суперконденсаторного накопителя энергии в процессе заряда двухцепным DC-DC преобразователем.

В четвёртой главе представлены результаты имитационного моделирования УНЭ в СТЭ в разных конфигурациях.

Приведена оценка эффективности установки разного объёма на одной исследуемой подстанции. 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 (рисунок 24).

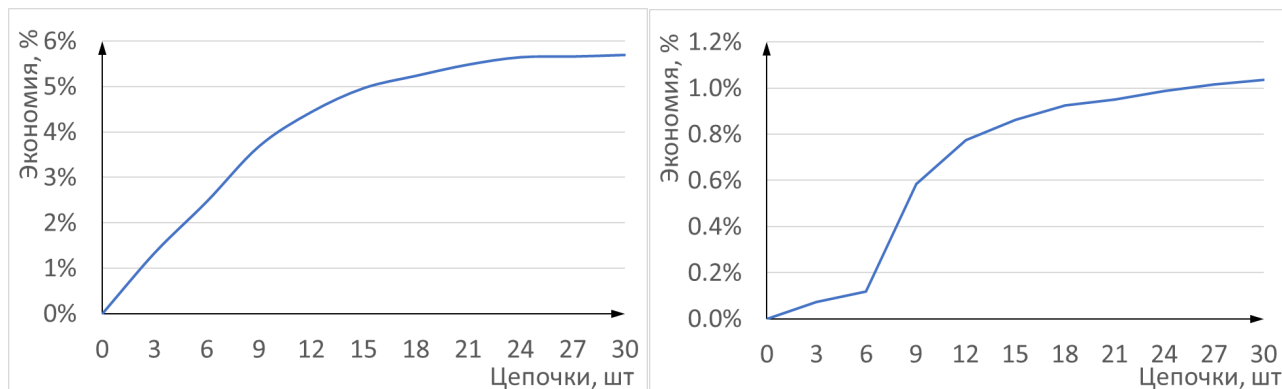


Рисунок 24 — Зависимость снижения потребления энергии подстанцией СТП-6 (слева) и всей линией (справа)

Проанализировано изменение эффективности рекуперативного торможения от числа подстанций линии, оборудованных УНЭ (рисунок 25).

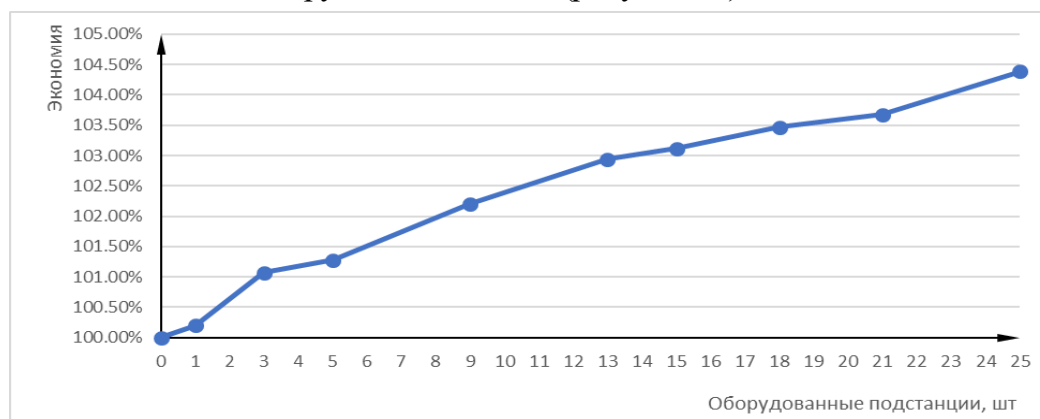


Рисунок 25 — Изменение энергоэффективности рекуперации от числа подстанций с накопителями.

Произведена оценка внедрения накопителя энергии в централизованной СТЭ. 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.

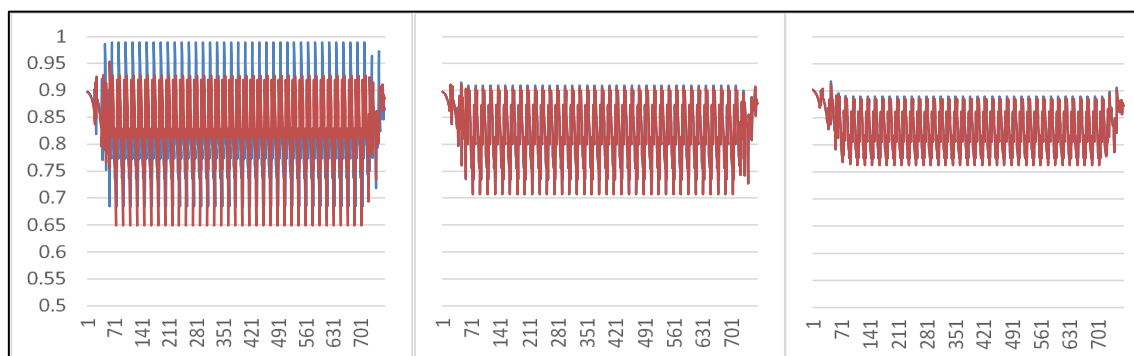


Рисунок 26 — Напряжение на усиливаемой платформе в трёх исследованных режимах

Отследим изменения токов подстанций (Таблица 2).

Таблица 2 — 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%

Произведена оценка внедрения накопителя энергии на участке с консольным питанием. В результате моделирования прохождения 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%).

Произведена оценка методики выбора мест установки накопителей, представленной во второй главе. По значениям матриц  $C, Z_y$  были оценены влияния всех рекуперующих составов на ветви с накопителями каждой из тяговых подстанций.

$$\text{Влияние } C = \sum_{i=1}^{N_{\text{вет нак}}} \sum_{j=1}^{N_{\text{узлов ЭПС}}} C_{i,j}, \quad (17)$$

$$\text{Влияние } CZ_y = \sum_{i=1}^{N_{\text{вет нак}}} \sum_{j=1}^{N_{\text{узлов ЭПС}}} C_{i,j} \cdot Z_{y,i,j}, \quad (18)$$

$$\text{Влияние } Z_y = \sum_{i=1}^{N_{\text{узел шин ТП}}} \sum_{j=1}^{N_{\text{узлов ЭПС}}} Z_{y,i,j}. \quad (19)$$

Полученные результаты представим в процентах эффективности накопления энергии рекуперации в зависимости от числа тяговых подстанций, оборудованных накопителями.

$$\text{Процент } C = \forall_i \left( \text{Влияние } C_i / \max_i (\text{Влияние } C_i) \cdot 100\% \right), \quad (20)$$

$$\text{Процент } CZ_y = \forall_i \left( \text{Влияние } CZ_{y,i} / \max_i (\text{Влияние } CZ_{y,i}) \cdot 100\% \right), \quad (21)$$

$$\text{Процент } Z_y = \forall_i \left( \text{Влияние } Z_{y,i} / \max_i (\text{Влияние } Z_{y,i}) \cdot 100\% \right). \quad (22)$$

Результаты представлены в графической форме (рисунок 27).

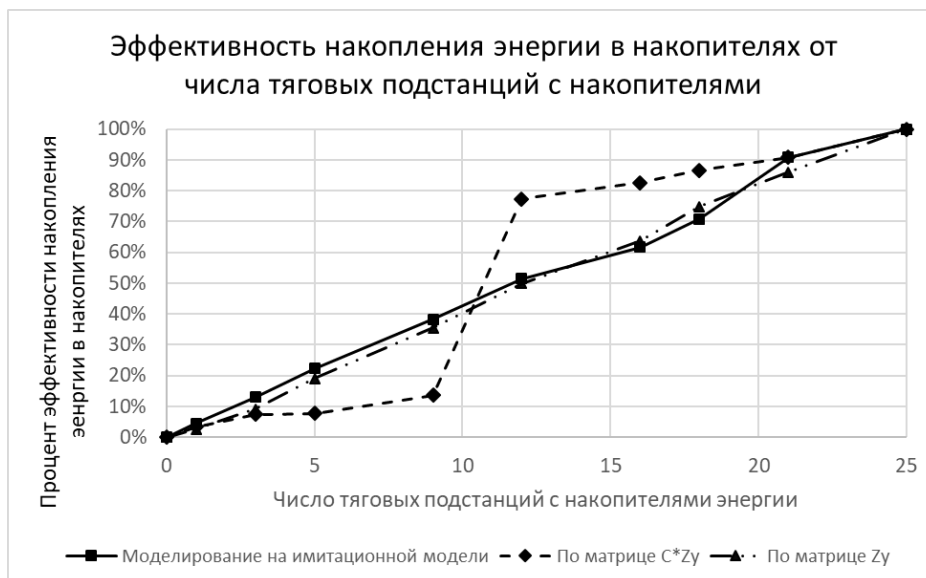


Рисунок 27 – Графики зависимости эффективности накопления энергии рекуперации накопителями в зависимости от числа тяговых подстанций, оборудованных накопителями

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

Срок окупаемости УНЭ на ТП можно оценить по следующей формуле:

$$T_{\text{ок}} = \frac{K - C_{\text{ум}}}{\mathcal{E} - P_{\mathcal{E}}} = \frac{K_{\text{НЭ}} - \Delta P_{\text{ум}} \cdot C_{\text{ум}}}{(A_{\text{рекГод}} + A_{\text{клим}} + \Delta A_{\text{потТП}}) \cdot C_{\text{элЭн}} - P_{\mathcal{E}}} \quad (23)$$

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

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

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

$C_{\text{элЭн}}$  – Цена электроэнергии;

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

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

$A_{\text{рекГод}}$  – Избыточная энергия рекуперации в год;

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

$\Delta A_{\text{потТП}}$  – Потери энергии в ТП в год.

Из полученной в результате расчёта кривой окупаемости (рисунок 28) 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.

Рассмотрим экономический эффект от внедрения УНЭ на одной подстанции относительно всей рассматриваемой линии и скорректируем кривую срока окупаемости.

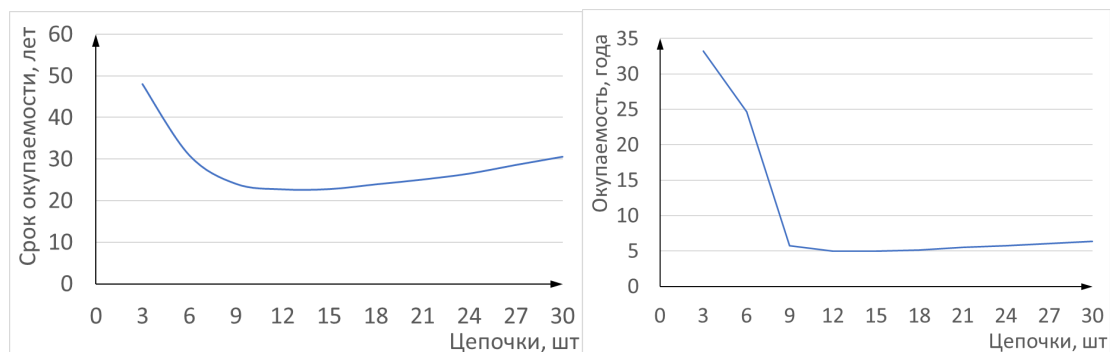


Рисунок 28 — Срок окупаемости накопителя энергии относительно энергопотребления одной подстанции (слева) и относительно всей линии (справа).

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 29).



Рисунок 29 — Чистый дисконтированный доход с учётом предполагаемого роста стоимости электроэнергии.

## 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) Рекомендуются 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 работ, опубликованных автором по теме диссертации**

#### ***а) в рецензируемых научных изданиях***

1. Шевлюгин, М. В. Применение накопителей энергии для усиления централизованного питания участка метрополитена в рамках одной межподстанционной зоны. / М. В. Шевлюгин, А. Е. Голицына, М. Н. Белов, Д. С. Плетнев // Энергобезопасность и энергосбережение. – 2023. – № 1. – С. 93–98.
2. Шевлюгин, М. В. Цифровое моделирование движения электроподвижного состава 81-775/776/777 "МОСКВА-2020" с учетом рекуперативного торможения на линии Московского метрополитена. / М. В. Шевлюгин, Д. С. Плетнев, М. Н. Белов, З. Е. Минаков // Электронный сетевой политематический журнал "Научные труды КубГТУ". – 2023. – № 1. – С. 119–129.
3. Шевлюгин, М. В. Оценка показателей качества электрической энергии на основе экспериментальных замеров в сетях совмещенной тяговой подстанции метрополитена / М. В. Шевлюгин, А. Е. Голицына, М. Н. Белов, Д. С. Плетнев // В сборнике: Приборы и методы измерений, контроля качества и диагностики в промышленности и на транспорте. Материалы V всероссийской научно-технической конференции с международным участием. – 2022. – С. 263–270.
4. Шевлюгин, М.В. Экспериментальная оценка качества электрической энергии в сетях собственных нужд совмещенной тяговой подстанции метрополитена / М. В. Шевлюгин, А. Е. Голицына, М. Н. Белов, Д. С. Плетнев // Электротехника. – 2022. – № 9. – С. 67–71.
5. Шевлюгин, М.В. Повышение надежности электроснабжения собственных нужд тяговых подстанций метрополитена с помощью накопителей энергии / М. В. Шевлюгин, А. Е. Голицына, М. Н. Белов, Д. С. Плетнев // Электротехника. – 2020. – № 9. – С. 26–31.

6. 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. – Т. 92. – № 9. – С. 488–491.
7. 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. – Т. 91. – № 9. – С. 552–556.
8. 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.
9. 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. Shevlyugin // Proceedings Of The 2022 Conference Of Russian Young Researchers In Electrical And Electronic Engineering. – 2022. – С. 1257–1259.
10. Плетнев, Д. С. Оценка эффективности применения рекуперативного торможения на примере метрополитена с использованием цифрового моделирования. / Д. С. Плетнев, М. Н. Белов, Е. В. Голицын, М. А. Воронкова, А. С. Михайлина // Наукосфера. – 2022. – № 1. – с. 162–167.
11. Королев, А. А. Анализ программного обеспечения для моделирования электрификации железных дорог. / А. А. Королев, Д. С. Плетнев, М. Н. Белов, Е. В. Голицын, М. А. Воронкова // Наукосфера. – 2022. – № 1. – с. 162–167.
12. Шевлюгин М.В. Стационарные накопители энергии управляемого типа для метрополитена. Перспективы развития метрополитенов в условиях интенсивного внедрения новых технологий. Инфраструктура и подвижной состав метрополитена / Шевлюгин М.В., Белов М.Н., Вуйченко И.В. // Сборник трудов Международной выставки-конференции. – № 2. – 2019. – С. 90–94.
13. Белов М. Н. Временные схемы тягового электроснабжения железных дорог и метрополитенов на основе комплектных накопителей энергии / М. Н. Белов // Сборник трудов Международной выставки-конференции «Интерметро – 2021». – 2021. – с. 40–45.
14. Korolev, A. Modeling Of Energy Saving In Substations Feeding Dc Metro Systems Based On Appropriate Location Of Energy Storage Elements. / 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. № 3. – 2021. – С. 9388021.

**Белов Михаил Николаевич**

**СТАЦИОНАРНЫЙ УПРАВЛЯЕМЫЙ НАКОПИТЕЛЬ ЭНЕРГИИ В СИСТЕМЕ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ МЕТРОПОЛИТЕНА**

2.4.2. Электротехнические комплексы и системы (технические науки)

Автореферат на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Подписано в печать – \_\_\_\_\_ 2024 г.

Заказ №

Формат 60x90/16

Тираж – 80 экз.

Усл. печ. л. 1,5

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