

Федеральное агентство железнодорожного транспорта  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Омский государственный университет путей сообщения»  
(ОмГУПС (ОМИИТ))

На правах рукописи



НЕЗЕВАК Владислав Леонидович

**РАЗРАБОТКА НАУЧНЫХ ОСНОВ ПОСТРОЕНИЯ  
СИСТЕМ НАКОПЛЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ  
В ТЯГОВОМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИИ**

Специальность 2.9.3. Подвижной состав железных дорог,  
тяга поездов и электрификация

Диссертация  
на соискание ученой степени доктора технических наук

Омск – 2023

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	6
1 АНАЛИЗ НАПРАВЛЕНИЙ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ СИСТЕМ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА .....	17
1.1 Направления совершенствования систем тягового электрообеспечения .....	17
1.2 Проблематика совершенствования систем тягового электрообеспечения с системами накопления электроэнергии .....	28
1.2.1 Стабилизация уровня напряжения на токоприемнике электроподвижного состава в границах межподстанционных зон.....	29
1.2.2 Выравнивание графика тяговой нагрузки .....	33
1.2.3 Повышение энергетической эффективности системы тягового электрообеспечения при применении систем накопления электроэнергии .....	35
1.2.4 Повышение надежности электрообеспечения в различных режимах работы при применении систем накопления электроэнергии .....	37
1.3 Обзор основных характеристик и параметров систем накопления электроэнергии для систем тягового электрообеспечения постоянного и переменного тока .....	39
1.4 Перспективы применения систем накопления электроэнергии в проекте цифровой системы тягового электрообеспечения.....	52
1.5 Выводы по первой главе.....	57
2 АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ЭЛЕКТРОТЯГОВОЙ НАГРУЗКИ НА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ .....	58
2.1 Анализ факторов, оказывающих влияние на показатели электротяговой нагрузки .....	58
2.1.1 Анализ профилей пути электрифицированных участков .....	69
2.1.2 Факторы, оказывающие влияние на показатели работы системы тягового электрообеспечения при рекуперации.....	83

2.2 Способы расчета параметров системы тягового электроснабжения .....	88
2.3 Анализ показателей графиков тяговой нагрузки подстанций .....	94
2.4 Основные факторы, определяющие объем электроэнергии на тягу ....	105
2.5 Выводы по второй главе .....	107
<b>3 МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРОТЯГОВОЙ НАГРУЗКИ И СИСТЕМЫ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ .....</b>	<b>109</b>
3.1 Имитационная модель системы тягового электроснабжения .....	109
3.2 Формирование электротяговой нагрузки .....	122
3.3 Моделирование процесса электропотребления на тягу .....	129
3.4 Анализ влияния формирования электротяговой нагрузки на энергетическую эффективность .....	141
3.5 Основные положения методологии учета влияния электротяговой нагрузки на тяговое электропотребление и потери электроэнергии .....	153
3.6 Выводы по третьей главе .....	159
<b>4 СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СПОСОБА РАСЧЕТА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ СИСТЕМЫ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ С СИСТЕМАМИ НАКОПЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ .....</b>	<b>161</b>
4.1 Пути совершенствования расчета энергетических показателей системы тягового электроснабжения .....	161
4.2 Имитационная модель системы тягового электроснабжения с системой накопления электроэнергии .....	180
4.3 Способы расчета параметров систем накопления электроэнергии .....	185
4.4 Разработка методики расчета параметров систем накопления и выбора мест размещения .....	189
4.5 Выводы по четвертой главе .....	202
<b>5 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ СИСТЕМ НАКОПЛЕНИЯ В ТЯГОВОМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИИ С УЧЕТОМ СПЕЦИФИКИ ФОРМИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОТЯГОВОЙ НАГРУЗКИ .....</b>	<b>203</b>
5.1 Определение параметров систем накопления для участков с преобладанием грузового движения .....	203
5.1.1 Двухпутные участки железных дорог .....	204

5.1.2 Однопутные участки железных дорог .....	222
5.1.3 Двухпутные участки с преобладанием пассажирского движения .....	228
5.2 Выбор устройств накопления электроэнергии для участков систем тягового электроснабжения .....	244
5.3 Применение систем накопления на тяговых подстанциях для снижения загрузки силового оборудования за счет использования рекуперации .....	252
5.4 Применение систем накопления электроэнергии на тяговых подстанциях для питания собственных нужд .....	262
5.5 Выводы по пятой главе.....	279
<b>6 РАСЧЕТНЫЕ МОДЕЛИ ГИБРИДНЫХ СИСТЕМ НАКОПЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ПРИ РАСЧЕТАХ СИСТЕМЫ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ.....</b>	<b>281</b>
6.1 Анализ способов управления системами накопления электроэнергии .....	281
6.2 Построение имитационной модели системы тягового электроснабжения с гибридной системой накопления электроэнергии ....	287
6.3 Системы накопления электроэнергии с пассивной топологией .....	301
6.4 Системы накопления электроэнергии с активной топологией .....	310
6.5 Физическое моделирование работы системы накопления электроэнергии .....	315
6.5.1 Работа физической модели без системы накопления энергии .....	325
6.5.2 Работа физической модели с использованием модуля аккумуляторной батареи.....	326
6.5.3 Работа физической модели с модулем суперконденсатора.....	328
6.5.4 Работа физической модели с использованием гибридной системы накопления электроэнергии.....	329
6.6 Сравнительный анализ результатов моделирования работы гибридной системы накопления в тяговом электроснабжении .....	332
6.7 Выводы по шестой главе .....	339

7 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ СИСТЕМ НАКОПЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ДЛЯ СИСТЕМ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ.....	340
7.1 Разработка модели прогнозирования пропускной и провозной способности при применении систем накопления электроэнергии .....	340
7.2 Анализ влияния систем накопления электроэнергии на показатели нагрузочной способности .....	347
7.3 Влияние тяговой нагрузки на параметры систем накопления электроэнергии .....	364
7.3.1 Влияние рекуперативного торможения на показатели работы систем накопления электроэнергии .....	367
7.3.2 Разработка методики оценки влияния систем накопления электроэнергии на показатели работы системы тягового электрооборудования .....	377
7.4 Анализ эффективности устройств накопления электроэнергии в системе тягового электрооборудования и на электроподвижном составе ...	379
7.5 Выводы по седьмой главе .....	389
8 ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ СИСТЕМ НАКОПЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В СИСТЕМАХ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ.....	391
8.1 Оценка технического эффекта применения систем накопления электроэнергии .....	391
8.2 Оценка технического эффекта для условий Октябрьской железнодорожной линии .....	397
8.3 Оценка технического эффекта для условий Свердловской железнодорожной линии .....	407
8.4 Выводы по восьмой главе .....	419
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	420
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	424
ПРИЛОЖЕНИЕ .....	475

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность темы исследования.** «Транспортной стратегией Российской Федерации до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года» предусматривается использование гибридных систем аккумулирования энергии на транспорте, а также внедрение технологий накопления энергии для снижения выбросов парниковых газов от транспортного сектора и снижения затрат на потребление энергии от внешних сетей. Ключевыми инициативами развития в «Долгосрочной программе развития ОАО «РЖД» до 2025 года» обозначены снятие барьерных ограничений в энергетическом комплексе и подготовка объектов инфраструктуры для обеспечения пропуска тяжеловесных поездов. «Энергетическая стратегия холдинга «РЖД» на период до 2015 и на перспективу до 2030 года» относит к одним из основных энергосберегающих технологий повышение эффективности рекуперативного торможения и использование накопителей энергии в основных технологических процессах.

Решение задач в рамках стратегических направлений развития связано с усилением системы тягового электроснабжения, предусматривающим рост установленных мощностей тяговых подстанций, увеличение сечения контактной сети, сооружение новых подстанций и линейных устройств. Применение систем накопления электрической энергии является одним из перспективных путей совершенствования системы тягового электроснабжения, целью которого является обеспечение тяговыми ресурсами, улучшение энергетических показателей и повышение эффективности перевозочного процесса ОАО «РЖД».

Совершенствование технологий и применение новых материалов при производстве накопителей электрической энергии различного вида привело к их широкому использованию в различных областях – от систем возобновляемой энергетики до объектов распределенной генерации,

электросетевого комплекса и энергетического хозяйства железнодорожного транспорта. Мировые тенденции развития электроэнергетики свидетельствуют о возрастающей роли систем накопления электрической энергии в процессах генерации, передачи и распределения, управления качеством электрической энергии в электроэнергетических системах, повышения энергетической эффективности технологических процессов, резервирования электроснабжения и др.

Перспективы применения накопителей электрической энергии на железнодорожном транспорте связаны с повышением эксплуатационной надежности систем тягового электроснабжения и эффективности перевозочного процесса за счет стабилизации напряжения на шинах тяговых подстанций и линейных устройств, ограничения перегрузки силового оборудования, резервирования мощности и приема энергии рекуперации.

Применение рекуперативного торможения на электрифицированных участках железных дорог позволяет использовать энергию рекуперации для решения задач улучшения энергетических показателей систем тягового электроснабжения. Использование систем накопления электроэнергии для повышения эффективности рекуперации относится к техническим решениям, имеющим ряд преимуществ перед традиционными выпрямительно-инверторными преобразователями, связанных с возможностью хранения энергии.

**Степень разработанности темы исследования.** В России вопросами совершенствования систем тягового электроснабжения и способов их расчета занимается ряд научных организаций (ВНИИЖТ, РУТ, ПГУПС, РГУПС, СамГУПС, УрГУПС, ОмГУПС, ИрГУПС, ДВГУПС и др.).

Значительный вклад в решение задач повышения пропускной и провозной способности и энергетической эффективности систем тягового электроснабжения, в том числе с применением систем накопления электроэнергии внесли отечественные ученые: Б. А. Аржанников, М. П. Бадёр,

Л. А. Баранов, А. П. Буйносов, А. Т. Бурков, Л. А. Герман, В. А. Гречишников, Б. Е. Дынькин, А. М. Евстафьев, Д. В. Ермоленко, Ю. И. Жарков, В. П. Закарюкин, А. Б. Косарев, А. В. Котельников, А. В. Крюков, В. А. Кучумов, Р. Р. Мамошин, К. Г. Марквардт, В. З. Манусов, А. Н. Марикин, А. Н. Митрофанов, Л. А. Мугинштейн, Д. С. Осипов, О. Е. Пудовиков, В. Н. Пупынин, В. П. Феоктистов, В. Т. Черемисин, М. Г. Шалимов, М. В. Шевлюгин и др.

Исследования в области повышения эффективности эксплуатации транспорта и применения накопителей электроэнергии в системах электроснабжения выполнялись зарубежными учеными, из которых наиболее существенный вклад внесли: A.-L. Allègre, P. Arboleya, A. Brecher, S. Bondeux, J. M. Cabelloa, M. Coto, G. Caralis, B. Destraz, A. Frilli, N. Ghaviha, H. Jiang, A. Kaudi, J. Larminie, N. Mendis, C. M. Shepherd, P. V. Radu, D. V. Ragone, D. Roch-Durpé, H. Yang, M. Yoshida, J. Wang, S. Williamson, W. Zhao, T. Zimmermann и др.

Несмотря на существенный вклад в изучение вопросов совершенствования работы и улучшения энергетических показателей системы тягового электроснабжения железных дорог остаются перспективными исследованиями в области совершенствования известных методов теоретических и экспериментальных исследований в свете появления устройств с новыми характеристиками, разработки новых технических решений, оценки эффективности работы данных устройств в тяговой энергетике, в т.ч. систем накопления электроэнергии.

**Цель и задачи диссертационной работы.** Целью диссертационной работы является разработка научно обоснованных технических, технологических и методологических решений и разработок, применение которых позволяет определять параметры и места размещения систем накопления электрической энергии с целью повышения нагрузочной способности тягового электроснабжения на лимитирующих

межподстанционных зонах и энергетической эффективности перевозочного процесса.

Для достижения поставленной цели сформулированы следующие **задачи**:

1. Определить параметры электротяговой нагрузки, оказывающие влияние на показатели нагрузочной способности и энергетические показатели системы тягового электроснабжения, на основе анализа условий ее формирования на участках железной дороги.

2. Разработать математические модели, позволяющие определять влияние условий формирования электротяговой нагрузки на энергетические показатели системы тягового электроснабжения с учетом параметров графика движения.

3. Обобщить существующие способы и усовершенствовать методику определения параметров и мест размещения накопителей электроэнергии для систем тягового электроснабжения с целью повышения пропускной и провозной способности.

4. Усовершенствовать способы определения энергетических показателей системы тягового электроснабжения при применении накопителей электроэнергии.

5. Разработать модель системы тягового электроснабжения с гибридной системой накопления электроэнергии, содержащей аккумуляторную батарею и суперконденсатор, для определения энергетических показателей.

6. Определить параметры накопителей электроэнергии, оказывающие влияние на показатели нагрузочной способности системы тягового электроснабжения и потери электроэнергии.

7. Разработать новые технические и технологические решения по подключению накопителей электроэнергии на тяговых подстанциях и постах секционирования контактной сети в системе тягового электроснабжения постоянного и переменного тока для решения задач по повышению пропускной и провозной способности и энергетической эффективности.

8. Выполнить техническое обоснование применения систем накопления электроэнергии в тяговом электроснабжении железнодорожного транспорта.

**Объект исследования** – система тягового электроснабжения электрифицированных железных дорог.

**Научная новизна** диссертационной работы заключается в следующем:

1. Расширена классификация профилей пути для оценки энергетических затрат движения поезда на электрифицированных участках за счет учета дополнительных характеристик профиля пути.

2. Разработана математическая модель электрифицированных участков железных дорог, отличающаяся от известных учетом типа профиля пути участков и предложенных параметров формирования нагрузки электроподвижного состава.

3. Разработаны способы определения расхода и потерь электроэнергии в системе тягового электроснабжения, зарядной характеристики системы накопления электроэнергии, имитационного моделирования энергоэффективного графика движения поездов.

4. Усовершенствован способ определения энергетических показателей системы тягового электроснабжения при применении устройств накопления электроэнергии.

5. Разработаны математические модели системы тягового электроснабжения для решения задач по повышению нагрузочной способности ее элементов, отличающиеся от известных учетом работы в ней систем накопления электроэнергии.

6. Разработаны имитационная и физическая модели системы тягового электроснабжения с гибридными системами накопления электроэнергии, позволяющие определять энергетические показатели систем тягового электроснабжения и накопления электроэнергии.

7. Усовершенствована методика определения параметров и мест размещения систем накопления электроэнергии на основе результатов

имитационного моделирования взаимодействия системы тягового электроснабжения и электроподвижного состава.

8. Предложены новые, научно обоснованные технические решения по построению тяговых подстанций и постов секционирования контактной сети постоянного и переменного тока, содержащих системы накопления электроэнергии.

**Теоретическая и практическая значимость работы:**

1. Усовершенствованный способ определения энергетических показателей систем тягового электроснабжения в отличие от известных позволяет рассчитывать показатели с учетом фактора работы накопителей электроэнергии.

2. Разработанная методика оценки влияния параметров электротяговой нагрузки на электропотребление и потери электроэнергии в системе тягового электроснабжения в отличие от известных позволяет проводить расчеты энергетических показателей с учетом параметров графика движения поездов и профиля пути.

3. Усовершенствованная методика выбора мест размещения и определения параметров систем накопления электроэнергии в системе тягового электроснабжения постоянного и переменного тока в отличие от известных позволяет определять параметры устройств с учетом лимитирующих нагрузочных показателей, характеристик профиля пути и рекуперативного торможения электроподвижного состава.

4. Предложенные технические решения по применению устройств накопления электроэнергии позволяют повысить эффективность мероприятий по повышению нагрузочной способности систем тягового электроснабжения постоянного и переменного тока.

5. Предложенные технические и технологические решения по определению тягового электропотребления и потерь электроэнергии в системе

тягового электроснабжения позволяют повысить точность расчетов с учетом организации движения поездов.

6. Разработанный способ определения зарядной характеристики систем накопления электроэнергии в отличие от известных позволяет формировать характеристику с учетом напряжения и нагрузочной характеристики контактной сети системы тягового электроснабжения.

7. Предложены технические параметры накопителей электроэнергии в системах тягового электроснабжения постоянного и переменного тока с учетом их размещения, которые вносят вклад в решение задачи повышения эффективности работы тягового электроснабжения железнодорожного транспорта.

8. Разработанные способы и технические решения по построению систем накопления электроэнергии закладывают методологические основы развития систем тягового электроснабжения с использованием технологии хранения электроэнергии.

**Методология и методы исследования.** Для достижения целей, поставленных в работе, при решении поставленных задач исследования выполнены на основе системного подхода, положений математической статистики, теории тяговых расчетов, моделирования систем тягового электроснабжения. В работе использовались методы математического моделирования на ПЭВМ с использованием программных пакетов Matlab, Statistica и комплекса программ расчета тягового электроснабжения «Кортэс».

При обработке данных измерений и расчетов использовались методы планирования и обработки результатов эксперимента, корреляционный и регрессионный анализ, аппарат искусственных нейронных сетей.

#### **Основные положения, выносимые на защиту.**

1. Методика оценки влияния систем накопления электроэнергии на энергетические показатели и показатели нагрузочной способности системы тягового электроснабжения.

2. Способ определения энергетических показателей системы тягового электроснабжения железной дороги, отличающийся учетом работы в ней систем накопления электроэнергии.

3. Методика выбора мест размещения и определения параметров систем накопления электроэнергии в системе тягового электроснабжения постоянного и переменного тока при различных вариантах формирования электротяговой нагрузки.

4. Способ определения зарядной характеристики системы накопления в системе тягового электроснабжения с автоматическим регулированием, отличающийся учетом режима напряжения в контактной сети.

5. Новые научно-обоснованные технические решения по применению систем накопления электроэнергии в тяговом электроснабжении.

#### **Реализация результатов работы:**

1) предложенная методика определения параметров литий-ионного накопителя электроэнергии, определения энергетических показателей системы тягового электроснабжения при работе накопителей электроэнергии с заданными ограничивающими параметрами, способ определения зарядной характеристики в зависимости от потерь напряжения в контактной сети использовались в ООО «РУСЭНЕРГОСБЫТ» при выполнении работ по оценке параметров устройств накопления электроэнергии на участках Октябрьской и Свердловской железных дорог;

2) предложенный способ определения энергетических показателей системы тягового электроснабжения железной дороги использовался Западно-Сибирской дирекцией по энергообеспечению Трансэнерго при выполнении расчетов по определению параметров устройств накопления электроэнергии на участке Омск – Иртышское Западно-Сибирской железной дороги – филиала ОАО «РЖД»;

3) предложенный способ формирования зарядной характеристики и определения энергетических показателей системы тягового электроснабжения

использовался при оценке эффективности работы устройств накопления электроэнергии в системе тягового электроснабжения Свердловской дирекции по энергообеспечению Трансэнерго – филиала ОАО «РЖД»;

4) технические решения в части применения гибридных систем накопления на постах секционирования переменного тока внедрены в производственную деятельность Красноярской дирекции по энергообеспечению Трансэнерго – филиала ОАО «РЖД»;

5) методика определения параметров накопителей электрической энергии, проектируемых для систем тягового электроснабжения, содержащая описание способа определения энергетических показателей системы тягового электроснабжения железной дороги, внедрена в производственную деятельность ООО «ЦПТ ТМХ»;

б) способы определения энергетических показателей системы тягового электроснабжения с учетом работы систем накопления электроэнергии и определения зарядной характеристики внедрены в электросетевую производственную деятельность ООО «Энергетик».

Результаты научных исследований получены в рамках выполнения проектов Российского фонда фундаментальных исследований в 2018 и 2019 гг. (проект № 17-20-01148 офи\_м\_РЖД) и Российского научного фонда в 2022 и 2023 гг. (проект № 22-29-00002).

**Степень достоверности научных результатов** диссертационной работы подтверждается результатами теоретических исследований режимов работы систем тягового электроснабжения и систем накопления электроэнергии, исследований физических моделей гибридных систем накопления электроэнергии, основанных на многократных экспериментальных исследованиях энергетических показателей тягового электроснабжения. Достоверность основных научных положений и результатов обеспечивается корректностью принятых допущений и математических формулировок задач и подтверждается качественным совпадением и удовлетворительной

сходимостью результатов теоретического и физического моделирования, расхождение между которыми не превышает 10 %.

**Апробация результатов.** Основные положения, выводы и рекомендации диссертационной работы докладывались и обсуждались на международных конференциях: «Транспортные системы, технологии и инфраструктура для пространственного развития территорий: инновации, экологичность и устойчивость» (MiTR 2022, Нижний Новгород), «Транспортная инфраструктура Сибирского региона» (Иркутск, 2022), «Инновационные производственные технологии и ресурсосберегающая энергетика» (Омск, 2021), «International Ural conference on electrical power engineering» (Uralcon, Челябинск, 2019, 2020), «International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies» (FarEastCon, Хабаровск, 2020, 2019), E3S Web of Conferences (ITESE 2019, Дивногорское, SPbWOSCE 2018, Санкт-Петербург), «Advances in Intelligent Systems and Computing» (EMMFT 2018, Самара), «Разработка и эксплуатация электротехнических комплексов и систем энергетики и наземного транспорта» (Транссибвуз, 2020, Омск), «Локомотивы. Транспортно-технологические комплексы. XXI век» (Санкт-Петербург, 2017), «Транспорт» (Ростов-на-Дону, 2015, 2016, 2018); «Инновации в системах обеспечения движения поездов» (Самара, 2016), «Перспективы развития и эффективность функционирования транспортного комплекса юга России» (Ростов-на-Дону, 2015), VII – XI симпозиумы «Eltrans» (Санкт-Петербург, 2013, 2015, 2017, 2019, 2023), II Международный научно-практический форум по передовым достижениям в науке и технике (SciTech 2022, Барнаул), Международный форум «Siberian transport forum – TransSiberia» (Новосибирск, 2019), и др.; всероссийских конференциях: «Образование - наука – Производство» (Чита, 2020, 2022), «Инновационные проекты и технологии в образовании, промышленности и на транспорте» (Омск, 2014 – 2022), «Эксплуатационная надежность локомотивного парка и повышение эффективности тяги поездов» (Омск, 2012, 2022), «Приборы и

методы измерений, контроля качества и диагностики в промышленности и на транспорте» (Омск, 2013, 2016, 2018, 2022), Информационные технологии в электротехнике и электроэнергетике (Чебоксары, 2020), Наука, творчество и образование в области электроэнергетики и электротехники (Хабаровск, 2015), «Повышение эффективности транспортной системы региона: проблемы и перспективы» (Хабаровск, 2015), «120 лет железнодорожному образованию в Сибири» (Красноярск, 2015) и др.

Основные положения диссертации были представлены и получили одобрение на заседании кафедры «Электроснабжение железнодорожного транспорта» Омского государственного университета путей сообщения (Омск, 2022), научно-техническом семинаре Омского государственного университета путей сообщения (Омск, 2023).

**Публикации.** Основные положения диссертации опубликованы в 77 научных работах, из них 31 статья в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК при Минобрнауки России, 12 работ в изданиях, индексируемых международными реферативными базами данных и системами цитирования Scopus и Web of Science, девять патентов на полезные модели и восемь патентов на изобретения, три свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ, две – научные монографии.

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа состоит из введения, восьми глав, заключения, приложения, списка использованной литературы из 370 наименований и содержит 487 страниц основного текста, включая 205 иллюстраций и 53 таблицы.

# 1 АНАЛИЗ НАПРАВЛЕНИЙ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ СИСТЕМ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

В первой главе выполнен анализ направлений совершенствования систем тягового электроснабжения с системами накопления электроэнергии. Рассмотрена проблематика применения систем накопления электроэнергии для решения различных задач в тяговом электроснабжении. Представлен обзор основных характеристик и параметров накопителей электроэнергии, показаны перспективы применения систем накопления электроэнергии при реализации цифровой системы тягового электроснабжения.

## 1.1 Направления совершенствования систем тягового электроснабжения

Появление и развитие систем тягового электроснабжения (СТЭ) железнодорожного транспорта связано с экономическими и экологическими преимуществами электрической тяги перед тепловозной. В настоящее время совершенствование СТЭ идет в направлении повышения напряжения в контактной сети и снижении ее сопротивления, применения вольтодобавочных устройств различного вида, смены рода тока с постоянного на переменный и др. [1].

На современном этапе необходимость совершенствования СТЭ обусловлена задачами повышением пропускной и провозной способности участков железных дорог и энергетической эффективности.

Возникновение лимитирующих участков связано со следующими основными факторами: низким уровнем напряжения на токоприемнике; перегрузкой и нагревом элементов силового оборудования; нагревом проводов и тросов контактной подвески и отсасывающих линий.

Требования к уровню напряжения на токоприемнике и шинах тяговых подстанций железнодорожного транспорта содержатся в нормативных документах:

наименьшее напряжение на токоприемнике электроподвижного состава постоянного и переменного тока – ГОСТ 6962-75. Транспорт электрифицированный с питанием от контактной сети. Ряд напряжений [2];

минимальный уровень напряжения на токоприемнике электроподвижного состава – Правила технической эксплуатации железных дорог Российской Федерации [3];

расчетный уровень наименьшего напряжения (усредненное значение на интервале 3 мин) для скоростей движения поездов до 160 км/ч включительно – ГОСТ Р 57670-2017 Системы тягового электроснабжения железной дороги. Методика выбора основных параметров [4].

Допустимая температура нагрева проводов контактной сети различных типов установлена нормативными документами [5 – 8]. Для тока и температуры нагрева силового оборудования СТЭ допустимые значения принимаются по данным заводов-изготовителей с учетом норм допустимых перегрузок и расчетных интервалов усреднения.

Применение нового оборудования и технологий направлено на решение задачи повышения пропускной и провозной способности. Одновременно с этим решаются задачи по повышению энергетической эффективности за счет улучшения показателей работы СТЭ.

Внедрение современных систем накопления электроэнергии (СНЭЭ) относится к одним из мероприятий, позволяющим решать указанные задачи. Применение технологий накопления электроэнергии в СТЭ ориентировано на оказание влияния на эксплуатационные показатели (уровень напряжения на токоприемнике; температура нагрева проводов контактной сети; загрузку и температуру нагрева силового оборудования; тяговое электропотребление и технические потери электроэнергии в тяговой сети).

В рамках настоящей главы рассматриваются вопросы, связанные с применением СНЭЭ в СТЭ для решения задач по улучшению эксплуатационных показателей СТЭ и повышения энергетической эффективности.

Реконструкция и модернизация СТЭ на действующих участках электрифицированных железных дорог выполняется для увеличения пропускной и провозной способности. Технические мероприятия, применяемые при реконструкции и модернизации СТЭ участка, разделяют в зависимости от рода тока [9]:

– для участков постоянного тока:

- 1) увеличение суммарного сечения контактной подвески;
- 2) устройство линейных пунктов (пунктов параллельного соединения или постов секционирования);
- 3) применение управляемых преобразователей, в том числе с применением управляемых реакторов или вольто-добавочной схемой выпрямления;
- 4) применение пунктов преобразования напряжения при питании от смежных тяговых подстанций по линии электропередач напряжением 6 кВ постоянного тока;
- 5) строительство дополнительных тяговых подстанций с питанием от смежных подстанций по линиям электропередачи переменного тока напряжением 20 кВ выше;
- 6) строительство дополнительных тяговых подстанций с присоединением к системе внешнего электроснабжения;
- 7) переход на СТЭ переменного тока напряжением 25 или 2×25 кВ;

– для участков переменного тока:

- 1) применение мероприятий для участков постоянного тока по пп. 1 и 2;
- 2) монтаж устройств поперечной емкостной компенсации реактивной мощности на тяговых подстанциях или линейных пунктах;

- 3) применение устройств продольной емкостной компенсации;
- 4) перевод отдельных межподстанционных зон на СТЭ с экранирующим и усиливающим проводами;
- 5) применение мероприятий для участков постоянного тока по пп. 6 и 7 (в части напряжения  $2 \times 25$  кВ).

В качестве перспективных технических мероприятий рассматриваются СТЭ постоянного тока повышенного напряжения и переменного тока напряжением 94 кВ [10]. Перспектива применения СТЭ постоянного тока повышенного напряжения 12 кВ и выше (24 кВ) сдерживается отсутствием электроподвижного состава (ЭПС) на соответствующий класс напряжения постоянного тока [11 – 13]. Прорабатывается вопрос создания трехфазной системы электрической тяги переменного тока [14]. Перечень мероприятий, применяемых в настоящее время для усиления СТЭ, дополняется перспективными мероприятиями, к которым относят применение СНЭЭ и автономных генерирующих агрегатов (рисунок 1.1).

Статистические данные о протяженности электрифицированных участков и тяговом электропотреблении по сети дорог холдинга ОАО «РЖД» показывают тренд на рост удельного электропотребления на тягу на единицу длины электрифицированных участков (рисунок 1.2; пунктиром обозначена функция тренда, полученная способом наименьших квадратов).

Рост удельного электропотребления при сохранении параметров СТЭ предполагает увеличение загрузки силового оборудования, степени нагрева и снижение среднего уровня напряжения на токоприемнике электроподвижного состава.

На участках электрифицированных железных дорог с пропуском поездов повышенной массы действуют требования в части допустимого диапазона напряжения на токоприемнике электроподвижного состава, температуры нагрева проводов, токовых нагрузок, чувствительности защит тяговой сети и обеспечения возможности трогания поезда повышенного веса

при остановке на перегоне или станции [15].



Рисунок 1.1 – Мероприятия по усилению систем тягового электроснабжения

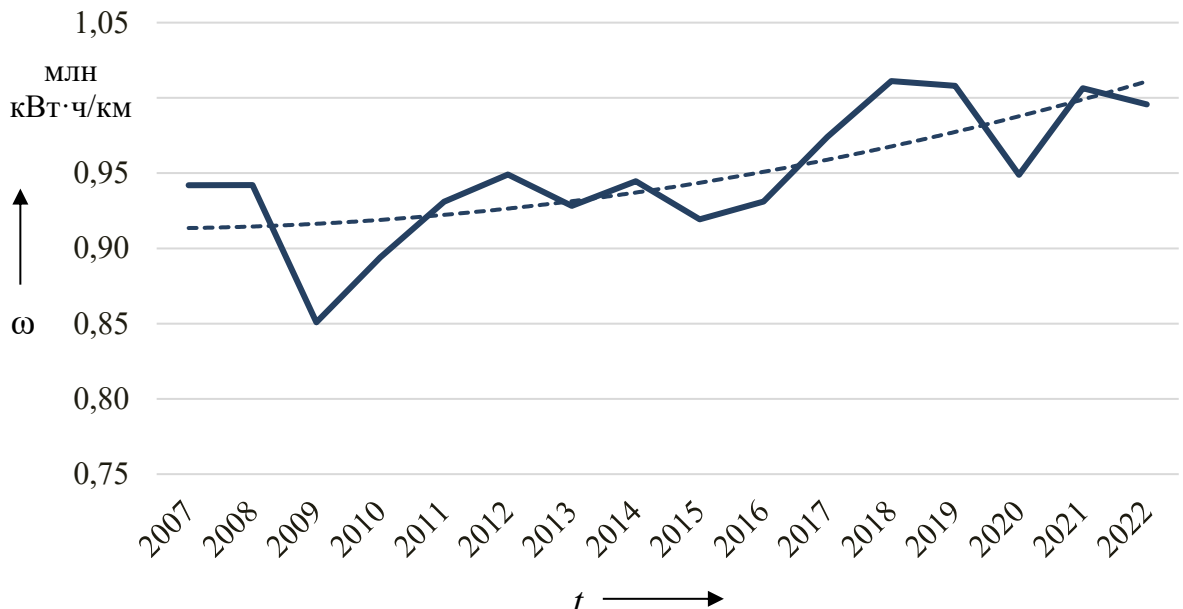


Рисунок 1.2 – Удельное тяговое электропотребление на единицу длины электрифицированных участков ОАО «РЖД»

Для обеспечения требований по пропуску поездов повышенной массы мероприятия по усилению СТЭ включают в себя увеличение сечения контактной сети, замену выпрямительных преобразователей, увеличение мощности силовых понижающих трансформаторов и др.

Основными показателями загрузки силового оборудования, используемыми для расчетов пропускной способности [16], являются:

- а) коэффициенты загрузки, определяемые для силового оборудования:  
– выпрямительных преобразователей:

$$k_{зВt} = \frac{I_{dt}}{\sum_i (I_{вном i} \cdot k_{допВti})}, \quad (1.1)$$

где:  $I_{dt}$  – наибольшее среднее значение выпрямленного тока подстанции за период  $t$ , А;

$I_{вном}$  – номинальный ток выпрямительного преобразователя, А;

$t$  – период усреднения, принимаемый равным 2, 15, 30 мин;

$k_{допВt}$  – коэффициент допустимой перегрузки выпрямительного преобразователя для соответствующего периода усреднения  $t$  (для интервалов усреднения, мин, 0,25 – 1,9, 2 – 1,5, 15 – 1,25, 30 и более – 1,0);

$i$  – количество выпрямительных преобразователей;

- преобразовательных трансформаторов:

$$k_{зПТt} = \frac{U_{dt} \cdot I_{dt}}{\sum_i (S_{ПТном i} \cdot k_{допПТti})}, \quad (1.2)$$

где:  $U_{dt}$  – среднее значение выпрямленного напряжения подстанции за период  $t$ , в котором зафиксировано наибольшее значение тока подстанции, В;

$k_{допПТti}$  – коэффициент допустимой перегрузки  $i$ -го выпрямительного преобразователя для соответствующего периода усреднения  $t$ ;

- понижающих трансформаторов подстанций постоянного тока:

$$k_{зТt} = \frac{U_{dt} \cdot I_{dt} + S_{pt}}{\sum_i (S_{Тном i} \cdot k_{допТt})}, \quad (1.3)$$

где:  $S_{Тном i}$  – номинальная мощность  $i$ -го понижающего трансформатора, кВ·А;

$S_{pt}$  – мощность нетяговой нагрузки, получающей питание от понижающих трансформаторов, кВ·А;

$k_{доп ПТ t}$  – коэффициент допустимой перегрузки выпрямительного преобразователя для соответствующего периода усреднения  $t$ ;

– понижающих трансформаторов подстанций переменного тока:

$$k_{зТt} = \frac{3 \cdot U_{\phi t} \cdot I_{\phi max t} + S_{pt}}{\sum_i (S_{Тном i} \cdot k_{допТt})}, \quad (1.4)$$

где:  $U_{\phi t}$  – среднее значение напряжения за период времени  $t$ , в котором зафиксирован максимальный фазовый ток обмоток  $I_{\phi max t}$ , В.

Нагрузочная способность понижающих трансформаторов в соответствии с ГОСТ 14209-85 Трансформаторы силовые масляные общего назначения. Допустимые нагрузки [17] оцениваются по максимальной температуре наиболее нагретой точки обмотки и масла в верхних слоях. В этом случае коэффициент загрузки определяется с учетом нагрева обмотки и масла по формулам соответственно:

$$k_{зO\tau} = \left( \frac{\tau_{обм max} - \tau_B - 18}{\tau_{ннт доп} - \tau_B - 18} \right)^{0,56}, \quad (1.5)$$

$$k_{зM\tau} = \left( \frac{\tau_{M max} - \tau_B - 17}{\tau_{M доп} - \tau_B - 17} \right)^{0,56}, \quad (1.6)$$

где:  $\tau_B$  – температура воздуха, принимаемая в расчетах равной  $35^\circ\text{C}$ ;

$\tau_{ннт доп}$  – допустимая температура для наиболее нагретой точки обмотки,  $^\circ\text{C}$ ;

$\tau_{M доп}$  – допустимая температура масла в верхних слоях,  $^\circ\text{C}$ ;

б) коэффициент загрузки тяговой сети по уровню напряжения:

$$k_{3U} = \frac{U_{xx} - U_{\min}^{3\text{мин}}}{U_{xx} - U_{\text{доп}}^{3\text{мин}}}, \quad (1.7)$$

где:  $U_{xx}$  – среднее напряжение холостого хода подстанций, питающих межподстанционную зону;

$U_{\min}^{3\text{мин}}$  – минимальное напряжение на токоприемнике электроподвижного состава на интервале усреднения 3 мин, В;

$U_{\text{доп}}^{3\text{мин}}$  – минимально допустимый уровень напряжения на токоприемнике электроподвижного состава, В;

в) коэффициент загрузки по допустимой температуре нагрева проводов контактной сети:

$$k_{3Kt} = \left( \frac{\tau_{\max t} - \tau_{\text{в}}}{\tau_{\text{доп} t} - \tau_{\text{в}}} \right)^{0,43}, \quad (1.8)$$

где:  $\tau_{\max t}$  – максимальное усредненное на интервале  $t$  (1, 3 и 20 мин) значение температура нагрева проводов контактной сети, °С;

$\tau_{\text{доп} t}$  – допустимая температура нагрева за соответствующей, °С.

Расчет показателей загрузки элементов СТЭ для условий неравномерной электротяговой нагрузки приводит к появлению критичных значений показателей, ограничивающих пропускную и провозную способность участка железной дороги. График изменения коэффициента загрузки для выпрямительного преобразователя на примере одной тяговой подстанции постоянного тока по 30-мин интервалам усреднения позволяет оценить продолжительность перегрузки (рисунок 1.3).

Неравномерность графика электротяговой нагрузки обуславливает невысокий удельный вес случаев перегрузки выпрямительных агрегатов тяговых подстанций (рисунок 1.4).

Напряжение на токоприемнике локомотива зависит от параметров СТЭ и формирующейся тяговой нагрузки на межподстанционной зоне. При оценке

пропускной и провозной способности уровень напряжения выступает ограничивающим фактором в период непродолжительных пиковых тяговых нагрузок.

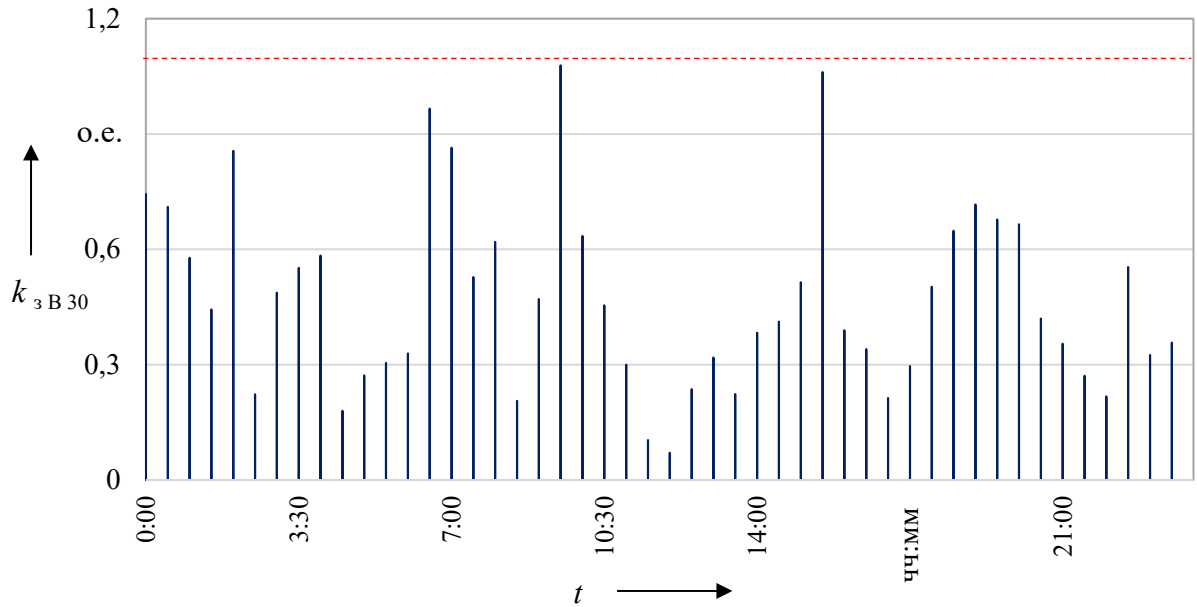


Рисунок 1.3 – Коэффициент загрузки выпрямительного агрегата по 30-мин интервалам

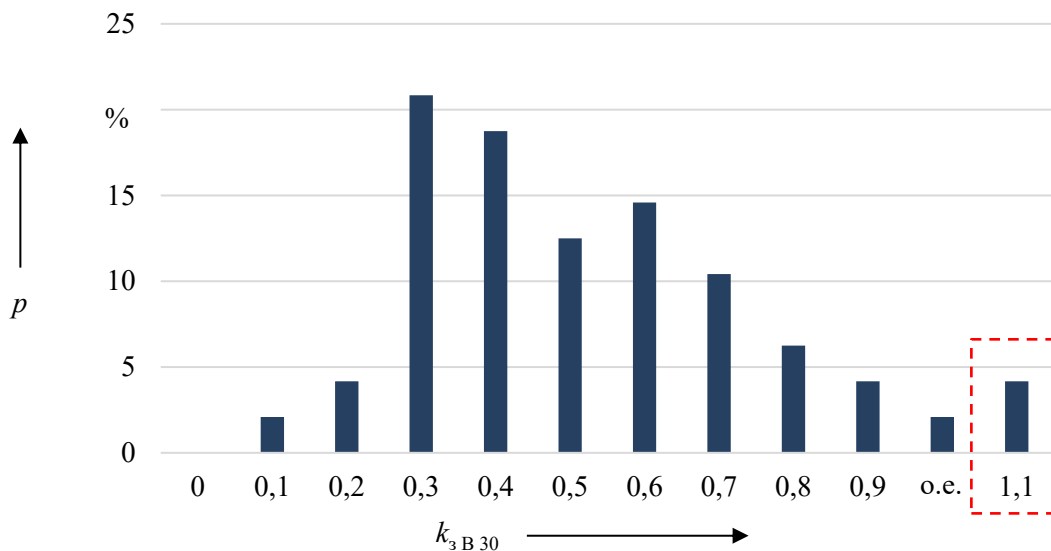


Рисунок 1.4 – Распределение коэффициента загрузки выпрямительных преобразователей

График изменения коэффициента загрузки по уровню напряжения, рассчитанному по 3-мин интервалам, для условий поездки локомотива серии

2ЭС10 по одному из участков Свердловской железной дороги приведен на рисунке 1.5. Удельный вес критичных значений коэффициента загрузки по уровню напряжения также относительно низок (рисунок 1.6).

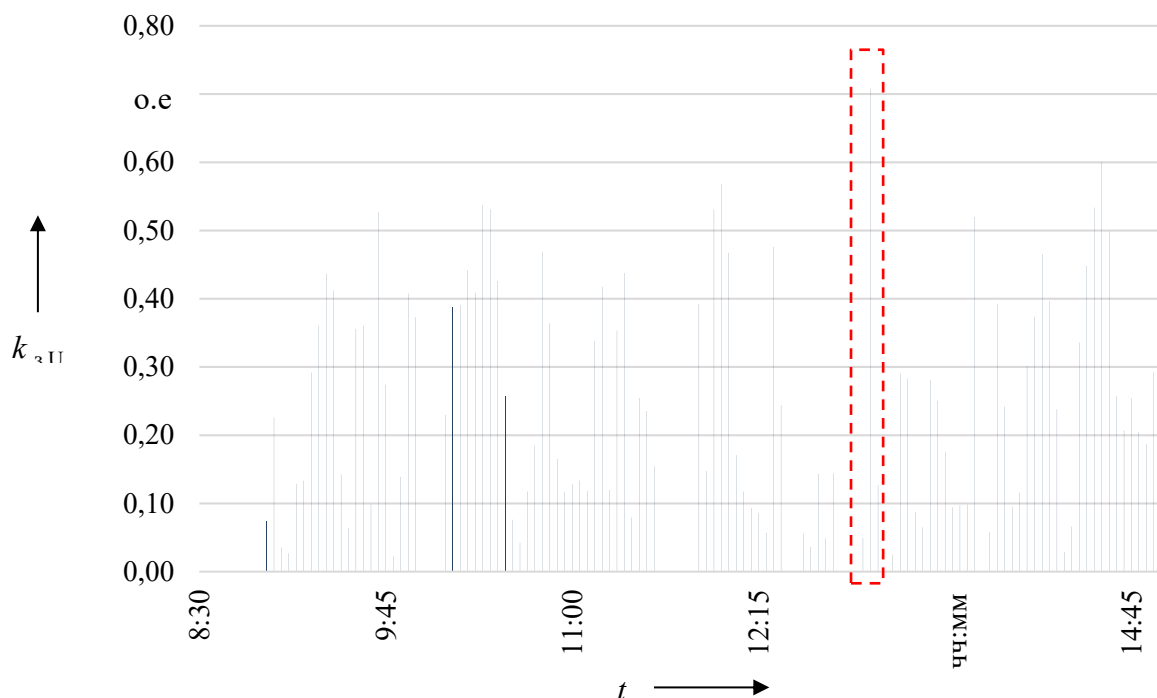


Рисунок 1.5 – Коэффициент загрузки по уровню напряжения на токоприемнике локомотива по 3-мин интервалам

Необходимость снижения перегрузок выпрямительных преобразователей привела к появлению агрегатов, номинальный ток которых составляет 5 кА. В отличие от широко распространенных на сети дорог ОАО «РЖД» агрегатов, например, ТПЕД-3150-3,3к и В-ТПЕД-3,15к-3,3к с номинальным током 3,15 кА, применение выпрямительных агрегатов с бóльшим номинальным током (например, В-МПП-Д-5,0-3,3к производства ООО НИИЭФа-Энерго) позволяет снизить коэффициент загрузки выпрямителей более чем в 1,5 раза.

С целью снижения коэффициентов загрузки силовых трансформаторов на тяговых подстанциях применяются трансформаторы с форсированной мощностью. Например, трансформаторы ТДФ-16000/10000/35 (производства АО «Уралэлектротяжмаш»), обеспечивающие повышение

нагрузочной способности за счет дополнительной форсированной системы охлаждения, позволяющей снизить коэффициент загрузки трансформаторов в 1,6 раза.

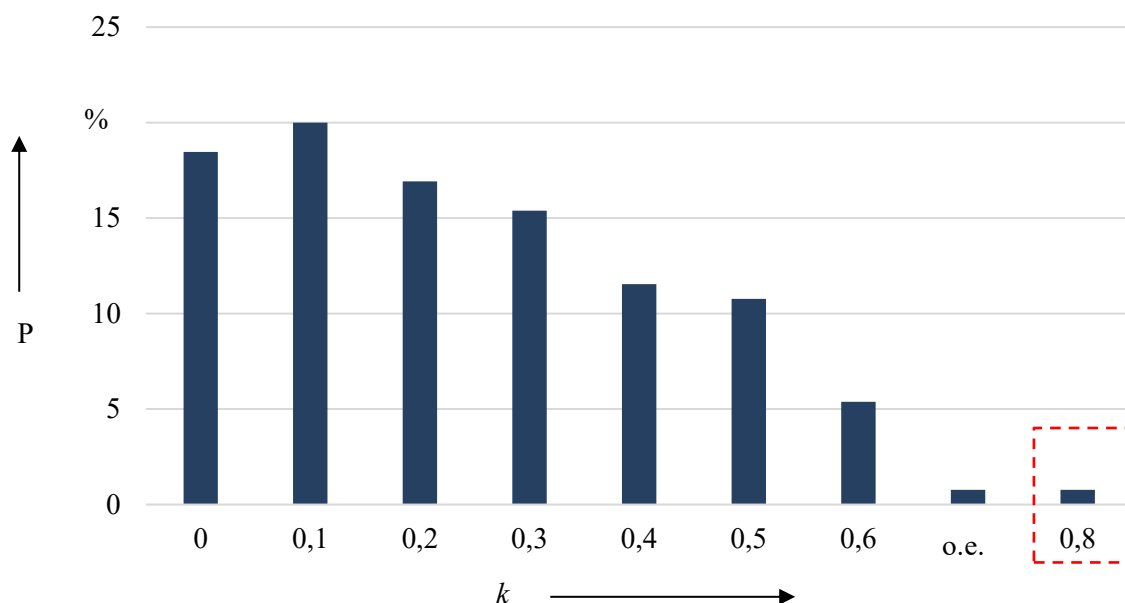


Рисунок 1.6 – Распределение коэффициента загрузки по уровню напряжения на токоприемнике

Перспективным решением, направленным на снижение загрузки силового оборудования и повышения уровня напряжения, является применение СНЭЭ в тяговой энергетике. В настоящее время в мире известны пилотные проекты по внедрению СНЭЭ в СТЭ железных дорог и метрополитенов, в качестве бортовых устройств подвижного состава.

Помимо решения задач по повышению пропускной и провозной способности железных дорог применение СНЭЭ позволяет повысить эффективность рекуперативного торможения за счет улучшения условий его применения и последующего использования электроэнергии рекуперации.

Силовое оборудование и устройства усиления СТЭ в зависимости от параметров оказывают различное влияние на показатели работы СТЭ (рисунок 1.7).

СНЭЭ не имеют ограничений в части места размещения в СТЭ. Применение технологий накопления электроэнергии направлено на изменение

нагрузочной способности СТЭ и предназначено регулирования уровня загрузки силового оборудования и напряжения, потерь энергии и мощности и объем энергии рекуперации.

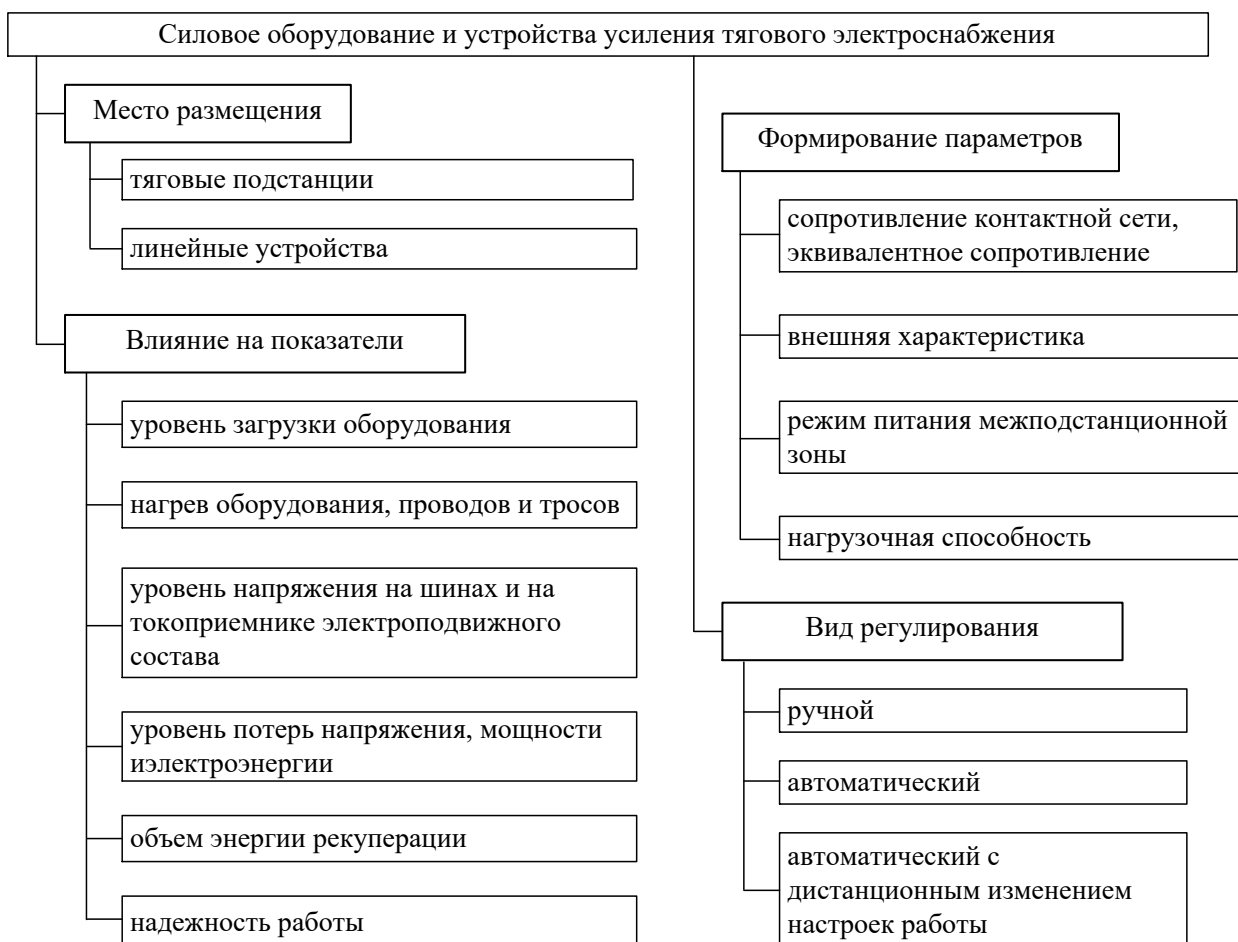


Рисунок 1.7 – Основные параметры и показатели работы системы тягового электроснабжения

## 1.2 Проблематика совершенствования систем тягового электроснабжения с системами накопления электроэнергии

Совершенствование СТЭ предполагает выбор вариантов реконструкции или модернизации устройств по критерию достижения целевых уровней ключевыми эксплуатационными показателями.

В данном случае варианты реконструкции и модернизации позволяют решать следующие задачи: повышение пропускной и провозной способности;

улучшение качества электроэнергии; аварийное электроснабжение и повышение энергетической эффективности. В качестве основных эксплуатационных показателей при решении указанных задач рассматриваются следующие: повышение уровня и стабилизация напряжения на токоприемнике; выравнивание графика тяговой нагрузки; повышение энергетической эффективности СТЭ; повышение надежности электроснабжения в различных режимах работы.

### *1.2.1 Стабилизация уровня напряжения на токоприемнике электроподвижного состава в границах межподстанционных зон*

Управление режимами работы СНЭЭ по уровню напряжения на шинах тяговой подстанции, линейного устройства или электроподвижного состава позволяет обеспечить поддержание заданного уровня напряжения. Исключение ограничивающего фактора по уровню напряжения на токоприемнике приводит к повышению пропускной и провозной способности на межподстанционной зоне (с учетом других факторов в нормальных и вынужденных режимах питания).

Необходимость поддержания напряжения на токоприемнике в требуемом диапазоне возникает в условиях роста тяговых нагрузок, обусловленных ростом масс поездов или скоростей движения. При движении по межподстанционной зоне изменение уровня напряжения на токоприемнике электроподвижного состава определяется режимами вождения поездов, их количеством и размещением на межподстанционной зоне, режимом работы тяговых подстанций и др. В связи с этим график напряжения на токоприемнике отличается от классического, где минимум напряжения наблюдается в середине межподстанционной зоны. Снижение напряжения до уровня минимально допустимых значений характеризуется относительно небольшой протяженностью и продолжительностью (рисунок 1.8, для условий следования поезда массой 9006 т с локомотивом серии ЗЭС4к).

Для наиболее тяжелых условий пропуска на участках с горным типом профиля снижение мгновенных значений напряжения до минимально допустимых уровней может достигать 20 – 30 % (рисунок 1.9, для условий следования поезда массой 9006 т с локомотивом серии ЗЭС4к).



Рисунок 1.8 – Напряжение на токоприемнике при следовании локомотива серии ЗЭС4к по участку Октябрьской железной дороги

При решении задач по поддержанию уровня напряжения в контактной сети опираются на данные эксплуатационной отчетности об уровне напряжения на токоприемнике электроподвижного состава и расчетов, позволяющих определить ординату в границах межподстанционных зон с минимальным уровнем напряжения.

Учитывая распределение напряжения на токоприемнике в границах межподстанционной зоны, в первую очередь следует рассматривать размещение СНЭЭ, на существующих или проектируемых линейных устройствах (постах секционирования, пунктах параллельного соединения и автотрансформаторных пунктах).

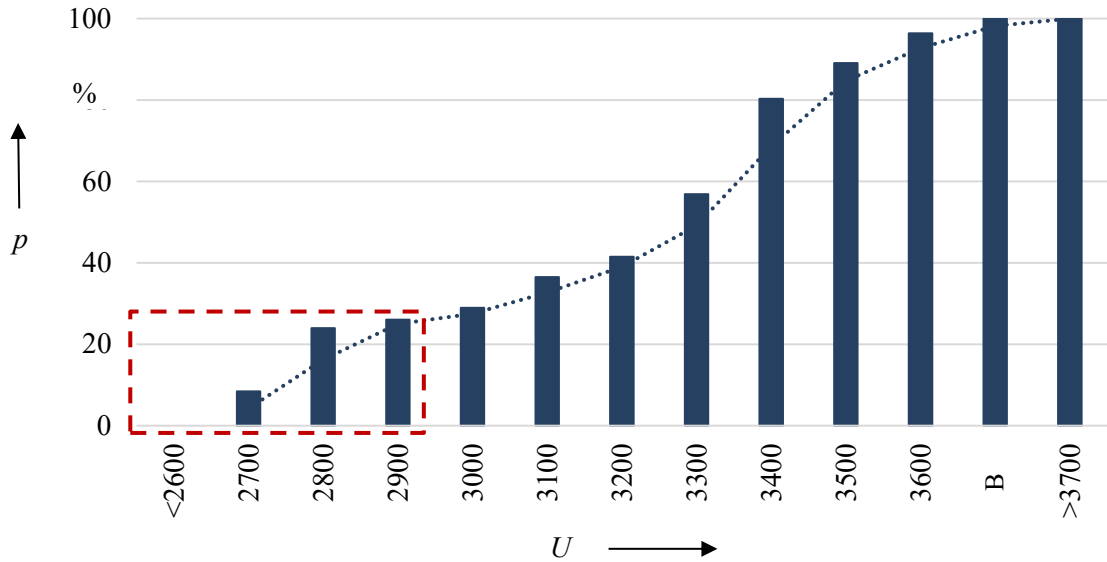


Рисунок 1.9 – Кумулятивное распределение напряжения на токоприемнике локомотива на Октябрьской железной дороге

Решение задачи позволяет сформировать вектор параметров СНЭЭ, определяемый как функция, зависящая от фактического и минимально допустимого уровня напряжения на шинах объекта и коэффициента загрузки по напряжению:

$$\left\{ \begin{array}{l} X = F(U_{ш m}, U_{ш \text{ мин(макс)}}, k_{3U}) \rightarrow opt \\ X = \{x_i, i = 1 \dots N_{п}\} \\ \forall m \in N_j: \\ U_{ш m \text{ мин}} < U_{ш m} < U_{ш m \text{ макс}} \\ \forall n \in N_{jk}: k_{3U n} < 1 \end{array} \right. , \quad (1.9)$$

где:  $U_{ш m}$ ,  $U_{ш \text{ мин(макс)}}$  – фактическое и минимально (максимально) допустимое напряжение соответственно на шинах объекта  $m$ , определяемое по заданным интервалам усреднения, В;

$X$  – вектор параметров СНЭЭ размерностью  $N_{п}$ ;

$m$  – линейное устройство или тяговая подстанция, входящие в  $j$ -ю рассматриваемую межподстанционную зону множества  $N_j$ ;

$n$  – локомотив или моторвагонный подвижной состав, входящий в  $k$ -ю

группу электроподвижного состава, следующую по  $j$ -й межподстанционной зоне из множества  $N_{jk}$ .

Размещение СНЭЭ, в общем случае состоящей из накопителя электроэнергии, преобразователя и трансформатора, на посту секционирования (ПС) позволяет поддерживать уровень напряжения на его шинах в заданном диапазоне. Система СНЭЭ подключена к контактной сети (к.с) через шины ПС постоянного тока (рисунок 1.10).

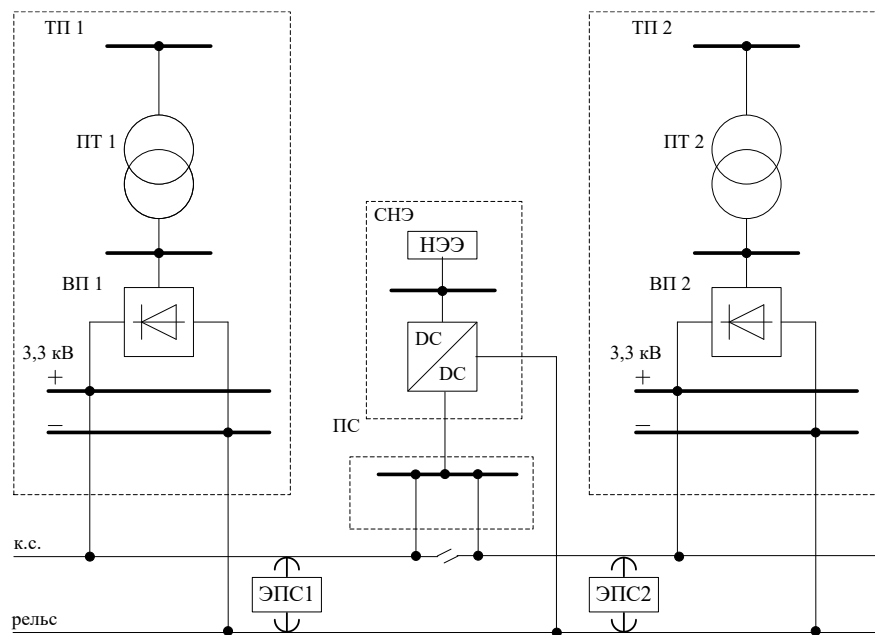


Рисунок 1.10 – Система накопления электроэнергии на линейных пунктах

СНЭЭ с накопительным модулем электроэнергии (НЭЭ) подключена к шинам ПС через преобразователь постоянно-постоянного напряжения DC/DC. Работа СНЭЭ осуществляется параллельно с выпрямительными преобразователями (ВП), подключенными с одной стороны к силовым понижающим трансформаторам (ПТ), с другой – через быстродействующие автоматические выключатели тяговых подстанций (ТП) к контактной сети. Различием в составе оборудования СНЭЭ для применения на линейных устройствах СТЭ переменного тока является тип преобразователя – переменного-постоянного напряжения (AC/DC).

### 1.2.2 Выравнивание графика тяговой нагрузки

Регулирование режимов работы СНЭЭ на ТП определяется потребляемой мощностью и направлено на снижение уровня потерь электроэнергии в силовом оборудовании и пиковой мощности тяговой нагрузки.

В первом случае решение задачи обеспечивает повышение энергетической эффективности работы силового оборудования, во втором – снижение его загрузки.

Выравнивание графика электрической нагрузки позволяет снизить пиковую потребляемую мощность, уровень перегрузки и требования к установленной мощности ТП (рисунок 1.11). Кратковременность возмущений в течение пиковых суммарных нагрузок ТП (рисунок 1.12) позволяет относительно небольшой мощностью и энергоемкостью СНЭЭ исключить перегрузку силового оборудования без увеличения его номинальной мощности.

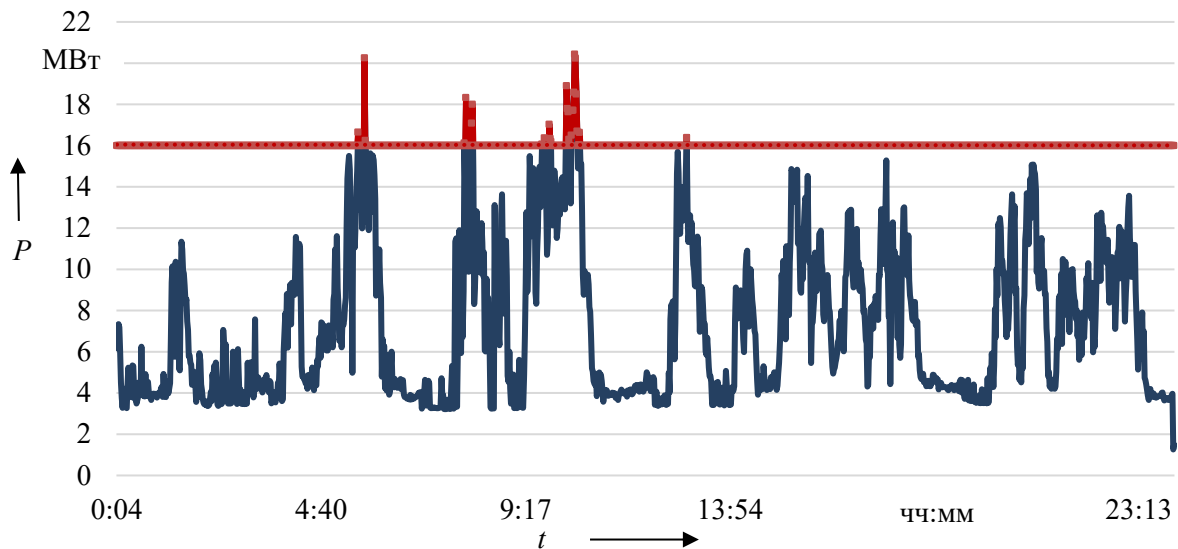


Рисунок 1.11 – Суточный график нагрузки тяговой подстанции Западно-Сибирской железной дороги

При решении задачи выравнивания графика тяговой нагрузки и снижения коэффициента загрузки силового оборудования тяговых

подстанций СНЭЭ размещают на тяговых подстанциях для обеспечения параллельной работы с выпрямительными преобразователями (рисунок 1.13).

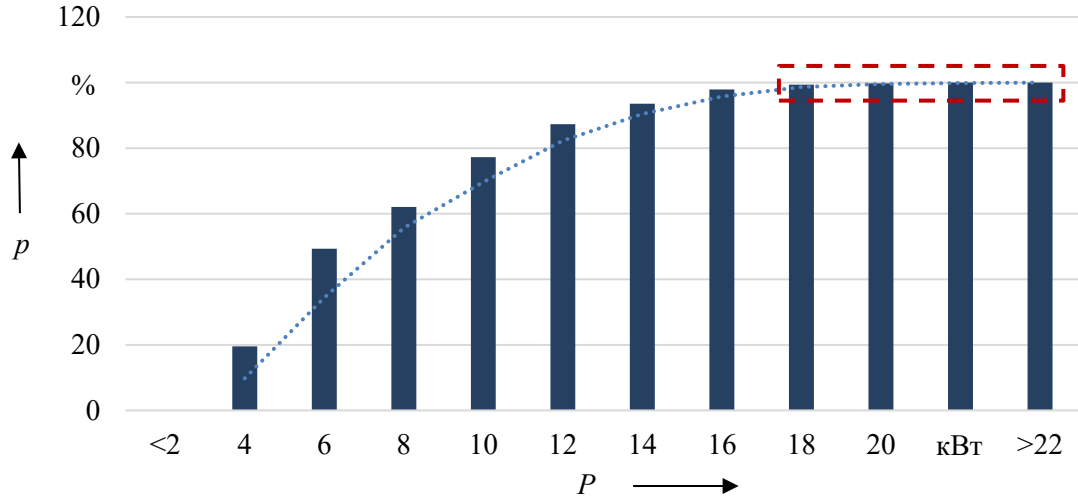


Рисунок 1.12 – Кумулятивное распределение нагрузки тяговой подстанции на Западно-Сибирской железной дороге

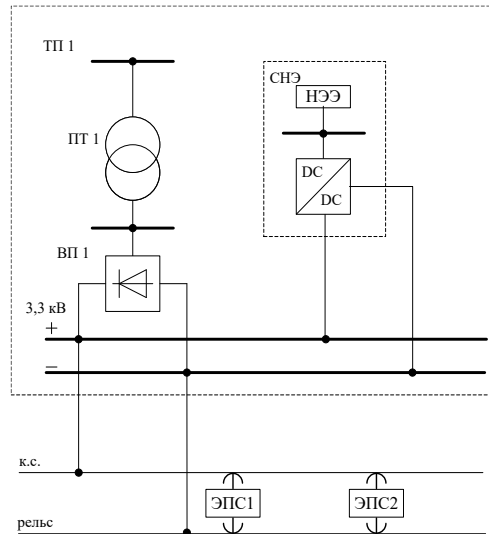


Рисунок 1.13 – Система накопления электроэнергии на тяговых подстанциях

Вектор расчетных параметров СНЭЭ определяется как функция, зависящая от значений выпрямленного тока  $I_{d1}$ , максимального фазного тока силового понижающего (преобразовательного) трансформатора  $I_{\phi \max}$ , коэффициента загрузки и допустимой перегрузки силового оборудования:

$$\left\{ \begin{array}{l} X = F(I_{d t}, I_{\text{ф макс } t}, k_{z j t}, k_{\text{доп } j t}, k_{\text{гр } k s}) \rightarrow \text{opt} \\ X = \{x_i, i = 1 \dots N_{\text{п}}\} \\ \forall m \in N_j: \\ k_{z k t} < k_{\text{доп } k t} \\ I_{d t} < I_{\text{ф макс } t} \\ k_{\text{гр } k s \text{ мин}} < k_{\text{гр } k s} < k_{\text{гр } k s \text{ макс}} \end{array} \right. \quad (1.10)$$

где:  $k_{z k t}$  и  $k_{\text{доп } k t}$  – коэффициенты загрузки и допустимой перегрузки силового оборудования по интервалам усреднения  $t$  для  $k$ -го силового оборудования;

$I_{d t}$  – среднее значение выпрямленного тока подстанции за период  $t$ , А;

$I_{\text{ф макс}}$  – максимальное значение фазного тока силового (преобразовательного) трансформатора тяговой подстанции, А;

$k_{\text{гр } k s \text{ (мин, макс)}}$  –  $k$ -й параметр графика нагрузки для  $s$ -го силового оборудования.

Состав оборудования СНЭЭ при этом не изменяется (включает в себя преобразователь DC/DC и НЭЭ). При применении СНЭЭ на тяговых подстанциях переменного тока применяется преобразователь AC/DC. Работа СНЭЭ на тяговой подстанции осуществляется параллельно выпрямительному преобразователю.

### *1.2.3 Повышение энергетической эффективности системы тягового электроснабжения при применении систем накопления электроэнергии*

Применение рекуперативного торможения на участках с горным профилем пути или в условиях частого чередования режимов разгон-торможение-остановка оказывает значительное влияние на характер изменения напряжения на токоприемниках электроподвижного состава в границах межподстанционной зоны.

СНЭЭ при решении данной задачи выступают в роли приемников энергии рекуперации, работа которых направлена на снижение потерь электроэнергии в тяговой сети и силовом оборудовании при протекании

энергообменных процессов и сокращение тягового электропотребления на подстанциях. Регулирование режимов работы определяется уровнем напряжения на шинах тяговой подстанции и линейного устройства и режимом работы электроподвижного состава.

Режимы вождения электроподвижного состава определяют интенсивность рекуперативного торможения. По сети железных дорог ОАО «РЖД» доля энергии рекуперации в среднем составляет около 5 %, достигая для некоторых участков 40 – 50 %, в частности, для участков с преобладанием городского движения моторвагонного подвижного состава в условиях Московского центрального кольца (МЦК) (рисунок 1.14).

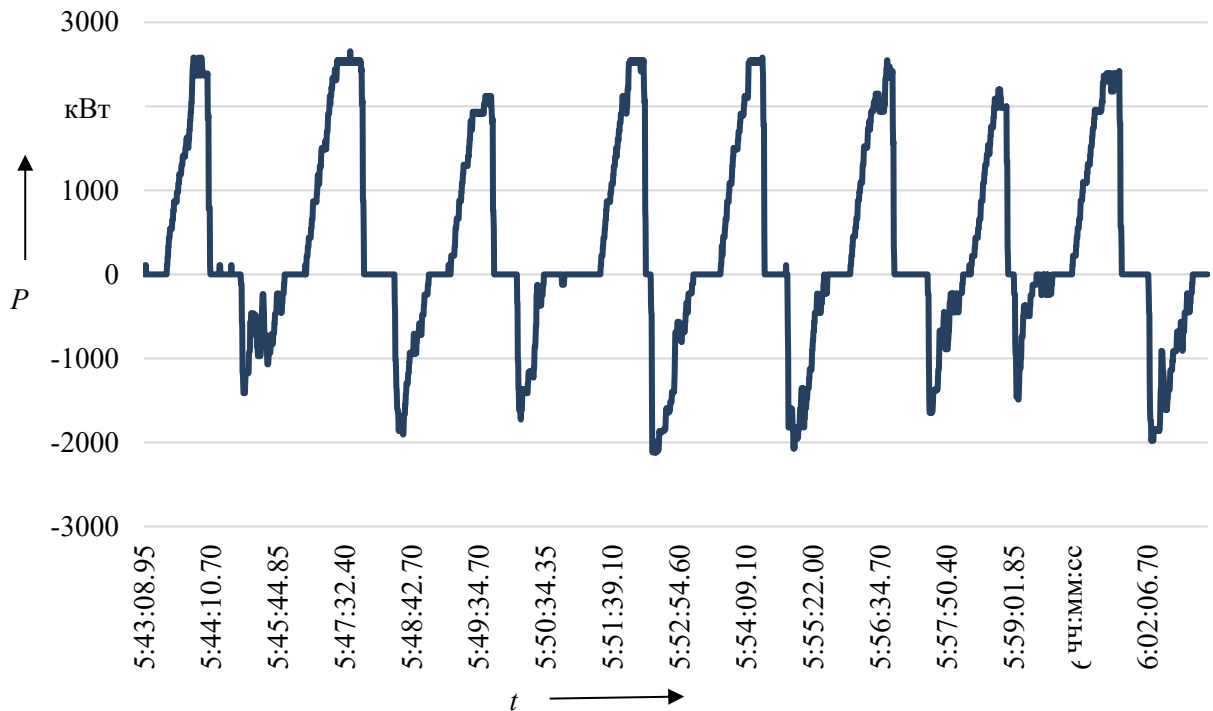


Рисунок 1.14 – Фрагмент тяговой нагрузки электропоезда серии ЭС2Г на МЦК

Решение задачи повышения энергетической эффективности СТЭ связано с выбором мест размещения СНЭЭ на тяговых подстанциях или линейных пунктах. Факторами, влияющими на изменение уровня энергетической эффективности при выборе размещения СНЭЭ, служат нагрузочный режим в границах межподстанционной зоны и режимы вождения

электроподвижного состава, определяющие частоту применения рекуперативного торможения и объемы энергии рекуперации.

В данном случае вектор параметров СНЭЭ определяется уровнем энергетической эффективности:

$$\begin{cases} X = F(\mathcal{E}_j) \rightarrow opt \\ X = \{x_i, i = 1 \dots N_n\}, \\ \forall N_j: \mathcal{E}_j < \mathcal{E}_{min j} \end{cases} \quad (1.11)$$

где:  $\mathcal{E}_j$ ,  $\mathcal{E}_{min j}$  – фактический и минимальный уровень энергетической эффективности для  $j$ -й межподстанционной зоны, кг у.т. / прив. ткм нетто.

#### *1.2.4 Повышение надежности электроснабжения в различных режимах работы при применении систем накопления электроэнергии*

Размещение различного вида СНЭЭ в СТЭ повышает надежность электроснабжения за счет обеспечения подачи напряжения в контактную сеть при отключении электропитания со стороны питающих ТП (исключая аварийные режимы работы). В данном случае параметры СНЭЭ должны обеспечивать минимальный уровень технологического потребления по условиям безопасности движения.

В отдельных случаях параметры СНЭЭ проектируются таким образом, чтобы обеспечить движение поезда к ближайшей попутной станции или разъезду. Примером данного решения могут служить железные дороги Японии, на которых СНЭЭ обеспечивают не только поддержание напряжения, выравнивание графика и прием энергии рекуперативного торможения, но и аварийный вывод пригородного поезда с перегона на ближайшую станцию [18].

При необходимости повышения надежности работы в вынужденных или послеаварийных режимах размещение СНЭЭ выбирается таким образом, чтобы обеспечить минимальный уровень технологического потребления электроэнергии, определяемый необходимостью безопасной остановки или вывода ЭПС на безопасный участок. В этом случае вектор параметров СНЭЭ

будет определяться как функция, зависящая от требуемых мощности и объема электропотребления в границах межподстанционной зоны:

$$\begin{cases} X = F(P_j, W_j) \rightarrow opt \\ X = \{x_i, i = 1 \dots N_n\} \\ \forall N_j: P_{\min j} \geq P_j; W_{\min j} \geq W_j \end{cases}, \quad (1.12)$$

где:  $P_j$  и  $P_{\min j}$  – мощность минимального технологического потребления на  $j$ -й межподстанционной зоне множества  $N_j$  и минимальная мощность СНЭЭ соответственно для вынужденного или послеаварийного режимов соответственно;

$W_j$  и  $W_{\min j}$  – минимальный объем технологического электропотребления на межподстанционной зоне  $N_j$  и энергоемкость СНЭЭ для вынужденного или послеаварийного режимов соответственно.

Решение указанных задач основано на выборе размещения СНЭЭ в ключевых точках СТЭ, ограничивающих пропускную или провозную способность межподстанционных зон, с низкой эффективностью использования установленной мощности силового оборудования, с низким уровнем энергетической эффективности и надежности электроснабжения электротяговой нагрузки.

На втором этапе решения задач определяются требуемые параметры и характеристики СНЭЭ для расчетных режимов работы (нормального, вынужденного и послеаварийного).

Результаты расчетов позволяют оценить требуемые значения параметров и характеристик СНЭЭ для рассматриваемых режимов работы СТЭ, выполнить выбор вида НЭЭ и определить состав оборудования системы.

В связи с тем, что параметры и характеристики различных видов НЭЭ отличаются, при выборе конкретного вида необходимо учитывать расчетные условия его работы при решении рассмотренных задач в СТЭ.

### 1.3 Обзор основных характеристик и параметров систем накопления электроэнергии для систем тягового электроснабжения постоянного и переменного тока

В настоящее время промышленностью выпускаются НЭЭ различного вида, к которым относятся следующие: электрохимические аккумуляторы (химические источники тока); редокс-накопители; гидроаккумулирующие электрические станции; электрические (ионисторы или суперконденсаторы); электромеханические (кинетические) устройства; накопители, использующие энергию сжатого воздуха, температуры, колебаний среды и др.

Указанные устройства нашли применение в различных областях электроэнергетики: распределенной генерации; возобновляемой энергетике; промышленности; жилищно-коммунальном хозяйстве; на транспорте; в домашних хозяйствах; системах электроснабжения специального назначения и др.

Отличие характеристик известных видов НЭЭ [19, 20, 239 – 241.], обуславливает различные области их применения. Выпускаемые промышленностью образцы отличаются по ключевым для НЭЭ параметрам: мощность; энергоемкость; емкость; максимальные токи; напряжение элемента системы и др. (таблица 1.1). Сравнение НЭЭ осуществляется как по удельным, так и по номинальным параметрам и характеристикам. На сегодняшний день наибольшее распространение на рынке хранения электроэнергии получили электрохимические, электрические и электромеханические виды НЭЭ.

При сравнении удельных характеристик широко используется диаграмма Рэйгона [242 – 244] в координатах удельная мощность – удельная энергоемкость, позволяющая сравнивать энергетические характеристики НЭЭ. Указанное и аналогичные ему сравнения (рисунок 1.15), например, на единицу объема, позволяют решать задачи выбора вида, параметров и размещения НЭЭ, например, в ограниченном пространстве на борту транспортного средства.

Таблица 1.1 – Основные характеристики накопителей электроэнергии

Параметр		Лиотех (РФ) LT-LFP 270 (Li-Ion)	Hitachi (Japan) LL1500-WS-8 (Pb)	Kawasaki (Japan) Gigacell (Ni-Mh)	Maxwell (USA) BMOD0004 P240 B02	Кинемак (РФ) НКЭ-3Г
Мощность, кВт		2,6	7,2	96 (10 с)	48	300
Энергоемкость, кВт·ч		0,85	12,0	5,4	30	1,95
Номинальная емкость, А·ч		265	1500	150	– (3,75 Ф)	–
Удельная мощность, Вт/кг		292	15,1	400	3300	0,086
Удельная энергоемкость, Вт·ч/кг		95	25,1	23	2,2	0,557
Максимальный ток, А	разряда	810	900	150	200	790
	заряда	270	450	75	200	790
Номинальное напряжение, В		3,2 =	8 =	36 =	240 =	380~
Ресурс, количество циклов		> 1000	< 1000	< 1000	500 000	–
Масса, кг		8,9	477	240	13,3	3500
Объем элемента, м <sup>3</sup>		$5,7 \cdot 10^{-3}$	0,191	0,652	0,018	3,0
Срок службы, лет		< 8	17	< 10	10	20 (5*)

Примечание: (5\*) – срок службы с учетом ресурса подшипников.

К номинальным параметрам СНЭЭ принято относить: номинальную мощность (ток), разделяя ее для ряда устройств по режимам работы; номинальную энергоемкость; ресурс (наработка – количество циклов работы); скорость реагирования на изменения параметров электрической сети (быстродействие); номинальное напряжение и диапазон рабочих напряжений; допустимый уровень деградации энергоемкости и др. Показателями работы НЭЭ являются: степень заряженности и ее изменение; максимальная глубина разряда; продолжительность работы в различных режимах; накопленное количество циклов работы; пропускная способность и др.

Номинальные мощность и энергоемкость являются ключевыми параметрами НЭЭ, определяющими показатели его работы в режимах заряда и разряда. Номинальная мощность в режимах заряда и разряда для НЭЭ электрохимического вида отличается и оценивается относительно номинальной емкости  $C_n$ . Допустимые значения тока заряда для рассматриваемого вида, как правило, ниже соответствующих значений для разряда. Например, для литий-ионных аккумуляторов производства Лиотех марки LT-LFP 270 максимальный ток заряда составляет  $1C_n$ , а максимальный ток непрерывного разряда –  $3C_n$  [21].

Для других видов НЭЭ, например, электрического или электромеханического типа, мощность для режимов заряда и разряда существенно не отличается.

Указанное обстоятельство необходимо учитывать при определении требований к СНЭЭ для режимов заряда и разряда, обоснованного выбора номинальных параметров, обеспечения необходимой продолжительности работы и устойчивости.

Резко-переменный характер, присущий электротяговой нагрузке, определяет количество циклов работы СНЭЭ. Теоретические исследования позволяют оценить диапазон частоты циклов СНЭЭ для низкочастотных колебаний электротяговой нагрузки – от 0,1 до 5 циклов/час. В зависимости от уровня данной величины формируются требования к ресурсу работы, зависящему от количества циклов заряда-разряда и глубины разряда НЭЭ.

Скорость деградации энергоемкости электрохимических источников зависит от условий и срока их эксплуатации. Падение энергоемкости приводит к

увеличению глубины разряда НЭЭ и сокращению срока службы. Скорость деградации необходимо учитывать при планировании технического обслуживания (для своевременной замены элементов с критическим состоянием), определении энергоемкости для расчетных режимов работы.

Быстродействие СНЭЭ является важным параметром для условий работы с электротяговой нагрузкой, носящей резко переменный характер. Частота высокочастотных колебаний для электротяговой нагрузки выше, чем для низкочастотных колебаний, и находится в среднем в диапазоне 0,3 – 0,5 цикла/мин. Указанные условия работы формируют требования к времени включения системы в работу и скорости изменения мощности в режимах заряда и разряда.

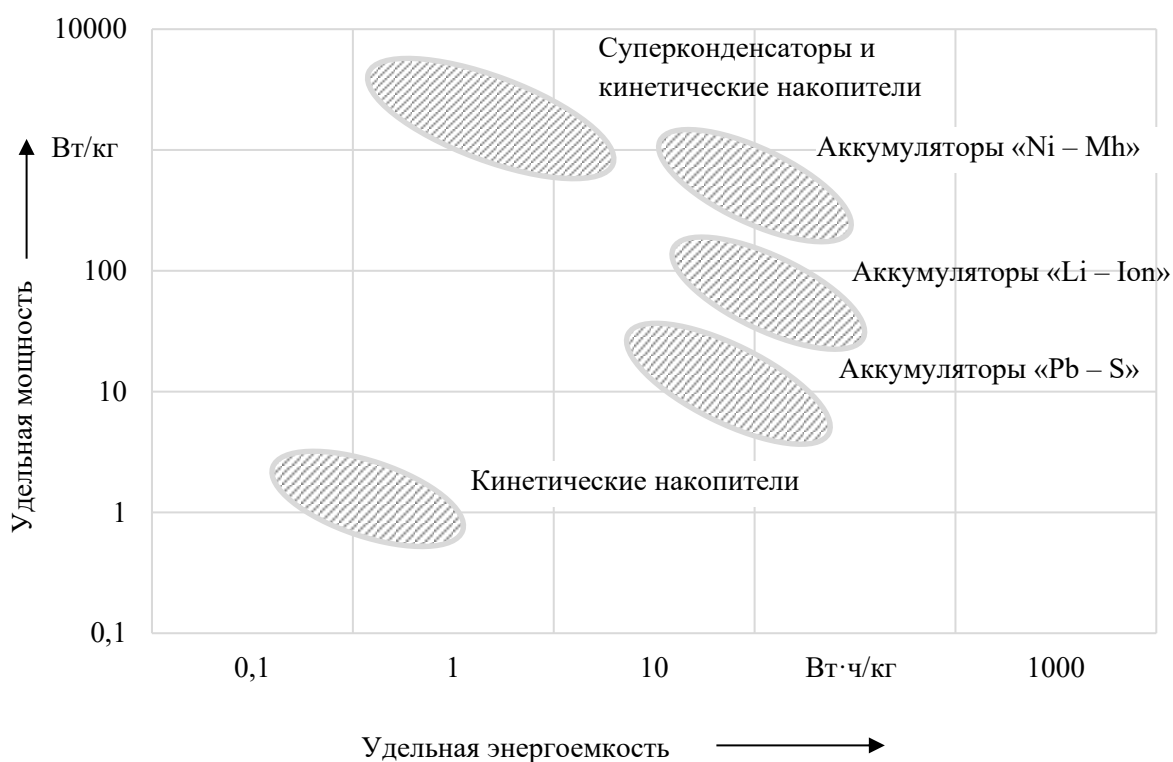


Рисунок 1.15 – Удельные характеристики накопителей электроэнергии

Работа СНЭЭ осуществляется в широком диапазоне напряжений, что связано с необходимостью обеспечения работы при повышении напряжения при рекуперативном торможении до максимальных значений и стабилизации напряжения при падении напряжения на токоприемниках до минимальной

границы рабочего диапазона. Выбор пороговых значений для режимов заряда и разряда СНЭЭ оказывает влияние на эффективность его работы и степень влияния показателей работы СТЭ. При реализации зарядной характеристики необходимо учитывать изменение режима напряжения в контактной сети.

Мировая тенденция расширения областей применения СНЭЭ обусловлена возможностью решения задач повышения эффективности эксплуатации наземных транспортных средств за счет обеспечения автономной работы транспорта, работы систем распределенной генерации, выравнивания графика электротяговой нагрузки, стабилизации напряжения, повышения энергетической эффективности и эффективности рекуперативного торможения [245 – 249] и др.

СНЭЭ применяются в системах электроснабжения распределенной генерации, наземного городского и пригородного транспорта во многих странах мира (Япония, Корея, Китай, Россия, Германия, Швейцария, США и др.) На железных дорогах и метрополитене Японии нашли применение СНЭЭ, выполненные на основе аккумуляторов различных типов (свинцово-кислотные, никель-металлогидридные, литий-ионные и др.) [22, 250]. На тяговых подстанциях метрополитена г. Осака применяются СНЭЭ, энергоемкость которых находится в диапазоне 225 – 600 кВт·ч. Необходимо отметить тенденцию роста энергоемкости СНЭЭ, например, в 2019 г. на пригородной железной дороге в г. Осака на базе литий-ионных аккумуляторов Tesla реализована энергоемкость 7 000 кВт·ч [251], которая уже на порядок выше энергоемкости НЭЭ, применяемой ранее в г. Осака. Аналогичное применение СНЭЭ нашли в метрополитенах других городов мира (Нью-Йорк, Вашингтон, Токио, Сеул, Москва и др.).

Особенностью линий метрополитена, городского и пригородного пассажирского сообщения является частая смена тягового режима и режима торможения. Данное обстоятельство определяет места целесообразного размещения СНЭЭ – на тяговых подстанциях или линейных устройствах, расположенных перед станциями и остановочными пунктами.

В настоящее время в России производят и проектируют значительную часть из известных и перспективных видов НЭЭ [23, 24]. К основным группам которых относят: электрохимические; электрические; электромагнитные и электромеханические (рисунок 1.16).



Рисунок 1.16 – Основные виды накопителей электроэнергии

По принципу управления режимами работы НЭЭ подразделяются на управляемые и неуправляемые с различной топологией. Первые образцы НЭЭ создавались как устройства неуправляемого типа. Примером реализации указанного типа НЭЭ является проект по применению СНЭЭ на одной из линий в Московском метрополитене, в котором системы были установлены на некоторых тяговых подстанциях СТЭ [25].

НЭЭ неуправляемого вида присоединяются к тяговой сети без преобразователей напряжения. Управление параметрами и режимами работы в

данном случае отсутствует, что относится к недостаткам указанного решения. Достоинством систем неуправляемого типа является относительная простота схемы и конструкции, в которых отсутствует преобразователь напряжения. Указанное решение предназначено для применения в тяговых сетях до 1000 В. При применении в тяговых сетях постоянного и переменного тока СТЭ железнодорожного транспорта необходимо применение соответствующих преобразователей AC/AC или AC/DC соответственно.

Энергоемкость СНЭЭ для применения в СТЭ железнодорожного транспорта зависит от решаемых задач, максимальный уровень данной величины для текущего уровня электротяговой нагрузки составляет около 10 МВт·ч, а максимальной мощности – на уровне 10 МВт. Указанная энергоемкость и мощность СНЭЭ реализуема на любых видах НЭЭ. В тоже время при выборе вида следует учитывать характеристики НЭЭ, например, наработку, которые должны обеспечивать их устойчивую и долговременную работу на электротяговую нагрузку.

Особенностью режимов работы СНЭЭ на железнодорожном транспорте является применение рекуперативного торможения, электрическая мощность которого определяется характеристиками электроподвижного состава, условиями его расположения на межподстанционной зоне и другими факторами.

Основными факторами, оказывающими влияние на энергетические показатели СТЭ, в которых размещены СНЭЭ, являются: токовые нагрузки; частота смены режимов работы электроподвижного состава; расположение поездов на межподстанционной зоне, определяемое графиком движения поездов; режим питания межподстанционных зон и параметры СТЭ [26, 27].

Эффективность работы СНЭЭ зависит от ряда факторов, связанных с параметрами СТЭ, условиями следования и режимами работы электроподвижного состава. Оценку эффективности при различных вариантах формирования электротяговой нагрузки целесообразно проводить на основе результатов имитационного моделирования, что позволяет оценить

формирование электротяговой нагрузки в условиях изменения межпоездного интервала и продолжительности режимов работы электроподвижного состава. Особенностью задачи по оценке формирования электротяговой нагрузки служит изменение условий организации движения, связанного с переходом от интервала движения поездов, определяемого по блок-участкам, к интервалу, определяемому по технологии «виртуальная автосцепка». В последнем случае происходит сокращение межпоездных интервалов возможно до минимальных по условиям безопасности движения поездов.

При моделировании оцениваются энергетические показатели работы СТЭ по межподстанционным зонам для вариантов, отличающихся местами размещения и параметрами СНЭЭ:

- объемы тягового электропотребления по тяговым подстанциям, в т. ч. объемы энергии рекуперации;

- параметры графика тяговой нагрузки и напряжения на шинах подстанций, линейных пунктов контактной сети и электроподвижного состава по заданным интервалам усреднения расчетных значений;

- коэффициенты загрузки силового оборудования;

- удельные энергетические характеристики (на единицу длины, массы, тоннокилометровой работы);

- потери мощности и энергии в элементах СТЭ.

Построение графиков электрической нагрузки ТП и СНЭЭ на основе заданных характеристик электротяговой нагрузки позволяет оценить следующие показатели работы:

- глубину разряда;

- изменение степени заряженности;

- расчетное количество циклов «заряд – разряд» с заданной глубиной разряда;

- продолжительность режимов заряда и разряда;

- максимальные токи в режимах заряда и разряда.

Определение показателей работы СНЭЭ позволяет на основе сравнительного анализа выбрать оптимальный вид по технико-экономическим параметрам, оценить ресурс работы, являющийся критичным для электрохимических НЭЭ, требуемые мощность, энергоемкость и суммарную стоимость.

Для различных условий работы СНЭЭ может оказаться предпочтительным тот или иной тип НЭЭ. Например, по результатам исследований применение СНЭЭ в СТЭ напряжением 3,3 кВ постоянного тока Польской транспортной компании характеризуется потенциальной экономией электроэнергии на тягу пассажирских поездов в размере около 1,5 млн кВт·ч в год [250]. Сравнение свинцово-кислотных, никель-металлгидридных и литий-ионных аккумуляторов, суперконденсаторов и кинематических НЭЭ для рассматриваемых условий Польши показывает, что на 10-летнем сроке эксплуатации наиболее экономически эффективным является проект с применением суперконденсатора (суммарные затраты составляют около 1,9 млн долл. США). Далее в порядке увеличения стоимости проекта на 10-летнем сроке эксплуатации, млн долл. США следуют: свинцово-кислотный аккумулятор (2,5); кинетический накопитель (3,5); литий-ионный аккумулятор (4,8); никель-металлгидридный (5,1). Отличия в стоимости реализации проектов обусловлены различными стоимостными и техническими характеристиками рассмотренных видов НЭЭ [236 – 256].

Характеристики НЭЭ, указанных выше, определяют использование накопителей электрического вида для сглаживания электрической нагрузки при кратковременных возмущениях, а электрохимических и электромеханических – для сглаживания низкочастотной части графика нагрузки в различных режимах [257 – 259].

Ионисторы (суперконденсаторы) наряду с электрохимическими источниками нашли применение в качестве бортовых систем на городском (электробус, трамвай) и железнодорожном (тепловоз) транспорте [28 – 31, 32,

260, 261], построение на их базе гибридных устройств является наиболее целесообразным.

Для суперконденсатора запасенная электроэнергия определяется по формуле:

$$W_c^{\text{НЭ}} = \frac{CU^2}{2}, \quad (1.13)$$

где:  $C$  – емкость суперконденсатора;

$U$  – напряжение на обкладках конденсатора.

Объем электроэнергии, реализуемый при разряде ионистора, определяется по формуле:

$$W_p^{\text{НЭ}} = \frac{1}{2}C(U_{p \text{ нач}}^2 - U_{p \text{ кон}}^2), \quad (1.14)$$

где:  $U_{p \text{ нач}}$  и  $U_{p \text{ кон}}$  – напряжение на клеммах ионистора в начале и конце разряда.

В режиме заряда напряжение на зажимах ионистора определяется уровнем напряжения до заряда, током заряда и продолжительностью заряда [33] по формуле:

$$U_c = \frac{1}{C} \int i_3 dt + U_{z \text{ нач}}, \quad (1.15)$$

где:  $i_3$  – ток заряда;

$U_{z \text{ нач}}$  – напряжение на клеммах ионистора на момент начала заряда.

Соответственно в режиме разряда напряжение емкостного НЭЭ будет определяться по выражению:

$$U_c = U_{p \text{ нач}} - \frac{1}{C} \int i_p dt, \quad (1.16)$$

где:  $i_p$  – ток разряда в течение времени  $t_p$ ;

$U_{p \text{ нач}}$  – напряжение на клеммах ионистора до начала разряда.

Объем энергии, запасаемый ионистором при заряде  $W_3$ , определяется аналогично формуле (1.14).

Коэффициент полезного действия ионистора определяется по формуле для режима заряда –

$$\eta_3 = \frac{W_3}{W_3 + \Delta W_3}, \quad (1.17)$$

где:  $W_3$  – объем энергии, запасенный в НЭЭ при заряде;

$\Delta W_3$  – потери энергии в зарядном контуре;

для режима разряда –

$$\eta_p = \frac{W_p}{W_p + \Delta W_p}, \quad (1.18)$$

где:  $W_p$  – объем энергии, потребленный при заряде;

$\Delta W_p$  – потери энергии в разрядном контуре.

К электрохимическим НЭЭ относятся электрохимические генераторы и аккумуляторные батареи различного типа.

Емкость при разряде батареи током  $I$  определяется для накопителей электрохимического типа по формуле В. Пейкерта (W. Peukert, 1897) [259]:

$$C = I^n \cdot t = \text{const}, \quad (1.19)$$

где:  $n$  – постоянная Пейкерта;

$t$  – продолжительность разряда.

Состояние емкости определяется током разряда – чем выше уровень тока, тем ниже доступная емкость батареи.

При определении разрядной емкости  $C_p$  для другого значения тока разряда  $I_p$  с учетом формулы (1.19) можно использовать уравнения:

$$I^n \cdot t = C \cdot I^{n-1} \quad \text{и} \quad I_p^n \cdot t_p = C_p \cdot I_p^{n-1}. \quad (1.20)$$

Приравнивая правые части уравнений (1.20) друг к другу, можно записать формулу для определения разрядной емкости  $C_p$  с заданным током разряда  $I_p$ :

$$C_p = C \cdot \left( \frac{I}{I_p} \right)^{n-1}. \quad (1.21)$$

Напряжение аккумуляторной батареи  $E_t$  рассчитывается по формуле Шеферда [262]:

$$E_t = E_0 - R_{\text{вн}} \cdot I - K \left( \frac{1}{1-f} \right), \quad (1.22)$$

где:  $E_0$  – напряжение холостого хода заряженной батареи;

$R_{\text{вн}}$  – внутреннее омическое сопротивление батареи;

$I$  – переходное значение тока батареи;

$K$  – сопротивление поляризации;

$f$  – полезная емкость разряда, определяемая методом интеграции ампер-часов.

Для упрощенной модели аккумуляторной батареи, содержащей источник постоянного напряжения и внутреннее сопротивление, на основе закона Ома можно определить напряжение на нагрузке по формуле:

$$U_t = U_{oc} - I_{\text{АКБ}} \cdot R_{\text{вн}}, \quad (1.23)$$

где:  $U_{oc}$  – напряжение холостого хода заряженной батареи, зависящее нелинейно от степени заряженности батареи  $SoC$  и температуры  $T$ ;

$I_{\text{АКБ}}$  – ток аккумуляторной батареи;

$R_{\text{вн}}$  – внутреннее омическое сопротивление батареи, нелинейно зависящее от степени заряженности батареи  $SoC$  и температуры  $T$ .

Напряжение холостого хода батареи  $U_{oc}$  в зависимости от степени заряженности [257] определяется по формуле:

$$U_{oc} = E_o + \left( \frac{R \cdot T}{F} \right) \cdot \ln \left( \frac{SoC}{1 - SoC} \right), \quad (1.24)$$

где:  $R$  – идеальная газовая постоянная;

$T$  – абсолютная температура;

$F$  – постоянная Фарадея.

Уровень заряженности батареи  $SoC$  определяется по формуле:

$$SoC(t) = \frac{\int_{t_0}^t i(t) dt}{Q_0} \cdot 100 \%, \quad (1.25)$$

где:  $Q_0$  – емкость полностью заряженной батареи.

Изменение напряжения электрохимического НЭЭ в зависимости от глубины разряда  $DoD$  описывается с помощью разрядных характеристик, получаемых для аккумуляторов опытным путем. В ряде случаев для описания процессов заряда и разряда литий-ионных батарей применяют модель Тевенина (Thevenin) [263, 264], в которой батарея представляется на схеме замещения в виде  $RC$ -цепи.

Определение зарядных и разрядных характеристик различных видов НЭЭ, в т. ч. гибридных, позволяет выполнить моделирование режимов их работы и в динамике процессов оценить эффективность работы.

В качестве бортовых систем на электроподвижном составе нашли применение НЭЭ различных видов. На российских локомотивах серии ТЭМ9Н (производится АО «СТМ» с 2011 г.) применяется литий-ионная батарея емкостью 300 А·ч (масса батареи составляет 2,5 т), на локомотиве серии ТЭМ35 (производится АО «ТМХ» (БМЗ) с 2013 г.) – суперконденсатор (номинальная энергоемкость составляет 22,7 МДж, 6,3 кВт·ч) [34, 35]. Емкость бортовых СНЭЭ, применяемых за рубежом, сопоставима с отечественными образцами. Например, на локомотивах серии ND300 (Япония) и прототипах локомотива

GeneralElectric (США), емкость НЭЭ составляет от 90 до 1200 А·ч, энергоемкость – от 67 до 1000 кВт·ч.

Сравнение кислотных и литий-ионных аккумуляторов показывает, что по стоимостным характеристикам кислотные аккумуляторы превосходят литий-ионные, но уступают им по КПД, удельной энергоемкости и экологичности [36]. Ионисторы по технико-экономическим характеристикам превосходят литий-ионные аккумуляторы по большинству параметров за исключением удельной энергоемкости (на единицу массы). Преимуществом ионисторов перед электромагнитными НЭЭ (сверхпроводниковыми индуктивными) является относительно низкая стоимость удельной энергоемкости.

#### 1.4 Перспективы применения систем накопления электроэнергии в проекте цифровой системы тягового электроснабжения

Разработка концепции и формирование информационной модели цифровой СТЭ направлены на повышение эффективности ее работы и управления ею путем изменения технологии сбора, обработки и анализа информации о работе силового и коммутационного оборудования. Повышение эффективности работы СНЭЭ при реализации проекта цифровая СТЭ основано на переходе от автоматического управления на базе информации локального уровня к управлению с учетом информации о режимах, параметрах и показателях работы СТЭ.

На современном этапе СТЭ эксплуатируются с функциональными элементами цифровых сетей, которые не связаны между собой. К ним относятся: системы телемеханики; микропроцессорные терминалы релейной защиты и автоматики; автоматизированные информационно-измерительные системы измерений и учета электрической энергии и др. Работа указанных элементов в

рамках единой системы в различных режимах работы предусматривается в цифровой СТЭ.

Основными задачами, стоящими перед цифровыми СТЭ, являются [37 – 39, 265, 266]:

- обеспечение требуемого уровня надежности работы, в т. ч. за счет систем мониторинга состояния оборудования;
- оперативное управление конфигурацией сетей;
- ликвидация аварийных и обеспечение устойчивости послеаварийных режимов работы;
- контроль и регистрация основных параметров систем;
- повышение качества электрической энергии;
- повышение энергетической эффективности работы системы;
- обеспечение информационной безопасности;
- реализация интеллектуальных систем учета и измерений и др.

СНЭЭ относятся к активным потребителям, нагрузку которых можно регулировать в зависимости от решаемых задач, и являются элементом активно-адаптивных сетей. К указанным элементам применительно к СТЭ относятся: управляемые средства компенсации реактивной мощности; выпрямительно-инверторные преобразователи; СНЭЭ; устройства ограничения токов короткого замыкания; управляемые линии электропередачи (на основе новых композиционных материалов и высокотемпературных сверхпроводников).

Технологии управления СТЭ реализуются на базе следующих элементов:

- силовое, коммутационное и измерительное оборудование ТП и линейных пунктов контактной сети;
- активно-адаптивные элементы;
- системы мониторинга оборудования ТП и линейных пунктов;
- системы учета электрической энергии;
- информационные системы управления, сбора и отображения информации (SCADA), управления режимами работы сетей (DMS), управления

оперативными работами в сетях (OMS), управления энергопотреблением (EMS), отображения информации на карте местности (GIS), управления активами (AMS), цифрового проектирования сетей (DPS) и др.;

– системы, обеспечивающие информационную безопасность.

Управление СНЭЭ в СТЭ направлено на получение следующего эффекта:

– эффективное управление резервной мощностью ТП;

– регулирование тяговой нагрузки, в т. ч. при применении рекуперативного торможения электроподвижным составом;

– поддержание заданного уровня напряжения на токоприемнике электроподвижного состава;

– повышение энергетической эффективности и надежности электроснабжения;

– повышение надежности электроснабжения.

Потенциальной областью применения СНЭЭ являются СТЭ постоянного и переменного тока, системы нетягового электроснабжения напряжением до и свыше 1000 В, возобновляемые источники энергии. Решение задач с помощью СНЭЭ в системах электроснабжения железнодорожного транспорта требует мощности устройств «мегаваттного» диапазона. Системы данной мощностью производятся промышленностью за рубежом и России [40].

Управление СНЭЭ позволяет регулировать мощность в режимах заряда и разряда в зависимости от уровня напряжения на шинах тяговой подстанции, линейных устройств и токоприемниках электроподвижного состава (рисунок 1.17).

Помимо напряжения, информативным параметром для управления режимом работы СНЭЭ является уровень тяговой нагрузки по вводу и присоединениям ТП. В этом случае управление режимами работы СНЭЭ осуществляется по уровню и скорости изменения напряжения и тяговой нагрузки. Передача данных измерений электрических величин в СТЭ и электроподвижного состава в рамках информационной модели на СНЭЭ позволяет повысить эффективность работы СТЭ.



Рисунок 1.17 – Реализация управления системой накопления электроэнергии в цифровой системе тягового электроснабжения

Таким образом, направление совершенствования СТЭ является актуальным. На основе анализа состояния СТЭ и проблематики ее развития в современных условиях сформулирована **цель диссертационной работы** – разработка научно обоснованных технических, технологических и методологических решений и разработок, применение которых позволяет определять параметры и места размещения систем накопления электрической энергии с целью повышения нагрузочной способности тягового электроснабжения на лимитирующих межподстанционных зонах и энергетической эффективности перевозочного процесса.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **задачи**.

1. Определить параметры электротяговой нагрузки, оказывающие влияние на показатели нагрузочной способности и энергетические показатели системы тягового электроснабжения, на основе анализа условий ее формирования на

участках железной дороги.

2. Разработать математические модели, позволяющие определять влияние условий формирования электротяговой нагрузки на энергетические показатели системы тягового электроснабжения с учетом параметров графика движения.

3. Обобщить существующие способы и усовершенствовать методику определения параметров и мест размещения накопителей электроэнергии для систем тягового электроснабжения с целью повышения пропускной и провозной способности.

4. Усовершенствовать способы определения энергетических показателей системы тягового электроснабжения при применении накопителей электроэнергии.

5. Разработать модель системы тягового электроснабжения с гибридной системой накопления электроэнергии, содержащей аккумуляторную батарею и суперконденсатор, для определения энергетических показателей.

6. Определить параметры накопителей электроэнергии, оказывающие влияние на показатели нагрузочной способности системы тягового электроснабжения и потери электроэнергии.

7. Разработать новые технические и технологические решения по подключению накопителей электроэнергии на тяговых подстанциях и постах секционирования контактной сети в системе тягового электроснабжения постоянного и переменного тока для решения задач по повышению пропускной и провозной способности и энергетической эффективности.

8. Выполнить техническое обоснование применения систем накопления электроэнергии в тяговом электроснабжении железнодорожного транспорта.

## 1.5 Выводы по первой главе

Совершенствование СТЭ связано с необходимостью решения задач по улучшению эксплуатационных показателей, повышению пропускной и провозной способности и энергетической эффективности. Показано, что помимо известных способов усиления СТЭ применение СНЭЭ позволяет решать класс задач в области повышения пропускной и провозной способности и энергетической эффективности.

Коэффициенты загрузки силового оборудования и коэффициенты загрузки по уровню напряжения на токоприемнике электроподвижного состава носят кратковременный характер, что позволяет рассматривать задачу совершенствования СТЭ на основе соответствующего воздействия при применении СНЭЭ.

Направления совершенствования СТЭ включают в себя: поддержание уровня напряжения на токоприемнике, выравнивание графиков нагрузки, повышение энергетической эффективности, повышение надежности работы в вынужденных и послеаварийных режимах.

СНЭЭ нашли широкое применение в мире в качестве бортовых систем подвижного состава и стационарных систем, входящих в состав СТЭ наземного пригородного, городского рельсового транспорта и метрополитена.

Современные виды НЭЭ обладают различными характеристиками и параметрами в абсолютном и удельном выражении, что обуславливает рассмотрение вопроса о применении гибридных СНЭЭ, состоящих из НЭЭ двух и более видов.

Наличие ряда параметров, определяющих динамику изменения показателей работы СНЭЭ и энергетических показателей СТЭ, обуславливает необходимость имитационного моделирования их работы в СТЭ.

Построение цифровой СТЭ позволяет рассматривать управление СНЭЭ не только на основе показателей, измеряемых в точке присоединения к контактной сети, но и на основе измерений электрических величин на тяговых подстанциях, линейных пунктах контактной сети и электроподвижном составе.

## 2 АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ЭЛЕКТРОТЯГОВОЙ НАГРУЗКИ НА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ

Применение систем накопления электроэнергии обуславливает необходимость определения перечня показателей электротяговой нагрузки, воздействие на которые приводит к изменению нагрузочной способности и уровня энергетической эффективности тягового электроснабжения. Обозначенная в главе 1 проблематика вопросов в части совершенствования систем тягового электроснабжения, рассмотренные характеристики и параметры существующих систем накопления электроэнергии, перспективы их развития позволяют перейти к анализу факторов, оказывающих влияние на электротяговую нагрузку и объемы тягового электропотребления, разработке и усовершенствованию способов расчета показателей систем тягового электроснабжения для решения задач, поставленных в работе.

В настоящей главе выполнен анализ показателей тяговой нагрузки подстанций, выявлены ее особенности как стохастического процесса, выполнен выбор наиболее подходящих теоретических функций распределения для тяговой нагрузки и напряжения на шинах тяговых подстанций. Предложены показатели профилей пути, дополняющие классификацию по степени энергозатратности движения поезда, учитывающие условия применения электроподвижным составом рекуперативного торможения, сформирован перечень факторов, оказывающих влияние на электротяговую нагрузку систем тягового электроснабжения.

### 2.1 Анализ факторов, оказывающих влияние на показатели электротяговой нагрузки

Условия работы СТЭ определяются мощностью и электропотреблением электроподвижного состава. Особенностью формирования нагрузки ТП является

влияние взаимного расположение электроподвижного состава в границах межподстанционных зон на график нагрузки. В свою очередь условия формирования электротяговой нагрузки определяют режимы работы силового оборудования, проводов и тросов контактной сети, графики нагрузки ТП участка железной дороги и уровень напряжения на шинах подстанций, линейных устройств и в контактной сети.

Тяговое электропотребление на ТП холдинга ОАО «РЖД» независимо от рода тока СТЭ значительно превышает нагрузку нетяговых потребителей железнодорожного транспорта, доли которых в среднем составляют 80 и 20 % соответственно. Графики нагрузки тяговых подстанций СТЭ постоянного и переменного тока не имеют принципиальных различий друг от друга и характеризуются значительной неравномерностью (фрагменты суточных графиков приведены на рисунке 2.1). Последнее обстоятельство обусловлено графиком следования поездов в границах межподстанционных зон.

Коэффициент неравномерности графика нагрузки [41], определяемый по формуле (2.1), для ТП становится равным или близким к нулевому значению:

$$k_n = \frac{P_{\min}}{P_{\max}}, \quad (2.1)$$

где:  $P_{\min}$  и  $P_{\max}$  – минимальная и максимальная мощности тяговой нагрузки подстанции соответственно.

Резко-переменный характер тяговой нагрузки описывается с помощью следующих коэффициентов и показателей: коэффициент заполнения  $k_3$ , минимальная  $P_{\min}$ , максимальная  $P_{\max}$  и среднесуточная мощность  $P_{\text{med}}$  нагрузки.

Коэффициент заполнения определяется по выражению:

$$k_3 = \frac{P_{\text{med}}}{P_{\max}}. \quad (2.2)$$

Для тяговых подстанций коэффициент заполнения тяговой нагрузки  $k_z$ , как правило, не превышает значения 0,5. Указанное значение определяется рядом факторов и зависит от месторасположения подстанции, изменения уровня электротяговой нагрузки и интенсивности движения, весовых норм поездов, профиля пути и т. д.

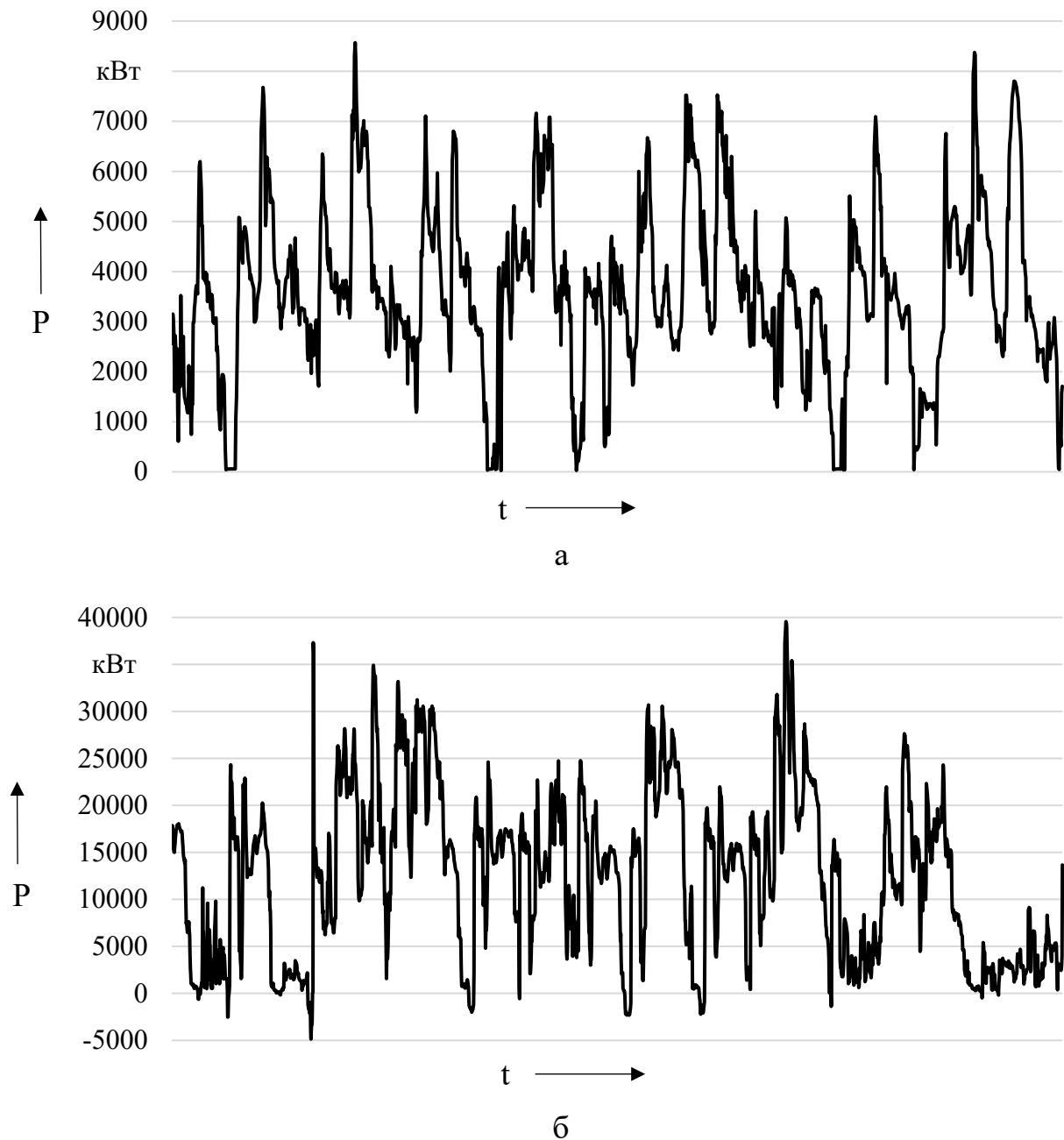


Рисунок 2.1 – Суточные графики нагрузки тяговой подстанции для систем тягового электроснабжения постоянного тока напряжением 3,3 кВ (а) и переменного тока напряжением 25 кВ (б)

Степень неравномерности графика тяговой нагрузки подстанций обуславливает неравномерность графика нагрузки по тяговым подстанциям в целом вследствие ее высокой доли, которая существенно выше, чем у распределительных подстанций энергосистем России. В тоже время, нагрузка группы ТП характеризуется уменьшением степени неравномерности, однако значения коэффициентов заполнения графика нагрузки остаются ниже значений коэффициентов для энергосистем России, принимающих по итогам 2016 – 2017 гг. значения не ниже 0,8. Аналогичная картина наблюдается для коэффициентов неравномерности графика нагрузки, принимающих значения не ниже 0,7 [42]. Сравнение значений указанных коэффициентов со соответствующими значениями 1970 – 1980 гг. [43] показывает их незначительный рост к текущему состоянию.

К увеличению неравномерности графика нагрузки ТП приводит увеличение доли тяжеловесного движения на полигоне железных дорог и роста единичной мощности электроподвижного состава, что обуславливает рост степени неравномерности графика тяговой нагрузки подстанций.

Существующая система учета и измерения электрической энергии определяет тяговое электропотребление по вводам преобразовательных агрегатов (или сумме при параллельной работе двух и более агрегатов) для СТЭ постоянного тока напряжением 3,3 кВ, а для систем переменного тока напряжением 25 кВ по вводам 27,5 кВ, систем 2×25 кВ – по вводам 55 кВ (рисунок 2.2). Аналогично планируется определять тяговую нагрузку на тяговых подстанциях перспективной СТЭ напряжением 94 кВ. Необходимо отметить, что типового графика нагрузки для ТП не существует, поэтому показатели работы СТЭ в каждом случае определяют расчетным способом [48, 49], аналогично выбирается закон распределения.

Потери электроэнергии в СТЭ постоянного тока, входящие в электропотребление на тягу, складываются из потерь в тяговой сети и оборудовании ТП:

$$\Delta W = \Delta W_{\text{ПТ}} + \Delta W_{\text{В}} + \Delta W_{\text{СУ}} + \Delta W_{\text{ТС}}, \quad (2.3)$$

где:  $\Delta W_{\text{ПТ}}$  – потери электроэнергии в преобразовательных трансформаторах;

$\Delta W_{\text{В}}$  – потери электроэнергии в выпрямительных преобразователях (выпрямительно-инверторных преобразователях);

$\Delta W_{\text{СУ}}$  – потери электроэнергии в сглаживающих устройствах;

$\Delta W_{\text{ТС}}$  – потери электроэнергии в тяговой сети.

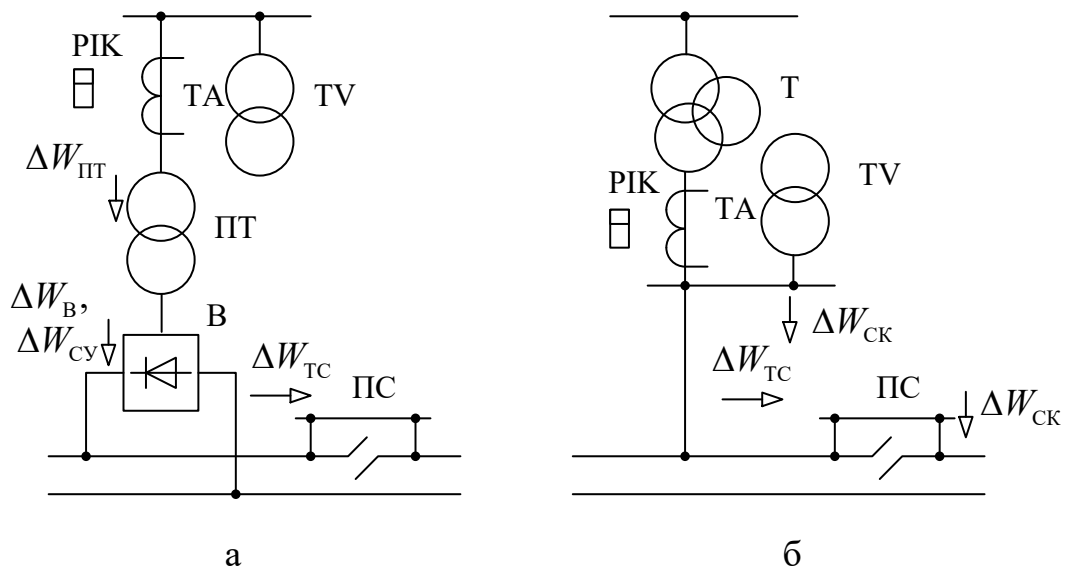


Рисунок 2.2 – Схемы учета электропотребления на тягу на тяговых подстанциях постоянного (а) и переменного (б) тока

Потери электроэнергии в СТЭ переменного тока, учитываемые системой измерений и учета, определяются по формуле:

$$\Delta W = \Delta W_{\text{ТС}} + \Delta W_{\text{СК}}, \quad (2.4)$$

где:  $\Delta W_{\text{СК}}$  – потери электроэнергии в средствах компенсации реактивной мощности.

Объем электроэнергии на тягу складывается из объема электроэнергии, потребляемого электроподвижным составом во всех видах движения, отбора

электроэнергии от контактной сети на технологические нужды и потерь электроэнергии в СТЭ:

$$W_{\text{ЭЧЭ}} = W_{\text{ЭПС}} + W_{\text{отб}} + \Delta W, \quad (2.5)$$

где:  $W_{\text{ЭПС}}$  – электропотребление электроподвижного состава во всех видах движения;

$W_{\text{отб}}$  – объем отбора электроэнергии от контактной сети на технологические нужды.

Уровень небаланса в СТЭ определяется с учетом выражений (2.3) – (2.5) по формуле:

$$\delta = \frac{\Delta W}{W_{\text{ЭЧЭ}}} \cdot 100 \%. \quad (2.6)$$

Определение тяговой нагрузки с учетом различных влияющих факторов (массы и режимов вождения поездов, интенсивности движения и др.) на средне- и долгосрочную перспективу позволяет осуществить выбор силового оборудования СТЭ и определить основные энергетические показатели работы системы в целом.

Выбор оборудования ТП, проводов и тросов контактной сети осуществляется на основе технико-экономических расчетов и базируется на следующих принципах:

1) величина трансформаторной мощности тяговой подстанции должна быть обоснована расчетным уровнем тяговой нагрузки с учетом возможного увеличения и обеспечивать минимальные инвестиционные вложения;

2) параметры СТЭ должны быть выбраны таким образом, чтобы уровень напряжения в контактной сети (по требованиям обеспечения пропускной и провозной способности) был выше минимального уровня и удовлетворял

целевым показателям уровня технических потерь электроэнергии (требования по достижению показателей энергетической эффективности).

Основой для электрических расчетов СТЭ являются тяговые расчеты и заданный график движения поездов на рассматриваемом участке. Энергетические характеристики движения поезда определяются массой состава, технической скоростью, нагрузкой на ось, профилем пути и рядом других факторов, входящих в уравнение тягово-энергетического баланса для определения удельного расхода электроэнергии  $b$ , по формуле [44]:

для локомотива –

$$b = \frac{10\,000}{Q \cdot \eta} \cdot \left( K_x \cdot K_{b_x} \cdot \frac{N_{KH}}{V_{mex}} + \frac{K_{TC} - K_x \cdot K_{b_x}}{367,2} \cdot (P + Q) \cdot (w_o + i) \right), \quad (2.7)$$

для моторвагонного подвижного состава –

$$b = \frac{10\,000}{\eta} \cdot \left( K_x \cdot K_{b_x} \cdot \frac{N_{KH}}{Q_c \cdot V_{mex}} + \frac{K_{TC} - K_x \cdot K_{b_x}}{367,2} \cdot (w'_o + i) \right), \quad (2.8)$$

где:  $Q$  – средняя масса поезда, т;

$Q_c$  – средняя масса секции МВПС, т;

$\eta$  – номинальный коэффициент полезного действия электроподвижного состава (КПД);

$K_x$  – коэффициент использования мощности вспомогательного оборудования электроподвижного состава на холостом ходу;

$K_{b_x}$  – коэффициент, характеризующий относительный расход электроэнергии на холостом ходу;

$K_{TC}$  – коэффициент технического состояния электроподвижного состава;

$N_{KH}$  – номинальная касательная мощность электроподвижного состава, кВт;

$V_{tex}$  – средняя техническая скорость движения, км/ч;

$P$  – сцепной вес локомотива, т;

$w_0, w'_0$  – основное удельное сопротивление движению поезда и моторвагонного подвижного состава соответственно, кгс/т;

$i$  – удельное сопротивление движению поезда от уклона, ‰.

Особенности и условия формирования электротяговой нагрузки позволяют определить круг задач, решаемых с помощью СНЭЭ в тяговом электроснабжении в зависимости от мест их размещения (рисунок 2.3).



Рисунок 2.3 – Основные задачи и пути их решения при применении систем накопления электроэнергии

Формирование тяговой нагрузки зависит от ряда факторов и обуславливает рассмотрение вопросов по применению СНЭЭ в тяговом электроснабжении с учетом следующих аспектов:

- 1) преобладания доли тяги в общей нагрузке ТП;
- 2) неравномерности графиков тяговой нагрузки подстанций;
- 3) изменения электротяговой нагрузки в зависимости от взаимного расположения электроподвижного состава в границах межподстанционных зон;

4) влияния единичной мощности электроподвижного состава, массы поезда и других нормообразующих факторов на тяговую нагрузку;

5) особенностей учета электрической энергии на тяговых подстанциях.

На основе анализа структурной схемы учета электроэнергии с учетом перспективных средств измерения и учета электроэнергии предложены способы определения расхода электроэнергии и потерь в СТЭ:

1) способ определения технологических потерь электроэнергии на тягу на тяговых подстанциях постоянного тока железнодорожного транспорта [45].

Способ определения технологических потерь электроэнергии на тягу на тяговых подстанциях основан на организации измерений электроэнергии со стороны переменного тока высшего напряжения, постоянного тока на вводах преобразовательных агрегатов и активных постах секционирования контактной сети, использующих устройства преобразования напряжения (рисунок 2.4).

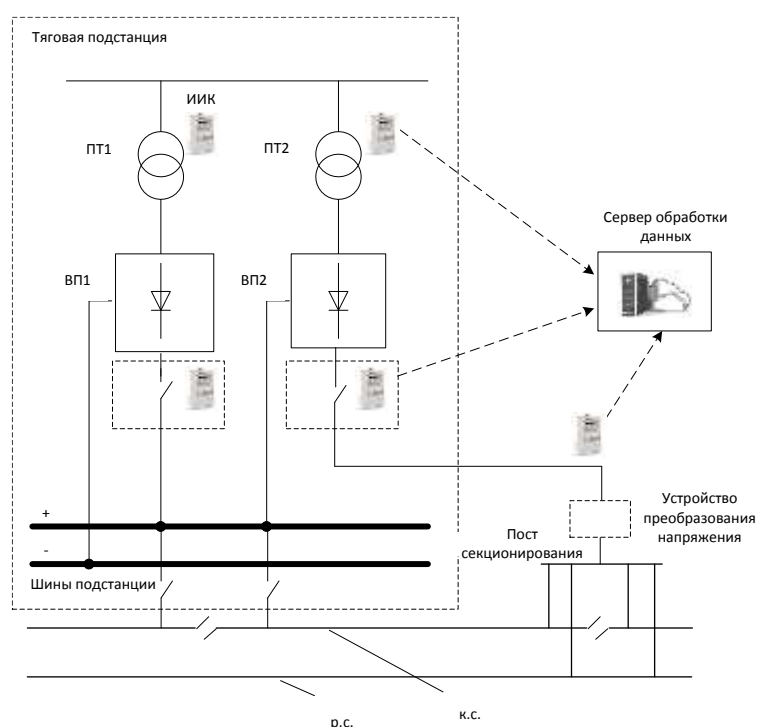


Рисунок 2.4 – Определение потерь электроэнергии на тяговых подстанциях

Реализация способа осуществляется путем передачи данных с информационно-измерительных комплексов, которые устанавливаются со стороны преобразовательных трансформаторов (ПТ), выпрямительных

преобразователей (ВП) и на активных постах секционирования, на сервер обработки данных. Технологические потери в силовом оборудовании, с учетом активного поста секционирования определяются на сервере обработки данных по заданным интервалам измерений.

2) способ определения расхода электроэнергии электроподвижным составом в границах произвольной зоны учета [46].

Предложенный способ позволяет определить расход электроэнергии электроподвижным составом в границах произвольных зон учета электроэнергии (рисунок 2.5).

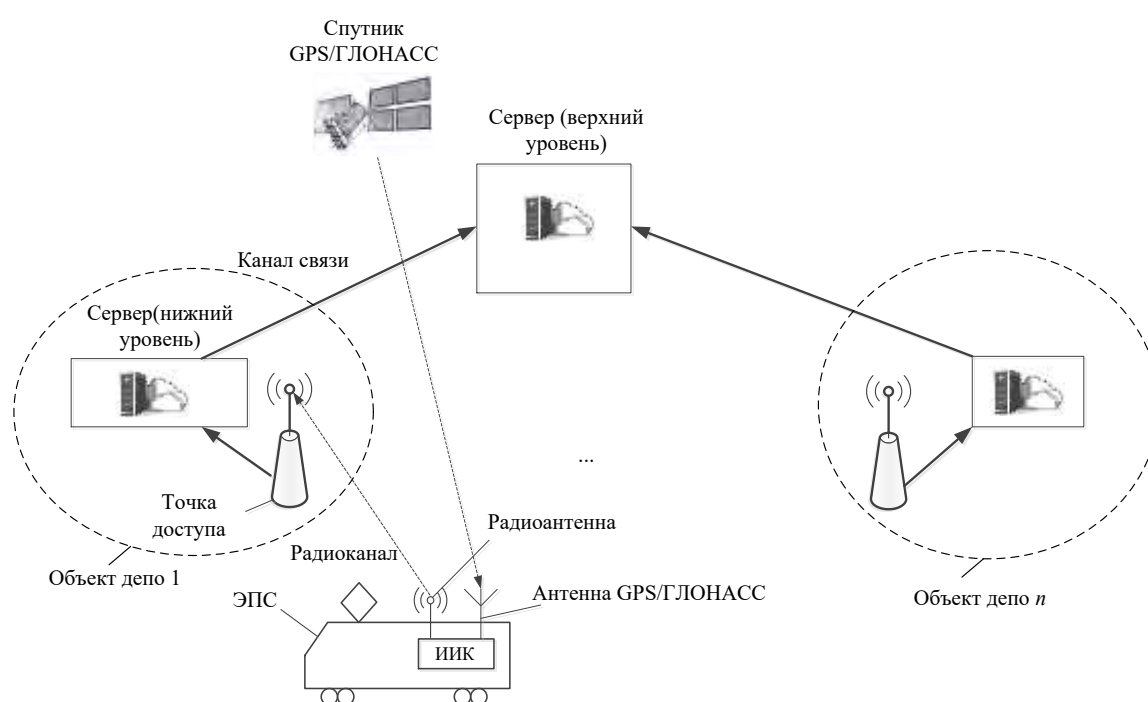


Рисунок 2.5 – Структурная схема способа определения расхода электроэнергии электроподвижным составом

Определение расхода электроэнергии выполняется на основании координат местоположения электроподвижного состава и последующего отнесения расхода к межподстанционным зонам. Информация о расходе электроэнергии передается от информационно-измерительного комплекса (ИИК) ЭПС с помощью радиоантенны по радиоканалу и далее через беспроводную точку доступа на сервер нижнего уровня, расположенном на объекте локомотивного депо или станции. Местоположение ЭПС в границах

произвольной зоны учета осуществляется на основании координат GPS/ГЛОНАСС с помощью антенны, расположенной на ЭПС, и спутника GPS/ГЛОНАСС. Данные с сервера нижнего уровня объекта депо (1 ...  $n$ ) данные поступают на сервер верхнего уровня с привязкой к данным о местоположении, позволяющей отнести расход электроэнергии к определенной зоне учета электроэнергии. Передача данных для определения расхода электроэнергии ЭПС в границах произвольной зоны учета приведена на рисунке 2.6. Технический результат указанного способа заключается в повышении достоверности определения расхода электроэнергии ЭПС в произвольных зонах учета с целью повышения точности расчетов технологических потерь электроэнергии.

3) способ определения технологических потерь электроэнергии в тяговой сети железнодорожного транспорта [47].

Предложенный способ основан на учете электроэнергии на присоединениях контактной сети (ФКС) ТП, данные которого поступают на сервер обработки данных, и учете электроэнергии на ЭПС, данные которого поступают на сервер обработки данных через точку доступа по радиоканалу (см. рисунок 2.6).

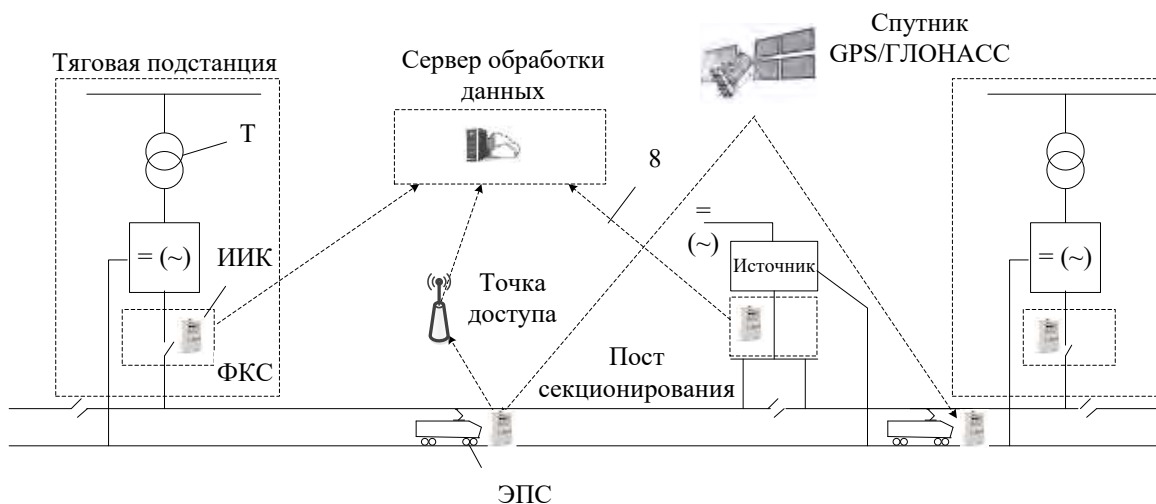


Рисунок 2.6 – Структурная схема способа определения расхода электроэнергии в тяговой сети

Организация учета электроэнергии подразумевает охват активных постов секционирования, через которые электроэнергия поступает в контактную сеть. Синхронизация времени и местоположения ЭПС осуществляется с помощью спутника GPS/ГЛОНАСС. Способ позволяет определить потери электроэнергии в тяговой сети с заданным периодом дискретизации по межподстанционным зонам.

Основные пути решения задач, стоящих перед СНЭЭ в тяговом электроснабжении, связаны с возможностью регулирования режимов их работы с целью изменения показателей нагрузочной способности, резервирования электроснабжения и электропитания приемников собственных нужд ТП.

### *2.1.1 Анализ профилей пути электрифицированных участков*

Профиль пути на электрифицированных участках оказывает значительное влияние на мощность и электропотребление электроподвижного состава и нагрузки ТП. Приведенная выше классификация профилей пути ВНИИЖТа выполнена на основе анализа значений и протяженности уклонов элементов профилей пути для равнинных и горных участков железных дорог и выделяет четыре типа профиля.

При анализе профилей пути на электрифицированных участках железных дорог России получено, что удельные веса различных типов распределены следующим образом: I тип – 26,5 %; II – 22,8; III – 37,6 и IV тип – 13,1 % [64].

На электрифицированных участках постоянного и переменного тока характер профиля пути оказывает значительное влияние на удельный расход электроэнергии на тягу, технические потери в СТЭ и объем энергии рекуперации. Типы профилей пути применяются для различных расчетов по оценке эффективности использования электровозов на полигонах дорог, характеристике рабочих режимов СТЭ, расчетов максимальных рабочих токов для определения уставок релейной защиты и т. д. Кроме указанных расчетов

для оценки энергетической эффективности перевозочного процесса при введении технологии вождения грузовых поездов по твердым ниткам (по энергооптимальным траекториям) графика движения также необходимо учитывать тип профиля пути, поэтому актуальной представляется задача по уточнению классификации типов профилей пути с целью дальнейшего использования при указанных выше расчетах.

Профиль пути оказывает влияние на дополнительное сопротивление движению поезда. В общем виде дополнительное сопротивление определяется планом и профилем пути, а также климатическими факторами [65]:

$$W_{\text{Д}} = W_i + W_r + W_{\text{к.ф}}, \quad (2.9)$$

где:  $W_i$  – сопротивление движению поезда от уклонов;

$W_r$  – сопротивление движению поезда от кривых;

$W_{\text{к.ф}}$  – сопротивление движению поезда от климатических факторов (ветра, температуры) и при движении в тоннелях.

Приведенный уклон профиля пути определяется величиной подъема и планом профиля по формуле:

$$i_c = \frac{\sum_j i_j S_j}{\sum_j S_j} + \frac{1}{l_c} \sum_k w_{rk} \times l_{rk}, \quad (2.10)$$

где:  $i_j$  – величина уклона  $j$ -го элемента профиля пути расчетного участка в соответствующем направлении, ‰;

$S_j$  – длина  $j$ -го элемента профиля пути расчетного участка в соответствующем направлении, м;

$l_c$  – длина элемента профиля, содержащего кривые участки, м;

$w_{rk}$  – дополнительное удельное сопротивление движению от  $k$ -й кривой, Н/кН;

$l_{rk}$  – длина  $k$ -й кривой, м.

Дополнительное сопротивление движению, обусловленное двумя первыми слагаемыми формулы (2.9), определяется профилем пути с уклонами, определяемыми по выражению (2.10). Для характеристики профилей пути участков железных дорог по энергетическим затратам предлагается разделять профили пути на четыре типа с различными расчетными уклонами.

На основе обработки профилей пути более 170 электрифицированных участков отечественных железных дорог, суммарной протяженностью, превышающей 30 тыс. км, получены распределения для удельной протяженности элементов с различными уклонами. Распределения построены для каждого типа профиля, определяемого на основании расчетов по формуле (2.10) и расчетных подъемов.

Полученные распределения позволяют проводить анализ влияния организации движения грузовых поездов по твердым ниткам на уровень технических потерь электроэнергии, условия применения рекуперативного торможения и расход электроэнергии по тяговым подстанциям в условиях различных профилей пути.

Удельная протяженность уклонов различных диапазонов ( $a - b$ ) определяется аналогично формуле (2.10) по выражению:

$$\lambda_{a-b} = \frac{\sum_i l_i^{(a-b)}}{L} \cdot 100\%, \quad (2.11)$$

где:  $l_i^{(a-b)}$  – протяженность  $i$ -го элемента профиля с уклоном в диапазоне от  $a$  до  $b$  ‰, км.

Диапазоны  $a - b$  для получения распределения удельной протяженности уклонов приняты с шагом в 1 ‰ и охватывают отрицательный и положительный диапазоны для нечетного направления.

Показано, что отклонение удельной протяженности уклонов профилей пути по классификации ВНИИЖТа от результатов с актуальными профилями пути для выборки электрифицированных участков железных дорог России

составляет 5 % (по данным информационной системы АСУ-П, содержащей информацию о характеристиках профиля пути).

Сравнение распределения удельной протяженности уклонов профиля выполнено на основе полученного распределения профилей пути электрифицированных участков для каждого типа профиля в соответствии с выражением (2.11). Полученные результаты для сравнения усреднены по участкам одного типа профиля и сопоставлены со средней структурой профиля пути каждого типа. Различие удельной протяженности участков для электрифицированного полигона представлено на рисунке 2.7.

Полученное в рамках 5 % расхождение позволяет рассмотреть на примере электрифицированных участков другие характеристики профиля пути и использовать полученные результаты для дополнения классификации профилей пути по энергозатратности.

На основе известных типов профилей пути предлагается выполнять обобщение результатов расчетов, связанных с оценкой внедрения мероприятий по повышению пропускной и провозной способности участка железной дороги или увеличением унифицированных масс поездов, определением энергетической эффективности электровозов и СТЭ, определением влияния на уровень потерь электроэнергии эксплуатационных факторов и эффективности применения и использования энергии рекуперации, изменением параметров графика движения поездов.

Основные области применения типовых профилей пути при выполнении тяговых и электрических расчетов представлены на рисунке 2.8.

Выполнение тяговых расчетов на основе типовых профилей позволяет выполнить сравнительный анализ эффективности различных серий ЭПС по видам движения для технической скорости, удельного расхода и рекуперации электроэнергии, энергоэффективности.

Удельная протяженность элементов для I – IV типов профилей пути приведена на рисунке 2.9.

Электрические расчеты можно разделить на расчеты, выполняемые для сравнительной эффективности СТЭ и мероприятий по усилению СТЭ между собой, и расчеты, выполняемые для оценки влияния того или иного фактора на энергетические показатели СТЭ и перевозочного процесса в целом.

При определении сравнительной эффективности СТЭ на основе участков с типовыми профилями выполняется расчет нагрузки ТП, пропускной и провозной способности, условий пропуска тяжеловесных и длинносоставных поездов, параметров СТЭ при организации скоростного движения, технико-экономическое сравнение мероприятий по усилению СТЭ или перехода от одной СТЭ к другой [53].

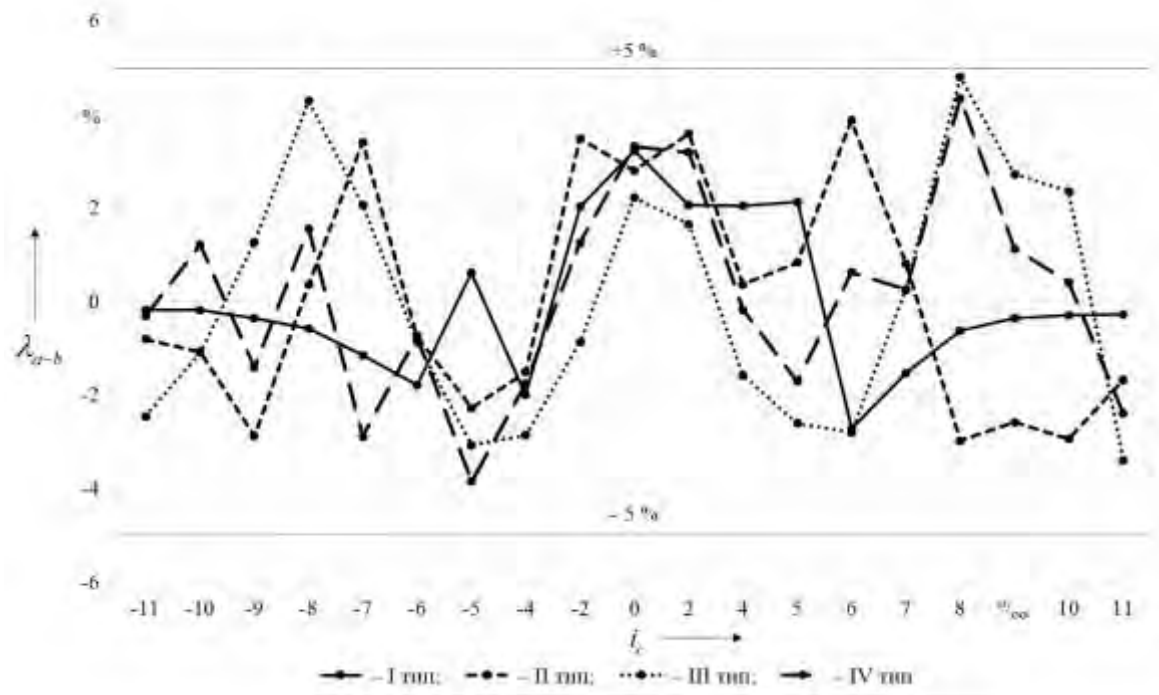


Рисунок 2.7 – Отклонения распределений удельной протяженности уклонов между типовыми и усредненными профилями пути

Создание типовых профилей для выполнения тяговых и электрических расчетов выполняется по двум основным параметрам – удельной протяженности легких элементов пути и расчетным профилям, соответствующим структуре типовых профилей. Следует отметить, что представленные критерии создания типовых расчетных профилей не являются исчерпывающими, поскольку не учитывают ряд других характеристик профиля. Одними из таких характеристик являются: средняя протяженность элемента профиля с монотонным уклоном и частота чередования знакопеременных монотонных уклонов на участке. Под элементом с монотонным уклоном здесь понимается участок пути, состоящий из нескольких  $j$ -х элементов одного знака (подъем или спуск).

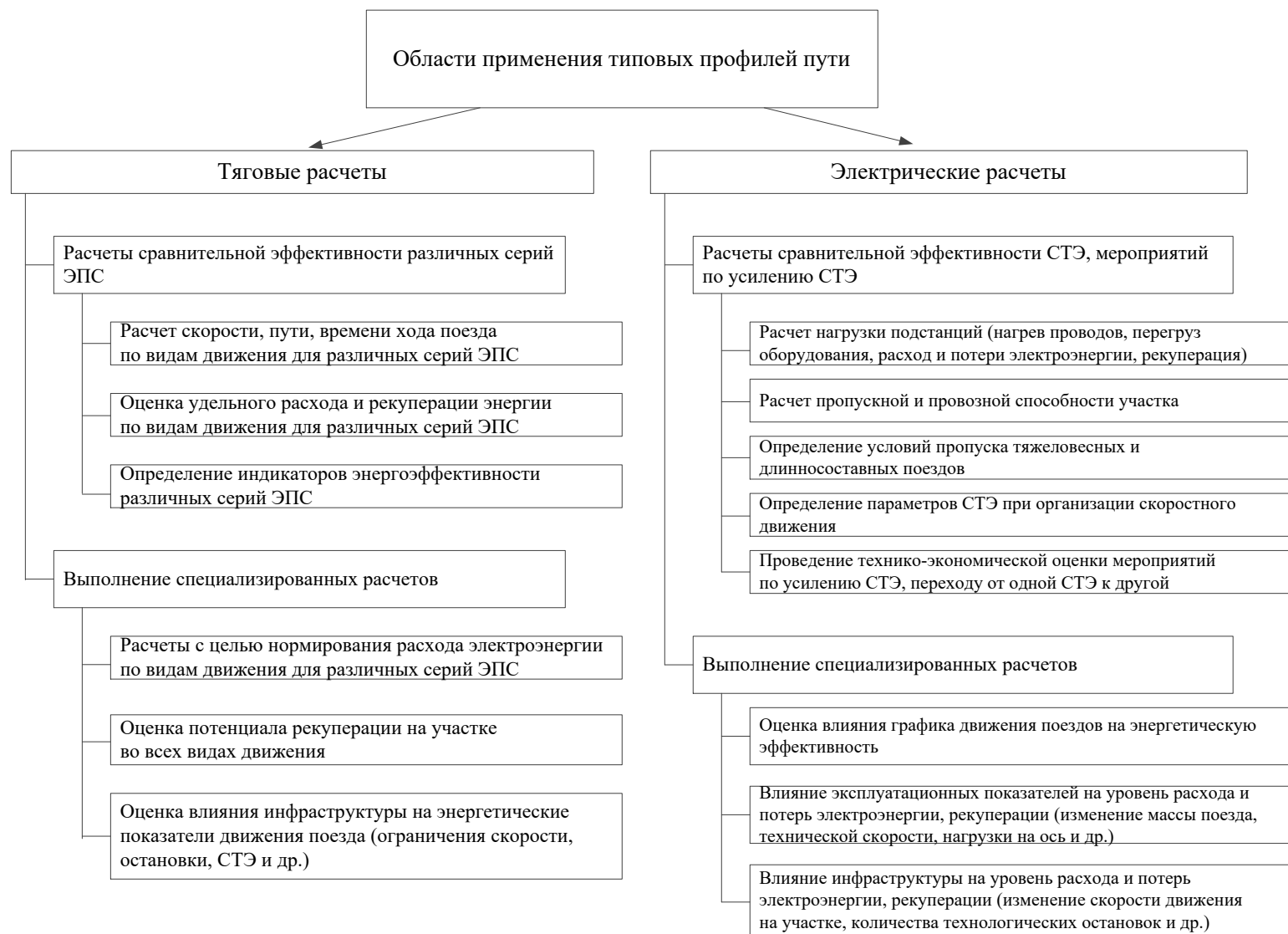
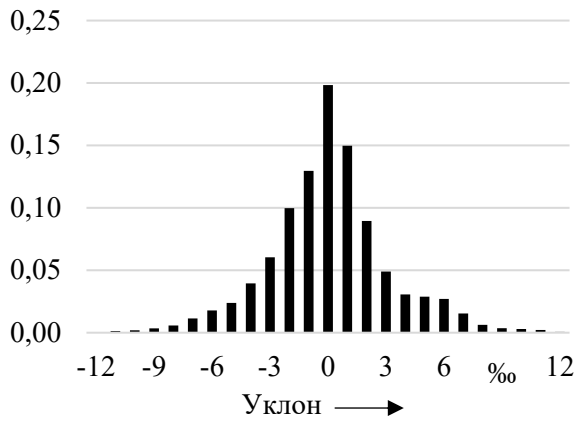
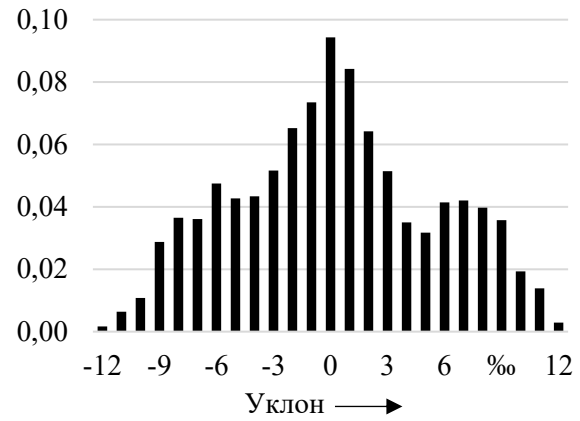


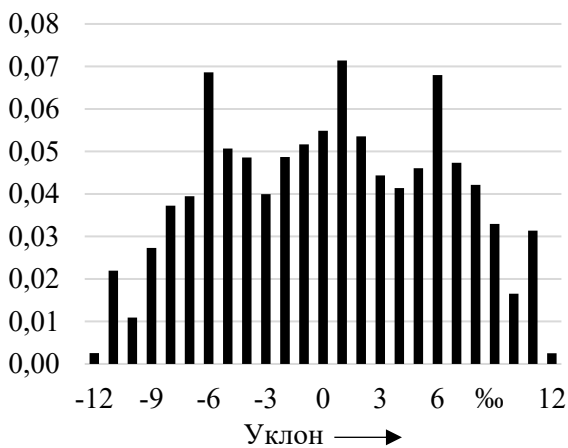
Рисунок 2.8 – Области применения типовых профилей при проведении тяговых и электрических расчетов



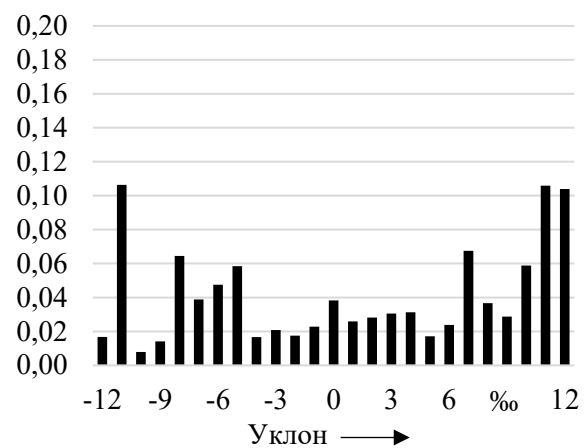
а



б



в



г

Рисунок 2.9 – Удельная протяженность элементов профиля пути:  
I тип профиля (а); II тип (б); III тип (в); IV тип профиля (г)

Эквивалентный уклон профиля пути для участка железной дороги определяется с учетом выражения (2.10) по формуле, ‰:

$$i_{\text{экв}} = \frac{\sum_{j=1}^{N_{\text{эл}}} \left( i_j S_j + \frac{700}{R_j} S_j \right)}{\sum_{j=1}^{N_{\text{эл}}} (S_j)}, \quad (2.12)$$

где:  $i_j$  – величина уклона  $j$ -го элемента профиля пути расчетного участка в соответствующем направлении, ‰;

$R_j$  – величина радиуса кривой  $j$ -го элемента профиля пути, м;

$S_j$  – длина  $j$ -го элемента профиля пути расчетного участка в соответствующем направлении, м;

$N_{эл}$  – количество элементов профиля пути расчетного участка.

Частота изменения направления уклонов и удельное количество монотонных участков различного знака (спуск или подъем) на единицу длины рассматриваемого участка железной дороги определяется соответственно по формулам:

$$\nu = \frac{1}{n_{cp}} \quad \text{и} \quad \alpha = \frac{n_{cp}}{l_{cp}}, \quad (2.13)$$

где:  $n_{cp}$  – усредненное количество монотонных участков соответствующего типа профиля, приходящееся на длину участков, шт.;

$l_{cp}$  – средняя длина участка рассматриваемого типа профиля, км.

Дополнительной характеристикой профиля является удельная протяженность монотонного участка средней длины:

$$\beta = \frac{l_{cp.мон}}{l_{cp}}, \quad (2.14)$$

где:  $l_{cp.мон}$  – средняя длина монотонного участка соответствующего типа профиля, км.

Для каждого монотонного участка по формуле (2.12) определяется эквивалентный уклон  $i_{эkv}$ .

Распределение удельной протяженности монотонных элементов  $\lambda$  по диапазонам профилей пути показывает, что более 80 % монотонных участков имеет протяженность 6 км и менее (рисунок 2.10). Результаты расчетов для профилей пути электрифицированных участков представлены в таблице 2.1.

По результатам расчетов наблюдается сокращение количества монотонных участков при увеличении номера типа профиля пути от I до IV. Сравнение приведенных профилей участков с III и IV типами профилей пути показывает, что профили содержат различное количество спусков и подъемов,

следующих подряд. При этом значение  $\alpha$  снижается при переходе от I к IV типу профиля, значение  $\beta$  увеличивается.

Таблица 2.1 – Характеристика монотонных участков для различных типов профиля

Тип профиля	Эквивалентный уклон $i_{\text{экв}}$ , ‰		Средняя длина $l_{\text{ср}}$ , км		Количество монотонных участков $n_{\text{ср}}$ , шт.	$\alpha$ , о.е.	$\beta$ , %
	участка в целом	монотонного участка	участка в целом	монотонного участка			
1	0,3	0,17	163,1	2,4	73,5	0,45	1,5
2	0,5	0,28	175,1	3,7	63,2	0,36	2,1
3	0,6	0,32	199,4	3,4	66,4	0,33	1,7
4	4,5	2,51	116,5	9,5	24,7	0,21	8,1

Группировка профилей пути на четыре типа по их влиянию на энергетические затраты поезда является обобщенной и в ряде случаев не учитывает уникальности характеристик профиля пути участка железной дороги, проявляющейся в чередовании участков пути с различными уклонами. В связи с этим для повышения точности специализированных расчетов, к которым можно отнести и расчеты, связанные с разработкой энергооптимального графика движения или оценкой эффективности рекуперативного торможения, предложено применять дополнительную характеристику профиля – переломность.

Указанная характеристика позволяет оценить влияние характеристик профиля пути на энергетические показатели поезда и отражает частоту смены участков пути с подъемами и спусками.

Оценка влияния переломности на энергетические показатели движения поезда основана на учете циклов разгон-торможение электроподвижного состава.

Результаты расчетов по оценке влияния переломности профиля пути на энергетические показатели движения поезда на примере участка железной дороги с профилем пути III типа выполнены для следующих условий:

- структура профиля пути изменяется на участке одной и той же протяженности (300 км);
- профиль состоит из повторяющихся элементов длиной 10 км;
- элементы имеют одинаковую структуру профиля;
- уклон участка является монотонным.

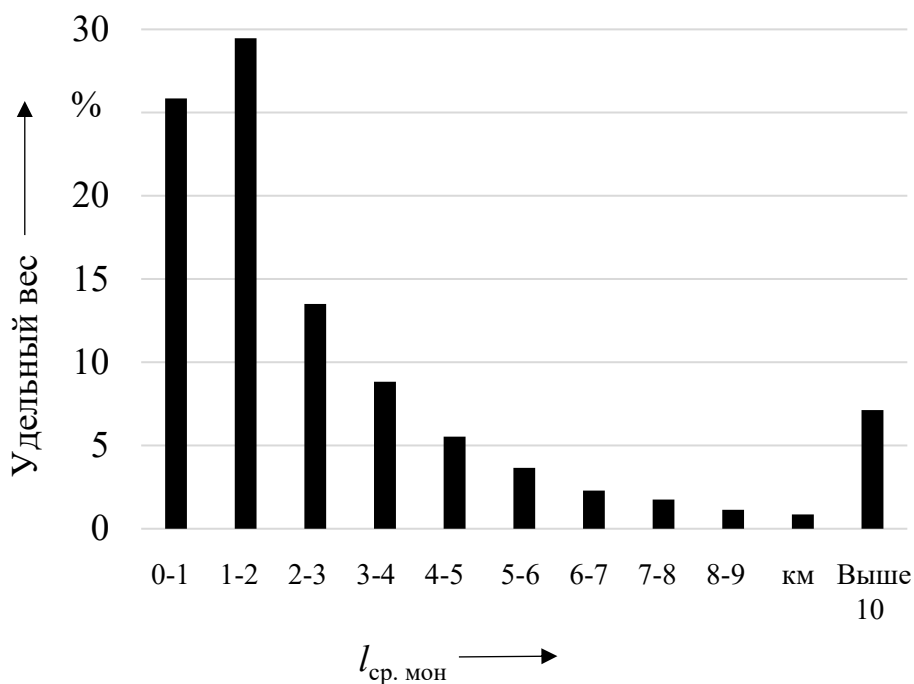


Рисунок 2.10 – Удельная протяженность монотонных уклонов профилей пути

Указанные допущения позволяют получить результаты тяговых расчетов для последующего сравнения в условиях сохранения типа профиля пути и его структуры. Различия между вариантами исполнения профилей пути будут заключаться в изменении переломности профиля.

Эквивалентный уклон, определяемый для рассматриваемого участка, рассчитываемый по формуле (2.12), для всех вариантов профилей равен нулю (рисунок 2.11). Повторение структуры профиля пути позволяет выполнить моделирование с одним значением удельного веса легких элементов и структурой профиля пути на участке в целом.

Четыре расчетных варианта профиля пути участка представлены на рисунке 2.11, а – г с одним, тремя, пятью и 15 переломами соответственно,

состоящими из повторяющихся элементов (см. рисунок 2.12), относящихся к III типу профиля пути, содержащих долю легких элементов 35 %.

Для оценки основных показателей работы электроподвижного состава для каждого из четырех вариантов профиля пути (см. рисунок 2.11) выполнены тяговые расчеты. Масса поезда в четном и нечетном направлениях принята одинаковой. Рекуперативное торможение применяется при наличии условий.

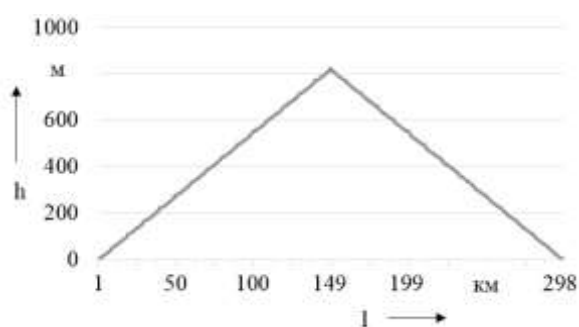
Результаты тяговых расчетов усреднены и приведены в таблицах 2.2 и 2.3 соответственно, где номера вариантов с профилями пути 1 – 4 соответствуют профилям пути, приведенным на рисунке 2.11, а – г. Приведенный профиль повторяющегося элемента пути протяженностью 10 км с меняющимся знаком уклона, относящийся к III типу профиля пути представлен на рисунке 2.12.

Таблица 2.2 – Результаты тяговых расчетов с применением рекуперативного торможения

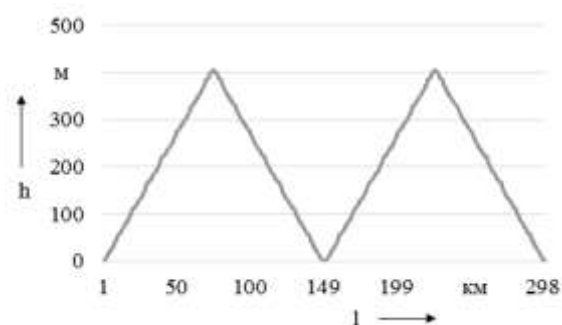
Параметр	Варианты профилей пути			
	1	2	3	4
$\alpha$ , о.е.	0,007	0,020	0,033	0,100
$\beta$ , %	50,0	17,0	10,0	3,3
Расход электроэнергии, кВт·ч	13365,0	13302,4	13238,7	12917,2
Удельный расход электроэнергии, кВт·ч/изм.	114,2	113,7	113,2	110,4
Рекуперация, кВт·ч	6310,3	6233,3	6161,1	5781,7
Удельная рекуперация, кВт·ч/изм.	53,9	53,3	52,7	49,4
Удельная доля рекуперации, %	47,2	46,9	46,5	44,8
Масса состава, т	3900,0	3900,0	3900,0	3900,0
Техническая скорость, км/ч	57,4	57,4	57,4	57,4
Максимальный ток, А	2842,0	2842,0	2842,0	2842,0
Время хода, мин	313,5	313,5	313,5	313,7
Время хода под током, мин	301,4	299,7	298,1	289,6
Расход с учетом рекуперации, кВт·ч	7054,7	7069,2	7077,6	7135,5
Удельный расход с учетом рекуперации, кВт·ч/изм.	60,3	60,4	60,5	61,0

Таблица 2.3 – Результаты тяговых расчетов без применения рекуперативного торможения

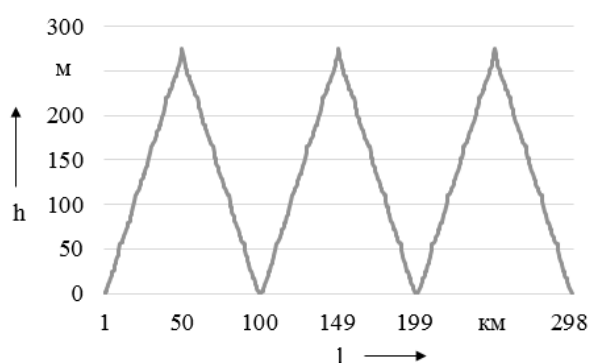
Параметр	Варианты профилей пути			
	1	2	3	4
$\alpha$ , о.е.	0,007	0,020	0,033	0,100
$\beta$ , %	50,0	17,0	10,0	3,3
Расход электроэнергии, кВт·ч	13725,6	13737,9	13751,8	13844,5
Удельный расход электроэнергии, кВт·ч/изм.	117,3	117,4	117,5	118,3
Масса состава, т	3900,0	3900,0	3900,0	3900,0
Техническая скорость, км/ч	55,7	55,6	55,6	55,4
Максимальный ток, А	2786,5	2787,0	2786,5	2786,5
Время хода, мин	323,5	323,8	324,0	325,2
Время хода под током, мин	148,6	148,4	148,2	147,2



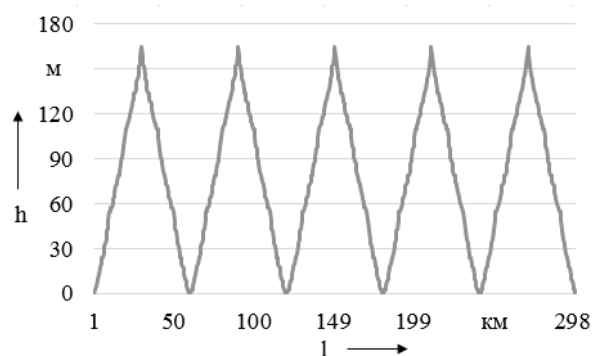
а



б



в



г

Рисунок 2.11 – Варианты исполнения профилей пути III типа

Графики изменения удельного расхода электроэнергии по вариантам применения и отсутствия рекуперативного торможения приведены на рисунке 2.13.

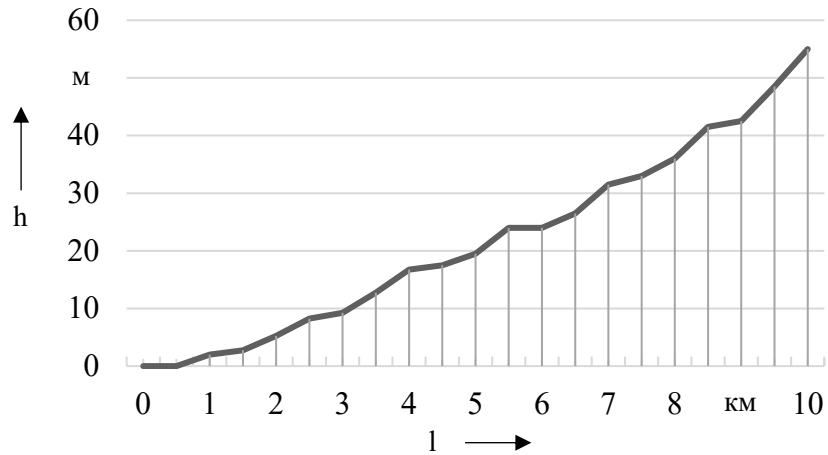


Рисунок 2.12 – Структура элемента профиля пути

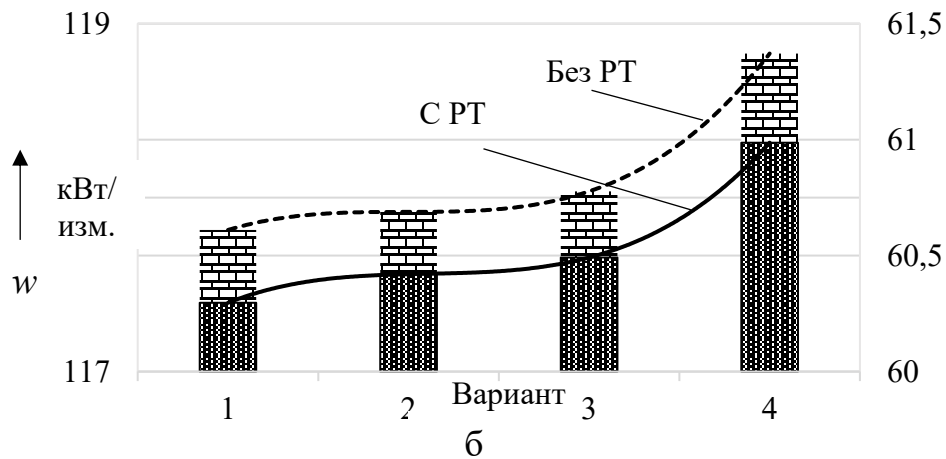
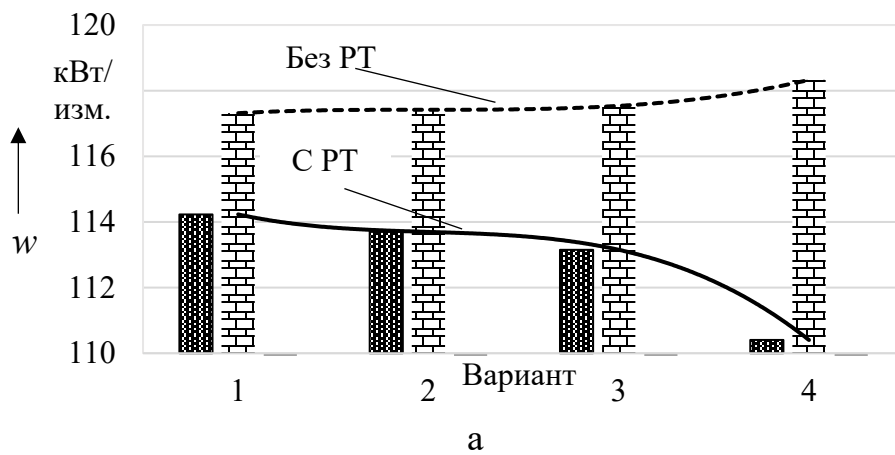


Рисунок 2.13 – Изменение удельного расхода электроэнергии: удельный расход электроэнергии для случаев с применением (с РТ) и без применения (без РТ) рекуперативного торможения (а); удельный расход (б) электроэнергии за вычетом энергии рекуперации

Коэффициент изменения удельного расхода электроэнергии определяется по формуле:

$$k = \frac{\omega_i}{\omega_{\text{баз}}}, \quad (2.15)$$

где:  $\omega_i$  и  $\omega_{\text{баз}}$  – удельный расход электроэнергии ЭПС для  $i$ -го варианта профиля пути и базового варианта соответственно, кВт·ч/изм.

Графики изменения коэффициента  $k$ , определяемого по формуле (2.15), в зависимости от изменения значений  $\alpha$  и  $\beta$  представлены на рисунке 2.14. Графики получены на основе аппроксимации данных, рассчитанных для условий применения (полиномиальная (с РТ)) и без применения (полиномиальная (без РТ)) рекуперативного торможения.

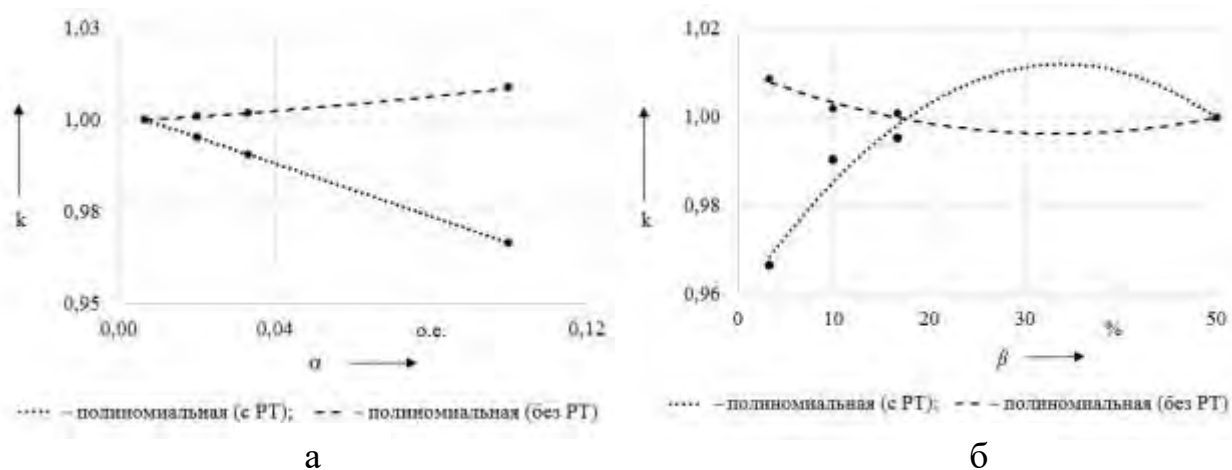


Рисунок 2.14 – Изменение коэффициента  $k$  при изменении характеристик переломности  $\alpha$  и  $\beta$  профиля пути III типа с применением и без применения рекуперативного торможения

Рассмотрение характера изменения удельного расхода электроэнергии для III типа профиля пути для участка с одинаковыми значениями удельного веса легких элементов (35 %) и эквивалентным уклоном повторяющихся элементов (5,5 ‰) показывает наличие влияния количества переломов профиля пути на расход электроэнергии, которое в рассматриваемой классификации профилей пути не нашло отображения.

В связи с этим для решения задач, связанных с оценкой энергетических показателей поезда и СТЭ, предлагается дополнить известную классификацию профилей пути показателями переломности профиля пути (частотой изменения

направления, удельными количеством и протяженностью монотонных участков, средней величиной эквивалентного уклона для указанных элементов).

Расчеты, выполненные для участка с III типом профиля, показывают, что при увеличении частоты изменения направления уклона монотонных участков в условиях применения РТ удельный расход электроэнергии падает (на 3,4 %), в условиях отсутствия РТ возрастает (на 0,9 %). При определении удельного расхода электроэнергии с учетом энергии рекуперации следует учитывать, что при увеличении удельного количества монотонных участков рост составляет 1,2 % от начального уровня.

Предложенные характеристики переломности определяются с помощью показателей, рассчитываемых по выражениям (2.13) и (2.14). Влияние переломности профиля пути на энергетические показатели движения поезда определяет необходимость ее учета при использовании типов профилей в связи с тем, что известная классификация профилей пути не содержит указанных характеристик.

Основной подход к оценке влияния параметров тяговой нагрузки на уровень потерь электроэнергии заключается в рассмотрении различных вариантов сочетания тяговых нагрузок поездов во всех видах движения (грузовом, хозяйственном, пассажирском движении дальнего следования и пригородного сообщения, маневровой работе) в границах межподстанционных зон с учетом режимов их питания.

### *2.1.2 Факторы, оказывающие влияние на показатели работы системы тягового электроснабжения при рекуперации*

Применение рекуперативного торможения на электроподвижном составе направлено на повышение энергетической эффективности перевозок, зависящей от уровня тягового электропотребления с учетом потерь электроэнергии (небаланса). Средний уровень небаланса на полигоне железных дорог России с СТЭ постоянного тока в последние годы находится на уровне около 13 %,

переменного тока – около 3,5 % (рисунок 2.15). Уровень небаланса складывается из двух основных составляющих: первая – технические потери электроэнергии в элементах СТЭ; вторая – технологические потери, обусловленные погрешностью учета средств измерений и погрешностями методического характера. Учитывая среднегодовой уровень электропотребления на тягу поездов на сети железных дорог на уровне 40 млрд кВт·ч, величина небаланса в абсолютном выражении является значительной. На полигоне постоянного тока за год значение небаланса электроэнергии достигает 1,9 млрд кВт·ч, на полигоне переменного тока – 0,8 млрд кВт·ч, что в сумме превышает годовой объем рекуперации электроэнергии 2,2 млрд кВт·ч по сети дорог.

Указанный небаланс определяется с учетом специфики учета электроэнергии на тяговых подстанциях. На постоянном токе в потери электроэнергии помимо потерь электроэнергии в тяговой сети входят потери в преобразовательных трансформаторах и статических преобразователях (выпрямительных и выпрямительно-инверторных преобразователях), устройствах регулирования напряжения различного вида, а на переменном токе – в средствах компенсации реактивной мощности.

Мощность, которая может быть передана ЭПС в режиме рекуперативного торможения, определяется сопротивлением тяговой сети до точки, где ее может принять ЭПС, следующий в режиме тяги. Поскольку потери мощности пропорциональны квадрату тока, то передаваемая мощность рекуперативного торможения определяется разницей уровней напряжения источника и приемника и потерями мощности в тяговой сети. Последние зависят от сопротивления тяговой сети (если приемники энергии рекуперации расположены в МПЗ) или сопротивлением тяговой сети и выпрямительно-инверторного преобразователя (при приеме избыточной энергии рекуперации потребителями, присоединенными к шинам различного напряжения тяговой подстанции постоянного тока). На подстанциях переменного тока на мощность рекуперации

оказывают влияние нагрузки, присоединенные к шинам переменного тока, и параметры силовых понижающих трансформаторов.

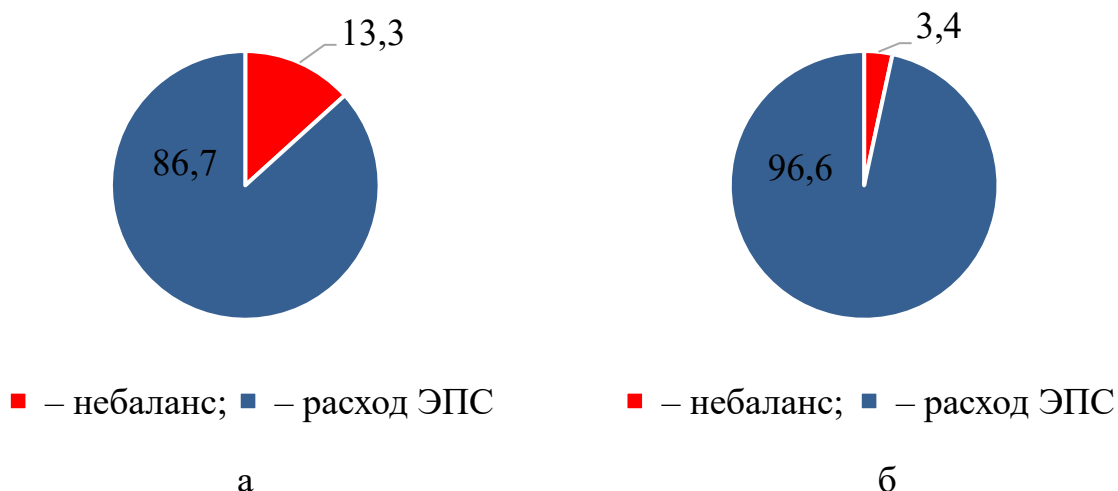


Рисунок 2.15 – Уровень небаланса на полигонах железных дорог постоянного (а) и переменного (б) тока

Потери мощности рекуперации в тяговой сети постоянного тока при передаче от источника до приемника определяются по формуле:

$$\Delta P_{\text{рек}} = \Delta U \cdot I_{\text{рек}} = (U_{\text{рек}} - U_{\text{тяг}}) \cdot I_{\text{рек}} = I_{\text{рек}}^2 \cdot r_{0\text{ТС}} \cdot l, \quad (2.16)$$

где:  $r_{0\text{ТС}}$  – удельное сопротивление тяговой сети, Ом/км;

$l$  – протяженность тяговой сети между источником и приемником энергии рекуперации, км;

$\Delta U, U_{\text{рек}}, U_{\text{тяг}}$  – падение напряжения в контактной сети, уровень напряжения на токоприемниках электроподвижного состава, находящихся в режимах рекуперативного торможения и тяги соответственно, В;

$I_{\text{рек}}$  – ток рекуперации, А.

Мощность рекуперативного торможения при преобразовании выражения (2.16) путем умножения обеих частей на напряжение на токоприемнике ЭПС можно выразить по формуле:

$$I_{\text{рек}}^2 \cdot r_{0\text{ТС}} \cdot l \cdot U_{\text{рек}} = \Delta U \cdot I_{\text{рек}} \cdot U_{\text{рек}} \Rightarrow P_{\text{рек}} = \frac{U_{\text{рек}} \cdot \Delta U}{r_{0\text{ТС}} \cdot l}. \quad (2.17)$$

Реализуемая мощность рекуперативного торможения определяется уровнем напряжения на токоприемниках ЭПС, находящегося в режиме рекуперативного торможения, падением напряжения в тяговой сети до электроподвижного состава, являющегося приемником, и сокращается обратно пропорционально удаленности приемника энергии рекуперации от ее источника. В этом случае для эффективного использования мощности рекуперации, необходимо выполнение двух условий: первое – обеспечить напряжение на приемнике энергии рекуперации ниже, чем у источника; второе – снизить сопротивление тяговой сети путем сокращения удаленности приемника энергии рекуперации от ее источника или путем увеличения эквивалентного сечения контактной подвески. Зависимость указанных условий от изменяющегося расположения ЭПС в границах межподстанционных зон существенно ограничивает возможности СТЭ в части эффективного управления процессами передачи мощности рекуперативного торможения. Указанное обстоятельство связано с необходимостью поддержания необходимого уровня напряжения на токоприемнике ЭПС и ограниченной возможностью регулирования напряжения на шинах ТП.

Факторы, оказывающие влияние на реализуемую мощность рекуперативного торможения ЭПС приведены на рисунке 2.16.

В соответствии с Правилами технической эксплуатации железных дорог [3] максимальное напряжение на токоприемнике ЭПС постоянного тока в режиме рекуперативного торможения ограничено уровнем 4000 В, а напряжение на токоприемнике ЭПС в режиме тяги – уровнем 2700 В. Диапазон указанных значений определяет условия работы ЭПС. Аналогичные условия рекуперации энергии существуют и для СТЭ переменного тока.

Регламентированный диапазон напряжений на токоприемнике ЭПС, режимы работы СТЭ в комплексе с условиями пропуска поездов на участке определяют эффективность применение энергии рекуперации и энергоэффективность перевозочного процесса в целом. В связи с этим рассмотрение вопросов влияния тяговой нагрузки на энергетическую

эффективность должно определяться с позиций системного охвата влияющих факторов.



Рисунок 2.16 – Факторы, оказывающие влияние на реализуемую мощность рекуперации

Эксперименты для оценки влияния рекуперативного торможения на эффективность работы СТЭ, проведенные на участке Тайга – Мариинск Западно-Сибирской железной дороги, позволяют выявить основные проблемы, стоящие перед регулированием параметров режима работы СТЭ: уровень напряжения на токоприемнике и неравномерность графика электрической нагрузки.

Повышение уровня напряжения на токоприемниках выше допустимого наблюдается при применении рекуперативного торможения сериями электровозов ВЛ10. В ряде случаев уровень напряжения поднимается до критических значений (рисунок 2.17). Результаты измерений позволяют оценить продолжительность времени рекуперативного торможения, которая по результатам экспериментов не превышает нескольких минут [66].

Применение рекуперативного торможения позволяет улучшить эксплуатационные показатели СТЭ в части сокращения расхода на тягу и потерь электроэнергии в тяговой сети за счет приемников энергии рекуперации на тяговых подстанциях. В качестве последних на одно- и двухпутных участках

применяются инверторные преобразователи и поглощающие устройства реостатного типа, в перспективе – СНЭЭ.



Рисунок 2.17 – График напряжения на шинах подстанции и тока рекуперативного торможения

Неравномерность графика тяговой нагрузки, особенности применения рекуперативного торможения и высокий уровень небаланса электроэнергии обуславливают необходимость разработки теоретических подходов и технических решений для повышения эксплуатационных показателей СТЭ и энергетической эффективности электрической тяги путем применения СНЭЭ, выбора их параметров и мест размещения.

## 2.2 Способы расчета параметров системы тягового электроснабжения

Определение тяговой нагрузки подстанций выполняется для решения ряда задач, связанных с вариантами усиления или повышения эксплуатационных показателей и эффективности работы СТЭ. На основе данных о тяговой нагрузке подлежат определению: мощность силовых трансформаторов ТП; сечение проводов и тросов контактной сети; размещение линейных устройств и др.

Расчеты позволяют определить: показатели нагрузочной способности; потенциал повышения энергетической эффективности СТЭ; эффективность работы силового оборудования и др. В основу расчетов тяговой нагрузки подстанций положены результаты тяговых расчетов и расчетные схемы пропуска поездов в границах межподстанционных зон. Определение тяговой нагрузки подстанций должно выполняться для расчетов режимов питания межподстанционных зон и работы силового оборудования и других параметров СТЭ (схема питания и секционирования контактной сети, количество работающих силовых понижающих и преобразовательных трансформаторов, сечение контактной подвески главных электрифицированных путей, уровень напряжения холостого хода на шинах подстанций и др.).

Тяговая нагрузка зависит от ряда факторов, к которым относят массу поезда, профиль пути, техническую скорость по видам движения, нагрузку на ось, серию ЭПС, долю бесстыкового пути [44] и др. Помимо указанных факторов необходимо учитывать режим вождения поездов, зависящий от условий их пропуска на участке железной дороги.

Выбор способа расчета для определения максимальных и минимальных значений токов нагрузки подстанций, присоединений контактной сети, минимального напряжения на токоприемнике ЭПС осуществляется исходя из требований точности и принимаемых допущений. При данном выборе предпочтение отдается способу расчета с приемлемой точностью.

Способы расчета СТЭ подразделяются на способы, предназначенные для расчета показателей в условиях установившихся нормальных и вынужденных режимов работы СТЭ и для условий, связанных с переходными процессами во всех режимах работы, в т. ч. аварийных.

Первая группа способов расчета базируется на способах представления тяговой нагрузки для выбранной стационарной модели и расчета основных энергетических показателей СТЭ на основе мгновенных схем.

Отечественными исследователями разработан ряд способов определения тяговой нагрузки подстанций, основанных на использовании графика движения

поездов (ГДП). Способы расчетов указанной группы условно можно разделить на две подгруппы – способы, основанные на расчетах по графику движения поездов и способы, основанные на заданных размерах или объемах движения поездов (рисунок 2.18).

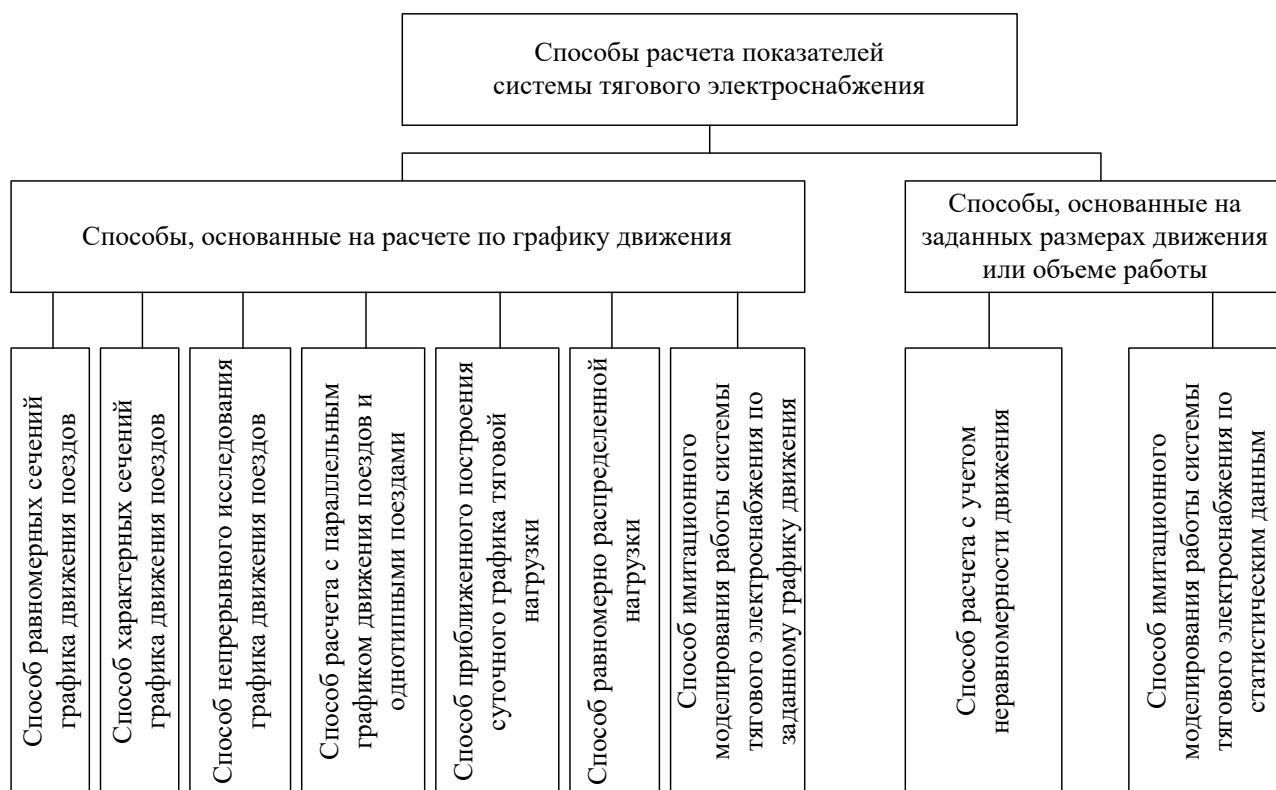


Рисунок 2.18 – Способы расчета показателей работы системы тягового электроснабжения, основанные на использовании графика движения поездов

Представленные способы позволяют выполнять расчеты на основе ряда допущений, позволяющих сократить количество вычислительных процедур. Среди существующих способов наиболее точным является способ имитационного моделирования, основанный на расчете по графику движения поездов, являющийся модификацией способа равномерных сечений графика [48].

Основными направлениями совершенствования способа имитационного моделирования является сокращение шага моделирования при проведении тяговых и электрических расчетов, позволяющего повысить точность расчетов и учесть изменение напряжения в контактной сети.

Способы второй подгруппы основаны на заданных размерах движения поездов или объемах перевозок. С целью получения усредненных характеристик

графиков нагрузок ТП по межподстанционным зонам расчет выполняется на основе результатов статистической обработки данных за рассматриваемый период о пассажиро- и грузоперевозках для определения: распределения количества поездов по видам движения в границах межподстанционных зон; межпоездных интервалов; масс поездов; электропотребления на тягу и других показателей.

Указанная подгруппа способов относится к ретроспективным, исходными данными для которых являются отчеты об эксплуатационной деятельности (объемы электропотребления, размеры движения, грузооборота и т.д.). Общими недостатками способы данной подгруппы является трудность учета особенностей режимов работы СТЭ и условий пропуска поездов, связанных с формированием масс поездов, их чередованием и порядком следования по участку.

Развитие способов расчета показателей привело к реализации и разработке программ расчета. В настоящее время все виды расчетов СТЭ в Трансэнерго – филиале ОАО «РЖД» выполняются в программном комплексе «Комплекс расчетов тягового электроснабжения». Данный программный комплекс принят в качестве основного при проведении расчетов СТЭ в ОАО «РЖД». Программный комплекс позволяет выполнять имитационное моделирование работы СТЭ исходя из заданного графика движения поездов и расчетов тяговой нагрузки на основе расчета мгновенных схем.

В ходе разработки имитационного способа расчета для определения параметров СТЭ и вычисления показателей ее работы было установлено, что способ равномерных сечений графика движения поездов является наиболее подходящим [75 – 77]. Преимуществом данного способа перед другими является возможность повышения точности расчетов путем уменьшения шага расчетов до нескольких секунд или долей секунд.

Указанный способ позволяет получить достаточно точную оценку величины расхода электроэнергии на участке железной дороги для заданного ГДП. Расчеты проводятся на основе баз данных, содержащих характеристику

СТЭ и ЭПС, графика движения поездов. Проведение тяговых расчетов выполняется для различного сочетания факторов и позволяет построить нитки движения для различных масс, скоростей, остановок и т.д.

На базе выполненных тяговых расчетов и ГДП выполняется расчет нагрузок ТП, в ходе которого определяется расход электроэнергии на тягу с учетом применения рекуперативного торможения и потерь электроэнергии.

Для решения задач по оценке влияния ГДП на расход электроэнергии по ТП использование способа имитационного моделирования представляется наиболее целесообразным, поскольку способ расчета позволяет учесть изменение ряда факторов: параметров СТЭ; характеристик электроподвижного состава; графика движения; условий рекуперативного торможения ЭПС и др. К недостаткам указанного способа относятся: относительно большая вычислительная трудоемкость; допущения по декомпозиции модели взаимодействия СТЭ и ЭПС. Указанные недостатки преодолеваются при проведении расчетов с использованием компьютеров высокой производительности и комплексном подходе при построении моделей с различной степенью детализации процессов.

Наличие большого количества способов расчета и специфики учета тех или иных параметров привело к появлению альтернативных программных средств, например, программы Fazonord-APC, предназначенной для решения различных задач, в частности расчета показателей СТЭ в фазных координатах [78].

Обусловленная динамикой процессов и множеством факторов сложность расчетов позволяет считать способы имитационного моделирования работы СТЭ наиболее подходящими для расчета показателей СТЭ.

Вторая группа способов ориентирована на расчет значений электрических величин в рамках переходных процессов, результаты которого применяются для оценки работы электрооборудования в аварийных режимах работы, выбора уставок релейной защиты, например, реагирующих на приращение и скорость изменения тока [48, 275]. Для расчета энергетических показателей установившихся режимов способы данной группы не предназначены.

Зарубежные исследования в части расчета показателей СТЭ позволяют выделить основные направления развития способов расчета. Совершенствование способов рассматривается путем повышения степени детализации динамических процессов, различной интеграции при комплексном рассмотрении систем и устройств в расчетах и уточнения способов по видам решаемых задач [273]. Расчеты показателей работы СТЭ за рубежом основаны на рассмотрении различных схем замещения, математических моделей и способов расчета. Ряд исследований посвящен применению различных способов решения систем линейных уравнений, описывающих изменение основных электрических величин в СТЭ (методы решения уравнений Ньютона-Рафсона, Гаусса-Зейделя, Якоби и др.) [274]. Для описания полученных в ходе экспериментов и расчетов зависимостей изменения токов и напряжений решаются задачи отыскания аппроксимирующих функций, как, например, это показано для описания результатов решения систем уравнений [275]. Применение различных алгоритмов для вычисления позволяет повысить эффективность вычислительных процедур при расчете энергетических показателей и является предметом рассмотрения при изучении вычислительного аспекта вопроса расчета [276]. Ряд исследований посвящены изучению специальных вопросов, например, способам моделирования работы СТЭ в условиях рекуперации энергии электроподвижным составом [277, 278] и оценке влияния характеристик инверторных преобразователей на энергетические показатели [279]. В ряде работ рассматриваются вопросы совершенствования моделей отдельных устройств в модели устройств СТЭ для учета в схемах замещения при решении специальных вопросов [280]. Широко исследуются вопросы, связанные с оценкой эффективности СНЭЭ и совершенствованием моделей систем хранения энергии в СТЭ [281 – 283].

Исследования в области расчета показателей работы СТЭ, выполненные отечественными и зарубежными исследователями, позволяют определить основной круг задач расчета показателей работы СТЭ (рисунок 2.19).



Рисунок 2.19 – Классификация задач расчета показателей работы системы тягового электроснабжения

Применение способов обеих групп ориентировано на определение энергетических показателей СТЭ участка железной дороги с различной степенью точности.

### 2.3 Анализ показателей графиков тяговой нагрузки подстанций

График электрической нагрузки ТП определяется электротяговой нагрузкой, зависящей от рассмотренных факторов и ГДП в границах соответствующих межподстанционных зон и формирующей уровень потерь электроэнергии в СТЭ, объем энергии рекуперации и суммарный объем электроэнергии на тягу по ТП.

Установлено, что особенности формирования графиков тяговой нагрузки ТП не позволяют выбрать один закон распределения для описания нагрузки.

Уникальность графиков тяговой нагрузки ТП не позволяет оперировать типовыми графиками.

Указанное обстоятельство обуславливает необходимость поиска законов распределения для каждой ТП для решения задач расчета различных режимов работы оборудования [11] или оценки эффективности работы оборудования [50, 51]. Ряд исследований в области расчета показателей электротяговой нагрузки [267 – 270] свидетельствует о том, что для электротяговой нагрузки необходимо подбирать теоретический закон распределения не только для конкретного объекта, но и для рассматриваемого интервала времени. В некоторых случаях подобрать теоретический закон распределения для использования его в дальнейшем в технико-экономических расчетах не представляется возможным. Выбор специальных функций для описания изменения показателей работы СТЭ не позволяет решить задачу разработки типового графика нагрузки, который для каждой тяговой подстанции необходимо определять исходя из местных особенностей.

Ранее показано, что выбор теоретических распределений на примере тяговой нагрузки выпрямительных преобразователей ТП используется для оценки эффективности параллельной работы преобразовательных агрегатов или автоматики включения агрегатов на параллельную работу [52].

Автоматизированная информационно-измерительная система коммерческого учета электроэнергии (АИИСКУЭ) на ТП позволяет выполнять измерения электрических величин с заданным шагом детализации. Анализ изменения электрических величин осуществляется на основе программного комплекса ПК «Энергия Альфа 2» АИИСКУЭ, позволяющего построить суточный график нагрузки и получить его основные статистические показатели.

На примере ряда ТП показано, что помимо отсутствия типовых графиков нагрузки для подстанций отсутствуют и типовые теоретические распределения. В зависимости от условий формирования электротяговой нагрузки для суточных графиков подстанции различных суток подходят различные законы распределения, в т.ч. описываемые функциями Джонсона.

Указанное положение можно проиллюстрировать на примере шести ТП постоянного тока Западно-Сибирской железной дороги: четыре подстанции находятся на двухпутных участках с равнинным профилем пути (I-го типа), две – на одно- и двухпутном участках с III-м типом профиля пути соответственно. Необходимость учета профиля пути продиктована различной энергозатратностью перевозок, оказывающей существенное влияние на тяговую нагрузку. Типовое распределение профилей по протяженности приведено в [53] и показывает структуру приведенного профиля пути различных типов.

Измерение тяговой нагрузки и уровня напряжения на шинах 3,3 кВ ТП выполнено с помощью программного комплекса ПК «Энергия Альфа 2» [54, 55] с одноминутным интервалом за трое суток (период с 06.07.2017 по 08.07.2017). Характеристика оборудования рассматриваемых ТП представлена в таблице 2.4.

Выбор теоретических распределений плотности вероятности напряжения на шинах и тяговой нагрузки подстанции в течение суток показывает, что экспериментальные распределения плотности вероятности напряжения наиболее близки к нормальному, а тока – к гамма-распределению. Данный вывод получен при проверке гипотезы об отклонении теоретического распределения по критерию Пирсона [56, 57]:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(n_i - n \cdot p_i)^2}{n \cdot p_i}, \quad (2.18)$$

где:  $n$  – объем выборки экспериментальных данных;

$n_i$  – эмпирическая частота;

$p_i$  – теоретическая вероятность попадания в интервал;

$k$  – количество интервалов.

Критерий Пирсона для наблюдаемых значений напряжения на шинах 3,3 кВ различных подстанций по результатам наблюдений находится в диапазоне (86,1 – 112,7), при этом для всех ТП наиболее близкими теоретическими законами распределения являются нормальный и гамма-распределение для напряжения и тока соответственно. Проведенные по критерию Пирсона расчеты показывают, что вероятность отклонения

правильной нулевой гипотезы о соответствии наблюдаемых распределений тока и напряжения теоретическим близка к нулю. Количество степеней свободы для рассматриваемых ТП применительно к суточным графикам составило – 11 [58].

Таблица 2.4 – Характеристика оборудования рассматриваемых ТП

Подстанция	Количество путей участка	Тип профиля пути	Марка преобразовательного трансформатора	Марка выпрямительного преобразователя
ТП 1	Два	I	ТРДП-12500/10ЖУ1	ТПЕД-3150-3,3к-У1
ТП 2	Два	I	ТРДП-12500/10ЖУ1	ТПЕД-3150-3,3к-У1
ТП 3	Два	I	ТРДП-12500/10ЖУ1	ТПЕД-3150-3,3к-У1
ТП 4	Два	I	ТРДП-12500/10ЖУ1	ТПЕД-3150-3,3к-У1
ТП 5	Один	III	ТРДП-12500/10 ТДП-12500/10	ВТПЕД 3,15к-3,3-31-У3а ПВЭ-5АУ1
ТП 6	Два	III	ТРДП-12500/6ЖУ1	ТПЕД-3150-3,3к-У1

Одним из способов сравнения наблюдаемых частот тяговой нагрузки является распределение кумулятивных частот [59], рассчитываемых по формуле:

$$p_i = \sum_{n=0}^N p_n \cdot \quad (2.19)$$

где:  $p_n$  – частота наблюдения для  $n$ -интервала из  $N$ .

Сравнение кумулятивной частоты наблюдения тяговой нагрузки и напряжения на шинах 3,3 кВ рассмотренных ТП показывает, что полученные результаты позволяют на основе сравнения размаха изменения и скорости изменения частоты наблюдения выполнить группировку величин по кумулятивной частоте в зависимости от профиля пути на межподстанционных зонах рассматриваемых подстанций (рисунок 2.20).

Для наблюдаемых значений тяговой нагрузки и напряжения рассмотренных подстанций для размаха значений справедливы неравенства:

$$\begin{aligned} \Delta U : \Delta U_{1,2,3,4} < \Delta U_5 < \Delta U_6, \\ \Delta I : \Delta I_{1,2,3,4} < \Delta I_5 < \Delta I_6. \end{aligned} \quad (2.20)$$

Наибольшая скорость изменения частоты наблюдения в полученных диапазонах наблюдения для рассматриваемых подстанций удовлетворяет неравенствам:

$$\begin{aligned} \Delta p_u : \Delta p_{u1,2,3,4} > \Delta p_{u5} > \Delta p_{u6}, \\ \Delta p_l : \Delta p_{l1,2,3,4} > \Delta p_{l5} > \Delta p_{l6}. \end{aligned} \quad (2.21)$$

Отсутствие типовых графиков плотности вероятности для напряжения на шинах и тяговой нагрузки подстанций и необходимость выбора законов распределения, не входящих в перечень классических, обуславливают необходимость нахождения других законов или функций аппроксимации для описания экспериментальных данных. Одним из путей решения является выбор теоретического закона распределения на основе функций распределения Джонсона.

Для случайной величины  $z$ , имеющей нормальное распределение, преобразование Джонсона [60, 61, 271] имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} z &= \gamma + \eta f(x; \varepsilon; \lambda), \\ \text{при } \eta &> 0, \\ -\infty &< \gamma < \infty, \\ \lambda &> 0, \\ -\infty &< \varepsilon < \infty, \end{aligned} \quad (2.22)$$

где:  $\gamma$ ,  $\lambda$ ,  $\varepsilon$  и  $\eta$  – параметры распределения Джонсона;

$f(x, \lambda, \varepsilon)$  – произвольная функция.

Функции Джонсона  $f(x, \lambda, \varepsilon)$  имеют следующий вид:

$$f_1(x; \varepsilon; \lambda) = \ln\left(\frac{x - \varepsilon}{\lambda}\right), \text{ при } x \geq \varepsilon; \quad (2.23)$$

$$f_2(x; \varepsilon; \lambda) = \ln\left(\frac{x - \varepsilon}{\lambda + \varepsilon - x}\right), \text{ при } \varepsilon \leq x \leq \varepsilon + \lambda; \quad (2.24)$$

$$f_3(x; \varepsilon; \lambda) = \text{Arsh}\left(\frac{x - \varepsilon}{\lambda}\right), \text{ при } -\infty < x < \infty. \quad (2.25)$$

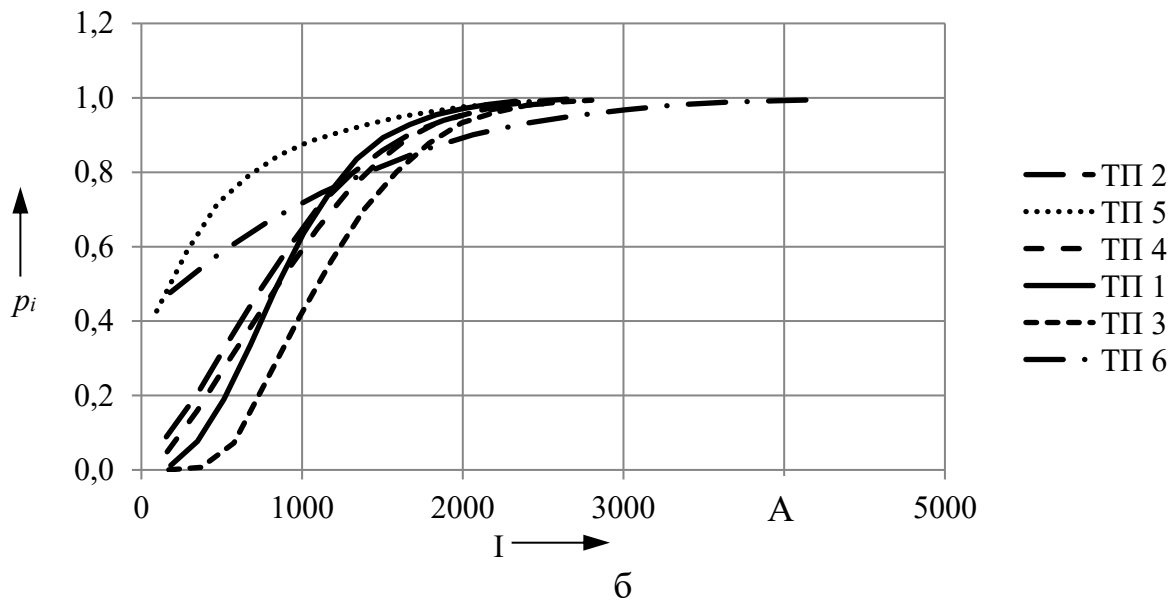
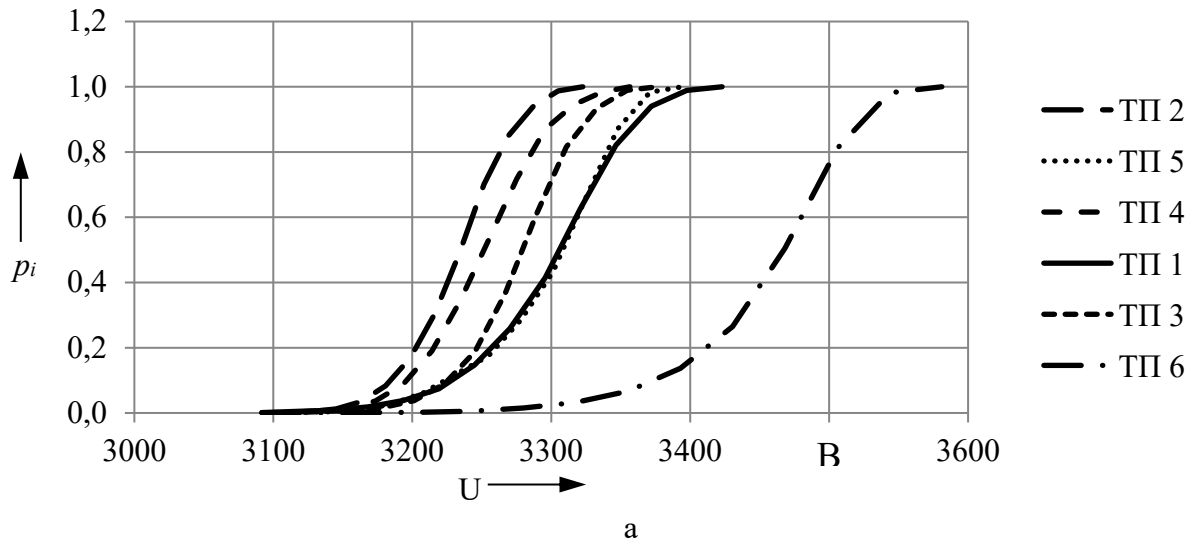


Рисунок 2.20 – Кумулятивная частота наблюдения напряжения (а) и тяговой нагрузки (б)

Функциям (2.23) – (2.25) соответствует семейство кривых  $S_L$ ,  $S_B$  и  $S_U$  Джонсона. С целью выбора функции распределения Джонсона определяются эмпирические оценки третьего ( $\alpha_3$ ) и четвертого ( $\alpha_4$ ) моментов:

$$\hat{a}_3 = \frac{1}{n \cdot s^3} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^3, \quad (2.26)$$

$$\hat{a}_4 = \frac{1}{n \cdot s^4} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^4, \quad (2.27)$$

где:  $s$  – определяется по формуле:

$$s^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2. \quad (2.28)$$

Подбор функций распределения Джонсона для результатов измерения напряжения на шинах 3,3 кВ подстанций показывает, что наиболее близким к наблюдаемым результатам является  $S_B$  распределение Джонсона. Результаты сравнения наблюдаемых и теоретических распределений напряжения на шинах 3,3 кВ приведены в таблице 2.5.

Таблица 2.5 – Значения критерия Пирсона для ряда наблюдаемых значениях напряжения на шинах тяговых подстанций

Подстанция	Дата	Наблюдаемое значение распределения		Критическое значение Хи-квадрат (уровень значимости, степени свободы)
		Нормальное	Джонсона $S_B$	
ТП 1	06.07.2017	111,6	36,0	19,7 (0,05; 11)
	07.07.2017	92,3	87,2	
	08.07.2017	94,9	90,7	
ТП 2	06.07.2017	86,1	<b>5,3</b>	
	07.07.2017	110,5	20,8	
	08.07.2017	103,5	<b>9,4</b>	
ТП 3	06.07.2017	102,1	242,8	
	07.07.2017	94,6	53,7	
	08.07.2017	104,3	<b>10,2</b>	
ТП 4	06.07.2017	104,1	<b>9,2</b>	
	07.07.2017	112,7	38,7	
	08.07.2017	111,9	37,8	
ТП 5	06.07.2017	103,3	52,2	
	07.07.2017	101,5	388,0	
	08.07.2017	86,3	23,1	
ТП 6	06.07.2017	108,9	33,8	
	07.07.2017	101,2	<b>10,3</b>	
	08.07.2017	100,3	<b>14,4</b>	

Распределение Джонсона  $S_B$  по наблюдаемым распределениям напряжения на шинах 3,3 кВ по некоторым суткам имеет значение критерия Пирсона ниже критического в отличие от нормального распределения. Распределения наблюдаемых и теоретических частот  $S_B$  распределения Джонсона на примере одной из подстанций для напряжения представлены на рисунке 2.21. Следует отметить, что значение Хи-квадрат для  $S_B$  функции при уровне значимости 0,05

ниже критического только в некоторых случаях. Для любой из рассмотренных подстанций в рамках наблюдаемого периода (трое суток) значение Хи-квадрат превышает критическое значение. Для рассмотренных данных нормальный закон и  $S_B$  функция Джонсона являются наиболее подходящими к наблюдаемым распределениям плотности вероятности, но использование теоретических распределений плотности вероятности не позволяет получить представительные выборки данных.

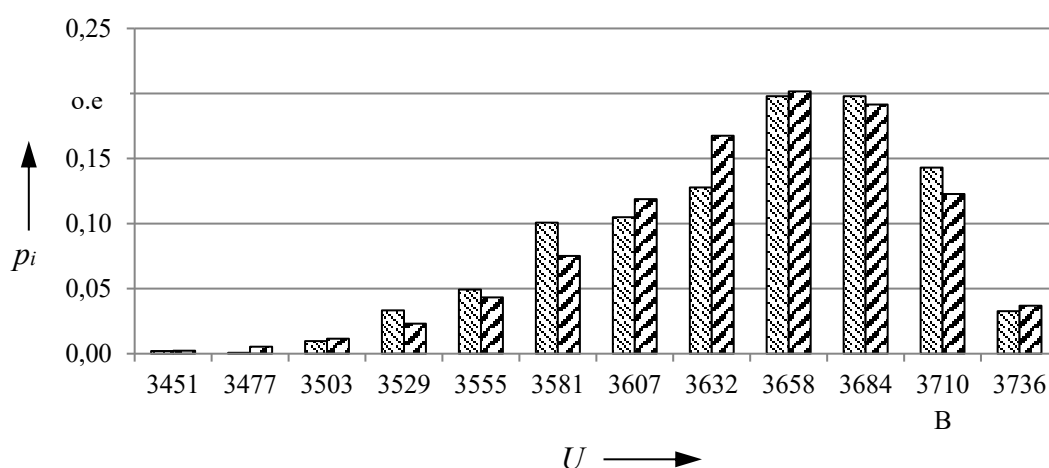


Рисунок 2.21 – Распределения наблюдаемых и теоретических частот напряжения

Выбор теоретических законов распределения для наблюдаемых значений тяговой нагрузки рассмотренных ТП позволяет получить аналогичные результаты (таблица 2.6).

При подборе теоретических частот по экспериментальным данным тяговой нагрузки рассматривались следующие типы распределений: нормальное, экспоненциальное, гамма, логарифмически нормальное, хи-квадрат и три формы кривых Джонсона.

Наиболее близкими к наблюдаемым распределениям тяговой нагрузки оказались гамма, логарифмически нормальное и  $S_L$  распределения Джонсона. Результаты сравнения наблюдаемых и теоретических распределений тяговой нагрузки представлены в таблице 2.7. В большинстве случаев гамма-распределение имеет значения критерия Пирсона ниже, чем распределение Джонсона  $S_L$ .

Исключение составляет тяговая подстанция ТП 5 – к наблюдаемому распределению в двух случаях из трех по критерию Пирсона распределение Джонсона  $S_L$  ближе, чем логарифмически нормальное и гамма распределения. В качестве примера на рисунке 2.22 представлены распределения наблюдаемых и теоретических частот Джонсона  $S_L$  тяговой нагрузки одной из ТП.

Таблица 2.6 – Законы и параметры распределения тяговой нагрузки

Подстанция	Дата	Наблюдаемое значение распределения		Критическое значение Хи-квадрат (уровень значимости, степени свободы)
		Нормальное	Джонсона $S_L$	
ТП 1	06.07.2017	<b>18,7</b> (Гамма)	21,2	19,7 (0,05; 11)
	07.07.2017	19,8 (Гамма)	35,3	
	08.07.2017	<b>7,6</b> (Гамма)	<b>19,6</b>	
ТП 2	06.07.2017	36,8 (Гамма)	51,2	
	07.07.2017	33,6 (Гамма)	<b>19,2</b>	
	08.07.2017	<b>15,4</b> (Гамма)	38,5	
ТП 3	06.07.2017	64,2 (Гамма)	30,1	
	07.07.2017	45,6 (Гамма)	41,7	
	08.07.2017	56,1 (Гамма)	48,0	
ТП 4	06.07.2017	67,9 (Гамма)	93,6	
	07.07.2017	29,7 (Гамма)	41,7	
	08.07.2017	<b>18,5</b> (Гамма)	29,4	
ТП 5	06.07.2017	56,7 (Лог. норм)	84,5	
	07.07.2017	69,9 (Лог. норм)	28,5	
	08.07.2017	39,1 (Лог. норм)	<b>10,6</b>	
ТП 6	06.07.2017	23,4 (Гамма)	74,9	
	07.07.2017	61,6 (Гамма)	117,7	
	08.07.2017	45,8 (Гамма)	89,4	

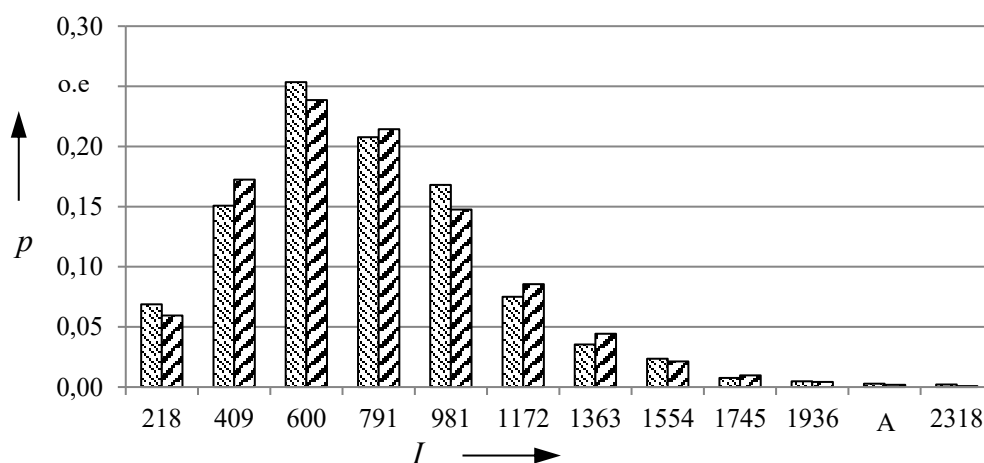


Рисунок 2.22 – Распределения наблюдаемых и теоретических частот тяговой нагрузки

Выбор различных функций распределения плотности вероятности для рассматриваемых данных показывает, что ни один из рассмотренных законов распределения не подходит для описания наблюдаемых распределений

напряжения и тяговой нагрузки ТП, построенным по экспериментальным данным, в течение времени измерений.

Таблица 2.7 – Сравнение распределение напряжений и тяговой нагрузки тяговых подстанций

Номера сравниваемых ТП	Наблюдаемое значение распределения	
	Напряжение на шинах 3,3 кВ	Тяговая нагрузка
1 – 3	0,065	0,117
1 – 6	<b>0,372</b>	<b>0,507</b>
2 – 1	0,076	0,154
2 – 3	0,126	0,271
2 - 4	0,045	0,065
2 – 5	0,265	<b>0,386</b>
2 – 6	<b>0,426</b>	<b>0,388</b>
3 – 6	0,362	<b>0,601</b>
4 – 1	0,110	0,099
4 – 3	0,171	0,215
4 – 6	<b>0,447</b>	<b>0,428</b>
5 – 1	0,191	<b>0,528</b>
5 – 3	0,182	<b>0,644</b>
5 – 4	0,287	<b>0,430</b>
5 – 6	0,180	0,049

Для подтверждения различия экспериментальных данных ТП между собой сравнение суточных выборок напряжения на шинах 3,3 кВ рассмотренных подстанций на однородность выполняется по критерию Колмогорова [62]:

$$D_n = \max_{-\infty < x < \infty} |P_i^*(x) - P_j^*(x)|, \quad (2.29)$$

где:  $P_i^*(x)$  – частота распределения экспериментальных данных;

$P_j^*(x)$  – частота теоретического распределения.

Критическое значение критерия Колмогорова рассчитано при доверительной вероятности – 0,95 и количестве интервалов группирования – 20

и равно 0,364. По результатам расчетов получено, что в трех случаях выборки напряжения на шинах 3,3 кВ различаются и во всех случаях одной из рассматриваемых подстанций является подстанция ТП 6. При сравнении пары подстанций ТП 3 – ТП 6 наблюдаемое значение близко к критическому. Пара подстанций ТП 5 – ТП 6 не имеет существенных различий между выборками напряжения на шинах 3,3 кВ. Это объясняется тем, что в границах межподстанционных зон, где расположены ТП 5 и ТП 6, интенсивно применяется режим рекуперативного торможения. Выборки напряжений для рассматриваемых подстанций ТП 1, ТП 2, ТП 3 и ТП 4 не имеют существенных отличий между собой. Результаты сравнения суточных выборок напряжения на шинах 3,3 кВ и тяговой нагрузки для трех суток (1, 2 и 3) с помощью критерия Колмогорова [63] представлены в таблице 2.8.

Таблица 2.8 – Сравнение распределений напряжения и тяговой нагрузки по критерию Колмогорова

Номера ТП	Напряжение на шинах			Тяговая нагрузка		
	1-2	1-3	2-3	1-2	1-3	2-3
1	0,122	0,074	0,164	0,108	0,106	0,023
2	0,071	0,145	0,083	0,085	0,243	0,200
3	0,145	0,331	0,214	0,159	0,126	0,251
4	0,072	0,069	0,140	0,075	0,049	0,074
5	0,297	0,195	0,285	0,028	0,040	0,068
6	0,092	0,053	0,090	0,042	0,044	0,047

По представленным результатам, можно сделать вывод о том, что суточные выборки напряжения и тяговой нагрузки в рамках одной ТП не имеют существенных отличий (критическое значение критерия Колмогорова составляет 0,364).

На примере данных измерений проиллюстрировано, что рассмотренные экспериментальные распределения для различных ТП, расположенных на участках железных дорог с различным типом профиля пути, на одно- и двухпутных участках для тока и напряжения не позволяют подобрать с заданным

уровнем значимости и мощностью критерия в качестве универсального ни одного из теоретических законов распределения.

Установлено, что наиболее подходящими теоретическими законами распределения для описания напряжения в СТЭ и тяговой нагрузки являются функции Джонсона, для ряда случаев допустимо использовать для описания напряжения – нормальный закон, а для тяговой нагрузки – гамма-закон распределения.

Отличие распределения кумулятивной частоты наблюдения, наблюдаемый размах значений тяговой нагрузки и напряжения позволяет выполнить усреднение для напряжения на шинах и тяговой нагрузки по группам ТП, общим для которых будет тип профиля пути участка, на которых они расположены. Выявленная однородность наблюдаемых рядов для ТП в пределах выделенных групп позволяет подойти к формированию унифицированных распределений, опираясь на размах наблюдаемых значений тяговой нагрузки и напряжения на шинах подстанций, которые следует использовать при оценке эффективности оборудования при усилении СТЭ, в частности, при рассмотрении работы тягового электроснабжения с СНЭЭ.

#### 2.4 Основные факторы, определяющие объем электроэнергии на тягу

На электропотребление ТП помимо объемов перевозок оказывает влияние множество факторов: масса поезда; нагрузка на ось; профиль пути; техническая скорость; доля порожнего пробега; объем энергии рекуперации; температура окружающего воздуха и др. Указанные факторы учитываются в различных исследованиях, связанных с моделированием движения поезда и расчетом его энергетических характеристик, проводимых как в России, так и за рубежом. В исследованиях рассматриваются вопросы влияния эксплуатационных факторов на энергетические показатели движения поезда и формирования тяговой нагрузки ТП, нормирования и прогнозирования [80 – 89, 284], моделирования взаимодействия электроподвижного состава и СТЭ и расчета

тяговой нагрузки [285 – 293]. Помимо указанных факторов на формирование электротяговой нагрузки в границах межподстанционных зон СТЭ оказывает влияние и ГДП [90].

Одним из способов оценки влияния факторов на энергетические показатели является способ декомпозиции, при применении которого определение степени влияния одного из факторов осуществляется при сохранении постоянными значений других факторов. С указанных позиций исследуются вопросы по влиянию на энергетические показатели СТЭ различных эксплуатационных факторов, связанных с характеристиками и режимами работы ЭПС, расположением ЭПС в границах межподстанционных зон, режимами работы и параметрами СТЭ.

Применение способа имитационного моделирования для исследования характера изменения энергетических показателей обусловлено сложностью взаимосвязей в моделях и позволяет оценивать влияние одного из факторов при сохранении остальных факторов постоянными. Применительно к решению указанных задач математическая модель принимает вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} Y = F(X) \\ x_i \in X \\ x_i = var \\ \forall j \neq i : x_j = const \\ X = \{x_k, k = 1 \dots N_\phi\} \\ Y = \{y_i, i = 1 \dots N_\pi\} \end{array} \right. , \quad (2.30)$$

где:  $X$  – вектор факторов, влияющих на энергетические показатели СТЭ;

$x_i, x_j$  – переменный и постоянные факторы, входящие в вектор  $X$ ;

$Y$  – вектор энергетических показателей СТЭ, влияние факторов  $X$  на который исследуется.

Имитационное моделирование взаимодействия СТЭ и ЭПС позволяет получить функциональную зависимость влияния эксплуатационных факторов,

параметров СТЭ, условий формирования электротяговой нагрузки в границах межподстанционных зон на энергетические показатели СТЭ.

При оценке влияния электротяговой нагрузки в границах межподстанционных зон на энергетические показатели СТЭ учитываются параметры инфраструктуры участка, к основным из которых относятся: количество главных путей; тип СТЭ (постоянного тока, переменного тока напряжением 3,3, 27,5 кВ или  $2 \times 25$  кВ соответственно); эксплуатируемые на участке серии ЭПС; параметры профиля пути.

Основой для получения оценки влияния ГДП на расход электроэнергии является множество вариантов исполнения ГДП, принимаемых для имитационного моделирования условий пропуска ЭПС и работы СТЭ. В связи с этим графики движения при имитационном моделировании представляется целесообразным формировать путем изменения одного из параметров ГДП (интервала попутного следования, количества пакетов и поездов в пакетах графика, количества энергосберегающих ниток в графике, количества остановок грузовых поездов).

## 2.5 Выводы по второй главе

Для решения задач повышения пропускной и провозной способности и энергетической эффективности применение СНЭЭ ориентировано на улучшение основных показателей графика нагрузки (коэффициентов неравномерности и заполнения), стабилизацию уровня напряжения на токоприемнике, снижение уровня потерь электроэнергии в тяговой сети, повышение надежности электроснабжения.

Установлено, что аналитическое представление графиков электрической нагрузки и напряжений в СТЭ с помощью теоретических законов распределения не носит универсального характера – для каждой тяговой подстанции описание изменения напряжения осуществляется между наиболее подходящими

нормальным, а графика нагрузки – гамма-распределением и распределением, полученным с помощью семейства функций Джонсона.

Показано, что для целей расчета энергетических показателей СТЭ определение токов и напряжений следует выполнять на основе функций Джонсона, для ряда случаев допустимо использовать нормальный закон (для напряжения) и гамма-закон распределения (для тяговой нагрузки).

Особенности профилей пути участков железных дорог, помимо классификации по энергозатратности, позволяют ввести новые дополнительные характеристики, описывающие переломность профиля и позволяющие оценить энергоэффективность работы СТЭ с учетом рекуперативного торможения.

Предложена классификация факторов, оказывающих влияние на реализуемую мощность рекуперации в границах межподстанционных зон, в зависимости от изменения сопротивления тяговой сети, режимов ведения поезда и регулирования напряжения.

Предложена классификация задач расчета показателей работы СТЭ, связанных с повышением пропускной и провозной способности и уровня энергетической эффективности СТЭ.

### 3 МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРОТЯГОВОЙ НАГРУЗКИ И СИСТЕМЫ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

Применение мероприятий по выравниванию графика электрической нагрузки в системе тягового электроснабжения обусловлено возможностью снижения тягового электропотребления с учетом энергии рекуперации и уровня потерь электроэнергии. Определение потенциала снижения указанных показателей позволяет оценить потенциальную эффективность применения систем накопления электроэнергии в системах тягового электроснабжения.

В данной главе представлены результаты, полученные на основе моделирования электропотребления в зависимости от условий формирования электротяговой нагрузки. Результаты расчетов выполнены на основе разработанной имитационной модели, предназначенной для определения графика тяговой нагрузки подстанций, формируемого для различных условий. Выполнен анализ изменения расхода и потерь электроэнергии в системах тягового электроснабжения постоянного и переменного тока. Показана необходимость учета особенностей профиля пути и формализуемых параметров формирования электротяговой нагрузки при оценке изменения тягового электропотребления и уровня потерь электроэнергии.

#### 3.1 Имитационная модель системы тягового электроснабжения

Определение энергетических показателей работы СТЭ выполняется при решении задач, связанных с технико-экономической оценкой эффективности работы различного оборудования и расчетом пропускной и провозной способности участков железных дорог по устройствам тягового электроснабжения.

Группу мероприятий по повышению энергетической эффективности перевозочного процесса условно можно разделить на две части. Первая часть

связана с управлением электротяговой нагрузкой в границах межподстанционных зон, вторая – с применением новых технологий, устройств или оборудования СТЭ, позволяющих улучшить показатели работы.

К первой части относятся мероприятия, связанные с регулированием режима вождения поездов, межпоездных интервалов, формированием поездов установленной массы, длины, и др., ко второй части – мероприятия, связанные с изменением параметров СТЭ, режимов питания межподстанционных зон, применением устройств управления режимами, мощностью и напряжением в контактной сети. Применение СНЭЭ на ТП или линейных устройствах относится ко второй части.

Зарубежные исследования в области оценки влияния организации перевозок на тяговое электроснабжение посвящены оценке уровня энергетической эффективности траектории движения и ГДП [294 – 308]. Одним из направлений повышения энергетической эффективности железнодорожных перевозок является повышение эффективности применения энергии рекуперативного торможения ЭПС [309 – 315]. Отечественные исследования по повышению энергетической эффективности посвящены вопросам определения энергооптимальных траекторий движения поезда в аспекте управления скоростью движения электроподвижного состава и реализации алгоритмов управления движением в аппаратно-программных комплексах [91 – 100].

Объем тягового электропотребления зависит от выполненной тоннокилометровой работы и от ряда других факторов: серии электроподвижного состава; массы состава; нагрузки на ось; технической скорости; режимов питания межподстанционных зон; характеристик СТЭ (параметры понижающих трансформаторов, преобразовательных агрегатов, схемы выпрямления, сечения контактных подвесок, расположения линейных устройств в границах межподстанционных зон, температуры окружающего воздуха и др.) и т.д.

Оценка влияния ГДП на электропотребление или энергетическую эффективность выполняется на основе сохранения базовых параметров

неизменными, к которым следует отнести те, которые непосредственно не связаны с расписанием движения поездов (масса состава, нагрузка на ось, длина поезда и т.п.).

При решении данной задачи необходимо оценить влияние параметров расписания движения поездов на объем электроэнергии. Полученные на основе имитационного моделирования результаты позволяют выявить закономерности изменения электропотребления для различных вариантов построения графиков движения для их последующего применения для решения задач оценки или прогнозирования.

Имитационное моделирование работы СТЭ при пропуске по участку ЭПС включает в себя три основных этапа. На первом этапе выполняются тяговые расчеты, на втором – определяются параметры ГДП, на третьем – определяются энергетические показатели работы СТЭ для принятых условий. Указанный порядок применяется при расчете энергетических показателей при решении различных задач [101 – 103].

При расчете энергетических показателей СТЭ на основе выполненных тяговых расчетов (ТР) строится ГДП, в соответствии с которым определяется тяговая нагрузка и выполняются электрические расчеты (ЭР) (рисунок 3.1, а). При решении задач, связанных с оценкой влияния ГДП на энергетические показатели, порядок расчетов предусматривает изменение графика движения после определения показателей (рисунок 3.1, б). В данном случае исследуются вопросы влияния расписания, интервалов движения поездов и их чередования с поездами повышенной массы, условий пакетного пропуска и др. факторов на энергетические показатели путем их заданного изменения с учетом корректировки при выходе за допустимые пределы (КФ). Для поиска вариантов соответствия энергетических показателей нормам или целевым ориентирам порядок расчетов должен позволять изменять параметры СТЭ. К следующему виду задач относятся задачи по оценке влияния параметров поезда и локомотива, режима следования и др. факторов на траектории движения поезда по участку и на ГДП (рисунок 3.1, в).

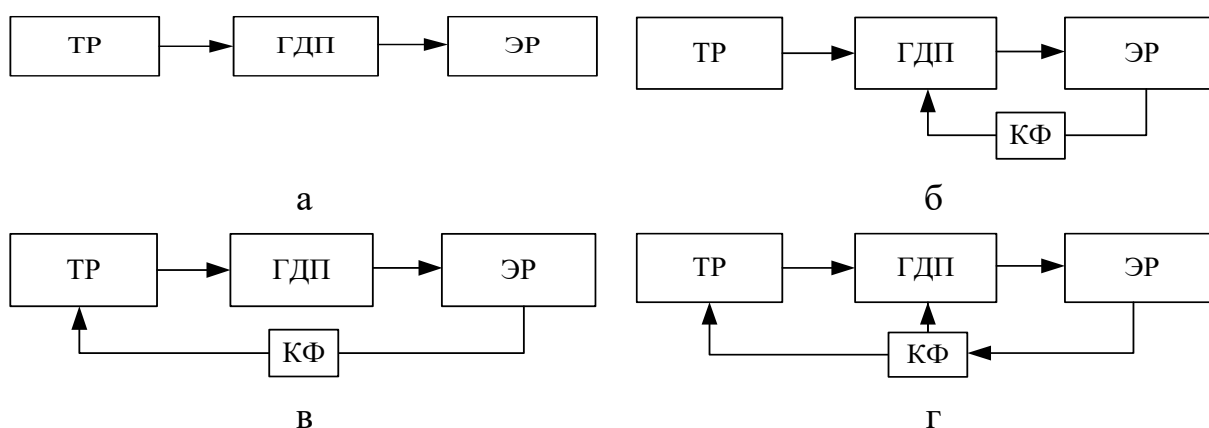


Рисунок 3.1 – Варианты выполнения имитационного моделирования

В случае одновременного изменения параметров тягового расчета, графика движения и параметров СТЭ порядок расчета показателей должен предусматривать корректировку параметров и влияющих факторов на всех этапах расчета (рисунок 3.1, г).

Направления совершенствования известных способов расчетов энергетических показателей СТЭ связаны с учетом условий работы, характеристиками оборудования, повышением точности расчетов, среди которых необходимо отметить следующие:

- совершенствование моделей объектов в схеме замещения СТЭ;
- учет устройств с регулированием параметров;
- совершенствование моделей при согласованном управлении параметрами, мощностью и напряжением на подстанциях и линейных устройствах;
- учет изменения напряжения на токоприемнике ЭПС при выполнении ТР и формировании ГДП на основании данных электрического расчета;
- уменьшение шага расчетов на этапах выполнения ТР и ЭР.

Проведение расчетов на основе имитационного моделирования позволяет выполнить оценку изменения:

– энергетических показателей (электропотребления на тягу, объема энергии рекуперации, технических потерь, удельного расхода электроэнергии и др.);

– показателей загрузки (нагрева проводов и тросов тяговой сети, загрузки силового оборудования; тока и напряжения на токоприемнике ЭПС).

Задача определения энергетических показателей СТЭ при изменении параметров или факторов на основе результатов, полученных при имитационном моделировании, решается методами интерполяции и аппроксимации [316]. Выбор функций аппроксимации для определения энергетических показателей на основе сравнения коэффициента детерминации и абсолютной ошибки показывает, что наилучшие результаты для рассматриваемых задач позволяют получить регрессионные функции и функции моделей нейронных сетей. Способы расчетов, используемые для определения энергетических показателей приведены на рисунке 3.2. Указанные функции аппроксимации позволяют достичь высокой степени приближения и достоверности, что подтверждается расчетами по определению сходимости на основе критериев Стьюдента и Фишера [27].

Существуют различные подходы к использованию результатов расчетов или измерений энергетических показателей электроподвижного состава и СТЭ для оценки влияния параметров и факторов на энергетические показатели, например, технические потери электроэнергии [317]. Наличие указанных данных позволяет выполнить верификацию имитационных моделей и их параметров, а также на основе полученных теоретических зависимостей использовать результаты измерений на ЭПС для оценки энергетических показателей СТЭ [104 – 106, 318, 319, 320].

В общем случае упрощенная электрическая схема ТП, соответствующая типовому составу оборудования, состоящему из понижающего трансформатора  $T_1$ , подключенного к шинам высшего и низшего напряжения Ш ВН и Ш СН соответственно, преобразовательного трансформатора  $T_2$ , подключенного

аналогично к шинам Ш СН и Ш НН, преобразователя VD и присоединений контактной сети (ФКС), имеет вид, приведенный на рисунке 3.3.

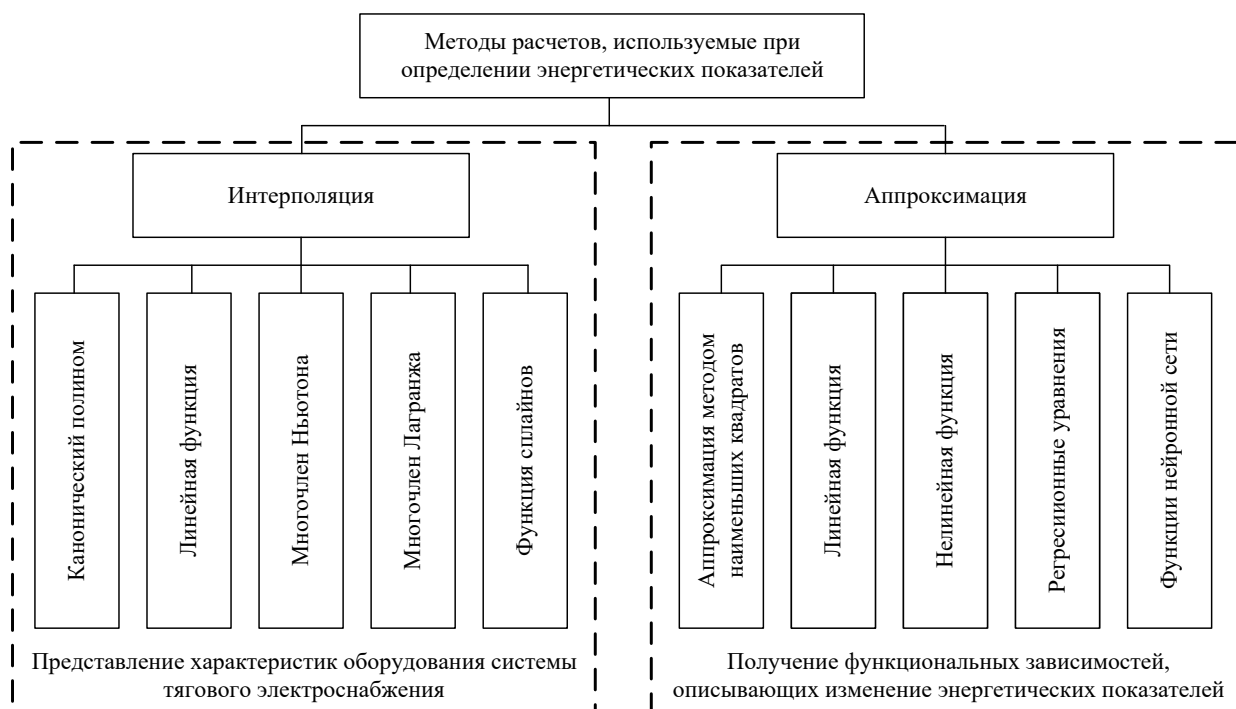


Рисунок 3.2 – Методы расчетов, используемые для определения энергетических показателей

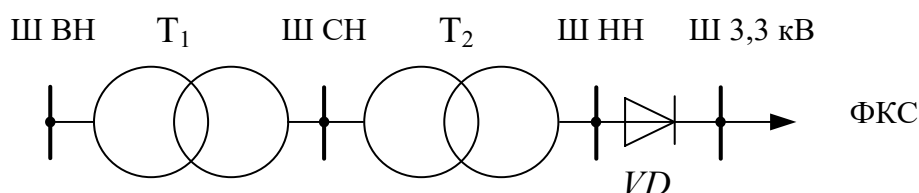


Рисунок 3.3 – Типовой состав силового оборудования тяговой подстанции

При выполнении расчетов энергетических показателей используются схемы замещения элементов, составляющих СТЭ. Схема замещения ТП постоянного тока (рисунок 3.4) содержит источник напряжения с  $E_0$ , принимаемой равной напряжению холостого хода подстанции, эквивалентное сопротивление подстанции  $R_{\Sigma}$  ТП и диод  $VD$ . Эквивалентное сопротивление предназначено для определения энергетических показателей в установившихся режимах. Для расчета внешней характеристики подстанции определяется полное сопротивление элементов подстанции с учетом сопротивления

электроэнергетической системы и силовых трансформаторов подстанции по формуле [107]:

$$R_{\text{э ПП}} = k_{\text{пр}} \cdot \left( \frac{1}{S_{\text{к.з}}} + \frac{u_{\text{к ПП}}}{100 \cdot n_{\text{ПП}} \cdot S_{\text{ПП ном}}} + \frac{u_{\text{к ПрТ}}}{100 \cdot n_{\text{ПрТ}} \cdot S_{\text{ПрТ ном}}} \right) \quad (3.1)$$

где:  $S_{\text{к.з}}$  – мощность трехфазного короткого замыкания на шинах ВН тяговой подстанции;

$S_{\text{ПП ном}}$ ,  $S_{\text{ПрТ ном}}$  – номинальная мощность понижающего и преобразовательного трансформатора соответственно;

$u_{\text{к ПП}}$ ,  $u_{\text{к ПрТ}}$  – напряжение короткого замыкания понижающего трансформатора и напряжение короткого замыкания коммутации преобразовательного трансформатора соответственно;

$k_{\text{пр}}$  – коэффициент, зависящий от схемы преобразования (3,67 – для эквивалентной двенадцатифазной схемы, 7,41 – для трехфазной мостовой схемы).

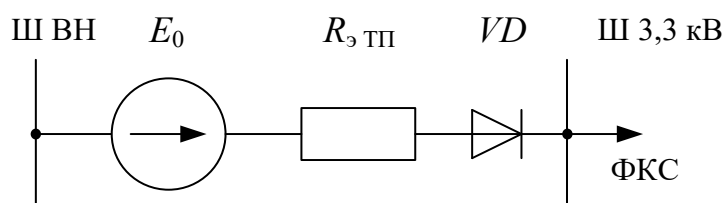


Рисунок 3.4 – Схема замещения тяговой подстанции

Использование данных о потерях короткого замыкания позволяет повысить точность расчетов при определении потерь активной электроэнергии в силовых трансформаторах. В этом случае при расчете внешней характеристики используют эквивалентное сопротивление, определяемое как полное, а расчет потерь активной электроэнергии выполняется по данным о мощности потерь короткого замыкания по формуле:

$$R_{\text{э ПП}} = \frac{U_{\text{ном ВН}}^2}{S_{\text{к.з}}} + \frac{P_{\text{к ПП}} \cdot U_{\text{ном ВН}}^2}{n_{\text{ПП}} \cdot S_{\text{ПП ном}}^2} + \frac{P_{\text{к ПрТ}} \cdot U_{\text{ном НН}}^2}{n_{\text{ПрТ}} \cdot S_{\text{ПрТ ном}}^2} \quad (3.2)$$

При определении внешней характеристики ТП сопротивления ее элементов должны быть приведены к уровню напряжения вентильных обмоток преобразовательного трансформатора. В этом случае эквивалентное сопротивление определяется по формуле:

$$R_{\text{э ТП}} = \frac{U_{\text{ВН}}^2}{k_{\text{тр В-Н}}^2} \cdot \left( \frac{1}{S_{\text{к.з}}} + \frac{u_{\text{к ПТ}}}{100 \cdot n_{\text{ПТ}} \cdot S_{\text{ПТ ном}}} + \frac{u_{\text{к ПрТ}}}{100 \cdot n_{\text{р}} \cdot n_{\text{ПрТ}} \cdot S_{\text{ПрТ ном}}} \right) \quad (3.3)$$

где:  $n_{\text{р}}$  – количество вторичных обмоток преобразовательного трансформатора.

При расчете эквивалентного сопротивления, рассчитанные по формуле (3.1) и (3.3) сопротивления отличаются, поскольку в (3.1) не используются номинальные напряжения и коэффициенты трансформации. Для различного набора исходных данных значения могут отличаться в несколько раз. Отличием в формулах является определение коэффициента для приведения сопротивления к низкому напряжению и учет количества расщепленных обмоток преобразовательного трансформатора.

Использование устройств регулирования мощности на тяговых подстанциях учитывается в знаменателе рассмотренного выражения – значение работающих трансформаторов определяется с учетом режима работы (автоматическое или ручное управление).

Применение устройств регулирования напряжения приводит к изменению расчетной формулы. При применении вольто-добавочного устройства, подключенного параллельно основному преобразовательному трансформатору, формула для определения эквивалентного сопротивления принимает вид:

$$R_{\text{э ТП}} = \frac{U_{\text{ВН}}^2}{k_{\text{тр В-Н}}^2} \cdot \left( \frac{1}{S_{\text{к.з}}} + \frac{u_{\text{к ПТ}}}{100 \cdot n_{\text{ПТ}} \cdot S_{\text{ПТ ном}}} + \frac{u_{\text{к ПрТ}}}{100 \cdot n_{\text{р}} \cdot n_{\text{ПрТ}} \cdot S_{\text{ПрТ ном}}} + \frac{u_{\text{к ВДУ}}}{100 \cdot n_{\text{р}} \cdot n_{\text{ВДУ}} \cdot S_{\text{ВДУ ном}}} \cdot \lambda \right), \quad (3.4)$$

где:  $\lambda$  – состояние вольто-добавочного устройства (включенное и отключенное состояние), соответствующее значениям 1 и 0;

$n_p, n_{ВДУ}$  – количество вторичных обмоток и количество вольто-добавочных устройств соответственно.

При применении устройств плавного регулирования напряжения формула для расчета эквивалентного сопротивления принимает вид:

$$R_{\text{э ПП}} = \frac{U_{\text{ВН}}^2}{k_{\text{тр В-Н}}^2} \cdot \left( \frac{1}{S_{\text{к.з}}} + \frac{u_{k \text{ ПП}}}{100 \cdot n_{\text{ПП}} \cdot S_{\text{ПП ном}}} + \frac{u_{k \text{ ПрТ}}}{100 \cdot n_p \cdot n_{\text{ПрТ}} \cdot S_{\text{ПрТ ном}}} + \frac{X_p \cdot U_{\text{ном}}}{100 \cdot I_{\text{ном}}} \right), \quad (3.5)$$

где:  $X_p$  – номинальное сопротивление реактора, %.

При определении эквивалентного сопротивления для моделирования внешней характеристики подстанции принимается ряд допущений, связанных с приведением параметров схемы замещения стороны переменного тока к стороне постоянного, с изменением напряжения со стороны переменного тока, сопротивлением преобразователя и др.

В настоящее время для определения токов, напряжений, мощности и потерь электроэнергии в схемах замещения СТЭ используются методы расчета, основанные на решении топологических матриц. Определение токов и напряжений в схеме замещения выполняется по одному из методов расчета, наиболее распространенными среди которых являются методы контурных токов и узловых потенциалов.

В матрично-топологических расчетах используется понятие обобщенной ветви электрической цепи, которая образована двумя параллельными ветвями: э.д.с. ветви  $E_b$ , сопротивлением  $R_b$  или проводимостью  $g_b$  ветви и источником тока  $J_b$ . В обобщенном виде ветвь схемы замещения приведена на рисунке 3.5.

Для обобщенной ветви в соответствии с законом Ома можно записать следующее уравнение:

$$I_b + J_b = g_b (E_e + \varphi_m - \varphi_n) = g_b (E_e + U_e), \quad (3.6)$$

где:  $U_b$  – напряжение ветви.

В соответствии с методом узловых потенциалов система уравнений для определения токов и напряжений схемы [108] записывается в матричной форме:

$$[A][g_b][A]^T[\varphi] = [A][J_b] - [A][g_b][E_e], \quad (3.7)$$

где:  $[A]$ ,  $[A]^T$  – узловые матрицы размерностью  $(y-1) \times \nu$  и транспонированная для схемы замещения соответственно ( $y$  – количество узлов,  $\nu$  – количество ветвей в схеме);

$[g_b]$  – матрица проводимости ветвей размерностью  $(\nu) \times (\nu)$ ;

$[\varphi]$  – матрица-столбец потенциалов узлов размерностью  $(y-1)$ ;

$[J_b]$  – матрица-столбец токов источников тока размерностью  $(\nu)$ ;

$[E_e]$  – матрица-столбец э.д.с. источников напряжения размерностью  $(\nu)$ .

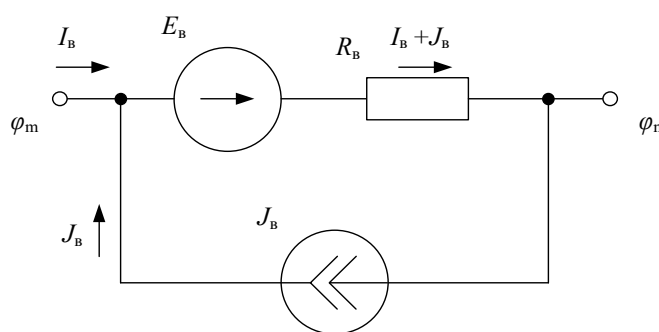


Рисунок 3.5 – Элементы ветви схемы замещения

Узловая матрица  $[A]$  составляется для всех узлов схемы кроме одного, принимаемого за базисный. Номер  $i$ -й строки матрицы соответствует номеру узла, а номер  $j$ -го столбца – номеру ветви. Ячейки матрицы заполняются значениями -1, 0 и 1. В соответствующую ячейку ставят 1, если направление ветви из узла и -1, если направление ветви к узлу. В случае, если ветвь не связана с узлом – в соответствующей ячейке ставится 0.

Решение уравнения (3.7) позволяет определить потенциалы во всех узлах схемы по формуле:

$$[\varphi] = [G]^{-1}[b], \quad (3.8)$$

где:  $[G]$  – матрица узловых проводимостей, определяемая по формуле:

$$[G] = [A][g_b][A]^T; \quad (3.9)$$

$$[b] = -[A][g_b][E_\epsilon]. \quad (3.10)$$

Матрица узловых токов определяется по выражению:

$$[I] = [A][J_b] + [b]. \quad (3.11)$$

Матрица токов ветвей определяется по выражению:

$$[I] = [g_\epsilon][U_\epsilon]. \quad (3.12)$$

Напряжения ветвей схемы можно определить по формуле:

$$[U_b] = [A]^T [\varphi] + [E_\epsilon]. \quad (3.13)$$

При решении задач по методу контурных токов токи контуров [108] определяют по формуле:

$$[I_{kk}] = \left( [K_\Gamma][R_b][K_\Gamma]^T \right)^{-1} [K_\Gamma]([E_b] - [R_b][J_b]), \quad (3.14)$$

где:  $[K_\Gamma]$  – матрица главных контуров;

$[R_b]$  – диагональная матрица сопротивлений ветвей;

$[E_b]$  – матрица э.д.с. ветвей;

$[J_b]$  – матрица токов ветвей источников тока.

Токи ветвей по методу контурных токов определяются по формуле:

$$[I_b] = [K_\Gamma]^T [I_{kk}]. \quad (3.15)$$

Матрица главных контуров составляется из чисел -1, 0 и 1. Номера строк матрицы соответствуют номеру главного контура, столбцы – номеру ветви. Если направление главного контура совпадает с направлением тока, то в

соответствующую ячейку ставят 1, если не совпадает, то -1. Если ветвь не охватывается контуром, то в ячейке указывается 0.

Определение тягового электропотребления на каждом  $i$ -м шаге расчетов с шагом времени  $\Delta t$  с учетом потерь электроэнергии осуществляется на основе расчета мощности э.д.с., определяемой с помощью матриц э.д.с. и токов ветвей:

$$P_i^{\text{э.д.с.}} = [E_{\text{в}}]^T [I_{\text{в}}], \quad (3.16)$$

по формуле:

$$W_i^{\text{э.д.с.}} = P_i \cdot \Delta t. \quad (3.17)$$

Падение напряжения на сопротивлениях ветвей определяется по формуле:

$$[\Delta U_i] = [R_{\text{в}}][I_{\text{в}}]. \quad (3.18)$$

С учетом формулы (3.18) расчет потерь энергии в тяговой сети в  $i$ -м интервале определяется по формуле:

$$\Delta W_i = [I_{\text{в}}]^T [R_{\text{в}}][I_{\text{в}}]. \quad (3.19)$$

Совершенствование метода расчета для определения энергетических показателей СТЭ связано с учетом особенностей работы ЭПС. Если для случая понижения напряжения ниже допустимых значений расчет не имеет смысла в связи с невозможностью движения поезда, то для случая повышения напряжения выше допустимых значений расчет должен быть скорректирован с учетом особенностей рекуперативного торможения.

В работе [109] для случаев применения рекуперативного торможения при повышении напряжения в узлах расчетной схемы свыше допустимого значения предлагается способ расчета по корректировке токов ЭПС в режиме рекуперации. После ограничения токов в ветвях источников тока решение задачи повторяется до тех пор, пока напряжения в ветвях схемы не окажутся менее

допустимого или не будут удовлетворять допустимой степени точности при решении задачи.

При решении задачи по указанному методу принято, что полученные в ходе тяговых расчетов токи рекуперации не изменяются за счет того, что на электроподвижном составе осуществляется регулирование мощности рекуперации. При необходимости уменьшения токов предполагается, что избыточная энергия рекуперации поглощается системой собственных нужд ЭПС или уменьшается при совместном использовании рекуперативного и пневматического торможения.

По формуле (3.13) определяется напряжение любой ветви, в т.ч. напряжение ветви источника тока, соответствующего ЭПС в режиме рекуперативного торможения.

Учитывая тот факт, что применительно к ЭПС режим тяги и рекуперации определяется направлением тока при проведении ТР, токи в ветвях источников тока, соответствующих рекуперативному торможению, при превышении напряжения будут определяться по формуле (3.12) с учетом того, что токи для источников тока, соответствующих ЭПС в режиме тяги будут оставаться неизменными, равными ранее определенным значениям.

Способы решения указанной задачи основаны на итерационных процедурах, в основе которых лежит анализ изменения евклидовой нормы матриц, полученной как разница матриц токов ветвей на каждом шаге итерации или как разница заданных и расчетных напряжений в задающих узлах, для которых уточняется ток рекуперативного торможения.

Во втором случае решение задачи выполняется в два этапа. На первом этапе значения токов рекуперации для задающих узлов напряжения снижаются на заданный шаг. Далее выполняется расчет, в ходе которого напряжения в рассматриваемых задающих узлах корректируются. На втором этапе значения напряжений в указанных задающих узлах проверяются на величину отклонения от максимально допустимого уровня напряжения:

$$0 \leq \sum_{y p} \frac{(U^{\text{доп}} - U_{y p})}{U^{\text{доп}}} \leq \varepsilon, \quad (3.20)$$

где:  $U^{\text{доп}}$ ,  $U_{y p}$  – допустимое и расчетное значения напряжения в задающем узле, соответствующему источнику тока с рекуперацией, В;

$\varepsilon$  – заданная степень точности, о.е.

Задача корректировки токов рекуперации требует решения как для условий отдельного проведения расчетов ТР и ЭР, так и при последовательном проведении данных расчетов в ходе имитационного моделирования.

В обоих случаях расчет значений токов рекуперации с учетом допустимого напряжения на токоприемнике ЭПС выполняется на этапе электрических расчетов. Одновременное проведение расчетов ТР и ЭР во втором случае направлено на повышение точности расчетов за счет учета изменения напряжения на токоприемнике ЭПС.

### 3.2 Формирование электротяговой нагрузки

В настоящее время для анализа и прогнозирования расхода электроэнергии на тягу в холдинге «РЖД» используется свыше двадцати нормообразующих факторов, учитываемых в Методике анализа расхода топливно-энергетических ресурсов на тягу поездов и прогнозирования [44]: средняя масса поезда и нагрузка на ось вагона; техническая скорость; коэффициент участковой скорости; доля порожнего пробега вагонов и др. Указанные факторы оказывают влияние на удельный расход электроэнергии ЭПС и в конечном счете на объем электроэнергии на тягу, определяемый по данным приборов учета ТП с учетом технических потерь электроэнергии в СТЭ.

Существующий анализ расхода электроэнергии на тягу ЭПС не предусматривает учет факторов, характеризующих взаимное расположение поездов в границах межподстанционных зон, как оказывающих влияние на технические потери в СТЭ, удельную рекуперации энергии и напряжение в

контактной сети. Указанное влияние обусловлено условиями применения рекуперативного торможения и формирования технических потерь электроэнергии в СТЭ. В текущей отчетности холдинга «РЖД» указанные факторы не рассматриваются и их влияние не оценивается.

Формирование электротяговой нагрузки определяется факторами, к которым относят: размеры движения; тоннокилометровую работу; техническую скорость движения поездов в различных видах движения; коэффициент участковой скорости; взаимное расположение поездов на участке в попутном и встречном направлениях (при пакетном, пачечном, пачечно-пакетном пропуске поездов); межпоездные интервалы и др. Формирование электротяговой нагрузки на тяговое электропотребление следует рассматривать в двух аспектах – влияние расписания движения поездов [27, 86] и влияние иных факторов, в том числе нормообразующих.

Оценку влияния расписания движения поездов на электротяговую нагрузку выполняют, принимая постоянными прочие факторы. С этой целью необходимо определить составляющие тягового электропотребления на основе имеющейся системы учета и измерений электроэнергии на ТП в холдинге «РЖД». Определение объема электроэнергии на тягу поездов и небаланса электроэнергии в тяговой сети для участка железной дороги в настоящее время осуществляется по данным автоматизированных информационно-измерительных систем коммерческого учета ТП (программный комплекс «Энергия Альфа 2»). Измерения на ТП постоянного и переменного тока выполняются приборами измерений РИК при помощи измерительных трансформаторов тока ТА и напряжения TV (рисунок 2.2). Существующие системы учета электроэнергии на тяговых подстанциях постоянного и переменного тока учитывают потери электроэнергии в различном составе оборудования. Для постоянного тока (рисунок 2.2, а) учитываются потери в преобразовательных трансформаторах ( $\Delta W_{\text{ПТ}}$ ), выпрямительных преобразователях и сглаживающих устройствах ( $\Delta W_{\text{В}}$  и  $\Delta W_{\text{СУ}}$ ), потери в тяговой сети ( $\Delta W_{\text{ТС}}$ ). На переменном токе (рисунок 2.2, б) учитываются потери в тяговой

сети и средствах компенсации ( $\Delta W_{СК}$ ). Исходя из этого составляющие технологических потерь электроэнергии для участков постоянного и переменного тока определяются с учетом состава оборудования. Для определения технологических потерь электроэнергии в тяговой сети используются данные приборов учета электроэнергии на ЭПС.

Существующие системы формирования прогнозного графика движения поездов, например, аппаратно-программный комплекс «Эльбрус», используемый в ОАО «РЖД» [110], позволяют строить прогнозный график движения поездов с определенными параметрами с учетом поездной обстановки.

Метод оценки эффективности введения энергооптимальных траекторий движения поезда в график движения по технологии системы информирования машиниста (СИМ) основан на приведении объема электроэнергии отчетного периода к базовому периоду на основе анализа изменения нормообразующих факторов [44].

Эффект от применения энергооптимальных траекторий в грузовом движении в отчетном периоде на рассматриваемом направлении участка, кВт·ч, определяется по формуле:

$$\mathcal{E} = (b^{\text{баз}} - b_{\text{прив}}^{\text{СИМ}} - \Delta b_{\text{нф}}) \cdot A^{\text{СИМ}}, \quad (3.21)$$

где:  $A^{\text{СИМ}}$  – объем работы в отчетном периоде для массива поездок с использованием технологии СИМ на рассматриваемом направлении участка, 10 тыс. ткм брутто;

$b^{\text{баз}}$  – удельный расход электроэнергии в базовом периоде на рассматриваемом направлении участка, кВт·ч/10 тыс. ткм брутто;

$b_{\text{прив}}^{\text{СИМ}}$  – приведенный удельный расход электроэнергии для массива поездок с использованием технологии СИМ в отчетном периоде с учетом изменения эксплуатационных факторов, кВт·ч/10 тыс. ткм брутто, на рассматриваемом направлении участка;

$\Delta b_{н.ф}$  – расчетная величина изменения удельного расхода электроэнергии от изменения нерасчетных нормообразующих факторов, кВт·ч/10 тыс. ткм брутто, на рассматриваемом направлении участка обслуживания.

Удельный расход электроэнергии в формуле (3.21) определяется по отчетным данным приборов учета электроэнергии ЭПС. Приведенный удельный расход рассчитывается с учетом приведения к базисному периоду нормообразующих факторов в отчетном периоде (массы поезда, нагрузки на ось, технической скорости и др.). Расчетная величина изменения удельного расхода электроэнергии от изменения нерасчетных нормообразующих факторов определяется как разница между удельным расходом электроэнергии в базовом периоде и удельным расходом по поездкам, выполненным без применения технологии СИМ.

Решение задачи по оценке влияния расписания движения поездов на формирование электротяговой нагрузки и объем электроэнергии на рассматриваемом участке выполняется путем исключения из рассмотрения тягового электропотребления в маневровой работе и отбора электроэнергии от контактной сети на нетяговые нужды.

Влияние электротяговой нагрузки на объемы электроэнергии выполняется при допущении о том, что объемы совершаемой работы во всех видах движения являются постоянными. В расчетах принимается, что весь объем работы в грузовом, хозяйственном и пассажирском движении выполняется на электрической тяге.

С целью описания изменений в расписании движения поездов необходимо использовать формализуемые параметры, учитывающие различные виды движения в электрической тяге. Расписание движения описывается следующими параметрами: межпоездной интервал в пакетах (пачках); интервал между пакетами (пачками); количество пакетов и поездов в пакетах (пачках) графика; количество технологических остановок и их продолжительность в грузовом и

хозяйственном движении, обусловленных стыковками расписаний железных дорог, необходимостью обработки поездов и сбоями в организации движения; количество твердых ниток в графике движения грузовых поездов; относительное время следования поездов в пакетах и др. При необходимости учета особенностей организации движения следует рассматривать и другие факторы, проявляющиеся на участках: преобладание пассажирского движения, многочисленные остановки пригородных и пассажирских поездов [111, 112, 321, 322], наличие скоростного движения и др.

С целью описания расписания движения поездов при формировании электротяговой нагрузки предлагается использовать следующие параметры:

- 1) средний межпоездной интервал в пакетах (пачках) или вне пакетов (пачках) поездов;
- 2) относительные значения времени следования поездов в пакетах (пачках) и между пакетами (пачками) поездов;
- 3) среднее количество поездов в пакете (пачке) графика (при изменении количества поездов в пакетах);
- 4) удельный вес остановок грузовых поездов;
- 5) удельный вес твердых ниток грузовых поездов;
- 6) коэффициент интенсивности.

Относительное значение времени следования поездов в пакетах  $\alpha$  (пачках – в зависимости вида блокировки, автоматической или полуавтоматической соответственно) определяется по формуле:

$$\alpha = \frac{\sum_{i=1}^n \tau_{i \text{ пак}}}{1440 \cdot K_{\text{гл}}}, \quad (3.22)$$

где:  $\tau_{i \text{ пак}}$  –  $i$ -й межпоездной интервал в пакетах (пачках), определяемый в обоих направлениях движения, мин;

$K_{\text{гл}}$  – количество главных путей на расчетном участке, шт.

Минимальное количество поездов в пакете (пачке) для расчета  $\alpha$  принимается равным трем. Относительное значение времени между пакетами (пачками)  $\alpha_{\text{пак}}$  определяется по уравнению:

$$\alpha_{\text{пак}} = \frac{\sum_{i=1}^n \tau_{i \text{ меж. пак}}}{1440 \cdot K_{\text{гл}}}, \quad (3.23)$$

где:  $\tau_{i \text{ меж. пак}}$  –  $i$ -й интервал между пакетами (пачками), определяемый в обоих направлениях движения, мин.

Интервал между пакетами (пачками) в случае наличия одиночных поездов определяется суммированием времени между последним поездом в пакете и одиночными поездами или между одиночными поездами.

Среднее значение количества поездов в пакетах  $n_{\text{ср}}$  определяется по формуле, шт.:

$$n_{\text{ср}} = \frac{\sum_{i=1}^n n_i}{K_{\text{пак}}}, \quad (3.24)$$

где:  $n_i$  – количество поездов в  $i$ -м пакете, шт.;

$K_{\text{пак}}$  – количество пакетов поездов в графике движения, шт.

В случае пропуска одиночных поездов среднее значение количества поездов в пакете (пачке) принимается равным нулю (влияние расписания графика движения на электропотребление отсутствует).

Удельный вес остановок в ГДП  $\beta$  определяется по выражению, о.е.:

$$\beta = \frac{n_o}{N \cdot K_{\text{гл}}}, \quad (3.25)$$

где:  $n_o$  – количество ниток грузовых поездов, содержащих остановки, обусловленные стыковками расписаний по диспетчерским участкам или по стыкам железных дорог, шт.;

$N$  – количество пар поездов в ГДП.

Удельный вес твердых ниток в ГДП  $\gamma$  определяется по формуле, о.е.:

$$\gamma = \frac{n_3}{N \cdot K_{\text{гл}}}, \quad (3.26)$$

где:  $n_3$  – количество энергосберегающих ниток графика (ниток, реализованных по энергооптимальным траекториям), шт.

С целью учета интенсивности следования поездов в ГДП используется коэффициент интенсивности для оценки пакетной и внепакетной зон расписания:

$$k_{\text{и}} = \frac{8}{\tau_{\text{ср. пак}}}, \quad (3.27)$$

где:  $\tau_{\text{ср. пак}}$  – средний межпоездной интервал в пакете (пачке);

$$k_{\text{им}} = \frac{20}{\tau_{\text{ср. меж. пак}}}, \quad (3.28)$$

$\tau_{\text{ср. меж. пак}}$  – средний интервал между пакетами (пачками).

Определение формализуемых параметров, характеризующих формирование электротяговой нагрузки в зависимости от расписания графика движения, позволяют перейти к описанию изменения объема электроэнергии на тягу. Аналитическое представление изменения электропотребления при различном формировании электротяговой нагрузки позволяет перейти к оценке и прогнозированию изменения объема электроэнергии на тягу с учетом технических потерь электроэнергии на участке железной дороги на основе отчетных данных об объеме электроэнергии в базовом периоде.

Оценка изменения объема электроэнергии при изменении параметров расписания движения поездов выполняется на основе базового значения объема электроэнергии на тягу, определяемого по отчетным данным «РЖД». Полученные аналитические зависимости изменения объема электроэнергии на тягу позволяют выполнить оценку и определить диапазоны изменения

параметров расписания, в которых вариация объема электроэнергии минимальна.

### 3.3 Моделирование процесса электропотребления на тягу

Моделирование процессов электропотребления позволяет оценить эффективность мероприятий, направленных на повышение пропускной способности и энергетической эффективности, в число которых входят технические мероприятия по усилению СТЭ, в т.ч. применение СНЭЭ, и мероприятия по разработке прогнозных графиков движения поездов на сутки вперед на электрифицированных участках на основе энергооптимальных траекторий [91].

Масса поезда и межпоездные интервалы оказывают различное влияние на уровень загрузки силового оборудования СТЭ [113] в зависимости от типа профиля пути. В связи с этим влияние параметров графика движения на участках с различными типами профилей пути рассматривается отдельно.

Данные о параметрах СТЭ и характеристиках работы ЭПС приняты из справочных данных [119, 120].

Результаты решения оптимизационной задачи показывают, что для электрифицированного участка железной дороги в условиях применения рекуперативного торможения существует вариант организации ГДП с минимальным расходом электроэнергии на тягу с учетом потерь электроэнергии в СТЭ. На примере решения задачи изменения двух переменных для рассматриваемого участка показано, что минимальное значение расхода электроэнергии достигается при следующих значениях переменных: количество поездов в пакете находится в диапазоне 8 – 10 мин; значения интервала между поездами в пакете находятся в диапазоне 8 – 10 мин; значения интервала между пакетами – 70 – 80 мин. Минимальное значение расхода электроэнергии достигается на некотором допустимом множестве значений переменных, что

позволяет рассматривать множество вариантов организации ГДП с наибольшим уровнем энергетической эффективности.

В общем виде математическая модель для решения задачи отыскания варианта формирования ГДП для заданных размеров движения с минимальным уровнем электропотребления по ТП принимает следующий вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} W = f(\alpha, \beta, \gamma, n_{\text{ср}}, k_{\text{и}}, k_{\text{им}}) \rightarrow \min; \\ \alpha_{\min} < \alpha < \alpha_{\max}, 0 < \beta < \beta_{\max}, 0 < \gamma < \gamma_{\max}; \\ \tau_{1\min \text{ ч(н)}} \leq \tau_{1 \text{ ч(н)}} < \tau_{1\max \text{ ч(н)}}; \tau_{1\max \text{ ч(н)}} = \frac{1440}{N_{\text{ч(н)}}} \\ \tau_{2\min \text{ ч(н)}} < \tau_{2 \text{ ч(н)}} \leq \tau_{2\max \text{ ч(н)}}; \\ (n_{\text{ср ч(н)}} - 1) \cdot \tau_{1 \text{ ч(н)}} \cdot k_{\text{ч(н)}} + (k_{\text{ч(н)}} - 1) \cdot \tau_{2 \text{ ч(н)}} = 1440; \\ 2 \leq n_{\text{ср}} \leq \frac{N}{2}; n_{\min \text{ ч(н)}} \leq n_{\text{ч(н)}} \leq n_{\max \text{ ч(н)}}; \\ k_{\text{и min}} \leq k_{\text{и}} \leq k_{\text{и max}}; \\ k_{\text{им min}} \leq k_{\text{им}} \leq k_{\text{им max}}; \\ U_{\min} \geq U_{\min \text{ доп}}; \\ T_{\max} \leq T_{\max \text{ доп}}; \\ k_{\text{пер}} \leq k_{\text{пер. доп}}. \end{array} \right. \quad (3.29)$$

Где:  $n_{\min \text{ ч(н)}}$  и  $n_{\max \text{ ч(н)}}$  – минимальное и максимальное количество поездов в пакете, шт.;

$N_{\text{ч(н)}}$  – количество поездов в четном или нечетном направлениях, шт.

$\tau_{1\min}$  и  $\tau_{1\max}$  – интервалы, определяемые соответственно по условиям безопасности движения и условиям пропуска поездов для межпоездного интервала между поездами в пакете графика  $\tau_1$ , мин;

$[\tau_{2\min}; \tau_{2\max}]$  – диапазон изменения интервалов между пакетами поездов в четном (ч) и нечетном (н) направлениях, мин;

$k_{\text{ч(н)}}$  – количество пакетов в сутки в четном и нечетном направлениях, шт.;

$U_{\min}$  – минимальное напряжение на токоприемнике электроподвижного состава, В;

$T_{\max}$  – максимальная температура нагрева силового оборудования, проводов и тросов контактной подвески, °С;

$k_{\text{пер}}$  – коэффициент допустимой перегрузки силового оборудования ТП на рассматриваемом участке железной дороги, о.е.

Решение указанной задачи позволяет оценить потенциал снижения электропотребления на тягу от выравнивания графика нагрузки в границах межподстанционных зон.

С целью использования полученных зависимостей изменения объема электроэнергии и потерь электроэнергии для прогнозного или исполненного ГДП в практических расчетах в дальнейшем применяются так называемые универсальные аппроксиматоры, построенные с помощью регрессионных и нейросетевых моделей.

В качестве универсальных аппроксиматоров для решения указанной задачи наиболее подходящими являются регрессионные модели [117, 118, 121] и модели, построенные на основе искусственного интеллекта, среди которых следует отметить модели с многослойными персептронами, радиально-базисными функциями, машины опорных векторов и нечеткие нейронные сети [123 – 127]. Указанные модели хорошо зарекомендовали себя при описании и прогнозировании процессов электропотребления в системе тягового и нетягового электроснабжения железнодорожного транспорта [128 – 130].

Технические потери электроэнергии в базовом периоде определяются по формуле:

$$\Delta W^{\text{баз}} = W_{\text{участок}}^{\text{баз}} - W_{\text{ЭПС тяга}}^{\text{баз}} - W_{\text{ЭЧЭ нетяг}}^{\text{баз}}. \quad (3.30)$$

При проведении имитационного моделирования величина отбора электроэнергии на нетяговые нужды принимается равной нулю.

Для описания результатов имитационного моделирования в условиях изменения параметров расписания ГДП рассмотрим регрессионную линейную модель, описывающую изменение суммарного расхода электроэнергии на тягу  $W$  с учетом технических потерь электроэнергии. Определение коэффициентов регрессии для участка постоянного тока с I типом профиля пути позволяет получить следующее выражение для определения суммарного расхода электроэнергии  $W$  (в относительных единицах, о.е.):

$$W = -0,94 \cdot \alpha + 1,87 \cdot \alpha_{\text{пак}} + 0,03 \cdot n_{\text{ср}} + 3,74 \cdot \beta + 5,81 \cdot \gamma + 99,3, \quad (3.31)$$

где:  $\alpha$  и  $\alpha_{\text{пак}}$  – относительное время следования поездов в пакетах и вне пакетов соответственно, о.е.;

$n_{\text{ср}}$  – среднее количество поездов в пакете, шт.;

$\beta$  – удельное количество остановок, о.е.;

$\gamma$  – удельное количество твердых ниток в грузовом движении, о.е.

Для целевой функции (3.31) скорректированный коэффициент детерминации принимает значение 0,78. Проверка по критерию Фишера с целью оценки значимости полученной регрессионной модели дает результат  $F_{\text{ф}} = 118,9$ , что выше табличного значения для  $F$ -критерия Фишера при уровне значимости 0,05 (пяти переменным соответствует пять степеней свободы, количество наблюдений составляет 172; для рассматриваемого случае количество степеней свободы составляет 166, табличное значение  $F_{\text{табл}}$  составит 2,27), поэтому можно сделать вывод о том, что полученная зависимость будет значима и для генеральной совокупности.

Коэффициенты корреляции  $r_{ij}$  для полученных пяти параметров расписания графика движения представлены в нормированной корреляционной матрице (таблица 3.1).

Коэффициенты корреляции между параметрами в данном случае не превышают 0,6, что свидетельствует об отсутствии мультиколлинеарности рассмотренных факторов [117, 118].

Таблица 3.1 – Нормированная корреляционная матрица

Параметр	$\alpha$	$\alpha_{\text{пак}}$	$n_{\text{ср}}$	$\beta$	$\gamma$	$W$
$\alpha$	1,000	-0,202	0,505	-0,118	-0,118	-0,265
$\alpha_{\text{пак}}$	–	1,000	0,041	0,314	0,314	0,649
$n_{\text{ср}}$	–	–	1,000	0,066	0,066	0,100
$\beta$	–	–	–	1,000	-0,166	0,606
$\gamma$	–	–	–	–	1,000	0,459
$W$	–	–	–	–	–	1,000

С целью оценки статистической значимости факторов модели используем метод пошагового включения и исключения переменных модели [117]. В методе пошагового исключения реализуется попытка исследовать только наилучшие регрессионные уравнения, содержащие определенное число переменных. Метод пошагового исключения начинается с наиболее полного уравнения, включающего в себя все переменные, и заключается в последовательном уменьшении числа переменных до момента, когда принимается решение об использовании уравнения с оставшимися членами. Метод включения представляет собой попытку поиска уравнения в обратном направлении – путем последовательного включения переменных до тех пор, пока уравнение не станет удовлетворительным.

Метод исключения реализует следующий порядок. Определяется регрессионное уравнение, включающее в себя все переменные. Рассчитывается величина частного критерия Фишера ( $F$ -критерия) для каждой предикторной переменной. По наименьшей величине  $F$ -критерия путем исключения предикторных переменных и сравнения с критическим значением  $F_0$ -критерия определяется необходимое уравнение.

В методе пошагового включения порядок определяется с помощью частного коэффициента корреляции, позволяющего оценить влияние переменной, включенной в уравнение. Порядок расчета по рассматриваемому методу состоит в определении наибольшего значения частного коэффициента корреляции. На следующем шаге формируется уравнение с соответствующей переменной. Далее проверяется, является ли данная переменная значимой. Если переменная является значимой, выполняется поиск следующей переменной с

наибольшей корреляцией до тех пор, пока новая переменная перестает быть значимой. Полное уравнение проверяется на значимость и увеличение значения коэффициента детерминации  $R^2$ , исследуются частные  $F$ -критерии для всех переменных уравнения. Наименьшая величина  $F$ -критерия сравнивается процентной точкой соответствующего  $F$ -распределения. Указанная проверка значимой переменной проводится на каждом шаге поиска. По критерию Фишера и влиянию предикторной переменной на  $R^2$  определяется необходимость включения переменной в итоговое уравнение.

Результаты расчетов по методу включения показывают значимость всех рассматриваемых факторов (таблица 3.2).

Таблица 3.2 – Результаты определения уровня значимости факторов по методу включения

Параметр	Шаг	$R$	$R^2_{\text{скорр}}$	$F$ -критерий	Уровень значимости
$\alpha_{\text{пак}}$	1	0,649	0,421	123,826	0,000
$\beta$	2	0,775	0,601	75,771	0,000
$\gamma$	3	0,877	0,770	123,521	0,000
$\alpha$	4	0,881	0,776	4,794	0,030
$n_{\text{ср}}$	5	0,884	0,782	4,207	0,042

Значение  $F$ -критерия для факторов  $\alpha$  и  $n_{\text{ср}}$  ниже по сравнению со значениями других факторов, что показывает их меньшее влияние на объем электропотребления на тягу для рассмотренного участка постоянного тока с I типом профиля. Аналогичные результаты оценки уровня значимости для рассматриваемых факторов показывает использование метода исключения переменных (таблица 3.3). Все переменные регрессионной модели являются статистически значимыми для уровня значимости 0,05.

Таблица 3.3 – Результаты определения значимости факторов по методу исключения

Параметр	Шаг	$R$	$R^2_{\text{скорр}}$	$F$ -критерий	Уровень значимости
3 $n_{\text{ср}}$	1	0,881	0,776	4,207219	0,041824
1 $\alpha$	2	0,877	0,770	4,793968	0,029947

При повышении уровня значимости до уровня 0,02 факторы  $n_{\text{ср}}$  и  $\alpha$  могут быть исключены из модели. Следует отметить, что полученные результаты справедливы для участков постоянного тока с I типом профиля пути. Для других условий (СТЭ и тип профиля пути) значимость рассмотренных факторов проверяется отдельно.

Сравнение коэффициентов детерминации для моделей, полученных для других участков постоянного тока с I типом профиля показывает достаточно большой разброс остатков для трех рассмотренных вариантов тяговых расчетов при исключении параметров расписания движения поездов. Статистически значимыми для всех трех участков являются параметры  $\alpha_{\text{пак}}$ ,  $\beta$  и  $\gamma$ .

Проверка значимости факторов выполняется по критерию Стьюдента. Табличное  $t$ -значение критерия Стьюдента составляет для исходных данных 1,974. Как видно из данных таблицы 3.4, для всех переменных значения критерия Стьюдента выше табличных, поэтому все переменные предложенной регрессионной модели признаются статистически значимыми.

В общем виде изменение потерь электроэнергии в СТЭ в зависимости от изменения межпоездного интервала в пакете поездов имеет нелинейный вид. При увеличении межпоездного интервала в пакете поездов наблюдается нелинейное изменение потерь электроэнергии в СТЭ (рисунок 3.6).

Таблица 3.4 – Результаты расчета  $t$ -значения критерия Стьюдента

Параметр	Среднее	Среднеквадратичное отклонение	Стандартная ошибка	$t$ -значение
$\alpha$	0,304	0,096	0,0073	41,724
$\alpha_{\text{пак}}$	0,637	0,113	0,0086	74,125
$n_{\text{ср}}$	5,218	1,754	0,1338	39,009
$\beta$	0,0419	0,103	0,0078	5,335
$\gamma$	0,021	0,051	0,0039	5,335

Для полученной выше линейной регрессионной модели (3.31) скорректированный коэффициент детерминации равен 0,78. Качество описания полученных результатов можно повысить путем перехода к кусочно-линейным или нелинейным регрессионным моделям. Например, применение кусочно-линейной регрессионной модели с использованием метода поиска

Розенброка [131] позволяет получить значение скорректированного коэффициента детерминации, равного 0,93, что значительно выше указанного ранее значения для линейной модели.

Кусочно-линейная модель для рассматриваемого случая имеет следующий вид:

$$W = \begin{cases} \text{при } W < 100,7: 0,69 \cdot \alpha + 0,57 \cdot \alpha_{\text{пак}} + 0,05 \cdot n_{\text{ср}} + \\ + 0,1 \cdot \beta + 0,1 \cdot \gamma + 99,8 \\ \text{при } W \geq 100,7: 33,3 \cdot \alpha + 41,6 \cdot \alpha_{\text{пак}} + 0,05 \cdot n_{\text{ср}} + \\ + 1,52 \cdot \beta + 1,36 \cdot \gamma + 61,7, \end{cases} \quad (3.32)$$

где: 100,7 – точка разрыва кусочно-линейной регрессионной модели.

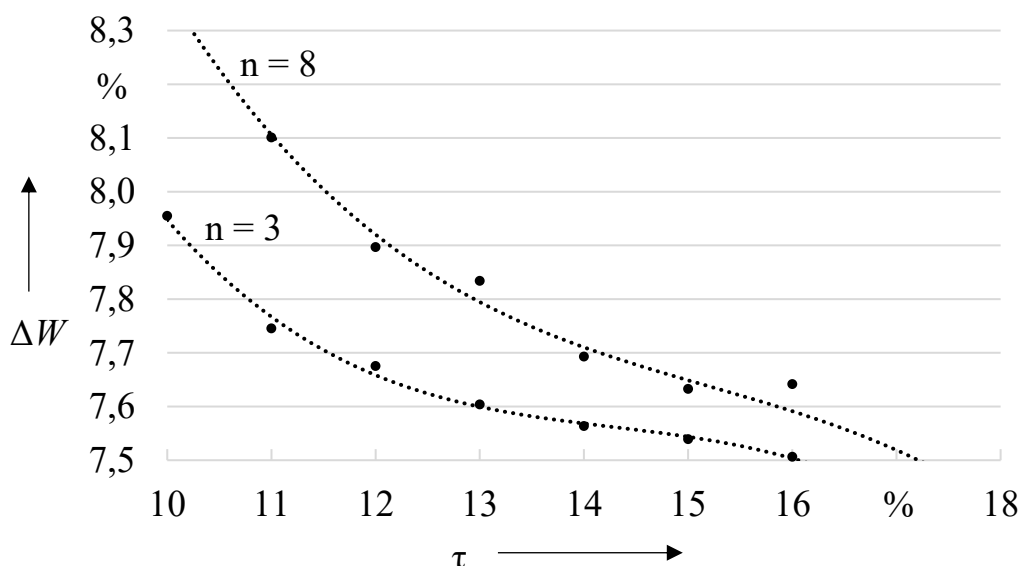


Рисунок 3.6 – Изменение потерь электроэнергии в зависимости от межпоездного интервала

Анализ объема электропотребления, определенного по регрессионному уравнению (3.32), показывает, что большая часть значений относительного времени следования в пакетах для значений выше точки раздела ( $>100,7$  о.е.) находится на уровне среднего значения 0,3 (2-я часть), в то время как для значений до точки раздела ( $\leq 100,7$  о.е.) значения относительного времени следования в пакетах принимают значения (1-я часть) из всего диапазона допустимых значений. Большая часть значений относительного времени вне

пакетов для значений выше точки раздела находится на уровне среднего значения 0,7 (2-я часть), в то время как для значений до точки раздела значения относительного времени вне пакетов принимают значения (1-я часть) из всего диапазона допустимых значений.

Результаты определения расхода электроэнергии на участках постоянного тока с I типом профиля пути по модели (3.32) приведены на рисунке 3.7.

Нелинейная регрессионная модель позволяет получить аналогичные результаты при описании изменения расхода электроэнергии на тягу.

Для указанной модели скорректированный коэффициент детерминации ниже, чем для кусочно-линейной функции (3.32), но выше, чем у линейной функции (3.31). Модель, полученная на основе приведенной ниже экспоненциальной функции, позволяет описать полученные результаты со значением скорректированного коэффициента детерминации, равного 0,79:

$$W = 100,02 + e^{(-7.90 - 3.09 \cdot \alpha + 10.56 \cdot \alpha_{\text{пак}} + 0.16 \cdot n_{\text{ср}} + 2.41 \cdot \beta + 3.61 \cdot \gamma)}. \quad (3.33)$$

С целью проверки неоднородности выборки для кусочно-линейной регрессионной модели, полученной в ходе имитационного моделирования, необходимо выполнить оценку с помощью теста Чоу, результаты которого позволяют ответить на вопрос о том, принадлежат ли две выборки одной генеральной совокупности, и принять решение об обоснованности применения двух уравнений регрессии [122, 236].

Тест Чоу проводится для выборок одного набора переменных. В нашем случае особенностью выборок является то, что выборки получены для различных условий, в которых отдельные переменные существенно не изменяются для ряда значений или принимают нулевые значения (варианты расписаний графика с отсутствием остановок и твердых ниток в графике). Если на выбранном уровне значимости наблюдаемое значение  $F$ -статистики больше критической точки, то нулевая гипотеза отвергается, что говорит о целесообразности использования различных уравнений регрессии для двух наборов данных.

В тесте Чоу значение  $F$ -статистики определяется по выражению:

$$F = \frac{(RSS - RSS_1 - RSS_2) \cdot (n_1 + n_2 - 2 \cdot k)}{(RSS_1 + RSS_2) \cdot k}, \quad (3.34)$$

где:  $RSS, RSS_{1,2}$  – сумма квадратов разностей всей выборки, первой и второй частей выборки соответственно;

$n_{1,2}$  – количество элементов в первой и второй частях выборки соответственно;

$k$  – количество переменных в модели.

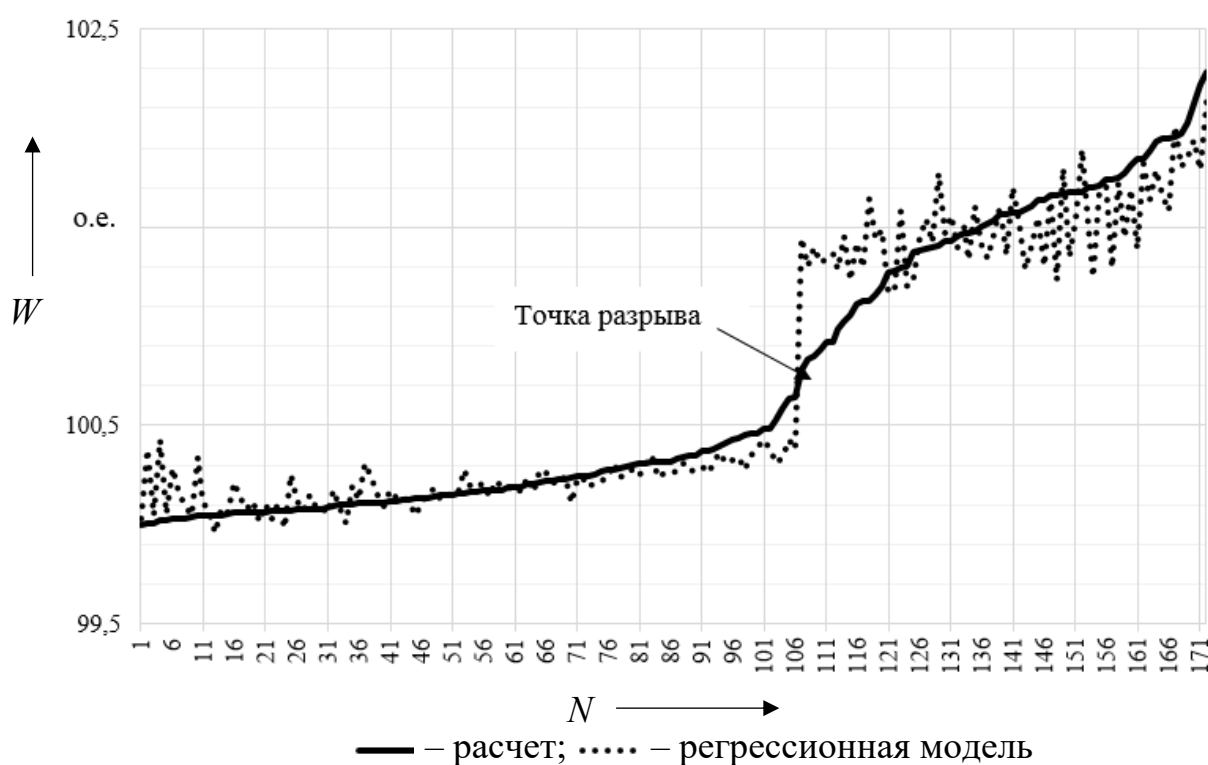


Рисунок 3.7 – Изменение значений расхода электроэнергии, полученных по регрессионной модели

Значение  $F$ -статистики для регрессионной модели с кусочно-линейной функцией (3.32) равно  $8,3 \cdot 10^{-15}$ , что ниже критического значения  $F$ -статистики –  $F(4, 164) = 2,435$ . Это означает, что рассматриваемую выборку данных можно считать единой и не разбивать ее на две. Таким образом, для описания полученных результатов не требуется получения двух уравнений и достаточно построение модели с одной целевой функцией, аналогичной (3.31) или (3.33).

Одним из эффективных инструментов для описания процесса электропотребления в СТЭ являются нейросетевые модели [129, 130], к которым относятся нейронные сети с сетевой архитектурой многослойного персептрона (MLP) [123]. Структура нейросетевой модели для решаемой задачи представляет собой сеть с нейронами на входном слое и одним нейроном на выходном слое (рисунок 3.8), количество скрытых слоев и нейронов на них определяется с помощью пакета программ Statistica [132, 133] по критерию минимальной ошибки. Обучение модели выполняется по методу обратной ошибки. Для обучения выбрано 80 % выборки результатов моделирования, для тестирования нейромодели – 20 %.

В качестве передаточных функций на скрытых и выходном слоях рассматриваются экспоненциальная, сигмоидальная и тангенциальная гиперболическая функции. Ошибки нейромодели минимизируются по алгоритму BFGS (Бройдена – Флетчера – Гольдфарба – Шанно). Скорость обучения для рассмотренных моделей составила от 30 до 60 итераций. Высокую точность позволяет достичь нейронная сеть с количеством скрытых слоев выше восьми. Например, для модели MLP 5-10-1 (рисунок 3.9) коэффициент детерминации составляет 0,89.

Анализ чувствительности коэффициентов, определяемых по выражению (3.35), для рассмотренной модели MLP подтверждает наибольшую статистическую значимость переменных  $\alpha_{\text{пак}}$ ,  $\beta$  и  $\gamma$ , коэффициенты чувствительности для которых равны 3,1; 3,7 и 6,9 соответственно, и меньшую значимость для переменных  $\alpha$  и  $n_{\text{ср}}$  – коэффициенты чувствительности равны 1,3 и 1,5 соответственно:

$$c_i = \frac{\partial W}{\partial x_i}, \quad (3.35)$$

где:  $x_i$  – фактор, учитываемый при оценке изменения объема электропотребления на тягу  $W$ .

Аналогичные результаты получены при оценке статистической значимости по методу включения-исключения переменных. Качество рассмотренной нейромодели оценивается показателем процентной погрешности:

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|W_{\phi i} - W_{\text{мод}i}|}{W_{\phi i}} \cdot 100 \%, \quad (3.36)$$

где:  $W_{\phi i}$ ,  $W_{\text{мод}i}$  – объем электропотребления фактический и полученный по модели соответственно;

$n$  – объем выборки.

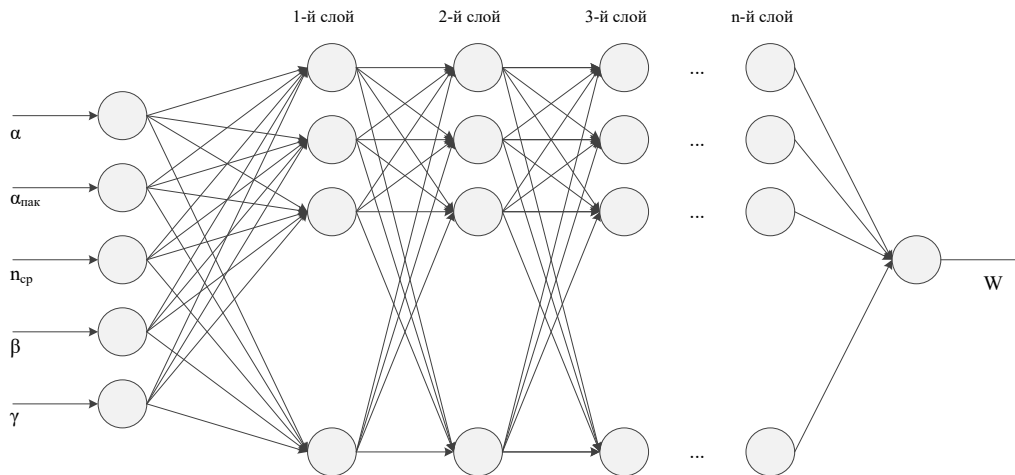


Рисунок 3.8 – Структура нейросетевой модели для оценки изменения электропотребления на тягу на участке в зависимости от параметров ГДП

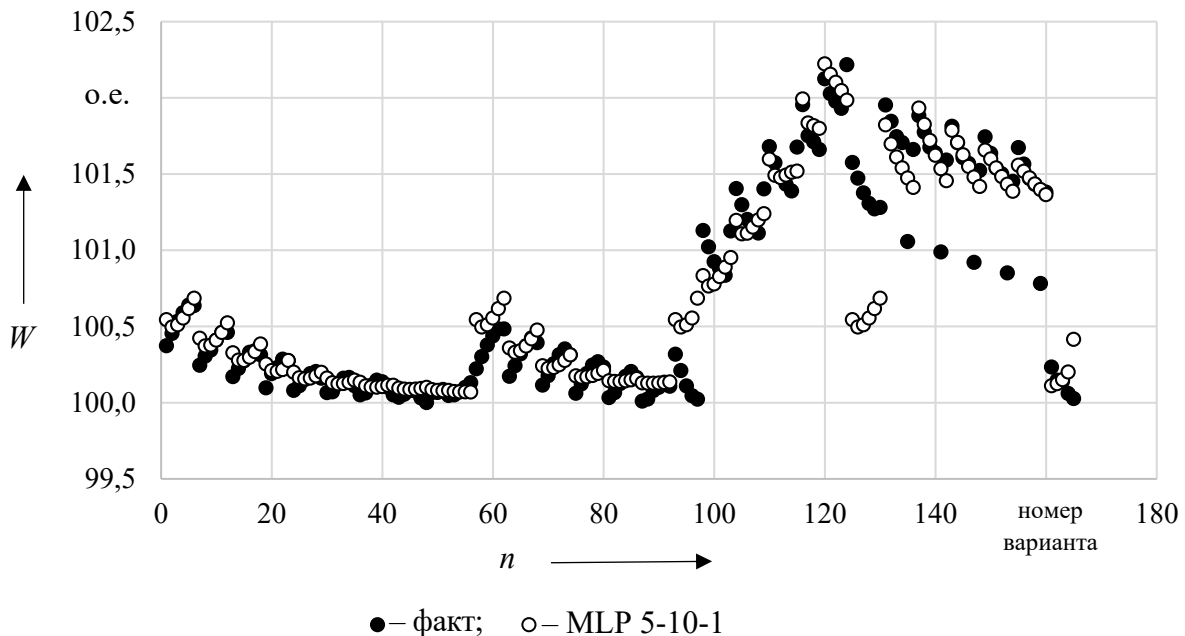


Рисунок 3.9 – Результат определения значений функции расхода электроэнергии с помощью модели нейронной сети

Процентная погрешность  $MAPE$ , определяемая по выражению (3.36), для рассмотренной модели MLP 5-10-1 составляет 0,11 %.

Сравнение результатов применения регрессионных моделей свидетельствует о наилучшем приближении характера изменения объема электропотребления уравнениями кусочно-линейной регрессии и нейронной сети. Коэффициент детерминации для линейных и нелинейных моделей ниже, чем для рассмотренных моделей кусочно-линейной регрессии и нейромоделей.

### 3.4 Анализ влияния формирования электротяговой нагрузки на энергетическую эффективность

Вследствие особенностей учета электроэнергии на тягу технологические потери в СТЭ постоянного и переменного тока определяются по-разному. Если в СТЭ переменного тока потери в понижающих трансформаторах Т не учитываются (приборы учета РИК расположены со стороны низшего напряжения силового трансформатора), то в СТЭ постоянного тока потери преобразовательных трансформаторов ПТ учитываются (см. рисунок 2.2).

Рассмотрим нелинейное уравнение множественной регрессии, описывающее изменение потерь электроэнергии в СТЭ в зависимости от изменения рассмотренных выше параметров графика движения поездов в базовом периоде:

$$\begin{aligned} \delta_{\text{участок}}^{\text{баз}} = & a_{11} \cdot k_{\text{и}} + a_{12} \cdot k_{\text{и мпак}} + a_{13} \cdot \frac{1}{1 + e^{-(\alpha-0.5)}} + a_{14} \cdot n_{\text{ср}} + a_{15} \cdot \beta + a_{16} \cdot \gamma + \\ & + a_{21} \cdot k_{\text{и}}^2 + a_{22} \cdot k_{\text{и мпак}}^2 + a_{23} \cdot \frac{1}{1 + e^{-2(-\alpha+0.5)}} + a_{24} \cdot n_{\text{ср}}^2 + a_{25} \cdot \beta^2 + a_{26} \cdot \gamma^2 + b. \end{aligned} \quad (3.37)$$

Для участков постоянного тока с I типом профиля функция изменения потерь электроэнергии (3.37) для полученных результатов имитационного моделирования дает следующие результаты: скорректированный коэффициент множественной детерминации  $R^2$  равен 0,970, стандартное отклонение – 0,031. Для участков переменного тока с I типом профиля коэффициент множественной

детерминации  $R^2$  равен 0,963, стандартное отклонение – 0,039. Результаты расчета коэффициентов для функции (3.37) представлены в таблице 3.5.

Коэффициент детерминации определяется по выражению:

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n \left( \hat{y}_i - \bar{y} \right)^2}{\sum_{i=1}^n \left( y_i - \bar{y} \right)^2}, \quad (3.38)$$

где:  $\hat{y}_i, \bar{y}$ ,  $y_i$  – расчетное, среднее наблюдаемое и фактическое  $i$ -е значения исследуемой функции.

Таблица 3.5 – Значения коэффициентов модели изменения потерь электроэнергии для участков с I типом профиля пути

Коэффициенты модели	Вид функции	Постоянный ток	Переменный ток
$b$	-	5,19632	-3,51772
$a_{11}$	Линейная	-0,54978	2,42973
$a_{12}$	Линейная	-2,59864	-2,07698
$a_{13}$	Логистическая	4,07595	8,18615
$a_{14}$	Линейная	-0,00574	0,01006
$a_{15}$	Линейная	0,48668	1,05558
$a_{16}$	Линейная	0,63720	1,14452
$a_{21}$	Квадратичная	1,67178	-0,04654
$a_{22}$	Квадратичная	3,27546	2,72258
$a_{23}$	Логистическая	0,96959	0,94883
$a_{24}$	Квадратичная	-0,00105	-0,00274
$a_{25}$	Квадратичная	0,00012	-0,55082
$a_{26}$	Квадратичная	-0,06212	-1,08057

Введение в модель коэффициентов интенсивности, определяемых по выражениям (3.27) и (3.28), позволяет улучшить получаемые результаты. В случае рассмотрения линейных регрессионных моделей с пятью параметрами (без коэффициентов интенсивности) значение скорректированного коэффициента множественной детерминации снижается до уровня 0,80. Учет данного параметра необходим для повышения точности при расчете уровня потерь электроэнергии с помощью функции (3.37).

Для описания результатов имитационного моделирования получены модели нейронной сети с многослойными персептронами – MLP-модели. Применение нейронных моделей позволяет достичь более высоких результатов при описании результатов моделирования [129, 130].

Ниже приведены результаты для описания изменения потерь электроэнергии для участков переменного тока с I типом профиля пути, получаемые с помощью нейромодели MLP 12-11-1, использующей на скрытых слоях функции экспоненциального вида (рисунок 3.10).

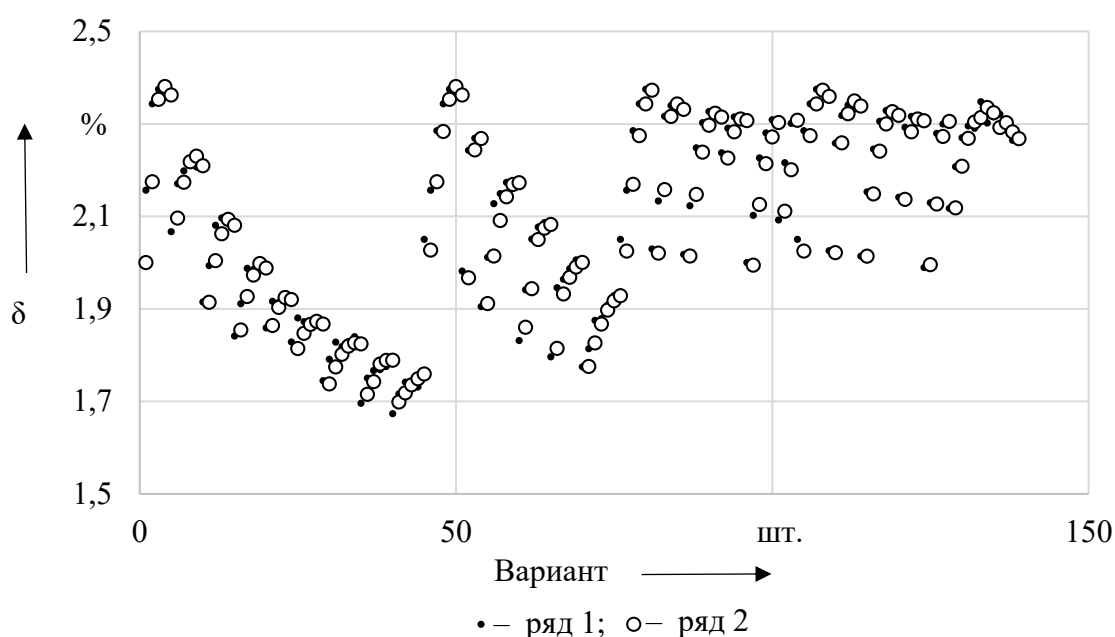


Рисунок 3.10 – График изменения потерь электроэнергии в системе тягового электроснабжения переменного тока: ряд 1 – результаты имитационного моделирования (а); ряд 2 – результаты, полученные по модели MLP 12-11-1 (б)

Рассмотрение различных MLP-моделей показывает незначительное расхождение результатов с исходными данными при применении на скрытых слоях функций различного вида (экспоненциальных, тангенциальных) и применении на выходном слое экспоненциальной, тангенциальной, сигмоидальной и других функций. В качестве алгоритма обучения использован итерационный метод численной оптимизации BFGS.

Аналогичные результаты получены при оценке статистической значимости по методу включения-исключения переменных. Качество

рассмотренной нейромодели оценивается показателем процентной погрешности (3.36).

Процентная погрешность MAPE, определяемая по выражению (3.36), для модели MLP 12-11-1, описывающей изменение потерь электроэнергии на участках переменного тока с I типом профиля пути, составляет 0,49 %.

Наименьшая ошибка в данном случае наблюдается у модели MLP 12-11-1, где используются экспоненциальные функции на скрытых слоях и выходном слое. В соответствии с полученными данными точность расчетов по нейромодели составит в среднем 99,4 %. Скорректированный множественный коэффициент детерминации для моделей показывает достаточно высокие значения – для модели MLP 12-11-1 он составляет 0,995, а для MLP 12-9-1 – 0,991.

Для постоянного тока с I типом профиля пути получены аналогичные результаты построения нейромоделей. В соответствии с полученными данными точность расчетов по нейромодели составит в среднем 99,8 %. Скорректированный множественный коэффициент детерминации для рассмотренных моделей составит для MLP 12-13-1 с логистическими функциями 0,984, для MLP 12-13-1 с тангенциальными функциями на скрытых слоях и логистической функцией на выходном слое – 0,984.

Характер изменения потерь электроэнергии в СТЭ для участков со II типом профиля в целом аналогичен характеру изменения потерь на участках с I типом профиля. Характер изменения потерь на участках переменного тока с I типом профиля аналогичен изменению потерь на участках со II типом профиля. Различие наблюдается в уровне потерь, который в среднем на 1 % выше во втором случае.

Результаты по определению коэффициентов модели (3.37) для описания изменения потерь электроэнергии на участках постоянного и переменного тока представлены в таблице 3.6. Для участков со II типом профиля модель дает следующие результаты: для постоянного тока – скорректированный коэффициент множественной детерминации  $R^2$  равен 0,910, стандартное

отклонение – 0,093, для переменного тока  $R^2$  указанный коэффициент равен 0,960, стандартное отклонение – 0,058.

Таблица 3.6 – Значения коэффициентов модели потерь электроэнергии на участках постоянного и переменного тока со II типом профиля пути

Коэффициенты модели	Вид функции	Постоянный ток	Переменный ток
$b$	–	–0,17450	–4,59391
$a_{11}$	Линейная	12,01582	5,52496
$a_{12}$	Линейная	–2,62542	–5,70917
$a_{13}$	Логистическая	17,72140	11,61969
$a_{14}$	Линейная	–0,04517	–0,04618
$a_{15}$	Линейная	0,41624	–0,40904
$a_{16}$	Линейная	0,88212	–0,70994
$a_{21}$	Квадратичная	–5,62272	–1,95791
$a_{22}$	Квадратичная	2,83782	7,14613
$a_{23}$	Логистическая	0,08417	1,35702
$a_{24}$	Квадратичная	–0,00344	–0,00158
$a_{25}$	Квадратичная	0,51650	6,72758
$a_{26}$	Квадратичная	1,89100	6,51460

В соответствии с полученными данными точность расчетов по MLP-модели составила в среднем 99,6 %. Скорректированный множественный коэффициент детерминации для рассмотренных моделей составил для MLP 12-10-1 с экспоненциальными функциями на скрытых слоях и линейной функцией на выходе 0,868, для MLP 12-14-1 с логистическими функциями на скрытых слоях и тангенциальной функцией на выходном слое – 0,956. Для участков переменного тока средняя точность расчетов по нейромоделям MLP составила 99,2 %. Скорректированный множественный коэффициент детерминации для модели MLP 12-7-1 составляет 0,980, для модели MLP 12-10-1 – 0,999. Точность результатов по рассмотренным моделям для участков постоянного и переменного тока в среднем составляет 99,6 и 99,2 % соответственно.

Для описания изменения расхода электроэнергии за основу принимается модель (3.37). Результаты определения коэффициентов регрессионных моделей для участков постоянного и переменного тока для описания изменения расхода электроэнергии приведены в таблице 3.7.

Для участков со II типом профиля модель по определению расхода электроэнергии на тягу дает следующие результаты: для постоянного тока –

скорректированный коэффициент множественной детерминации  $R^2$  равен 0,976, стандартное отклонение – 0,105, для переменного тока  $R^2$  равен 0,916, стандартное отклонение – 0,397.

Таблица 3.7 – Значения коэффициентов модели электропотребления для участков постоянного и переменного тока со II типом профиля пути

Коэффициенты модели	Вид функции	Постоянный ток	Переменный ток
$b$	–	118,587	113,687
$a_{11}$	Линейная	–7,131	–2,958
$a_{12}$	Линейная	10,046	–19,067
$a_{13}$	Логистическая	–27,294	46,735
$a_{14}$	Линейная	0,236	2,062
$a_{15}$	Линейная	0,840	10,425
$a_{16}$	Линейная	–5,068	4,380
$a_{21}$	Квадратичная	–0,209	–0,699
$a_{22}$	Квадратичная	–12,049	18,605
$a_{23}$	Логистическая	3,207	–9,979
$a_{24}$	Степенная	–0,307	–14,146
$a_{25}$	Квадратичная	–1,551	–38,988
$a_{26}$	Квадратичная	–5,618	–38,617

Полученные для описания изменения расхода электроэнергии MLP-модели позволяют получить высокую степень приближения – процентная погрешность здесь не превышает значения 0,2 % для всех рассмотренных случаев. Средняя точность расчетов для участков постоянного и переменного тока составляет 99,9 и 99,8 % соответственно.

Включение в модель дополнительных параметров ГДП и использования нелинейной модели регрессии и MLP-моделей позволяет существенно повысить точность расчетов. Скорректированный коэффициент множественной детерминации увеличивается со значения 0,8 до значения 0,9 и выше, а относительная процентная погрешность увеличивается до 99 % и выше. Повышение точности обусловлено введением в модель логистической и степенной функций, более точно описывающих характер изменения потерь и расхода электроэнергии в зависимости от изменения параметров графика движения поездов. Полученные результаты предназначены для проведения оценки прогнозного ГДП на участках постоянного и переменного тока с I и II типами профиля пути по критерию энергетической эффективности.

Участки с горным профилем пути, к которым относятся профили III и IV типов, требуют отдельного рассмотрения, поскольку на указанных участках на электропотребление существенное влияние начинает оказывать рекуперативное торможение.

Сравнение значений и изменения приведенных объемов электропотребления для рассмотренных участков с горным типом профиля показывает идентичный характер изменения величин в зависимости от параметров графика движения. Так, при увеличении относительного времени следования поездов в пакетах  $\alpha$  при заданных условиях моделирования наблюдается рост объема электропотребления, что проиллюстрировано на рисунке 3.11.

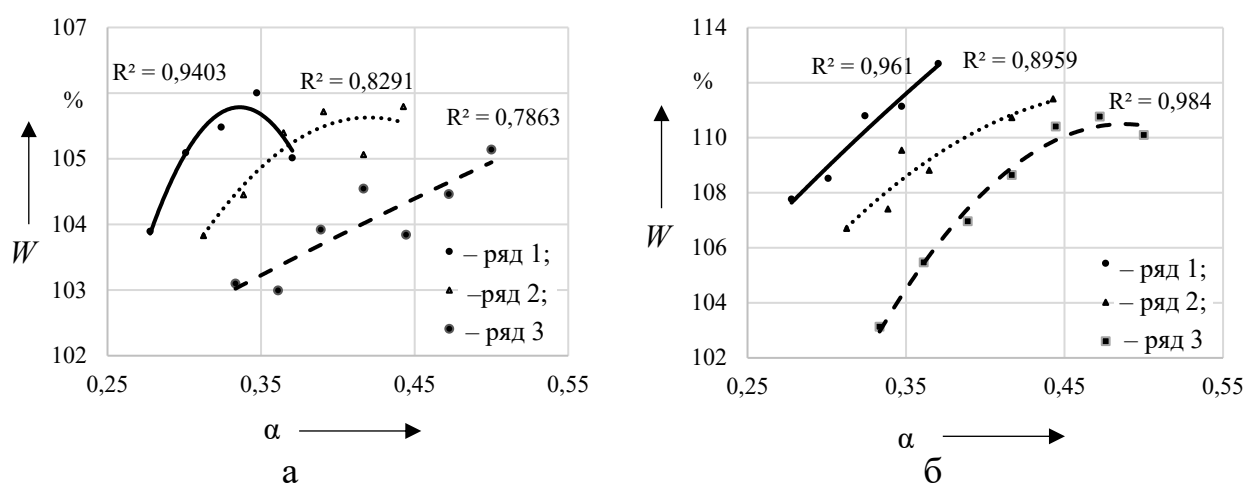


Рисунок 3.11 – График изменения объема электроэнергии на тягу для участков постоянного тока: III тип профиля (а); IV тип профиля (б)

Аппроксимирующие функции, описывающие изменение объема электропотребления при изменении  $\alpha$ , иллюстрируют изменение электропотребления с высоким коэффициентом детерминации  $R^2$  для всех трех участков (ряд 1 – ряд 3) при использовании полиномов второго порядка. Рост объема электроэнергии на тягу при увеличении значения  $\alpha$  связан с ухудшением условий применения рекуперации на участке вследствие увеличения расстояния между поездами в пакетах. Различное изменение уровня объема электроэнергии в данном случае объясняется уникальностью профиля пути каждого участка сети железных дорог.

Наблюдаемый диапазон изменения объема электроэнергии для рассмотренных участков постоянного тока с III типом профиля пути меньше диапазона для участков с IV типом профиля: если для участков с III типом профиля диапазон изменения составляет 103 – 106 %, то для участков с IV типом профиля – 103 – 113 %. В этом случае при изменении  $\alpha$  в заданном диапазоне для каждого рассмотренного  $i$ -го участка с IV типом профиля пути значение вариации выше, чем для участков с III типом профиля пути:

$$\forall_{\alpha} W_{i\text{IV}}(\alpha) > \forall_{\alpha} W_{i\text{III}}(\alpha), \quad (3.39)$$

где:  $W(\alpha)$  – зависимость объема электроэнергии от относительного значения времени следования поездов в пакетах  $\alpha$ .

Увеличение диапазона изменения электропотребления с переходом от равнинных профилей пути к горным наблюдается и на участках переменного тока. При рассмотрении изменения  $\alpha$  вариация объема электроэнергии на участках с IV типом профиля пути выше, чем на участках с III типом профиля, что показано на рисунке 3.12.

Рассмотрение зависимости изменения уровня потерь электроэнергии на участках постоянного и переменного тока от параметров расписания движения позволяет получить аналогичные зависимости для объема электропотребления на тягу для постоянного и переменного тока (рисунки 3.13, 3.14). В частности, при увеличении  $\alpha$  наблюдается падение потерь электроэнергии на участках с III и IV типами профиля пути как переменного, так и постоянного тока. Вариация потерь на участках постоянного и переменного тока с IV типом профиля пути отмечается выше, чем на участках с III типом профиля. Характер изменения потерь электроэнергии позволяет выбрать аппроксимирующие функции с высоким значением коэффициента детерминации  $R^2$ , превышающим 0,9 за исключением зависимости изменения небаланса для участков постоянного тока с III типом профиля.

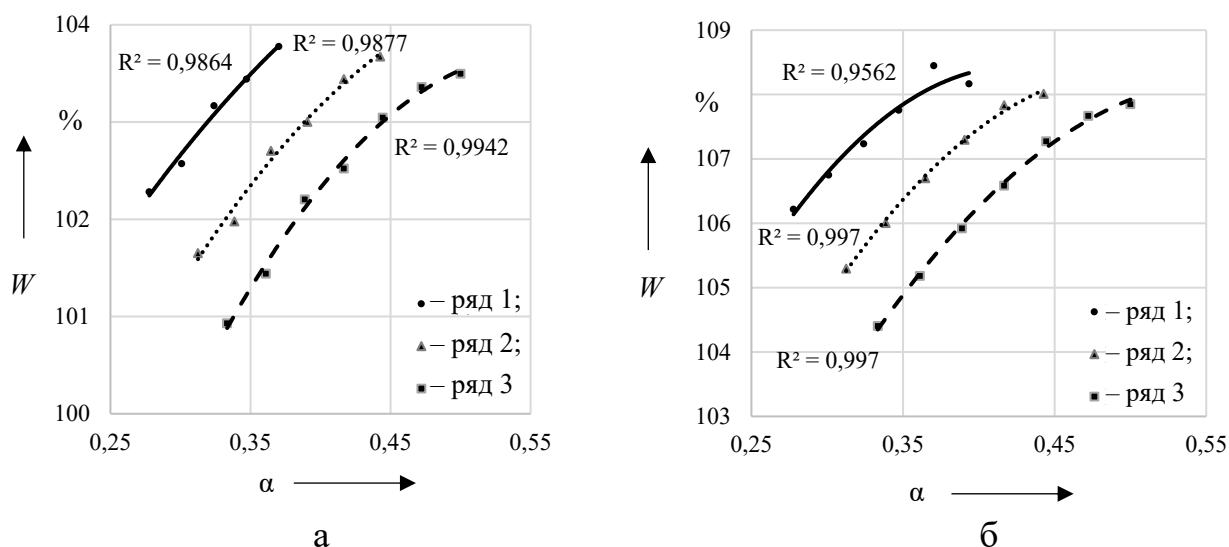


Рисунок 3.12 – 1 график изменения объема электроэнергии на тягу для участков переменного тока: III тип профиля (а); IV тип профиля (б)

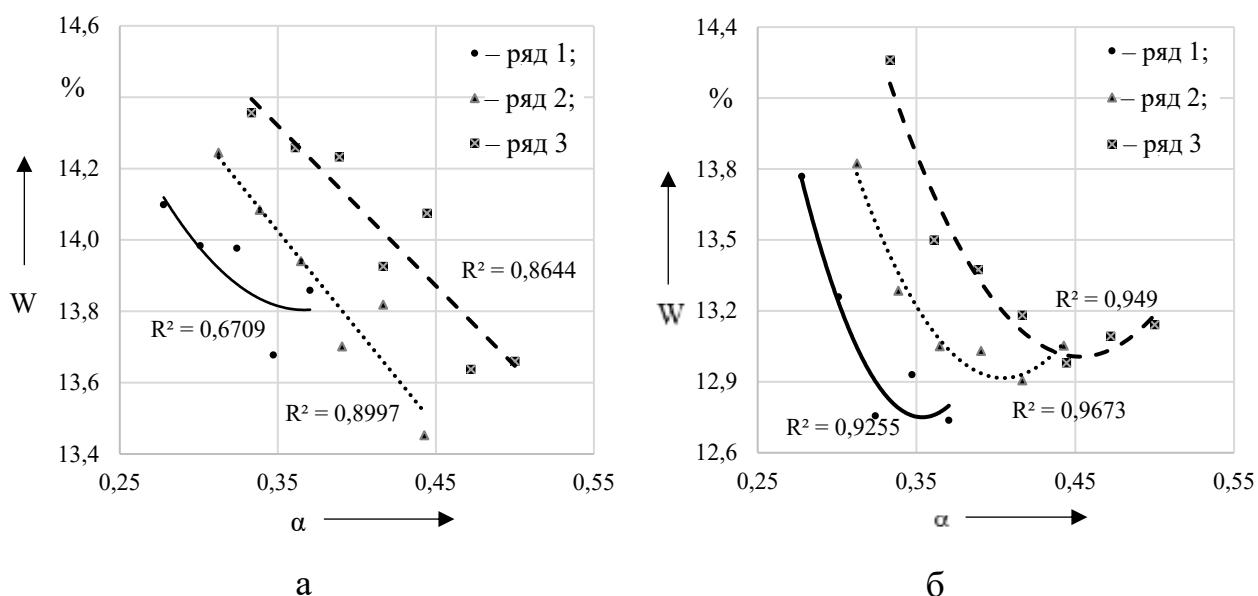


Рисунок 3.13 – График изменения небаланса для участков постоянного тока: III тип профиля (а); IV тип профиля (б)

Полученные зависимости изменения объема электропотребления на тягу и небаланса для участков постоянного и переменного тока позволяют перейти к формированию соответствующих выражений исходя из усредненных значений для рассмотренных участков [117, 118].

Для данных имитационного моделирования значения коэффициентов регрессионной модели для участков постоянного и переменного тока с III и IV типами профиля пути приведены в таблице 3.8.

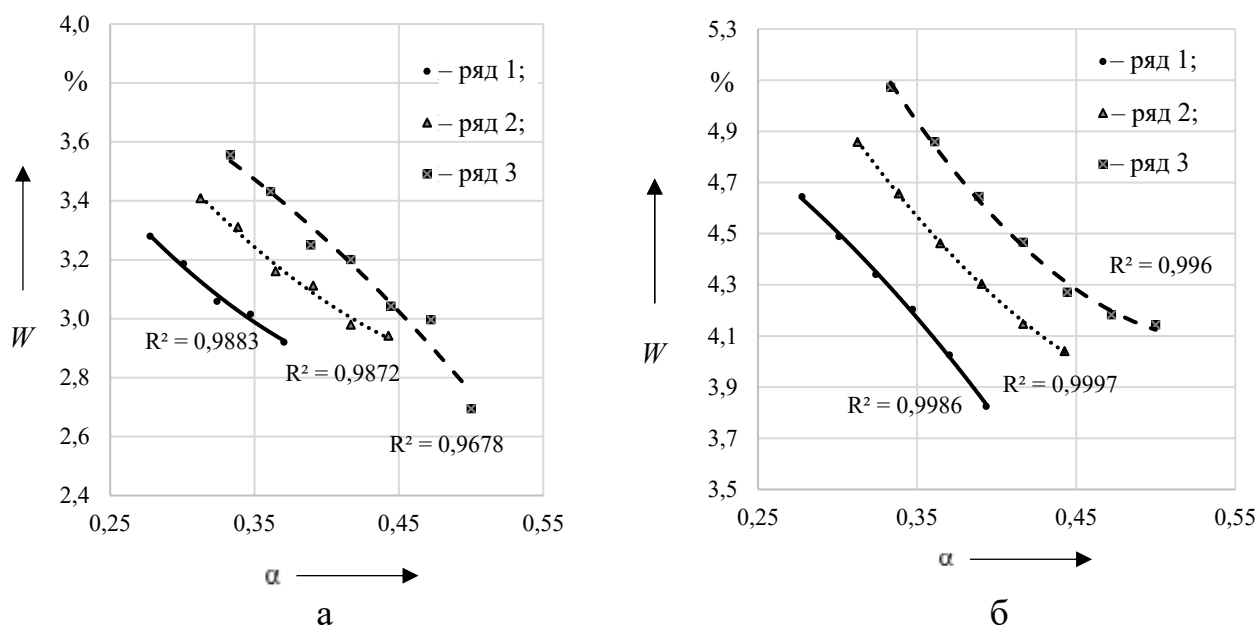


Рисунок 3.14 – График изменения небаланса для участков переменного тока: III тип профиля (а); IV тип профиля (б)

Альтернативным описанием полученных в ходе имитационного моделирования зависимостей изменения объема электропотребления и потерь электроэнергии при изменении параметров графика движения является описание с помощью нейронных сетей, в частности, многослойных персептронов [123].

Нейронная сеть по аналогии с регрессионной моделью (3.37) содержит аналогичное количество влияющих факторов – 12 входных нейронов, соответствующих переменным – параметрам расписания движения, и один выходной нейрон, соответствующий объему электропотребления на тягу или уровню потерь электроэнергии на участке.

Обучение нейронной сети выполняется по алгоритму обратного распространения. Для полученных в ходе имитационного моделирования выборок сформирован ряд MLP-моделей.

Как показывает сравнение результатов расчетов коэффициентов детерминации и показателя для различных моделей, нейронные модели с многослойными персептронами показывают лучшие результаты по сравнению с регрессионной моделью по коэффициенту детерминации и MAPE.

Таблица 3.8 – Коэффициенты регрессионной модели

Коэффициенты модели	Объем электроэнергии, о.е				Потери электроэнергии, о.е			
	постоянный ток		переменный ток		постоянный ток		переменный ток	
	III тип	IV тип	III тип	IV тип	III тип	IV тип	III тип	IV тип
<i>b</i>	180,542	191,927	132,606	119,950	-9,088	13,050	-3,570	-6,538
<i>a11</i>	-129,989	-107,850	-48,082	-23,313	41,847	-2,360	10,447	19,922
<i>a12</i>	28,099	38,289	12,937	71,175	-2,626	-7,871	-3,152	-6,651
<i>a13</i>	-85,005	-83,975	-23,807	-38,046	22,978	-0,184	7,712	10,702
<i>a14</i>	0,903	1,803	0,585	0,033	-0,078	0,002	-0,056	-0,025
<i>a15</i>	11,713	15,993	9,140	-3,926	-4,858	-1,103	-2,827	-5,872
<i>a16</i>	8,856	19,617	5,522	-7,817	-7,316	-3,215	-4,075	-6,535
<i>a21</i>	96,427	59,880	29,842	9,010	-30,644	4,360	-6,060	-12,796
<i>a22</i>	-44,296	-46,840	-17,013	-85,628	3,585	7,719	3,156	8,078
<i>a23</i>	3,467	-4,174	-1,079	-10,015	-1,036	3,519	0,023	0,331
<i>a24</i>	-2,104	-7,042	-2,649	3,528	-0,002	-0,006	0,001	-0,002
<i>a25</i>	-23,678	-3,507	-9,648	32,555	9,860	-0,658	3,881	17,325
<i>a26</i>	-60,459	-11,053	-8,315	34,774	23,149	-1,573	3,832	17,622

Среди MLP-моделей наилучшие результаты показывают модели с количеством скрытых слоев от 6 до 15. В качестве метода оптимизации при определении структуры и активационных функций использован итерационный метод численной оптимизации BFGS. В результате расчетов в моделях на скрытых слоях и выходном слое используются следующие нелинейные функции активации – гиперболический тангенс, логистическая, экспоненциальная, тождества.

Полученные модели для оценки влияния параметров ГДП на объем электропотребления и потери электроэнергии на участках с различными типами профилей пути и родами тока позволяют описать результаты имитационного моделирования и использовать их в дальнейшем при оценке энергетической эффективности перевозочного процесса. Результаты изменения потерь электроэнергии на участках постоянного и переменного тока, позволяющие оценить изменение потерь электроэнергии от параметров расписания и профиля пути, приведены на рисунке 3.15.

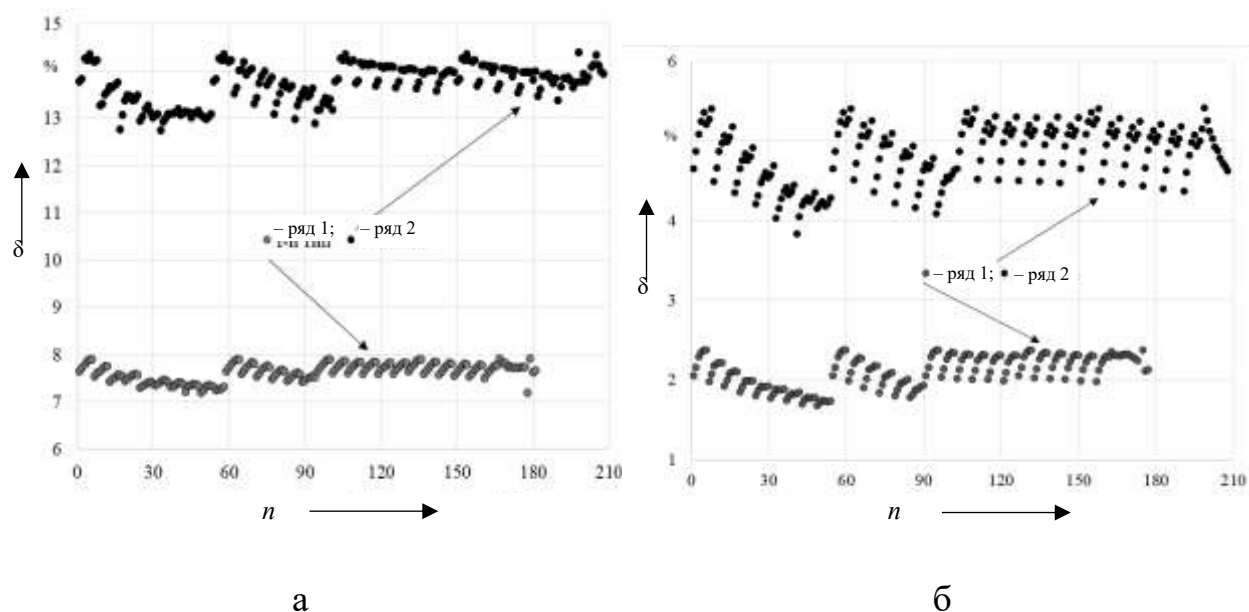


Рисунок 3.15 – Зависимости изменения небаланса электроэнергии для участков постоянного (а) и переменного (б) тока для различных вариантов расчета

Результаты имитационного моделирования процессов электропотребления на тягу и уровня потерь электроэнергии на участках с III и IV типами профиля пути с СТЭ постоянного и переменного тока напряжением 3,3 и 25 кВ соответственно показывают наличие влияния на них параметров ГДП. В условиях организации грузового движения влияние параметров графика может приводить к изменению объема электропотребления на 3 – 10 % для участков постоянного тока и на 3 – 4 % – переменного тока, при этом изменение уровня потерь для участков постоянного тока наблюдается в диапазоне 1 – 1,5 %, для участков переменного тока – в диапазоне 1 – 1,3 % при сохранении объема работы.

Выявленные зависимости изменения объема электропотребления и потерь электроэнергии от параметров расписания движения поездов позволяют перейти к их описанию с помощью моделей, полученных на основе регрессионного анализа и нейронных сетей. Сравнение значений коэффициентов детерминации и показателей процентной погрешности, полученных для рассмотренных регрессионных моделей и нейронных сетей, показывает, что для решения задачи описания изменения объема электропотребления и небаланса на участках с III и

IV типами профилей пути наиболее подходящими являются нейронные модели на основе многослойных персептронов.

Электротяговая нагрузка, одним из отличительных характеристик которой является резкая неравномерность, формирует уровни тягового электропотребления и потерь электроэнергии, зависящие от расписания движения. Формируемые графики тяговой нагрузки позволяют оценить диапазон изменения тягового электропотребления и потерь электроэнергии, расширяющийся с увеличением номера типа профиля пути с учетом рекуперации. Указанное обстоятельство создает предпосылки для применения СНЭЭ в СТЭ, целью которых является не только повышение пропускной и провозной способности лимитирующих межподстанционных зон, но и повышение энергетической эффективности перевозок за счет выравнивания графика электротяговой нагрузки, повышения эффективности применения рекуперативного торможения и снижения потерь электроэнергии.

### 3.5 Основные положения методологии учета влияния электротяговой нагрузки на тяговое электропотребление и потери электроэнергии

Решение задачи повышения энергетической эффективности перевозочного процесса ориентировано на снижение электропотребления при ведении поезда от станции отправления до станции назначения и сокращение количества остановок грузовых поездов [91, 99, 100, 110]. В то же время большой потенциал повышения энергетической эффективности перевозок находится в области решения задач, связанных с формированием электротяговой нагрузки. Указанное направление работ связано со снижением уровня потерь электроэнергии в СТЭ и улучшением условий применения ЭПС рекуперативного торможения. В настоящее время не решена задача по сравнению вариантов прогнозных графиков движения между собой, а также сравнения исполненного графика движения с прогнозным по критерию

энергетической эффективности несмотря на проводимые в данной области исследования, в том числе за рубежом [237, 289, 308, 309, 238].

В общем случае объем электроэнергии на тягу для целей анализа изменения определяется по сопоставимым периодам – базовому и отчетному. В качестве указанных периодов на железнодорожном транспорте используются: месяц, квартал, полугодие и год.

Для участков железных дорог постоянного тока объем электроэнергии на тягу в грузовом и пассажирском движении за рассматриваемый период определяется по формуле:

$$W_{\text{ЭЧЭ (груз+пас)}} = W_{\text{участок}} - \frac{W_{\text{ЭПС хоз}} + W_{\text{ЭПС ман}} + W_{\text{ЭЧЭ нетяг}}}{100 - \delta_{\text{участок}}} \cdot 100 \%, \quad (3.40)$$

где:  $W_{\text{участок}}$  – объем электроэнергии по вводам преобразовательных (для постоянного тока) или понижающих (для переменного тока) трансформаторов ТП (ЭЧЭ), питающих контактную сеть в границах участка, тыс. кВт·ч;

$W_{\text{ЭПС хоз}}$  – объем электроэнергии без учета небаланса в хозяйственном движении на рассматриваемом участке, тыс. кВт·ч;

$W_{\text{ЭПС ман}}$  – объем электроэнергии без учета небаланса на маневровую работу на рассматриваемом участке, тыс. кВт·ч;

$W_{\text{ЭЧЭ нетяг}}$  – объем электроэнергии без учета небаланса на нетяговые нужды от присоединений контактной сети тяговых подстанций, расположенных в границах рассматриваемого участка, тыс. кВт·ч;

$\delta_{\text{участок}}$  – относительная величина небаланса на рассматриваемом участке постоянного тока за базовый период, определяемая по выражению:

$$\delta_{\text{участок}}^{\text{баз}} = \left( 1 - \frac{W_{\text{ЭПС тяга}}^{\text{баз}} + W_{\text{ЭЧЭ нетяг}}^{\text{баз}}}{W_{\text{участок}}^{\text{баз}}} \right) \cdot 100 \%, \quad (3.41)$$

$W_{\text{ЭПС тяга}}$  – объем расхода электроэнергии во всех видах движения и на маневровой работе в границах участка, тыс. кВт·ч.

Для участков железных дорог переменного тока объем электроэнергии на тягу в рассматриваемом периоде определяется по формуле:

$$W_{\text{ЭЧЭ (груз+пас)}} = W_{\text{участок}} - W_{\text{ДПР}} - W_{\text{ТСН}} - \frac{W_{\text{ЭПС хоз}} + W_{\text{ЭПС ман}} + W_{\text{ЭЧЭ нетяг}}}{100 - \delta_{\text{участок}}} \cdot 100\%, \quad (3.42)$$

где:  $W_{\text{ДПР}}$  – объем расхода электроэнергии по присоединениям продольного электроснабжения «два провода рельс» (ДПР) тяговых подстанций, расположенных в границах рассматриваемого участка, тыс. кВт·ч;

$W_{\text{ТСН}}$  – объем расхода электроэнергии по присоединениям трансформаторов собственных нужд (ТСН) тяговых подстанций (в том числе по присоединениям главного распределительного шкафа и сигнализации, централизации и блокировки при наличии отдельного учета), расположенных в границах рассматриваемого участка, тыс. кВт·ч;

$\delta_{\text{участок}}$  – относительная величина небаланса на рассматриваемом участке переменного тока за базовый период, %, определяется по формуле:

$$\delta_{\text{участок}} = \left( 1 - \frac{W_{\text{ЭПС тяга}} + W_{\text{ЭЧЭ нетяг}} + W_{\text{ДПР}} + W_{\text{ТСН}}}{W_{\text{участок}}} \right) \cdot 100\%. \quad (3.43)$$

Исходя из порядка расчета тягового электропотребления определяются основные положения проведения имитационного моделирования взаимодействия электроподвижного состава и СТЭ. При рассмотрении задачи влияния электротяговой нагрузки на тяговое электропотребление из расчетных выражений (3.40) – (3.43) допустимо исключить величины, напрямую не связанные с перевозочным процессом. К указанным величинам относятся следующие:  $W_{\text{ЭПС ман}}$ ,  $W_{\text{ЭЧЭ нетяг}}$ ,  $W_{\text{ДПР}}$ ,  $W_{\text{ТСН}}$ . Указанное допущение позволяет сохранить функциональность расчетов, упрощает их в части получения данных, не связанных тяговой нагрузкой, и создает условия для определения основных зависимостей тягового электропотребления от условий формирования электротяговой нагрузки.

На первом этапе расчетов определяется объем электроэнергии на тягу и уровень потерь электроэнергии по выражениям (3.40) – (3.43). На втором этапе определяются параметры расписания движения поездов по выражениям (3.22) – (3.28). В ходе имитационного моделирования указанные расчеты повторяются

для различных вариантов расписаний, реализованных для неизменного объема работы, с целью получения зависимостей изменения объема электроэнергии на тягу и потерь электроэнергии. Полученные на основе регрессионных моделей или нейронных сетей [130] зависимости в дальнейшем используются для сравнения прогнозных расписаний движения по критерию энергетической эффективности между собой или сравнения прогнозного и исполненного графиков движения и позволяют получить приемлемые результаты.

С целью оценки влияния формирования электротяговой нагрузки на тяговое электропотребление и потери электроэнергии расчет проводится в относительном выражении, тыс. кВт·ч/о.е.:

$$b_{\text{ЭПС (груз+пас)отн}} = \frac{W_{\text{ЭПС (груз+пас)}}}{W_{\text{ЭПС (груз+пас)отн}}}, \quad (3.44)$$

где:  $W_{\text{ЭПС(груз+пас)}}$ ,  $W_{\text{ЭПС(груз+пас)отн}}$  – объемы электроэнергии на тягу суммарно в грузовом и пассажирском видах движения без учета небаланса на рассматриваемом участке в абсолютном и относительном исчислении, тыс. кВт·ч и о. е. соответственно.

Введение указанной величины позволяет в дальнейшем перейти к расчету в абсолютных единицах для оценки эффекта в абсолютном выражении.

Величина потерь электроэнергии в относительном выражении в рассматриваемом периоде суммарно в грузовом и пассажирском движении с учетом доли электропотребления определяется по выражению, тыс. кВт·ч/о.е.:

$$\Delta w_{\text{участок (груз+пас)отн}} = \frac{W_{\text{ЭПС (груз+пас)}}}{W_{\text{ЭПС тяга}} + W_{\text{ЭЧЭ нетяг}}} \cdot \frac{\Delta W_{\text{участок}}}{\Delta W_{\text{участок (груз+пас)отн}}}, \quad (3.45)$$

где:  $\Delta W_{\text{участок(груз+пас)отн}}$  – величина потерь электроэнергии, относящаяся к грузовому и пассажирскому видам движения, на рассматриваемом участке, о.е.;

$\Delta W_{\text{участок}}$  – абсолютная величина потерь электроэнергии на рассматриваемом участке расчетного полигона за базовый период, тыс. кВт·ч:

а) для рассматриваемого участка постоянного тока –

$$\Delta W_{\text{участок}} = W_{\text{участок}} - (W_{\text{ЭПС тяга}} + W_{\text{ЭЧЭ нетяг}}); \quad (3.46)$$

б) для рассматриваемого участка переменного тока –

$$\Delta W_{\text{участок}} = W_{\text{участок}} - (W_{\text{ЭПС тяга}} + W_{\text{ЭЧЭ нетяг}} + W_{\text{ДПР}} + W_{\text{ТСН}}). \quad (3.47)$$

Для сравнения графиков движения по критерию энергоэффективности в расчете предлагается использовать следующие расчетные величины.

Расчетная величина объема электроэнергии на тягу суммарно в грузовом и пассажирском видах движения без учета небаланса в расчетном периоде для  $i$ -го варианта графика, тыс. кВт·ч:

$$W_{\text{ЭПС (груз+пас)} i} = b_{\text{ЭПС (груз+пас)отн}} \cdot W_{\text{ЭПС (груз+пас)отн } i}. \quad (3.48)$$

Расчетная абсолютная величина потерь электроэнергии, относящаяся к грузовому и пассажирскому видам движения, в расчетном периоде для  $i$ -го варианта графика, тыс. кВт·ч, определяется по выражению:

$$\Delta W_{\text{участок (груз+пас)} i} = \Delta w_{\text{участок (груз+пас) отн}} \cdot \Delta W_{\text{участок (груз+пас) отн } i}. \quad (3.49)$$

Сравнение электропотребления для  $i$ -го варианта графика с другим или базовым вариантом позволяет определить график движения с наибольшей энергетической эффективностью. Эффект в абсолютном выражении определяется по выражению, тыс. кВт·ч:

$$\Delta W_{\text{ЭЧЭ (груз+пас)} i} = W_{\text{ЭЧЭ (груз+пас)}} - (W_{\text{ЭПС (груз+пас)} i} + \Delta W_{\text{участок (груз+пас)} i}). \quad (3.50)$$

Относительная величина изменения объема электроэнергии с учетом небаланса в расчетном периоде относительно базового для  $i$ -го варианта графика определяется по выражению, %:

$$\delta_{\text{ЭЧЭ груз ПГД}} = \frac{\Delta W_{\text{ЭЧЭ (груз+пас)} i}}{W_{\text{ЭЧЭ (груз+пас)}}} \cdot 100 \%. \quad (3.51)$$

На основании приведенных выше выражений для определения тягового электропотребления и потерь электроэнергии предложены способы имитационного моделирования для поиска энергоэффективного графика движения поездов и определения потерь электроэнергии в СТЭ:

1) способ имитационного моделирования энергоэффективного графика движения поездов на электрифицированных железных дорогах [134].

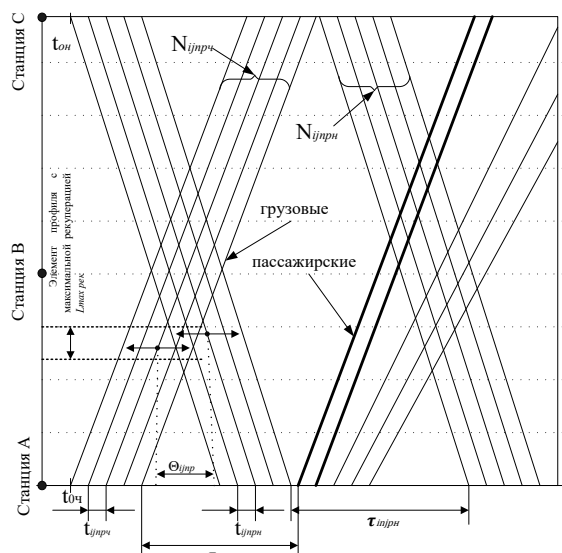


Рисунок 3.16 – Фрагмент графика движения поездов

На рисунке 3.16 представлен фрагмент формируемого графика движения, при построении которого используются: межпоездные интервалы  $t_{ijnp\ ч}$  и  $t_{ijnp\ н}$  в первом пакете в четном/нечетном направлениях; время отправления первого поезда в суточном графике –  $t_{0ч}$ ,  $t_{0н}$ ; интервал между пакетами в четном/нечетном направлениях –  $\tau_{ijnp\ ч(н)}$ ; количество поездов в  $j$ -м пакете в четном/нечетном направлениях  $N_{ijnp\ ч(н)}$ ,  $N_{ijnp\ н}$ ; ординату максимальной рекуперации –  $L_{\max\ рек}$ ;

интервалы между условными нитками встречных пакетов относительно прохождения ординаты максимальной рекуперации  $\Theta_{ijnp}$ .

На заключительном этапе из подмножества энергоэффективных графиков осуществляется выбор варианта графика, максимально приближенного к нормативному по критерию минимального отклонения ниток графика движения, с целью сокращения эксплуатационных расходов, связанных с изменением нормативного графика. Найденный вариант графика относится к энергоэффективному ГДП и может использоваться для построения нормативного графика.

2) способ определения потерь электроэнергии электроподвижным составом при неграфиковых остановках с использованием бортовых информационно-измерительных комплексов учета электроэнергии [135].

Способ определения потерь электроэнергии электроподвижным составом при неграфиковых остановках направлен на расширение возможностей известных способов за счет реализации технологии определения абсолютного значения потерь электроэнергии при неграфиковой остановке электроподвижного состава.

Приведенные основные положения позволяют использовать полученные в настоящей главе расчетные выражения при оценке и прогнозировании уровня электропотребления и потерь электроэнергии, а также оценки эффекта от мероприятий по выравниваю графика электрической нагрузки.

### 3.6 Выводы по третьей главе

Результаты имитационного моделирования в части определения электропотребления на тягу и уровня потерь электроэнергии в системах тягового электроснабжения постоянного и переменного тока на участках с различными типами профиля пути показывают влияние на них условий формирования электротяговой нагрузки

Показано, что в условиях преобладания грузового движения изменение условий организации движения приводит к соответствующему изменению тягового электропотребления на 3 – 10 % для участков постоянного тока и на 3 – 4 % – переменного тока, при этом изменение потерь электроэнергии для участков постоянного тока наблюдается в диапазоне 1 – 1,5 %, для участков переменного тока – в диапазоне 1 – 1,3 %.

Указанные диапазоны изменения электропотребления и потерь электроэнергии позволяют оценить потенциальный эффект от выравнивания графиков электротяговой нагрузки на уровень энергетических показателей при реализации мероприятий применения СНЭЭ в тяговом электроснабжении.

Предложен способ определения энергетической эффективности прогнозных и исполненных графиков движения поездов, основанный на

имитационном моделировании и обработке результатов расчетов, позволяющий, отталкиваясь от отчетных данных об электропотреблении и параметрах расписания движения на участке железной дороги определить параметры для формирования электротяговой нагрузки и оценить потенциальную эффективность от внедрения мероприятий по выравниванию графика электрической нагрузки.

Разработан способ оценки определения потерь электроэнергии при остановках электроподвижного состава на основе бортовых систем регистрации энергетических показателей.

Предложен способ определения влияния параметров графика движения поездов на объем электропотребления и потери электроэнергии на участках или полигонах железных дорог с учетом рекуперации, основанный на использовании регрессионных моделей или нейронных сетей. Предложенные решения предназначены для оценки энергетических показателей СТЭ и энергоэффективности перевозок и потенциала применения СНЭЭ.

#### 4 СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СПОСОБА РАСЧЕТА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ СИСТЕМЫ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ С СИСТЕМАМИ НАКОПЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

Работа систем накопления электроэнергии оказывает влияние на энергетические показатели систем тягового электроснабжения в зависимости от своих параметров, мест размещения, настроек режимов работы и функциональности. Оценка влияния систем накопления электроэнергии на системы тягового электроснабжения требует совершенствования существующих способов расчета энергетических показателей работы.

В настоящей главе выполнен анализ существующих способов расчета. Представлены разработанные способы расчета энергетических показателей и имитационная модель системы тягового электроснабжения, построенная с учетом систем накопления электроэнергии. Предложена методика расчета параметров и выбора мест размещения систем накопления электроэнергии в системах тягового электроснабжения.

##### 4.1 Пути совершенствования расчета энергетических показателей системы тягового электроснабжения

Способы расчета энергетических показателей СТЭ содержат ряд упрощений, часть из которых связана с последовательностью выполнения расчетов (тяговых и электрических). Разделение расчетов ТР и ЭР позволяет существенно снизить их вычислительную сложность, но приводит к снижению точности расчетов за счет принимаемых допущений. В данном случае основными направлениями по повышению точности расчетов является учет изменения напряжения на токоприемнике электроподвижного состава в режимах тяги и рекуперативного торможения с учетом регулируемых устройств в СТЭ,

адекватно не реализуемый на этапе тяговых расчетов, а также сокращение шага расчетов.

Развитие систем учета и измерений электроэнергии в СТЭ и на ЭПС в части точности в настоящее время значительно опережает возможности применяемых программных комплексов, например, «Комплекса расчетов тягового электроснабжения», в которых выполняются расчеты ТР и ЭР. Указанное обстоятельство связано с применяемым шагом интегрирования уравнения движения поезда, который для приведенного программного комплекса при расчете мгновенных значений принимается на уровне  $\frac{1}{4}$  минуты или выше. Возможности современных систем измерений и учета электроэнергии на несколько порядков выше.

Реализация способов расчета энергетических показателей в программных комплексах определяет минимальный шаг времени для расчетов мгновенных схем, который находится в диапазоне от 1 до 60 с [78, 109, 136, 137]. Тяговые расчеты выполняются способом интегрирования уравнения движения поезда с учетом серии ЭПС, массы состава, нагрузки на ось и других параметров [120].

Одним из путей повышения точности расчета способа расчета показателей работы СТЭ является учет изменения уровня напряжения на токоприемнике ЭПС на каждом шаге интегрирования при проведении тяговых и электрических расчетов. В этом случае повышение точности расчетов достигается путем учета изменения напряжения в наиболее тяжелых нагрузочных режимах, связанных с пиковыми тяговыми нагрузками, и режимах рекуперативного торможения, изменяющих картину распределения мощности в границах межподстанционных зон [106, 138].

При проведении тяговых расчетов учет изменения уровня напряжения выполняется путем корректировки скорости движения по тяговой характеристике, однако, существенным недостатком этой корректировки является невозможность учета фактического напряжения, определяемого на этапе ЭР в зависимости от условий формирования тяговой нагрузки. С целью

повышения точности расчетов ниже рассматривается усовершенствованный способ расчета.

В классическом способе расчета учет изменения напряжения реализуется на этапе выполнения тяговых расчетов для заданных условий. В качестве начальных условий для выполнения ТР напряжение на токоприемнике ЭПС принимается равным номинальному напряжению  $U_0$ , скорость движения ЭПС принимается равной заданной начальной скорости  $V_0$ , начальная ордината расположения –  $S_0$ .

Расчет выполняется пошагово с заданным интервалом времени и предусматривает определение удельного сопротивления движению подвижного состава. Определению подлежат следующие величины [120]:

- 1) основное удельное сопротивление движению грузовых вагонов;
- 2) основное удельное сопротивление движению пассажирских вагонов;
- 3) основное удельное сопротивление движению локомотивов;
- 4) основное удельное сопротивление движению электропоездов;
- 5) дополнительное удельное сопротивление состава при трогании с места;
- 6) дополнительное удельное сопротивление движению от уклона;
- 7) дополнительное удельное сопротивление движению от кривой;
- 8) дополнительное удельное сопротивление движению от спрямленного профиля и плана пути;
- 9) дополнительное удельное сопротивление движению от подвагонных генераторов;
- 10) дополнительное сопротивление движению от низкой температуры наружного воздуха;
- 11) дополнительное сопротивление движению поезда от ветра.

При проведении тормозных расчетов определяются:

- 1) тормозная сила поезда;
- 2) коэффициент трения;
- 3) расчетные тормозной коэффициент поезда;
- 4) тормозной путь.

При вычислении тормозного пути используются методы скоростей и интегрирования по интервалам времени. При использовании метода скоростей на каждом  $k$ -м шаге расчетов определяется величина тормозного пути до места остановки при текущей скорости  $V_k$ , км:

$$S_{Tk} = 0,278 \cdot V_k \cdot t_{\Pi} + \frac{500 \cdot (V_k^2 - V_{\text{ост}}^2)}{\zeta \cdot (1000 \cdot \varrho_p \cdot \varphi_{\text{кр}} + w_{0k} + w_c)}, \quad (4.1)$$

где:  $t_{\Pi}$  – время подготовки тормозов к действию в зависимости от типа состава, типа тормозов и количества осей состава, ч;

$V_{\text{ост}}$  – скорость проследования остановочного пункта, км/ч;

$\zeta$  – замедление поезда под действием удельной замедляющей силы, км/ч<sup>2</sup>;

$\varrho_p$  – расчетный тормозной коэффициент поезда;

$\varphi_{\text{кр}}$  – расчетный коэффициент трения тормозных колодок;

$w_{0k}$  – основное удельное сопротивление движению поезда при холостом ходе локомотива в расчетном интервале скоростей, Н/т;

$w_c$  – удельное сопротивление от спрямленного уклона, для которого производятся расчеты (при спуске значение со знаком минус), Н/т.

Режим торможения применяют с текущего шага расчетов  $k$  до остановки поезда в заданном остановочном пункте при условии выполнения неравенства:

$$S_{\text{о.п}} \leq S_k + S_{Tk} \leq S_{\text{о.п}} + \frac{l_{\text{по}}}{2}, \quad (4.2)$$

где:  $S_{\text{о.п}}$  – координата остановочного пункта, км;

$l_{\text{по}}$  – длина приемоотправочных путей остановочного пункта, км.

При применении режима торможения поезда на каждом шаге расчетов определяется значение тормозной силы  $B_{kk}$  (кН), удельного замедляющего усилия  $b_{kk}$  (Н/кН) и падения скорости  $\Delta V_k$ .

Режим тяги при движении поезда применяется при выполнении неравенства:

$$S_k + S_{Tk} < S_{\text{о.п}}. \quad (4.3)$$

Для режима тяги по тяговым характеристикам  $F_{\kappa}(V)$  определяется значение силы тяги  $F_{\kappa k}$  (кН) на  $k$ -м шаге расчетов для скорости  $V_k$ .

После определения силы тяги рассчитываются значения удельной силы тяги  $f_{\kappa k}$  на  $k$ -м шаге расчетов, удельного ускоряющего усилия  $f_{y k}$ , приращений скорости  $\Delta V_k$  (км/ч) и пройденного пути  $\Delta S_k$  (км), конечного времени  $k$ -го шага интегрирования  $t_{k+1}$  (с), скорости  $V_{k+1}$  (км/ч) [120].

Полученное значение скорости движения поезда сравнивается со значением заданного ограничения скорости движения на расчетной ординате:

$$V_{k+1} \geq V_{k+1}^{\text{орп}}, \quad (4.4)$$

где:  $V_{k+1}^{\text{орп}}$  – максимально допустимая скорость для расчетной категории поездов на участке пути с координатой  $S_{k+1}$ .

В случае выполнения неравенства (4.4) режим тяги заменяется режимом выбега и для  $w_0 + i_c \geq 0$  принимается, что  $V_{k+1} = V_{k+1}^{\text{орп}}$  на шаге  $k+1$ . При этом удельная сила тяги принимается  $f_{\kappa k+1} = 0$ . При выполнении неравенства  $w_0 + i_c < 0$ , в качестве режима работы электроподвижного состава выбирается торможение и для скорости  $V_{k+1}$  по тормозным характеристикам  $B_{\kappa}(V)$  определяется соответствующее значение тормозной силы  $B_{\kappa k+1}$ , для которой рассчитываются удельное замедляющее усилие  $b_{y k}$  и падение скорости  $\Delta V_{k+1}$ . Расчет конечной координаты на  $k$ -м шаге интегрирования  $S_{k+1}$  (км) выполняется отдельно для четного и нечетного направлений.

Полученные ординаты и токи каждого поезда в границах рассматриваемого участка, определенные на предыдущем шаге, используются для построения мгновенной схемы замещения при проведении электрических расчетов на  $k$ -м шаге.

Полученное в ходе электрических расчетов значение напряжения на токоприемнике каждой единицы ЭПС используется на следующем шаге расчета  $k+1$  для соответствующего поезда. При отличии полученного уровня

напряжения от номинального значения осуществляется пересчет токовых характеристик поезда для скорости  $V'$ , определяемой по формуле, км/ч:

$$V' = V \frac{U_k}{U_{\text{ном}}}, \quad (4.5)$$

где:  $V$  – скорость, определяемая по тяговой характеристике для номинального напряжения  $U_{\text{ном}}$ , км/ч.

Проверка условий для рекуперативного торможения реализуется в усовершенствованном способе на основе баланса мощностей с учетом рекуперативного торможения ЭПС для каждой межподстанционной зоны [139].

После определения скорости с учетом расчетного уровня напряжения для режима тяги по токовым характеристикам  $I_d(V)$  для значения скорости  $V'_k$ , определяется значение тягового тока  $I_{dk}$  поезда на текущем  $k$ -м шаге расчетов.

При смене режима работы на режим торможения проверяются условия применения рекуперативного торможения. В случае выполнения неравенства (4.2) с  $k$ -го шага применяется торможение. Определяется величина тормозной силы  $B_{\kappa k}$  для скорости  $V_k$ , затем величина  $b_{yk}$  и приращение скорости  $\Delta V_k$ . По характеристикам рекуперативного торможения  $I_p(V)$  для  $V_k$  определяется значение тока рекуперации  $I_{pk}$  поезда.

Для каждой межподстанционной зоны, в которой созданы условия для перехода в режим рекуперативного торможения, и смежных с ней зон выполняется проверка неравенства:

$$P_k^{\text{рек}} \leq \sum P_k^{\text{тяг}} + \sum P_k^{\text{пр}} + \sum \Delta P_k, \quad (4.6)$$

где:  $P_k^{\text{рек}}$  – мощность рекуперативного торможения:

$$P_k^{\text{рек}} = V_k \cdot B_{\kappa k}, \quad (4.7)$$

$\sum P_k^{\text{тяг}}$  – суммарная мощность ЭПС, не находящегося в режиме рекуперативного торможения в границах рассматриваемой межподстанционной зоны и смежных с ней;

$\sum P_k^{\text{пр}}$  – суммарная мощность приемников энергии рекуперации в СТЭ;

$\sum \Delta P_k$  – суммарные потери мощности, обусловленные передачей энергии рекуперации в границах межподстанционной зоны.

При рассмотрении баланса мощности совместно со смежными межподстанционными зонами границы для неравенства (4.6) увеличиваются на количество смежных межподстанционных зон.

В случае, если неравенство (4.6) выполняется, мощность рекуперации реализуется полностью и по характеристикам рекуперативного торможения определяется  $I_{pk+1}(V_{k+1})$ . Напряжение на токоприемнике рассчитывается по формуле:

$$U_k^{\text{рек}} = \frac{P_k^{\text{рек}}}{I_{pk}}. \quad (4.8)$$

Условия для применения рекуперативного торможения будут выполняться до тех пор, пока выполняются неравенство (4.6) и напряжение на токоприемнике не превышает допустимое значение:

$$U_k^{\text{рек}} \leq U_{\text{доп}}, \quad (4.9)$$

где:  $U_{\text{доп}}$  – максимально допустимое напряжение на токоприемнике ЭПС.

Если неравенства (4.6) и (4.9) не выполняется, ЭПС переходит в режим совместного применения пневматического (реостатного) и рекуперативного торможения, при этом ток рекуперации определяется из условия баланса мощности как доля расчетного значения тока рекуперативного торможения:

$$I'_{pk}(V_k) = \left( 1 - \frac{\sum P_k^{\text{тяг}} + \sum \Delta P_k}{P_k^{\text{рек}}} \right) \cdot I_{pk}. \quad (4.10)$$

Для режима выбега  $I_{dk}$  принимается равным току, соответствующему потреблению на собственные нужды. Ток собственных нужд ЭПС определяется по формуле, А:

$$I_{\text{с.н.}k} = \frac{P_{\text{с.н.}}}{U_k}. \quad (4.11)$$

где:  $P_{\text{с.н}}$  – мощность собственных нужд ЭПС.

Расчетная схема замещения межподстанционной зоны, поясняющая способ определения энергетических показателей СТЭ приведена на рисунке 4.1. Электроподвижной состав на схеме представлен в виде двух единиц – ЭПС<sub>*j*</sub> и ЭПС<sub>*j+1*</sub>, находящихся в режиме рекуперативного торможения и тяги соответственно. Возможность рекуперативного торможения на каждом шаге расчетов определяется на основе баланса мощности и условия сохранения напряжения на токоприемниках ЭПС ниже допустимого уровня. Расход электроэнергии по шинам подстанций ТП<sub>*i*</sub> и ТП<sub>*i+1*</sub> определяется по расчетным значениям тока шин подстанций  $I_{\text{ш}}$ . Расход электроэнергии ЭПС осуществляется отдельно для режима рекуперативного торможения и других режимов на основе токов ЭПС –  $I_{\text{р}jk}$ .

Полный ток ЭПС определяется для режимов тяги, выбега и торможения в общем виде по формулам:

$$\underline{I}_k = \underline{I}_{dk} + \underline{I}_{\text{с.н.}k}; \quad (4.12)$$

$$\underline{I}_k = \underline{I}_{pk} - \underline{I}_{\text{с.н.}k}. \quad (4.13)$$

Расчет энергетических показателей СТЭ выполняется одним из методов: узловых потенциалов или контурных токов. Далее рассмотрено применение метода контурных токов. В соответствии с методом контурных токов для участков переменного тока значение тока во всех ветвях схемы замещения с учетом полных сопротивлений элементов определяется по формуле:

$$[\underline{I}_{nn}] = \left\{ [K_z] \cdot [Z_v] \cdot [K_z]^T \right\}^{-1} \cdot [K_z] \cdot \left\{ [\underline{E}_v] - [Z_v] \cdot [\underline{J}_v] \right\}, \quad (4.14)$$

где:  $[\underline{I}_{nn}]$  – матрица контурных токов, представляющая собой вектор размером  $n \times 1$ ;

$[K_2]$  – матрица независимых контуров размером  $n \times v$ , составленная из чисел 0, 1, -1, строки которой соответствуют номеру главного контура схемы замещения, а столбцы – номеру ветви.

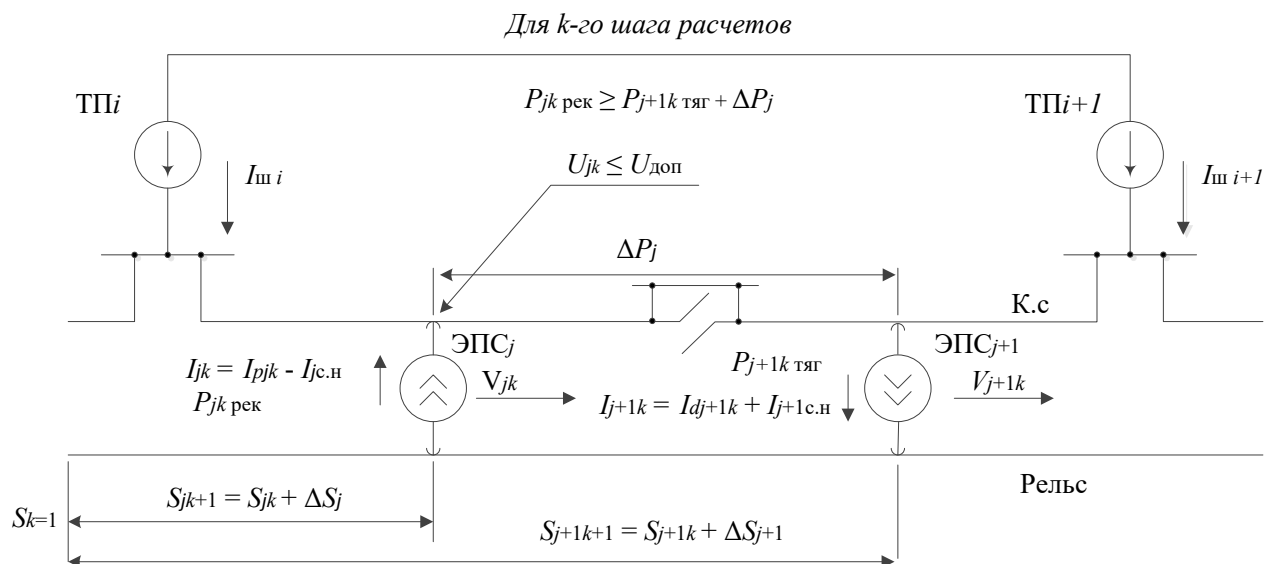


Рисунок 4.1– Фрагмент схемы замещения для межподстанционной зоны

При совпадении направления обхода контура совпадает с направлением тока в ветви в соответствующую ячейку  $[K_r]$  ставят 1, при несовпадении – -1, если ветвь не обходится, то 0;

$[K_r]^T$  – транспонированная матрица независимых контуров размером  $v \times n$ ;

$[E_v]$  – матрица электродвижущих сил ветвей, представляющая собой вектор размером  $v \times 1$ .

Если в одной ветви содержится несколько электродвижущих сил, то результирующее значение определяется как сумма комплексных значений этих электродвижущих сил;

$[J_v]$  – матрица источников тока, представляющая собой вектор размером  $v \times 1$ , составленный из значений токов ЭПС  $J_v$  для соответствующей ветви;

$[Z_v]$  – квадратная матрица комплексных сопротивлений ветвей, размер которой определяется количеством ветвей схемы замещения и равен  $v \times v$ . При этом главная диагональ матрицы содержит собственные сопротивления ветвей

$\underline{Z}_{11}, \underline{Z}_{22} \dots \underline{Z}_{vv}$ , а остальные ячейки – сопротивления взаимоиндукции соответствующих ветвей  $\underline{Z}_{12}, \underline{Z}_{13}$  и т. д.

Определяются потенциалы всех узлов схемы замещения  $\underline{\varphi}_q, B$ , в соответствии со вторым законом Кирхгофа, методом узловых потенциалов или иным способом с учетом того, что известны значения токов и сопротивлений ветвей схемы замещения.

Определение потенциалов во всех узлах схемы позволяет вычислять напряжения на всех элементах СТЭ и токоприемнике ЭПС как разность потенциалов узлов схемы в комплексном виде:

$$\underline{U} = \underline{\varphi}_{к.п} - \underline{\varphi}_p, \quad (4.15)$$

где:  $\underline{\varphi}_{к.п}$  – потенциал узла, соединяющего соответствующую тяговую нагрузку и контактный провод, В;

$\underline{\varphi}_p$  – потенциал узла, соединяющего соответствующую тяговую нагрузку и рельс, В.

С помощью выражения (4.15) формируется матрица напряжений на токоприемнике ЭПС размерностью  $1 \times v$ .

При проведении расчетов в рамках суток расчет для рассматриваемого участка завершается при условии достижения расчетного времени, то есть при выполнении неравенства  $t_{k+1} \geq 24$  ч.

Для участков постоянного тока определение контурных токов в ветвях схемы в ходе электрических расчетов осуществляется по формуле:

$$[I_m] = \left\{ [K_z] [R_v] [K_z]^T \right\}^{-1} \cdot [K_z] \cdot \{ [E_v] - [R_v] [J_v] \}, \quad (4.16)$$

где:  $[R_v]$  – квадратная матрица сопротивлений ветвей, размер которой определяется количеством ветвей схемы замещения и равен  $v \times v$ .

Матрица-столбец токов ветвей определяется с помощью формулы (4.16) по выражению:

$$[I_v] = [K_z]^T \cdot [I_m]. \quad (4.17)$$

Расход электроэнергии по шинам  $i$ -х тяговых подстанций рассматриваемого участка определяется по формуле:

$$W_{\text{ш ТП } k+1} = W_{\text{ш ТП } k} + \sum_i I_{\text{ш } i k} \cdot U_{\text{ш } i k} \cdot \Delta t, \quad (4.18)$$

где:  $W_{\text{ш ТП } k}$  – расход электроэнергии на  $k$ -м шаге расчетов, определяемый как сумма с накоплением;

$I_{\text{ш } i k}$  – суммарный ток тяговой нагрузки  $i$ -й подстанции на  $k$ -м шаге расчетов;

$U_{\text{ш } i k}$  – напряжение на шинах  $i$ -й тяговой подстанции на  $k$ -м шаге расчетов.

Расход электроэнергии для группы  $j$ -х ЭПС определяется на  $k$ -м шаге расчетов отдельно для режимов торможения, тяги и выбега по выражению:

$$W_{\text{ЭПС } j \text{ рек(тяг) } k+1} = W_{\text{ЭПС } j \text{ рек(тяг) } k} + \sum_j U_{\text{ТКП рек(тяг) } j k} \cdot I_{d \text{ рек(тяг) } j k} \cdot \Delta t, \quad (4.19)$$

где:  $U_{\text{ТКП } j k}$  – напряжение на токоприемнике  $j$ -го ЭПС на  $k$ -м шаге расчетов;

$I_{d \text{ рек(тяг) } j k}$  – ток  $j$ -го ЭПС на  $k$ -м шаге расчетов для тяги (рекуперации) соответственно.

Потери электроэнергии в тяговой сети на  $k$ -м шаге расчетов определяются по выражению:

$$\Delta W_{k+1 \text{ т.с}} = \Delta W_{k \text{ т.с}} + \sum_v I_{k v}^2 \cdot R_{k v} \cdot \Delta t, \quad (4.20)$$

где:  $I_{k v}$  – ток в  $v$ -й ветви схемы замещения на  $k$ -м шаге расчета.

Рассмотренный выше порядок расчета можно представить в виде алгоритма, приведенного на рисунке 4.2.

На начальном этапе расчетов в составе исходных данных задаются начальные значения напряжения, скорости и ординаты движения поезда (блок 1). В блоке 3 на основании данных о напряжении, скорости и ординате каждого  $k$ -го поезда (блок 2) определяется тормозной путь поезда на  $k$ -м шаге расчетов. В случае, если величина тормозного пути недостаточна для остановки поезда (блок 4), осуществляется торможение (блоки 5, 11), в противном случае

осуществляется расчет тягового усилия для поезда (блок 6). Результатом расчетов блока 6 являются значения токов и скоростей движения каждого поезда.

По окончании расчетов по определению приращения скорости выполняется проверка соблюдения ограничения скорости движения (блок 7). При превышении ограничения скорость принимается равной скорости ограничения и режим тяги сменяется режимом выбега (блок 10) или торможения (блок 11). Выбор режима торможения в блоке 11 (Блок Б) осуществляется исходя из мощности рекуперативного торможения и создания условий для его применения в границах межподстанционной зоны. Условия определяются при выполнении неравенства баланса мощностей рекуперативного торможения, мощности потребления ЭПС и мощности приемников избыточной энергии рекуперации в СТЭ (блок 12). При соблюдении условий для применения рекуперативного торможения по тяговым характеристикам ЭПС определяются токи и напряжение на токоприемнике (блок 13). При допустимом напряжении на токоприемнике расчеты переходят к определению энергетических параметров СТЭ (блок 17), в случае превышения напряжения сверх допустимого в расчете применяется пневматическое или комбинированное (с электрическим) торможение (блок 15), при этом ток поезда принимается равным току собственных нужд.

Блок 17 (блок В) расчетов позволяет на основе метода контурных токов определить токи и напряжения элементов схемы замещения на  $k$ -м шаге, расход и потери электроэнергии по шинам ТП и ЭПС (в том числе в режиме рекуперативного торможения) как сумму с накоплением.

Предложенный усовершенствованный способ определения энергетических показателей движения поезда и СТЭ позволяет учитывать изменяющийся уровень напряжения при проведении ТР и корректировать тяговые нагрузки в ЭР на последующих шагах моделирования, уровень напряжения в узлах СТЭ, потери и расход электроэнергии, а также значения коэффициента реактивной мощности в СТЭ переменного тока и может быть использован для расчетов с различными устройствами усиления СТЭ, предназначенными для стабилизации напряжения в контактной сети.

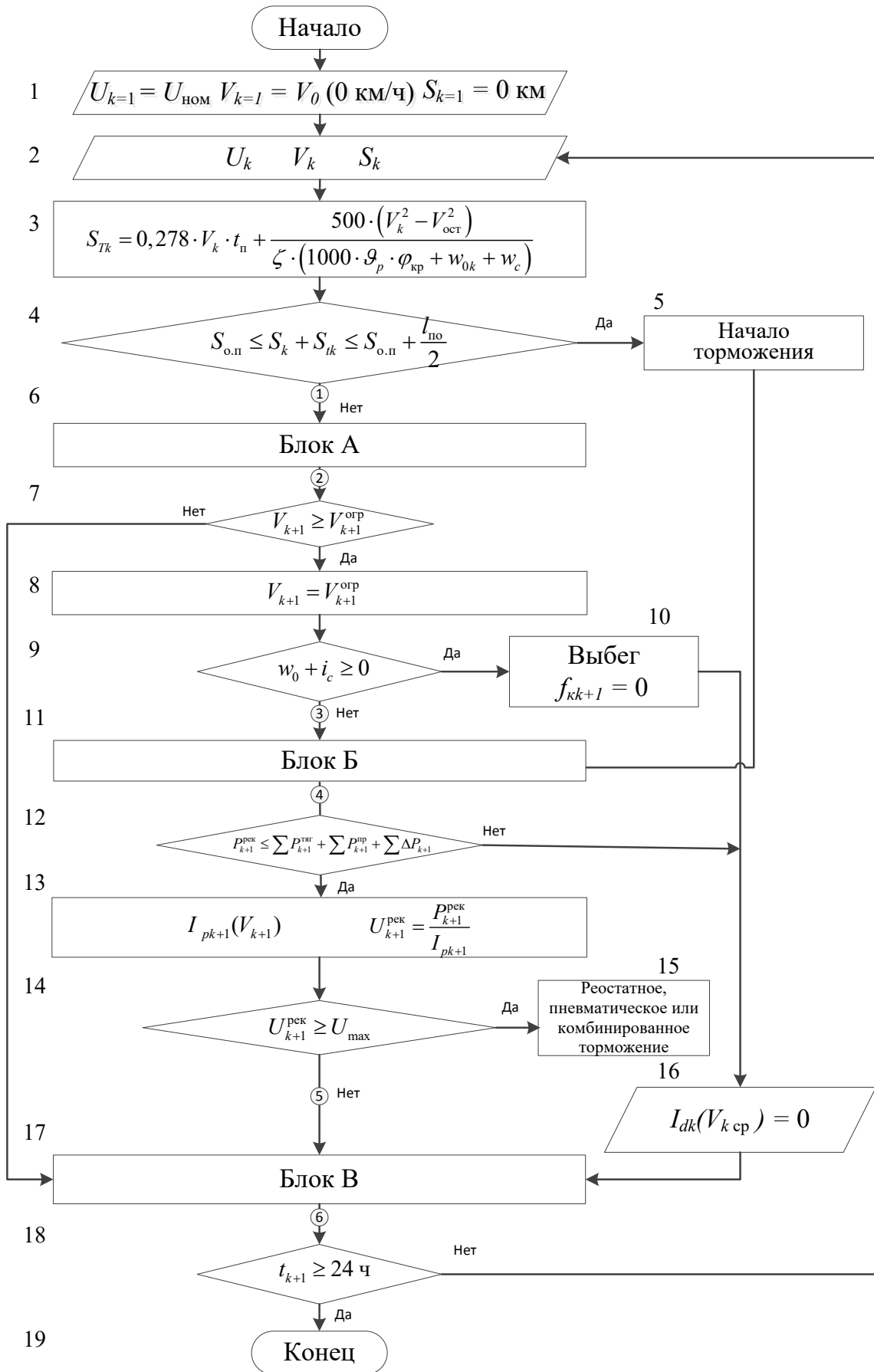


Рисунок 4.2– Алгоритм способа расчета

Блок расчетов А (рисунок 4.3) предназначен для корректировки скорости движения ЭПС в зависимости от уровня напряжения, определения токов поезда с учетом режима движения и нагрузки собственных нужд. Блок Б (рисунок 4.4) предназначен для расчета приращения скорости и пройденного пути, мощности тяговой нагрузки и потерь мощности в тяговой сети, блок В (рисунок 4.4) – для определения объема и потерь электроэнергии.

## Блок А

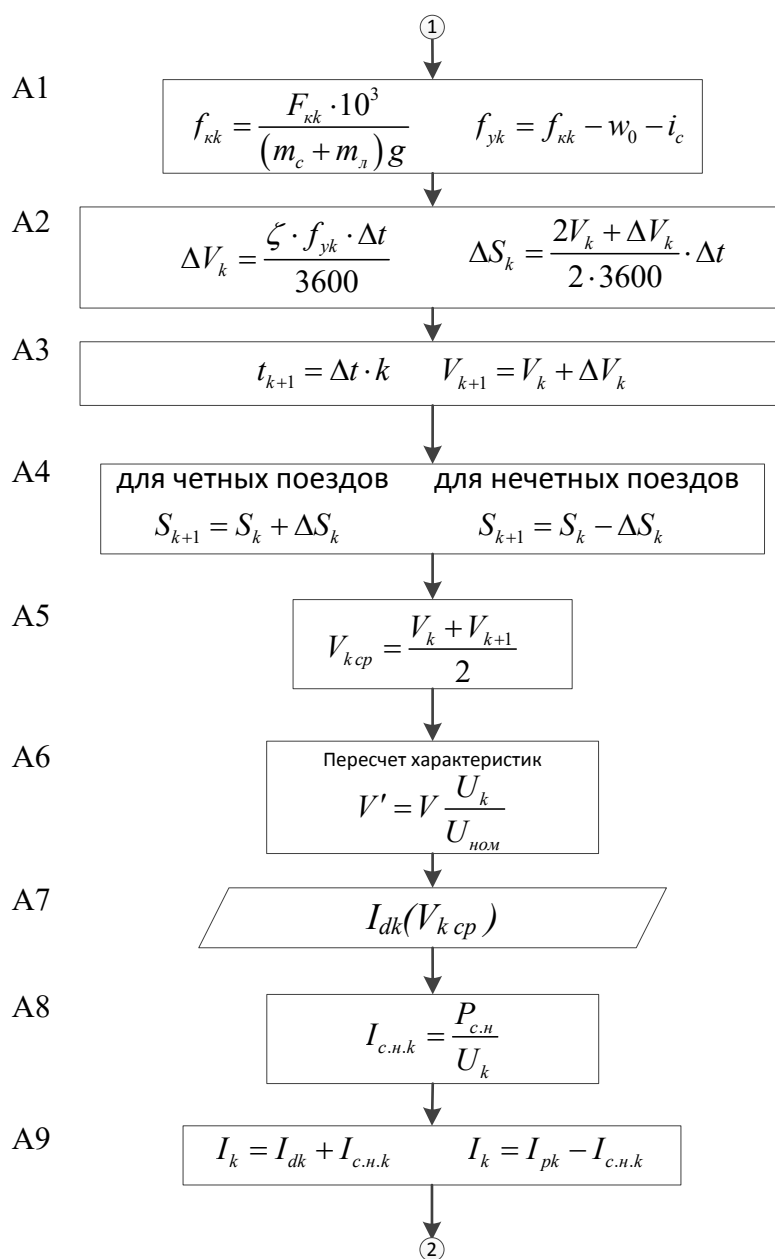
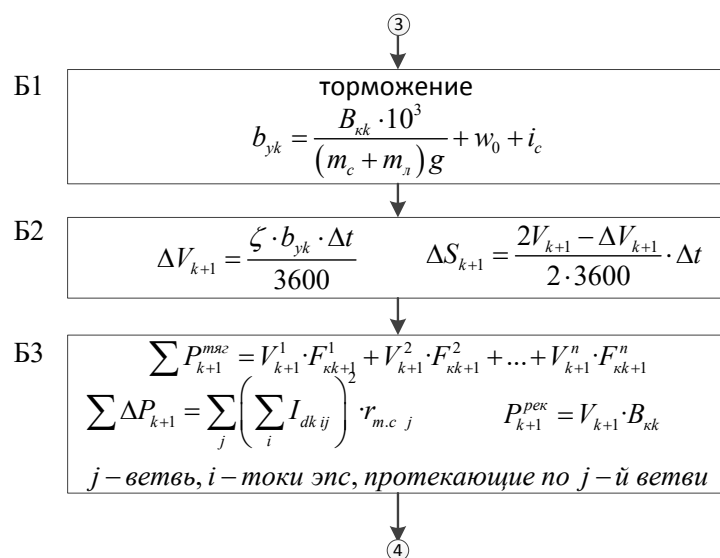


Рисунок 4.3 – Блок А способа расчета

## Блок Б



## Блок В

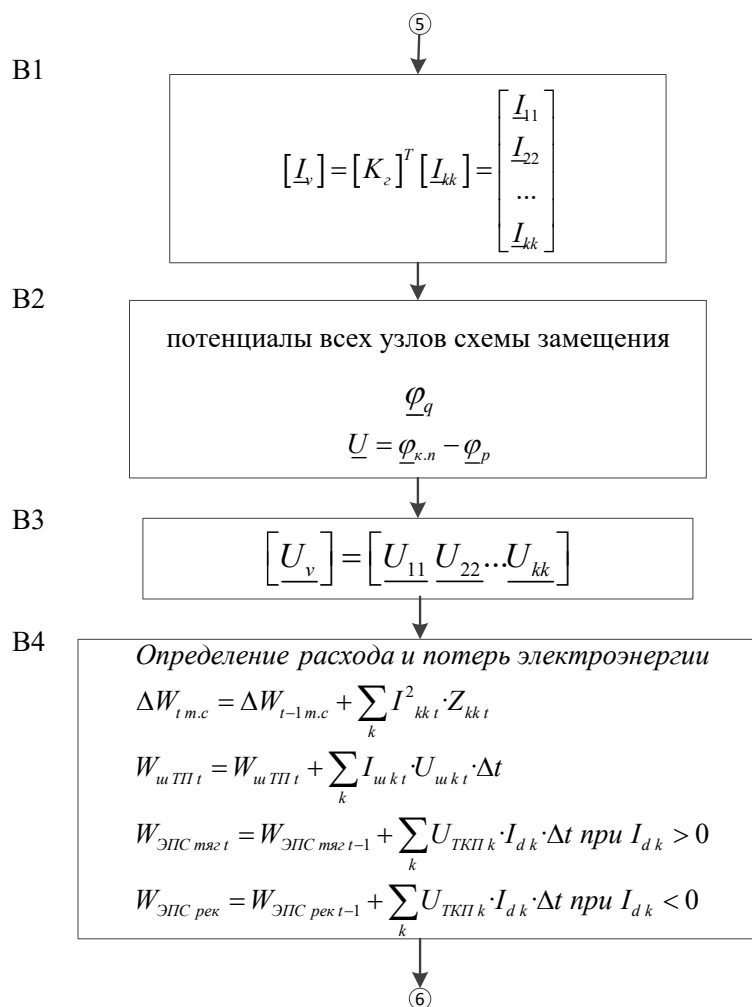


Рисунок 4.4 – Блоки Б и В способа расчета

Предложенный способ позволяет повысить точность расчетов ТР и ЭР и может применяться при имитационном моделировании взаимодействия ЭПС и СТЭ, в частности, при рассмотрении различных схем питания и секционирования и вариантов усиления СТЭ, а также для оценки эффективности применения различных регулируемых устройств.

Дальнейшее совершенствование способа расчета показателей СТЭ в установившихся режимах связано со следующими направлениями: дополнение схемы замещения СТЭ схемами и алгоритмами работы регулируемых устройств; использование базы данных ТР при проведении вычислений показателей работы СТЭ.

Высокая вычислительная сложность представленного выше усовершенствованного способа расчета обуславливает поиски наиболее эффективных алгоритмов расчетов, которые позволяют получить адекватные результаты. Одним из таких способов является способ, отличающийся от традиционных тем, что учет изменения напряжения происходит на основе использования базы данных ТР, выполненных для различных уровней напряжения и скоростей движения.

Исходя из допустимого диапазона напряжений на токоприемнике в диапазоне от  $U_{\min}$  до  $U_{\max}$  перед проведением ЭР формируется база данных тяговых расчетов для вариантов, отличающихся уровнем напряжения на токоприемнике и технической скоростью движения поезда. Полученный массив поездов формирует базу данных по маркерам напряжения, скорости и ординаты, которая в дальнейшем используется для проведения ЭР. Тяговые расчеты проводятся для допустимых значений уровня напряжения на токоприемнике и скоростями движения, изменяющихся с заданным шагом  $\Delta U$  и  $\Delta V$  соответственно.

База данных ТР представляет собой массив данных размером  $n \times m$ , в каждой ячейке которых хранится ряд данных тяговых расчетов, содержащих информацию об уровне напряжения, скорости движения, ординате и токе поезда.

Количество строк  $n$  и столбцов  $m$  массива данных определяется по выражениям соответственно:

$$n = \frac{U_{\text{макс}} - U_{\text{мин}}}{\Delta U} \text{ и } m = \frac{V_{\text{макс}} - V_{\text{мин}}}{\Delta V}. \quad (4.21)$$

Формирование базы данных осуществляется для каждого типа ЭПС, массы и других параметров поезда в обоих направлениях движения.

На каждом шаге ЭР для единицы ЭПС выбирается ТР, который по уровню напряжения и скорости движения наиболее близок к расчетным значениям. По данным расчета определяется ток поезда. Нагрузка поезда принимается для расчета мгновенной схемы, по результатам решения которой определяются токи во всех ветвях схемы на текущем шаге и напряжения во всех узлах. Расчетный уровень напряжения на токоприемниках используется на следующем шаге для выбора тягового расчета, наиболее близкого к расчетному значению.

На первом шаге расчетов (рисунок 4.5) напряжение на токоприемнике каждой единицы ЭПС  $U_1$  принимается равным номинальному значению  $U_{\text{ном}}$ :

$$U_1 = U_{\text{ном}}. \quad (4.22)$$

На втором и последующем шагах ЭР напряжение на токоприемнике определяется на основе нагрузки поезда, находящегося на определенной ординате  $j$ :

$$I_i = f(j, U_m, V_n), \quad (4.23)$$

определяемой по ТР, выбираемому по наиболее близким к расчетным значениям напряжению  $U_n$  и скорости  $V_m$ .

Напряжение  $U_n$  и скорость  $V_m$  ТР на  $i$ -ом шаге выбираются по критерию минимального отклонения расчетных значений  $U_i$  и  $V_i$  от значений ТР соответственно:

$$\begin{aligned} |U_n - U_i| &\rightarrow \min; \\ |V_m - V_i| &\rightarrow \min. \end{aligned} \quad (4.24)$$

Ток поезда определяется из массива данных соответствующего расчета для определенных  $n$  и  $m$  значений для  $j$ -й ординаты в расчетный момент времени на  $i$ -м шаге расчетов:

$$\forall n, m, j, i \rightarrow I_{ijmn}. \quad (4.25)$$

На начальном этапе расчетов выполняется подготовка расчетных данных и параметров схемы замещения СТЭ (блок 1). На следующем шаге реализации способа выполняются тяговые расчеты для формирования базы данных по заданным диапазонам изменения напряжения на токоприемнике и скорости движения (блок 2). Определение показателей работы начинается с начального времени расчетов (блок 3), являющегося точкой отсчета, и определения ординаты  $j$  ЭПС в границах расчетного участка (блок 4). На следующем этапе выполняется расчет электрических величин на основе мгновенных схем (блок 5), в ходе которого определяются напряжения на токоприемниках ЭПС. Результаты расчетов по мгновенной схеме на  $i$ -м шаге расчетов записываются для последующего расчета интегральных показателей работы (блок 6). Выбор тягового расчета в зависимости от уровня напряжения и скорости выполняется в блоке 7. По результатам выбора определяется нагрузка поезда (блок 8), используемая на следующем шаге расчетов. Блок 9 увеличивает расчетное время на шаг расчетов, для последующей проверки окончания расчетов (блок 10). На заключительном этапе выполняется расчет интегральных энергетических показателей (блок 11) на основе записанных данных расчета.

Предложенный способ позволяет определить энергетические показатели СТЭ на основе сформированного массива данных ТР с учетом изменяющихся нагрузки и напряжения на токоприемнике ЭПС.

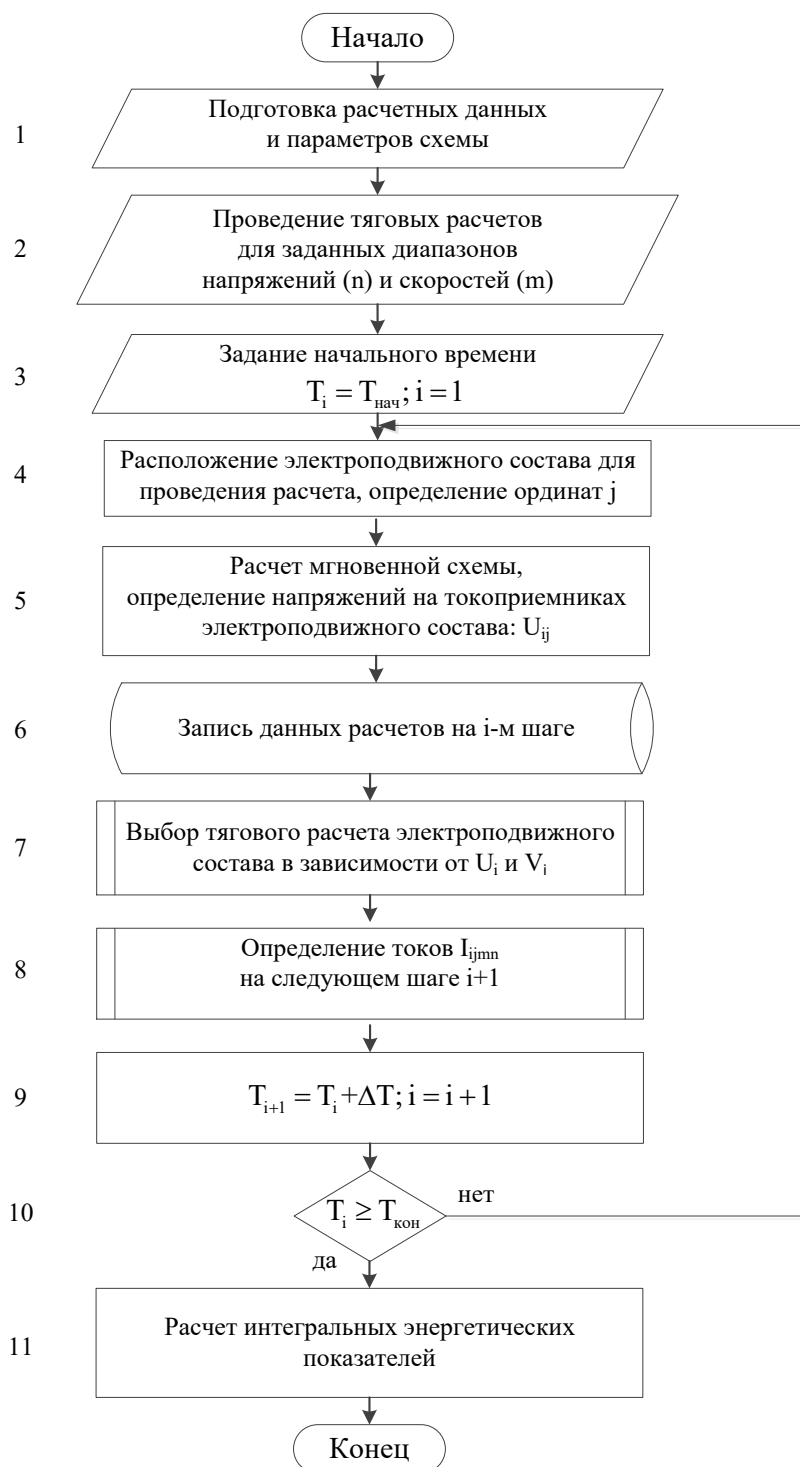


Рисунок 4.5 – Алгоритм расчета показателей работы системы тягового электроснабжения

Перспективными исследованиями в области совершенствования способов являются разработка и дополнение схемы замещения СТЭ следующими устройствами: автоматического бесконтактного регулирования напряжения; управляемые статические преобразователи (выпрямительные и инверторные);

автоматического регулирования напряжения под нагрузкой силовых понижающих трансформаторов; регулируемые средства компенсации реактивной мощности (статические компенсаторы, генераторы и дискретно регулируемые устройства); вольт-добавочные трансформаторы, пункты преобразования напряжения и др.

#### 4.2 Имитационная модель системы тягового электроснабжения с системой накопления электроэнергии

Проведение натуральных экспериментов в СТЭ сопряжено с рядом сложностей, связанных с необходимостью предоставления технологических «окон» или с условиями безостановочного пропуска поездов. Необходимость технико-экономической оценки при трудностях проведения натуральных экспериментов обуславливает проведение имитационного моделирования, позволяющего оценить изменение энергетических показателей работы СТЭ до и после внедрения электрооборудования, изменения технологии или режимов работы.

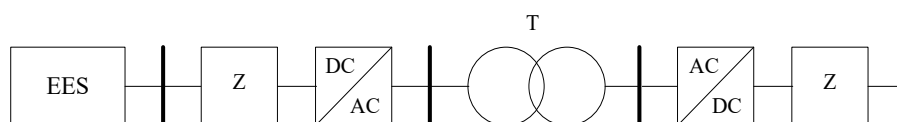
К преимуществам имитационного моделирования относят возможность оценки влияния одного или различного сочетания нескольких факторов на энергетические показатели работы СТЭ, чего сложно добиться при проведении натуральных экспериментов [112, 140 – 143].

Оценка эффективности работы СНЭЭ при решении задач по стабилизации напряжения и выравниванию графика электрической нагрузки связана с проведением расчетов по оценке изменения энергетических показателей СТЭ (электропотребление на тягу, технические потери электроэнергии, удельный расход электроэнергии, удельная рекуперация, напряжение на токоприемнике, нагрузка силового оборудования и др.) в условиях работы до и после их внедрения [74, 144].

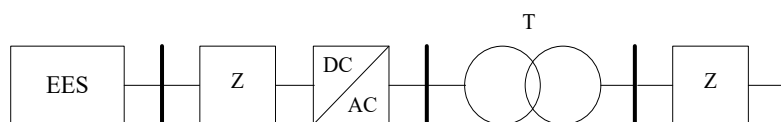
Имитационное моделирование является одним из основных способов оценки эффективности работы силового оборудования и режимов, позволяющим

оценить энергетические показатели СТЭ. В холдинге «РЖД» применяется ряд программ, реализующих имитационное моделирование работы ЭПС и СТЭ. Для выполнения тяговых расчетов применяются следующие специализированные программные комплексы: «Комплекс расчетов тягового электроснабжения (Кортэс)», «Искра-ПТР», ПК «ЭРА», *MoveRW*, «Вектрум». Помимо указанных программных комплексов при исследованиях работы СТЭ применяются специальные моделирования, например, вычислительные среды *Matlab*, *Comsol* и другие аналоги.

Определение энергетических показателей СТЭ при размещении в ней СНЭЭ выполняется на основе дополненной соответствующим элементом схемы замещения. Структурная схема СНЭЭ для применения в СТЭ постоянного и переменного тока приведена на рисунке 4.6 а и б соответственно. Схема содержит НЭЭ (EES), фильтры (Z), преобразователи постоянно-постоянного (DC/DC), переменного-постоянного (AC/DC) и постоянно-переменного (DC/AC) тока.



а



б

Рисунок 4.6 – Структурная схема системы накопления электроэнергии для системы тягового электроснабжения постоянного (а) и переменного (б) тока

Управление режимами СНЭЭ осуществляется в зависимости от решаемых задач, например, связанных с регулированием уровня напряжения или выравниванием графика нагрузки. В первом случае управление режимами

осуществляется по рабочим диапазонам напряжений, во втором – в зависимости от уровня тяговой нагрузки.

Для исследуемой схемы замещения СТЭ допустимо представить преобразователи в виде коммутатора  $S$ , обеспечивающего включенное и отключенное состояние СНЭЭ (рисунок 4.7):

$$\forall U_{зар} > U_{раз} \rightarrow S = 1: U_{зар} < U_i \vee U_i < U_{раз}; S = 0: U_{раз} \leq U_i \leq U_{зар}. \quad (4.26)$$

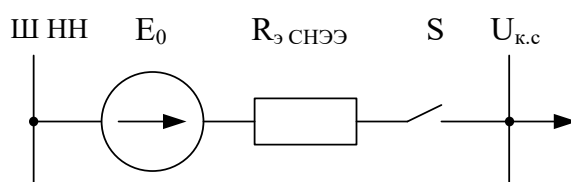


Рисунок 4.7 – Схема замещения системы накопления электроэнергии

Эквивалентное сопротивление СНЭЭ для включенного положения  $S$  определяется по формуле:

$$R_{э СНЭЭ} = \frac{U_{НН}^2}{k_{тр Н-В}^2} \cdot \left( \frac{u_{кТ}}{100 \cdot n_p \cdot n_T \cdot S_{Тном}} \right) + R_{пр}, \quad (4.27)$$

где:  $R_{пр}$  – сопротивление преобразователей СНЭЭ.

С учетом того, что сопротивление трансформатора значительно превышает сопротивление преобразователей, последним в формуле (4.90) можно пренебречь.

При введении в расчетную схему замещения СНЭЭ схема преобразуется в следующую, приведенную на рисунке 4.8.

Для отключенного положения  $S$  эквивалентное сопротивление принимается равным бесконечности. Переключение ключа  $S$  в схеме позволяет реализовать расчеты для трех режимов СНЭЭ в зависимости от уровня напряжений в контактной сети. Граничными значениями в этом случае являются напряжения для перехода в режим заряда  $U_{зар}$  и разряда  $U_{раз}$ .

При ограничении мощности СНЭЭ в расчеты вводится значение максимального тока  $I_{\text{макс}}$ , по достижении которого ток стабилизируется на указанном уровне. Реализация алгоритма расчетов энергетических показателей приведена на рисунке 4.9.

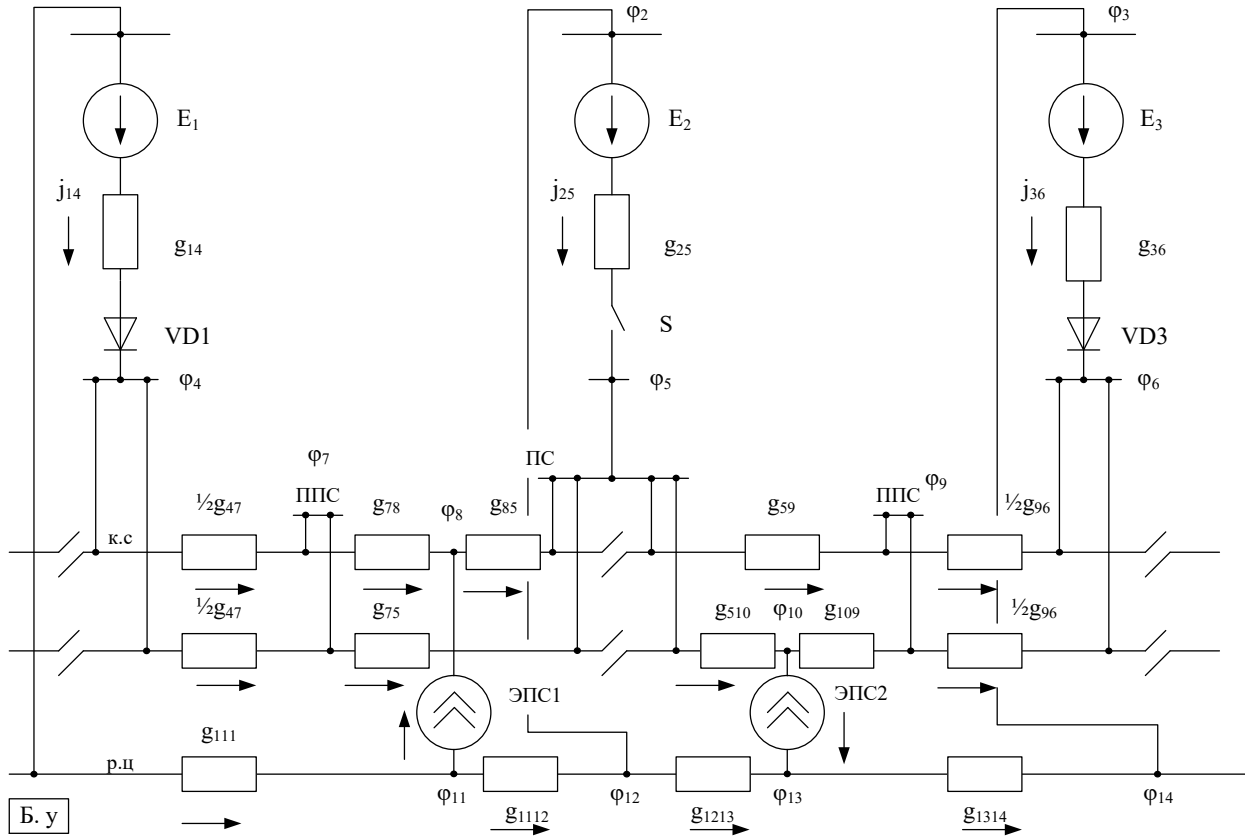


Рисунок 4.8 – Схема замещения межподстанционной зоны с системой накопления электроэнергии

Результатами расчета являются данные об изменении тока, напряжения, электропотребления по режимам работы СТЭ, степени заряженности и глубины разряда СНЭЭ. В случае решения задачи выбора энергоемкости для заданной номинальной мощности представленный алгоритм дополняется блоком проверки граничных условий степени заряженности.

В этом случае для рассматриваемой схемы замещения с учетом состояния ключа  $S$  определяется значение и направление тока, напряжение, что позволяет определить кумулятивное значение энергии НЭЭ  $W(t)$  и степень его заряженности:

$$SoC(t) = \frac{W(t)}{W_{\text{НОМ НЭЭ}}} \cdot \eta \cdot 100, \quad (4.28)$$

где:  $W_{\text{НОМ НЭЭ}}$  – номинальная энергоемкость НЭЭ;

$\eta$  – коэффициент полезного действия СНЭЭ, определяемый с учетом потерь в преобразователях.

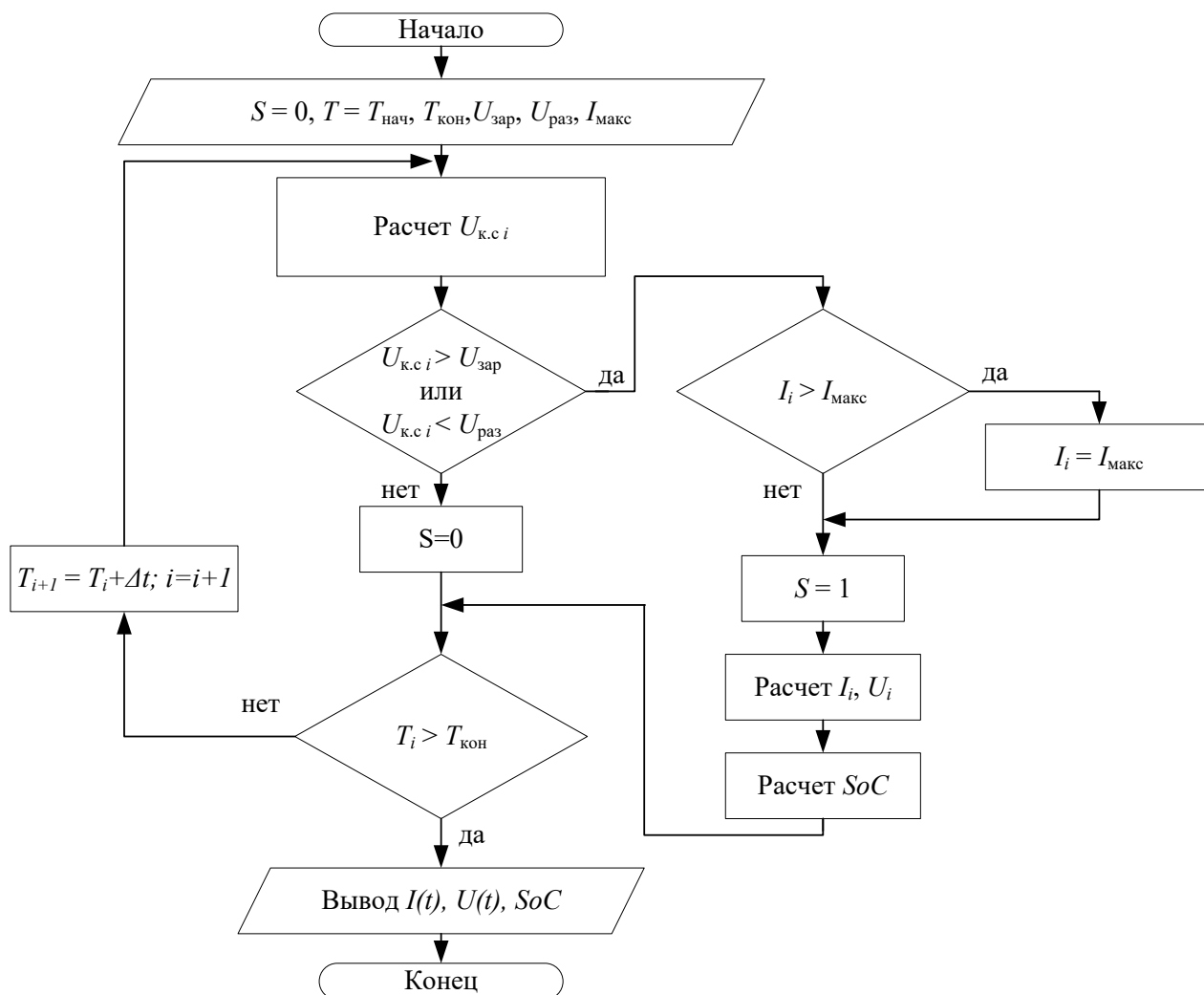


Рисунок 4.9 – Алгоритм расчетов энергетических показателей системы тягового электроснабжения с системой накопления

На основании схемы замещения и алгоритма работы СНЭЭ предложен усовершенствованный способ определения энергетических показателей СТЭ, отличающийся от известных учетом особенностей и режимов работы СНЭЭ на объектах тягового электроснабжения [145].

### 4.3 Способы расчета параметров систем накопления

При оценке параметров СНЭЭ используются различные подходы, зависящие от специфики решаемых задач, особенностей нагрузки и мест размещения. На основе существующих исследований можно сформировать три основных подхода, сложившихся в вопросе определения мощности и энергоемкости СНЭЭ, в основе которых лежит получение усредненных значений, определение параметров на основе максимальных значений или расчет по наиболее наблюдаемым значениям.

В работах, посвященных исследованиям в области гибридного маневрового локомотива [28 – 30, 259], предложена методика расчета энергоемкости бортового НЭЭ. Расчет основан на среднестатистических энергетических показателях работы локомотива.

Если рассматривать смену режимов работы тепловоза как цикл, то для интервала цикличности средняя мощность генератора определяется по формуле:

$$P_{\Gamma \text{ ср}} = \frac{1}{T} \int_0^T p_{\Gamma}(t) dt, \quad (4.29)$$

где:  $p_{\Gamma}$  – мощность тягового генератора на интервале времени  $[0; T]$ .

Рассматривая работу НЭЭ совместно с генератором тепловоза, можно определить сокращение накопленной энергии при разряде по формуле:

$$\Delta W_{\text{р}}^{\text{НЭЭ}} = W_{\text{т}} - W_{\Gamma} = W_{\text{т}} - P_{\Gamma \text{ ср}} \Delta t, \quad (4.30)$$

где:  $W_{\text{т}}$  – объем энергии, потребляемый в режиме тяги;

$\Delta t$  – продолжительность работы в режиме разряда;

$W_{\Gamma}$  – объем энергии, вырабатываемый генератором.

Приращение энергии НЭЭ в режиме заряда определяется по уравнению:

$$\Delta W_{\text{з}}^{\text{НЭЭ}} = W_{\text{торм}}^{\text{ТЭД}} + P_{\Gamma \text{ ср}} \Delta t, \quad (4.31)$$

где:  $W_{\text{торм}}^{\text{ТЭД}}$  – энергия, генерируемая тяговыми электродвигателями (ТЭД) в режиме электрического торможения.

Исходя из принципа обеспечения приема или отдачи объема энергии НЭЭ в тяговом режиме или режиме электрического торможения при средней мощности генератора тепловоза необходимая энергоемкость определяется с учетом цикличности как максимальный объем в режимах заряда или разряда:

$$W^{\text{НЭЭ}} = \max \left\{ \max \left( W_3^{\text{НЭЭ}} \right), \max \left( W_p^{\text{НЭЭ}} \right) \right\} + W_{\text{зап}}, \quad (4.32)$$

где:  $W_{\text{зап}}$  – неиспользуемый запас энергоемкости НЭЭ, необходимый для обеспечения работы.

Максимальная мощность НЭЭ в режиме разряда определяется по формуле:

$$P_{p \text{ max}}^{\text{НЭЭ}} = \max \left( P_{г.т} \right) - P_{г \text{ ср}}, \quad (4.33)$$

где:  $P_{г.т}$  – мощность, потребляемая генератором.

Максимальная мощность НЭЭ в режиме заряда определяется по выражению:

$$P_{з. \text{ max}}^{\text{НЭЭ}} = \max \left( P_{\text{ТЭДТ}} \right) + P_{г \text{ ср}}, \quad (4.34)$$

где:  $P_{\text{ТЭДТ}}$  – мощность тяговых электродвигателей при электрическом торможении.

Начальный объем энергии, запасенный в НЭЭ, определяется следующим образом. На первом этапе принимают значение запасенной НЭЭ для конца расчетного периода ( $W_{\text{кон}}$ ). Далее определяется энергия, соответствующая потребляемой мощности, развиваемой двигателями  $p_m(t)$ , и средняя мощность.

Если на рассматриваемом интервале мощность тяговой нагрузки превышает среднюю мощность, что соответствует режиму разряда, то изменение объема электроэнергии НЭЭ составит при  $p_m(t) > P_{г \text{ ср}}$ :

$$\Delta W_i^{\text{НЭЭ}} = W_i^{\text{НЭЭ}} - W_{i+1}^{\text{НЭЭ}} = \int_{t_i}^{t_{i+1}} \left( p_m(t) - P_{г \text{ ср}} \right) dt > 0. \quad (4.35)$$

Если мощность тяговой нагрузки ниже уровня средней мощности, что соответствует режиму заряда, то изменение объема электроэнергии НЭЭ составит при  $p_M(t) < P_{Г\text{ ср}}$ :

$$\Delta W_i^{\text{НЭЭ}} = \int_{t_i}^{t_{i+1}} (p_M(t) - P_{Г\text{ ср}}) dt < 0. \quad (4.36)$$

Начальное значение энергии для работы НЭЭ определяется по формуле:

$$W_{\text{нач}}^{\text{НЭЭ}} = W_{\text{кон}}^{\text{НЭЭ}} + \sum_i \Delta W_i^{\text{НЭЭ}} = \int_{t_i}^{t_{i+1}} (p_M(t) - P_{Г\text{ ср}}) dt. \quad (4.37)$$

Недостатком указанного способа расчета является высокая погрешность в рамках цикла, связанная с использованием средней мощности генератора.

В ряде исследований в области гибридного привода указывается требуемая для тепловоза энергоемкость НЭЭ в диапазоне 100 – 120 МДж (27,8 – 33,3 кВт·ч) при мощности генератора  $P_G = 400$  кВт [31, 32, 34, 35, 260, 261].

При определении энергоемкости и мощности НЭЭ используются и другие подходы, опирающиеся на результаты измерений или имитационного моделирования, в ходе которых мощность и энергоемкость устанавливаются по средним, максимальным или наиболее наблюдаемым значениям.

Для определения энергоемкости НЭЭ используется один из известных способов, основанный на определении статистической вероятности появления избыточной энергии рекуперации в месте потенциального размещения устройства [146]. Способ определения энергоемкости основан на результатах имитационного моделирования работы НЭЭ в СТЭ. Значение энергоемкости предложено определять через математическое ожидание величины возврата энергии рекуперации в выбранном месте размещения НЭЭ.

Определение значения энергоемкости на основе среднего значения возврата энергии рекуперации имеет свои недостатки, выражающиеся в том, что в данном случае не учитывается цикличность работы режимов НЭЭ. Указанное

допущение приводит к ряду неточностей в расчетах. Например, при следовании подряд двух эпизодов заряда или разряда второй и последующий эпизоды вследствие полного заряда или разряда не переведут НЭЭ в соответствующий режим. Это приведет к потере избыточной энергии рекуперации или дефициту энергии соответственно.

В рассматриваемом случае математическое ожидание запасенной в НЭЭ определяется по выражению:

$$M(W_{\text{зап}}) = \int_0^{W_{\text{max}}} f(W_{\text{изб}}) W_{\text{изб}} dW_{\text{изб}}, \quad (4.38)$$

где:  $W_{\text{max}}$  – максимальное значение энергии рекуперации в месте подключения НЭЭ к СТЭ;

$f(W_{\text{изб}})$  – функция распределения плотности вероятностей появления избыточной энергии рекуперации в месте подключения НЭЭ.

В случае, если энергоемкость НЭЭ в СТЭ  $W_{\text{НЭ}} < W_{\text{max}}$ , математическое ожидание избыточного объема электроэнергии  $W_{\text{изб}}$ , который не может быть принят НЭЭ:

$$M(W_{\text{изб}}) = \int_{W_{\text{НЭ}}}^{W_{\text{max}}} f(W_{\text{изб}}) W_{\text{изб}} dW_{\text{изб}}. \quad (4.39)$$

Указанным образом определяется мощность НЭЭ как математическое ожидание мощности, наблюдаемой при возврате электроэнергии. В описанном способе расчета не рассмотрены способы определения энергоемкости и мощности, соответствующие режиму разряда НЭЭ.

Известны другие подходы к определению мощности и энергоемкости НЭЭ. Если рассматривать график нагрузки автономного участка энергосистемы, то НЭЭ предлагается применять для выравнивания суточного графика [147, 148]. В предложенном способе мощность НЭЭ определяется по выражению:

$$P_{\text{НЭЭ}} = P_{\text{max}} - P_{\text{cp}}, \quad (4.40)$$

где:  $P_{\text{max}}$  – максимальная мощность электростанции (потребителя);

$P_{\text{cp}}$  – средняя мощность.

Поскольку НЭЭ предлагается использовать для выравнивания суточного графика нагрузки, энергоемкость НЭЭ определяется исходя из диаграммы изменения энергии накоплением, формируемой на основе графика мощности НЭЭ в обоих режимах работы (заряд и разряд). В этом случае энергоемкость определяется как максимальный размах значений энергии в режимах заряда  $W_{\text{зар max}}$  и разряда  $W_{\text{раз max}}$ :

$$W_{\text{НЭ}} = W_{\text{зар max}} - W_{\text{раз max}}. \quad (4.41)$$

Если рассматривать влияние на энергоемкость НЭЭ различных факторов, то следует учитывать мощность ЭПС, ускорение, скорость движения, протяженность цикла «разгон – выбег – торможение», например, как это показано при рассмотрении городского транспорта [149, 323].

Помимо рассмотренных подходов определения мощности и энергоемкости НЭЭ предложен способ, опирающийся на статистическую обработку результатов моделирования и выбора требуемой мощности и энергоемкости при работе НЭЭ в режимах заряда и разряда [150 – 153]. Полученные в ходе имитационного моделирования графики нагрузки НЭЭ в режиме заряда и разряда позволяют получить наиболее наблюдаемые диапазоны значений мощности, энергоемкости, продолжительности эпизодов работы в различных режимах.

#### 4.4 Разработка методики расчета параметров систем накопления и выбора мест размещения

С целью повышения эффективности работы СТЭ проектируемые СНЭЭ для выбранных мест размещения должны обладать определенными

параметрами, позволяющими решать задачи по повышению эксплуатационной и энергетической эффективности. Для определения параметров систем предлагается методика, включающая в себя следующие основные этапы.

#### 1. Постановка задачи, сбор исходных данных.

Применение СНЭЭ позволяет решать ряд задач, к основным из которых относят повышение нагрузочной способности СТЭ и энергетической эффективности.

В зависимости от необходимости улучшения того или иного показателя нагрузочной способности определяется место размещения системы: для снижения перегрузки силового оборудования системы располагаются на тяговых подстанциях; для повышения уровня напряжения в контактной сети – на линейных пунктах СТЭ.

Лимитирующие показатели нагрузочной способности определяются на основе расчетов пропускной способности для текущих условий пропуска поездов и на перспективу с учетом модернизации и реконструкции СТЭ. В соответствии с этими значениями выполняется отбор межподстанционных зон для размещения СНЭЭ.

При решении задач по повышению энергетической эффективности выбор СНЭЭ осуществляется в зависимости от уровня избыточной энергии рекуперации и цикличности тяговой нагрузки. Выбор места размещения СНЭЭ зависит от характеристик профиля пути участка, определяющих тяговую нагрузку и условия применения рекуперативного торможения. Потенциальными местами размещения СНЭЭ являются участки с горным типом профиля (III и IV типы), характеристики которых свидетельствуют о переломности профиля и возможности эффективного применения рекуперативного торможения.

Дополнительной характеристикой профиля пути, оказывающей влияние на формирование электротяговой нагрузки, является количество участков с ограничением скорости движения. Введение ограничений скорости приводит к появлению дополнительных участков торможения и разгона поезда, необходимых для сохранения технической скорости и увеличивает потенциал рекуперации. Для указанного случая условия рекуперации оцениваются по удельному весу ограничений на участке:

$$k_n = \frac{n_{\text{огр}}}{l_{\text{уч}}}, \quad (4.42)$$

где:  $n_{\text{огр}}$  – количество мест с ограничениями скорости на участке;

$l_{\text{уч}}$  – протяженность участка, 100 км;

и среднему отклонению ограничений скорости от установленной скорости движения на участке по формуле:

$$k_V = \frac{\sum_i (V_{\text{уст}} - V_i)}{n_{\text{огр}} \cdot V_{\text{уст}}} \cdot 100 \%, \quad (4.43)$$

где:  $V_{\text{уст}}$  – установленная на участке скорость движения;

$V_i$  – установленное в  $i$ -м месте ограничение скорости.

Наибольший потенциал рекуперативного торможения соответствует значениям коэффициентов  $k_n \geq 0,1$  и  $k_V \geq 0,2$ . Средний уровень энергии рекуперации соответствует ориентировочному диапазону значений  $0,1 > k_n \geq 0,03$  и  $0,2 > k_V \geq 0,1$ . Наименьший объем энергии рекуперации будет соответствовать значениям  $0,03 > k_n \geq 0$  и  $0,1 > k_V \geq 0$ .

Влияние профиля пути на уровень энергетической эффективности дополнительно оценивается по предложенным коэффициентам  $\alpha$  и  $\beta$ . При применении рекуперативного торможения наибольший уровень энергоэффективности наблюдается в диапазоне значений  $\alpha$  от 0,08 до 0,12 о.е., в диапазоне значений  $\beta$  – от 5 до 20 %. В случае, если рекуперативное торможение не применяется диапазоны коэффициентов изменяются: для  $\alpha$  – от 0,01 до 0,08 о.е., для  $\beta$  – от 10 до 50 %.

Выбранные по указанным характеристикам профиля пути участки (тип, переломность профиля и ограничения скорости) обладают повышенным потенциалом рекуперации и рекомендуются для проведения расчетов для выбора мест размещения СНЭЭ, их мощности и энергоемкости.

## 2. Проведение тяговых расчетов для заданных условий движения поездов

Проведение ТР для участков, выбранных на первом этапе, позволяет перейти к расчету и построению графиков тяговой нагрузки подстанций, уровня напряжения в контактной сети в границах межподстанционных зон выбранных участков. Выполнение расчетов производится для условий приведенного профиля пути с указанием мест постоянного ограничения скорости.

Исходными данными для проведения расчетов является база данных о характеристиках профиля пути, весовые нормы поездов, обращающихся на участке, ординаты станций и остановочных пунктов, места остановок, серии локомотивов, эксплуатируемые на участке, средний уровень напряжения на токоприемнике по результатам поездок.

Для подтверждения потенциала рекуперации энергии ТР выполняются для средних масс поездов каждого диапазона с шагом не более 1000 т. Для оценки показателей работы СТЭ на средне- и долгосрочную перспективу ТР выполняются для планируемых значений скоростей, масс составов и серий ЭПС.

Проведение ТР в ПК «Кортэс» (графики тяговой нагрузки ЭПС, полученные для условий следования поезда в обоих направлениях, с привязкой к ординатам для участка Литвиново – Мариинск для локомотива серии 2ЭС6 с поездом массой 4200 т приведены на рисунке 4.10) позволяет определить энергетические показатели движения поезда (мощность, расход электроэнергии, смену режимов, удельный расход и рекуперацию энергии; график расхода электроэнергии для рассматриваемого примера приведен на рисунке 4.11).

## 3. Выполнение электрических расчетов

### а. Определение потенциала рекуперации по объектам СТЭ

Потенциал рекуперации энергии по всем объектам СТЭ позволяет оценить возможность заряда СНЭЭ при возникновении избыточной энергии рекуперации.

Потенциальными объектами размещения СНЭЭ являются ТП и линейные устройства с уровнем расчетного возврата энергии выше среднего уровня на участке, который определяется по формуле:



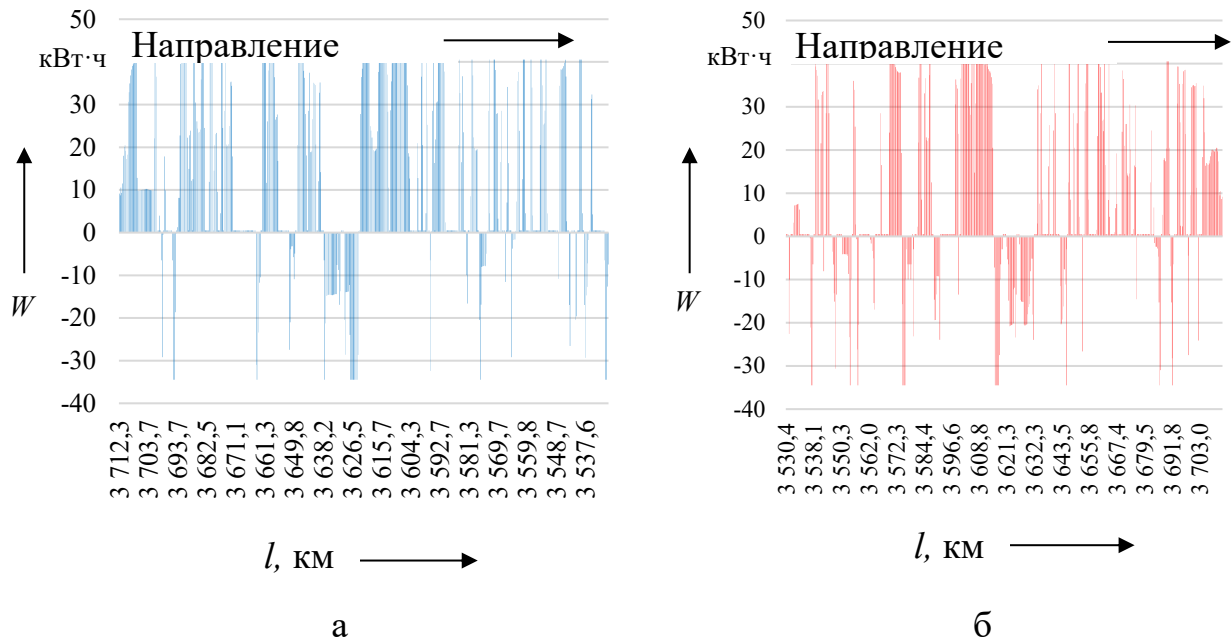


Рисунок 4.11 – График потребления энергии по 15-секундным интервалам для локомотива серии 2ЭС6 в нечетном (а) и четном (б) направлениях

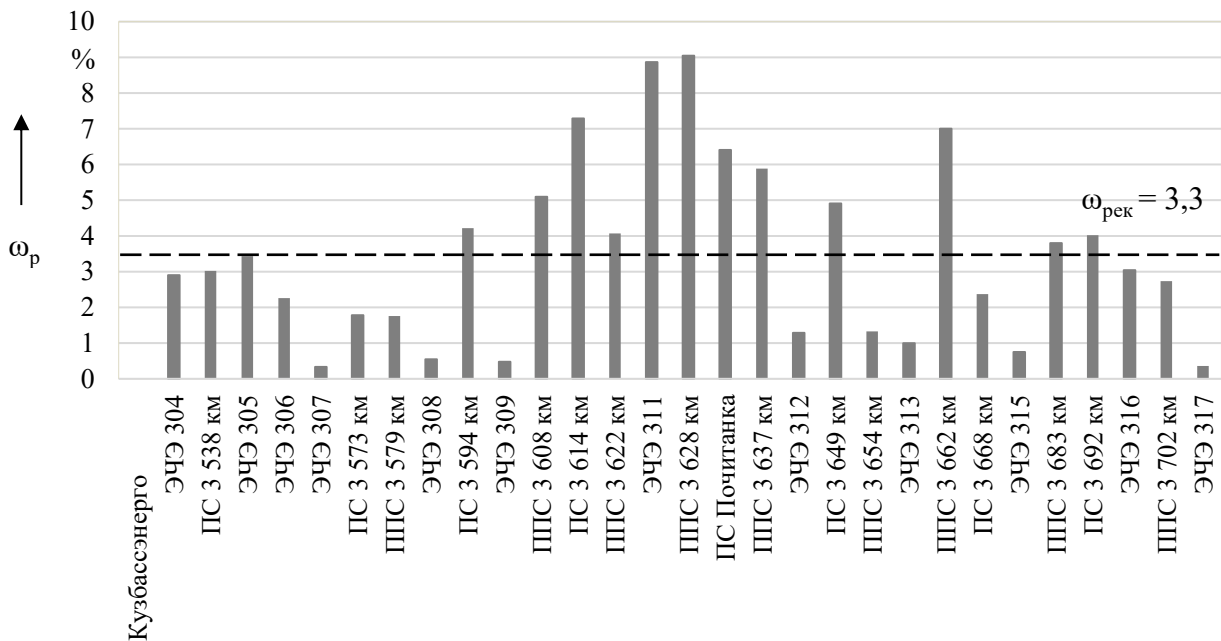


Рисунок 4.12 – График потенциального объема возврата энергии рекуперации по объектам участка

б. Определение особенностей режимов питания межподстанционных зон

Электрические расчеты выполняются для нормального и возможных вынужденных режимов питания (двусторонний, односторонний, консольный, односторонний с разделом, раздельный, узловый, параллельный и комбинированный режимы питания) межподстанционных зон. Перечень

возможных вынужденных режимов питания межподстанционных зон определяется для неэлектрифицированных участков на этапе проектирования, для электрифицированных – эксплуатирующими организациями (дистанциями электроснабжения) по местным условиям [10].

Потенциальное размещение СНЭЭ в узлах объединения различных секций контактной сети для основных режимов питания межподстанционных зон приведено на рисунке 4.13.

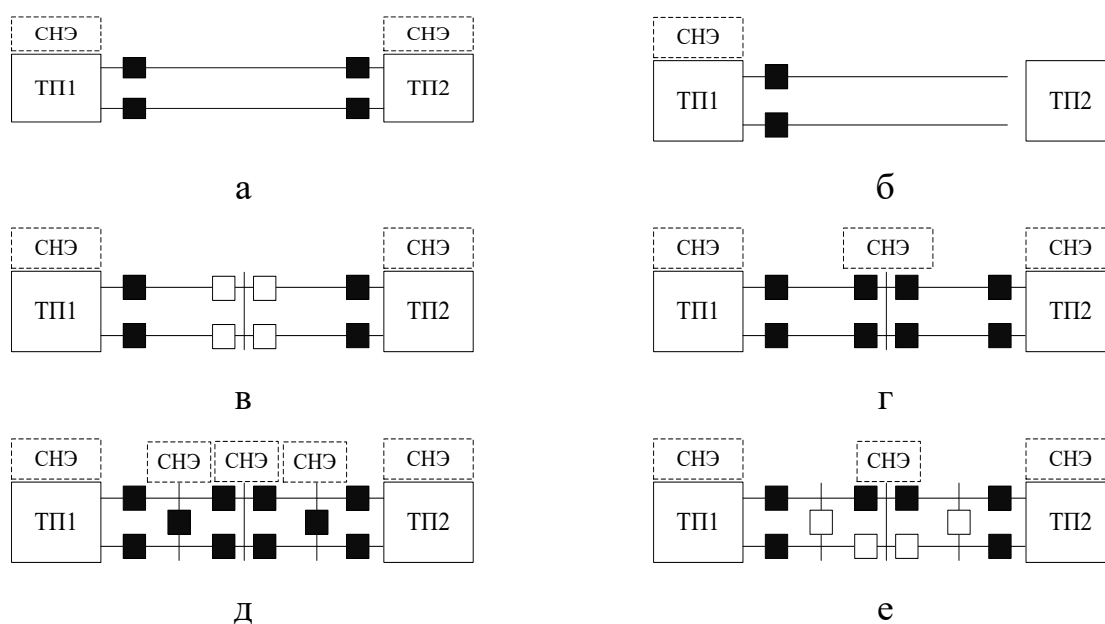


Рисунок 4.13 – Размещение систем накопления электроэнергии в границах межподстанционной зоны для режимов питания: отдельный (а), консольный (б), односторонний с разделом (в), узловый (г), параллельный (д), комбинированный (е)

Размещение СНЭЭ в границах межподстанционных зон позволяет использовать в нормальных режимах схемные преимущества объединения секций контактной сети для узловых или параллельных схем питания по сравнению с другими.

Сравнение условий рекуперации энергии выполняется для расчетных режимов питания межподстанционных. В качестве примера ниже приведено сравнение по изменению удельной рекуперации энергии для двух вариантов с различными режимами питания.

В качестве первого варианта рассмотрен двусторонний параллельный режим (при наличии линейных устройств), второго – двусторонний. Переход ко второму режиму питания сопровождается снижением удельной рекуперации энергии и объемов потенциального возврата электроэнергии на шины ТП суммарно на рассматриваемом участке более чем на 9 %, что детализировано по объектам участка на рисунке 4.14.

Ухудшение условий распределения мощности рекуперации в режимах питания, связанных с отключением или отсутствием связи между секциями контактной сети, обуславливает необходимость рассмотрения для внедрения СНЭЭ межподстанционные зоны, нормальным режимом питания которых является параллельный или узловый режимы питания.

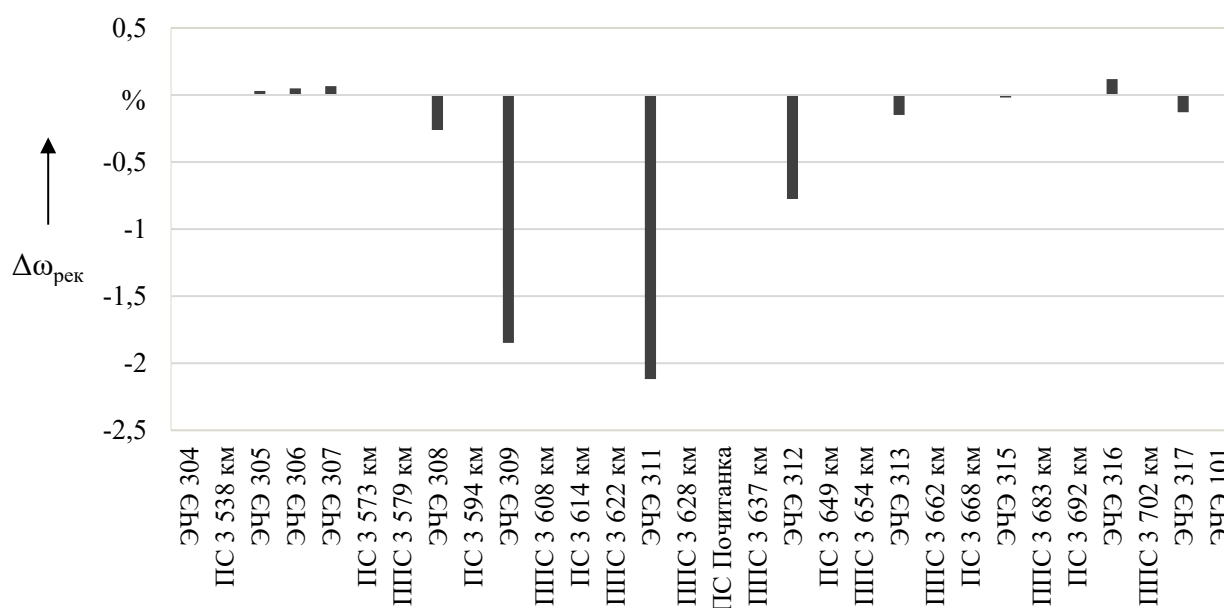


Рисунок 4.14 – Изменение объема потенциального возврата электроэнергии при изменении режима питания

в. Проведение электрических расчетов для расчетной схемы движения поездов

Расчетные схемы пропуска поездов позволяют определять пропускную способность участка в зависимости от условий формирования пакетов с поездами повышенной массы. Указанные схемы пропуска определяют электротяговую нагрузку, формирующуюся в границах межподстанционных зон. На данном этапе проведения ЭР рассматриваются варианты по размещению

СНЭЭ в СТЭ из числа мест, выбранных на основе анализа профиля пути участка и результатов ТР с учетом режимов питания и секционирования контактной сети.

В случае решения задачи повышения пропускной и провозной способности варианты размещения СНЭЭ дополняются межподстанционными зонами, являющихся лимитирующими по одному или более показателей нагрузочной способности.

Для сформированного перечня вариантов размещения СНЭЭ в межподстанционных зонах СТЭ выполняются расчеты показателей работы СТЭ.

г. Расчет показателей работы СТЭ при реализации заданного графика движения.

В результате расчета должны быть определены значения токов и напряжений, полученные с интервалами расчета 0,5, 1 или 3 мин для ТП, линейных устройств и СНЭЭ, напряжений на токоприемниках ЭПС, нагрева проводов и силового оборудования, расход и потери электроэнергии в тяговой сети и силовом оборудовании в рассматриваемом периоде времени.

Расчет изменения межпоездных интервалов и пропускной способности участка с целью оценки влияния мест размещения и параметров СНЭЭ.

В качестве базового варианта принимается вариант расчета пропускной способности СТЭ без применения СНЭЭ. Результаты базового варианта сравниваются с результатами расчетов по другим вариантам.

Расчеты по п. 1 и 2 проводятся для заданных внешних характеристик НЭЭ и пороговых напряжений, по достижении которых система переходит в один из возможных режимов работы (заряд, ожидание и разряд). Возможность реализации различных внешних характеристик и пороговых напряжений для смены режимов приводит к необходимости повторных расчетов в рассмотренных местах размещения.

При исследовании различных внешних характеристик и условий смены режимов работы электрические расчеты выполняются повторно и подлежат сравнению с аналогичными вариантами размещения, но другими характеристиками и настройками.

Указанные расчеты позволяют определить влияние СНЭЭ и их параметров на пропускную и провозную способность и энергетическую эффективность и

рассчитать предварительные значения мощности и энергоемкости. Указанные значения уточняются после проведения расчетов по мгновенным схемам с минимальным шагом расчетов (0,25 или 0,5 мин).

Расчет показателей СТЭ по мгновенным схемам выполняется с целью получения суточного графика нагрузки СНЭЭ и ТП, графика изменения напряжения.

Расчет по мгновенным схемам выполняется по заданному графику движения поездов для расчетных суток. В ходе указанного расчета определению подлежат мгновенные значения токов с заданным шагом моделирования в главной цепи СНЭЭ и ТП и напряжений на шинах 3,3 кВ. В качестве заданного графика могут быть использованы различные варианты, предусматривающие пропуск поездов повышенной массы на участке, например, по схемам «Н-с-с-с», «Н-с-Н-с» и др. («Н» – поезд наибольшей массы, «с» – поезд средней массы).

Ресурс работы СНЭЭ в системе определяется на основе анализа эпизодичности работы устройства, позволяющего определить среднюю продолжительность эпизода и суммарное количество эпизодов по режимам работы устройства, получить частотное распределение по продолжительности и объемам энергии [13]. На основе полученных данных строятся графики степени заряженности СНЭЭ для расчетных суток, по которым в дальнейшем выполняется оценка ресурса работы. Для гибридной СНЭЭ, состоящего из модулей с различными видами НЭЭ, оценка ресурса выполняется отдельно с учетом характеристик последних.

Электрические расчеты для определения энергоемкости СНЭЭ в СТЭ следует выполнять с учетом выбора пороговых напряжений, позволяющих переводить устройство из одного режима работы в другой. С учетом возможных ограничений, которые могут быть наложены на энергоемкость, в ходе расчетов уточняются значения пороговых напряжений и потенциальные потери энергии рекуперации при данном регулировании.

#### 4. Определение энергоемкости, мощности и режимов работы СНЭЭ

На следующем этапе на основе результатов расчетов определяются основные параметры СНЭЭ для СТЭ. Для выбранных условий управления режимами СНЭЭ по результатам электрических расчетов строится график изменения степени заряженности, определяется максимальная глубина разряда с учетом коэффициента полезного действия системы для каждого из режимов.

По результатам построения графика определяется количество циклов «заряд – разряд» и степень разряженности для последующей оценки преобладания режима работы (заряда или разряда) в графике нагрузки СНЭЭ и определения требований к ресурсу работы НЭЭ.

#### 5. Определение вида НЭЭ для систем и уточнение параметров

На данном этапе определяется вид НЭЭ, предназначенный для работы в составе СНЭЭ. Полученные на этапе расчетов параметры и требуемый ресурс работы позволяют выполнить выбор вида НЭЭ.

Выбор накопителя СНЭЭ выполняется с учетом следующих характерных особенностей тягового электроснабжения:

- резкопеременная тяговая нагрузка;
- переменная мощность и энергия рекуперации;
- изменение рабочего напряжения в контактной сети в широком диапазоне.

При выборе вида НЭЭ необходимо учитывать их особенности, в том числе гибридных систем (использование двух различных видов). Так, при выборе электрохимических НЭЭ необходимо принимать во внимание ограниченный ресурс их работы, его зависимость от глубины разряда и цикличности работы, ограничения по току заряда и разряда, рабочий температурный диапазон. При выборе суперконденсаторов и кинетических НЭЭ определяющим для оценки эффективности работы будет являться саморазряд, приводящий к потере накопленной энергии.

На данном этапе уточняются параметры СНЭЭ, относящиеся к подсистемам накопления, преобразования и защиты [154]. Для подсистемы накопления уточняются: нормированная энергоемкость, входная и выходная мощности, эффективность заряда/разряда, расчетный срок службы, саморазряд,

электропотребление на собственные нужды и др.; для подсистемы преобразования: время отклика; контроль статизма, мощность короткого замыкания и др.; для подсистемы защиты: виды и уставки защит и автоматики.

6. Сравнение показателей для различных вариантов электротяговой нагрузки

Особенностью расчетов пропускной способности на участках железных дорог является проведение ТР без применения рекуперативного торможения. В данном случае выполняется проверка возможности заряда СНЭЭ при ограничении зарядной характеристики по минимальному уровню напряжения в контактной сети. При необходимости для поддержания степени заряженности рассматривают варианты заряда СНЭЭ от других источников.

В условиях применения рекуперативного торможения устойчивость работы СНЭЭ повышается и дополнительно с решением задачи повышения пропускной и провозной способности решается задача повышения энергетической эффективности СТЭ. В этом случае СНЭЭ обеспечивают условия приема избыточной энергии рекуперации. При больших объемах энергии рекуперации требуется увеличение энергоемкости и мощности, значения которых будут превышать те, которые требовались для решения задачи повышения пропускной и провозной способности. В случае выхода показателей СНЭЭ за критические значения, параметры корректируются и расчет по определению параметров систем повторяется.

7. Технико-экономическое сравнение вариантов

Выбор конкурирующих вариантов размещения устройств при достижении заданных энергетических показателей работы СТЭ и повышения пропускной способности участка выполняется на основе укрупненных показателей стоимости СНЭЭ в качестве которой используются удельная стоимость мощности и энергоемкости.

Оценка вариантов выполняется на основе сроков окупаемости, рассчитываемых по данным о доходных и расходных ставках на перевозки на участке железной дороги, объеме перевозок, стоимости СНЭЭ, включающей в

себя стоимость НЭЭ, системы управления и преобразования, затрат на эксплуатацию системы на всем этапе жизненного цикла.

Разработанная методика по расчету параметров и выбору мест размещения СНЭЭ в СТЭ описывается следующим алгоритмом, приведенном на рисунке 4.15.

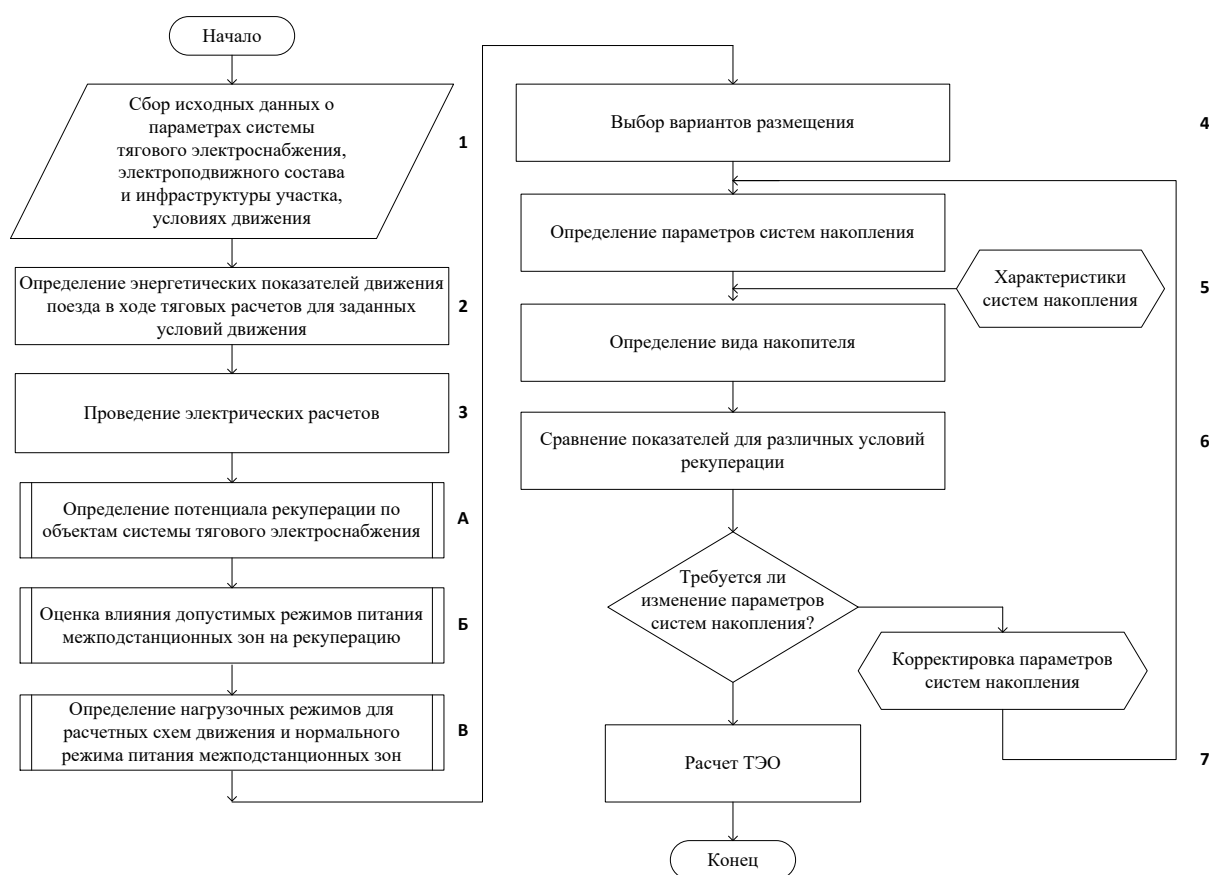


Рисунок 4.15 – Алгоритм методики расчета параметров и выбора мест размещения

Одним из направлений совершенствования расчета энергетических показателей СТЭ является применение базы тяговых расчетов, выполненных для различных скоростей движения электроподвижного состава и уровня напряжения на токоприемнике. Указанные способы расчета направлены на снижение вычислительной сложности и увеличение точности расчетов энергетических показателей [155].

#### 4.5 Выводы по четвертой главе

Предложен усовершенствованный способ расчета показателей работы СТЭ, позволяющий учитывать изменение напряжения на токоприемнике ЭПС в условиях работы СНЭЭ и применения рекуперативного торможения.

Усовершенствована имитационная модель СТЭ и ЭПС с учетом применения в СТЭ систем накопления электроэнергии.

Разработан алгоритм расчета энергетических показателей работы СТЭ с учетом работы СНЭЭ.

Усовершенствован способ определения параметров СНЭЭ и выбора их мест размещения в СТЭ, позволяющий учитывать показатели работы системы накопления электроэнергии.

Разработана методика определения параметров СНЭЭ и выбора мест их размещения при работе в СТЭ для решения задач пропускной и провозной способности участка железной дороги по устройствам тягового электроснабжения.

## 5 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ СИСТЕМ НАКОПЛЕНИЯ В ТЯГОВОМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИИ С УЧЕТОМ СПЕЦИФИКИ ФОРМИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОТЯГОВОЙ НАГРУЗКИ

В настоящей главе выполнен анализ результатов определения параметров систем накопления электроэнергии в различных условиях формирования электротяговой нагрузки. Рассмотрены электрифицированные одно- и двухпутные участки сети железных дорог России с преобладанием одного из видов движения – грузового или пассажирского. Получены зависимости изменения показателей работы систем накопления электроэнергии, позволяющие определять их параметры для различных условий формирования электротяговой нагрузки и расположения на линейных устройствах контактной сети и тяговых подстанциях. Предложены технические решения по подключению систем накопления электроэнергии в тяговом электроснабжении для решения задач по повышению нагрузочной способности и энергетической эффективности.

### 5.1 Определение параметров систем накопления для участков с преобладанием грузового движения

Определение параметров СНЭЭ непосредственно связано с условиями формирования электротяговой нагрузки, которые на участках с преобладанием грузового движения существенно отличаются от условий на участках с преобладанием пассажирского движения, что объясняется различной мощностью ЭПС и условиями организации движения поездов [157 – 159]. Условия работы СНЭЭ зависят от параметров и показателей работы СТЭ. Оценка эффективности СНЭЭ основана на расчетах их показателей работы, как это показано на примере действующих участков в [152, 160]. Широкое распространение НЭЭ электрохимического вида (например, литий-ионных аккумуляторов), используемых для сетевых СНЭЭ, обуславливает

необходимость учета глубины разряда и ограничений по входной и выходной мощности для оценки энергетических показателей и ресурса работы. Зарубежные исследования работы СНЭЭ в тяговом электроснабжении направлены на решение задач по оценке эффективности их работы для различных условий применения рекуперативного торможения и мест их размещения [325 – 333].

Повышение нагрузочной способности элементов СТЭ и энергетической эффективности связано с решением задач по стабилизации напряжения, выравниванию графика нагрузки и обеспечению условий приема энергии рекуперации. Указанные задачи решаются при помощи сетевых СНЭЭ, построение которых связано с использованием управляемых преобразователей различных родов тока. Производство сетевых СНЭЭ освоено отечественной промышленностью. В качестве примера можно привести СНЭЭ с линейкой мощности от 0,1 до 100 МВт [156].

В дальнейшем условия, режимы работы СНЭЭ в СТЭ и результаты определения их параметров рассматриваются на примере электрифицированных участков железных дорог ОАО «РЖД».

### *5.1.1 Двухпутные участки железных дорог*

#### *Участок Октябрьской железной дороги (Волховстрой – Бабаево)*

Основным показателем нагрузочной способности, ограничивающим пропускную способность на указанном участке, является низкий уровень напряжения на токоприемнике ЭПС. Фрагмент изменения напряжения на токоприемнике электровоза серии ЗЭС4К при следовании по одной из лимитирующих межподстанционных зон участка постоянного тока Волховстрой 1 – Бабаево Октябрьской железной дороги [160] приведен на рисунке 5.1. Для приведенного примера снижение напряжения ниже допустимого уровня является кратковременным и фиксируется в 2 % времени регистрации (рисунок 5.2), что является характерным для электротяговой нагрузки.



Рисунок 5.1 – График тока поезда и напряжения с локомотивом серии ЗЭС4К (масса поезда 9006 т)

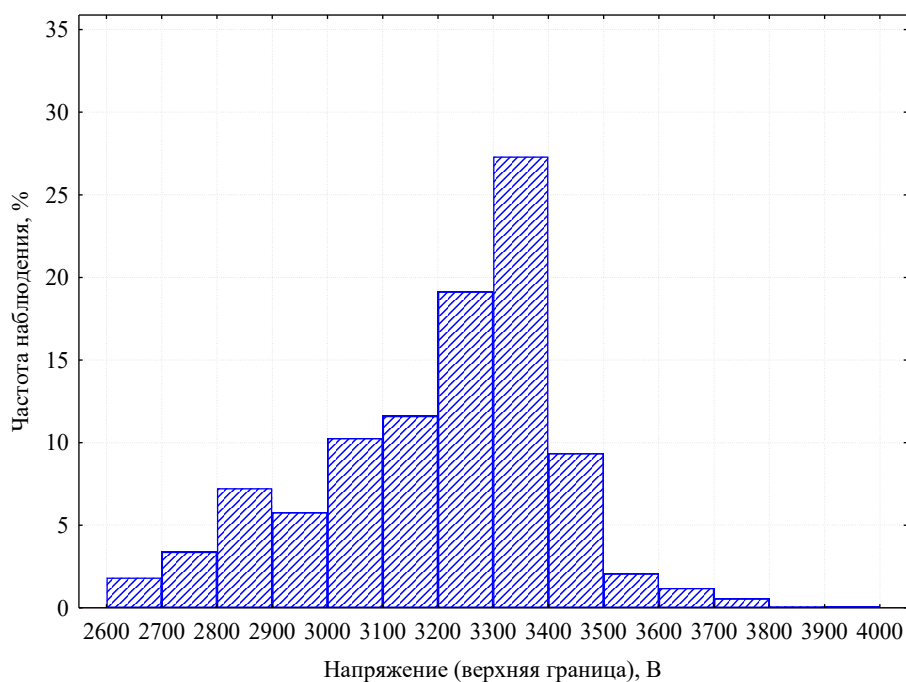


Рисунок 5.2 – Гистограмма распределения напряжения на токоприемнике электровоза серии ЗЭС4К (масса поезда 9006 т) для рассматриваемого участка

Продолжительность времени, в течение которого напряжение на токоприемнике на рассмотренном участке снижается до минимально допустимого уровня и ниже, находится в диапазоне 4 – 6 мин. Снижение напряжения ниже от допустимого уровня составляет 100 – 200 В. Указанные диапазоны коррелируют с диапазонами изменения напряжения на шинах ТП и линейных устройств СТЭ на лимитирующих участках [152, 153].

При решении задачи стабилизации напряжения с помощью СНЭЭ рассматриваются основные режимы работы разряда и заряда, в том числе по регулируемым характеристикам.

При реализации режима заряда от смежных ТП мощность СНЭЭ определяется с учетом допустимого падения напряжения в контактной сети. Максимальное значение тока заряда  $I_{з \max}$  в этом случае должно удовлетворять неравенству:

$$I_{з \max} \leq \frac{\Delta U_{\text{доп}}}{r_{\text{к.с}}} = \frac{U_{\max} - U_{\min}}{r_{\text{к.с}}}, \quad (5.1)$$

где:  $U_{\max}$  – максимальное напряжение на шинах поста секционирования с учетом рекуперативного торможения ЭПС;

$U_{\min}$  – минимальное допустимое напряжение на шинах поста секционирования по условиям пропуска поездов;

$r_{\text{к.с}}$  – активное сопротивление секции контактной сети от тяговой подстанции до поста секционирования.

Ток заряда  $I_з$  СНЭЭ определяется по регулируемой характеристике с учетом уровня напряжения на шинах поста секционирования для условий поддержания минимального напряжения на шинах. Одним из вариантов реализации характеристики является линейное изменение  $I_з$  при изменении напряжения. Тогда ток заряда в зависимости от своего максимального значения (5.1) и напряжения на шинах будет определяться по условиям:

$$I_{з i} = \begin{cases} 0, U_{\text{ПС} i} < U_{\min}; \\ \frac{U_{\text{ПС} i} - U_{\min}}{U_{\max} - U_{\min}} \cdot I_{\max}, U_{\min} < U_{\text{ПС} i} < U_{\max}; \\ I_{\max}, U_{\text{ПС} i} > U_{\max}; \end{cases} \quad (5.2)$$

где:  $U_{\text{ПС} i}$  – фактическое напряжение на шинах поста секционирования в  $i$ -й момент времени.

Эквивалентное сопротивление СНЭЭ зависит от максимальных токов в режимах заряда  $I_з$  и разряда  $I_p$ , напряжений на шинах  $U_{\text{ш}}$ , и диапазонов

регулирования токов в режимах заряда –  $U_{\min з}$  и  $U_{\max з}$ , разряда –  $U_{\min р}$  и  $U_{\max р}$ , носит нелинейный характер и для режимов заряда и разряда определяется по выражениям:

$$r_з = \begin{cases} U_{ш i} \geq U_{\max з} : r_з = \text{const}, I_{\max з}; \\ U_{\min з} < U_{ш i} < U_{\max з} : \frac{U_{\max з} - U_{\min з}}{U_{ш i} - U_{\min з}} \frac{U_{ш i}}{I_{\max з}}; \\ U_{\max р} \leq U_{ш i} \leq U_{\min з} : \infty; \\ U_{\min р} < U_{ш i} < U_{\max р} : r_з = \frac{U_{\max р} - U_{\min р}}{U_{ш i} - U_{\min р}} \frac{U_{ш i}}{I_{\max р}}; \\ U_{ш i} < U_{\min р} : r_з = \text{const}, I_{\max р}. \end{cases} \quad (5.3)$$

Уменьшение межпоездного интервала движения поездов при увеличении порогового напряжения в режиме разряда от 2800 до 3200 В происходит в узком диапазоне времени: 1 – 1,5 мин (рисунок 5.3).

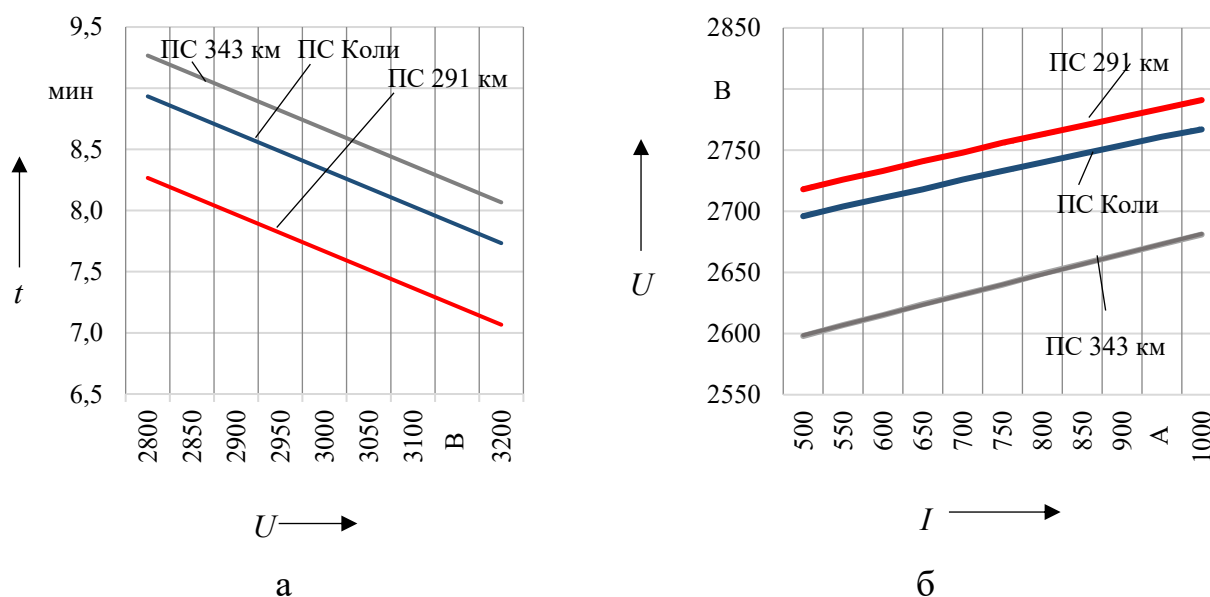


Рисунок 5.3 – График минимального межпоездного интервала при изменении напряжения включения (а) и минимального напряжения на токоприемниках локомотивов (б)

Аналогичный характер изменения имеет зависимость минимального межпоездного интервала от мощности СНЭЭ (рисунок 5.4). Реализация указанных режимов для различных топологий и состава оборудования [143 – 149, 150 – 159, 160, 161, 162, 323, 324] осуществляется по предложенному алгоритму

на основе данных измерений уровня напряжения на шинах поста секционирования и степенью заряженности (рисунок 5.5).

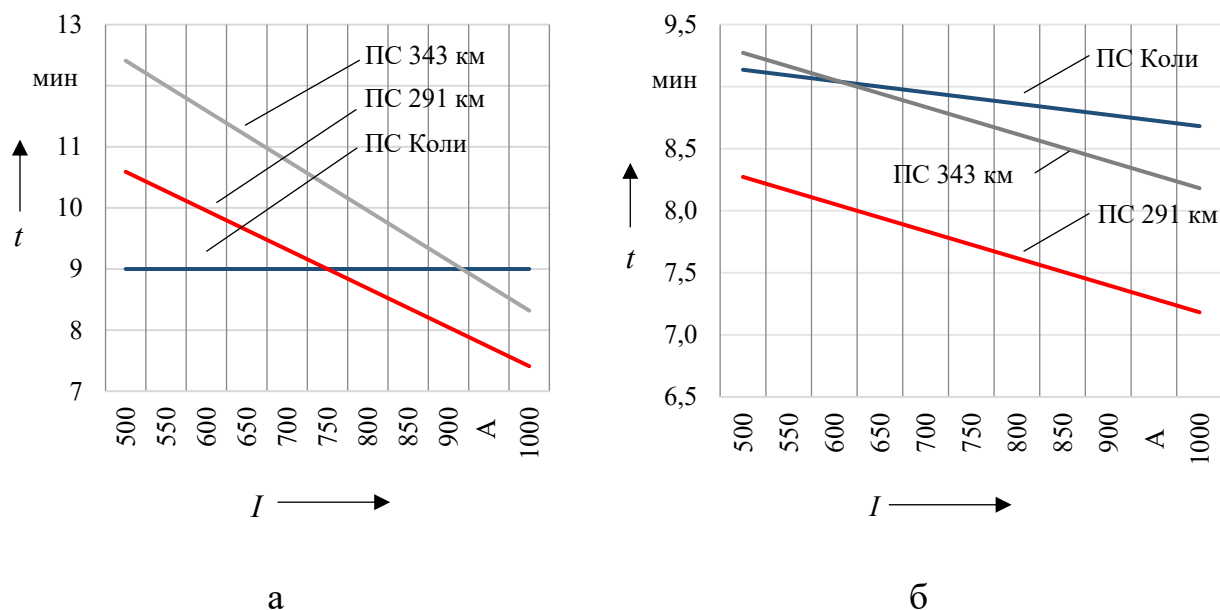


Рисунок 5.4 – График межпоездного интервала при изменении максимального тока системы накопления при пороговом напряжении разряда: 2800 (а), 3200 В (б)

В блоке (а) алгоритма выполняется тестирование оборудования системы при первоначальном включении и в процессе работы. Переход к выбору режима (блоки алгоритма (б) и (в)) выполняется через проверку измеренного напряжения на шинах поста секционирования  $U_{ПС}$  и индекса состояния режима  $k$ . В алгоритме различаются условия начала работы и продолжения работы вследствие различия напряжений для перехода в один из режимов и возврата из него (гистерезисная характеристика). Исключение режима явления «прыгания» системы осуществляется путем введения ступени напряжения  $\Delta U$  и задержки по времени для смены режимов.

Для перехода в режим разряда степень заряженности должна быть выше минимального уровня  $SoC_{\min}$ , при котором обеспечивается режим разряда (блок (б)). При выполнении данного условия, система переходит в режим разряда (режиму присваивается индекс  $k = 1$ ), при невыполнении – в режим ожидания ( $k = 2$ ). Индексы режима  $k = 3$  и  $k = 4$  соответствуют режимам заряда и заряда малыми токами СНЭЭ соответственно, а  $k = 0$  – начальное значение индекса при включении системы в работу. В блоке (в) алгоритма реализуется выбор режима

заряда. В режиме заряда малыми токами уровень тока СНЭЭ определяется в зависимости от уровня напряжения на шинах поста секционирования. В случае невыполнения условий, система переходит в режим ожидания.

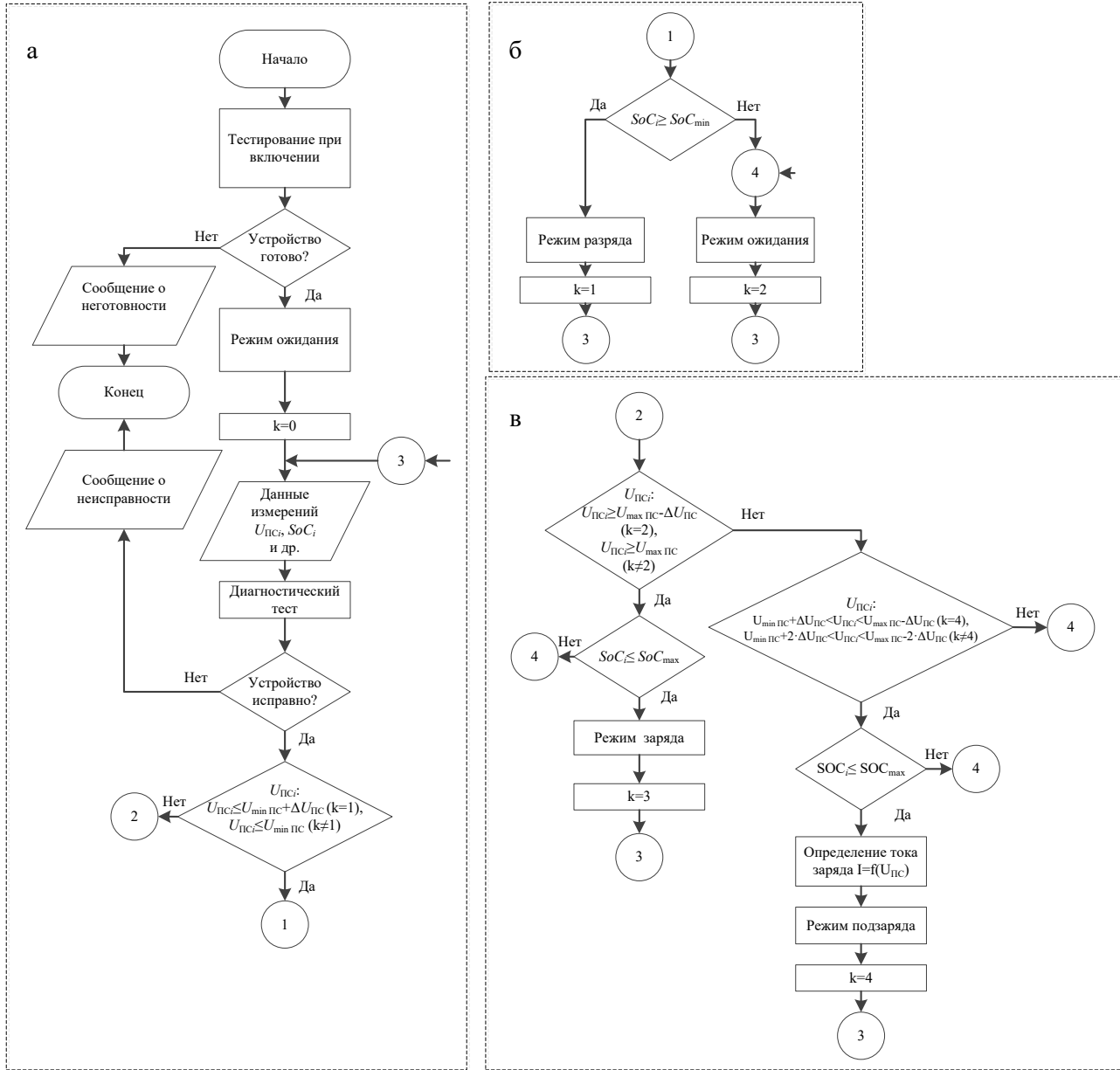


Рисунок 5.5 – Алгоритм работы системы накопления электроэнергии на шинах поста секционирования

Проверка условий для перехода в режим разряда или продолжение работы в нем выполняется в зависимости от индекса режима:

включение ( $k \neq 1$ ) –

$$U_{ПСi} \leq U_{\min ПС}, \tag{5.4}$$

где  $U_{ПС i}$  – напряжение, измеренное на шинах поста секционирования, в  $i$ -й момент времени;

$U_{\min ПС}$  – минимальный уровень напряжения, при котором СНЭЭ переходит в режим разряда;

сохранение режима разряда ( $k = 1$ ) –

$$U_{ПС i} \leq U_{\min ПС} + \Delta U . \quad (5.5)$$

Реализация алгоритма управления позволяет обеспечить цикличную работу системы в соответствии с уровнем напряжения на шинах поста секционирования в зависимости от состояния накопительного модуля. Смена соответствующего режима осуществляется при отклонении напряжения на значение напряжения  $\Delta U$  от заданных пороговых уровней или достижения системой экстремальных значений заряженности или разряженности.

При соответствии измеренного напряжения заданному уровню для режима разряда выполняется проверка степени заряженности:

$$SoC_i \geq SoC_{\min} , \quad (5.6)$$

где:  $SoC_i$ ,  $SoC_{\min}$  – текущий уровень степени заряженности в  $i$ -й момент времени и минимальный уровень заряженности соответственно, при котором допустим переход СНЭЭ в режим разряда.

При несоблюдении условий, при которых возможен переход в режим разряда или заряда с максимальными токами, определение тока заряда выполняется по зарядной характеристике в зависимости от напряжения на шинах поста секционирования.

В этом случае напряжение для перехода в режим заряда с регулированием тока должно удовлетворять условию:

включение ( $k \neq 4$ ) –

$$U_{\min ПС} + 2 \cdot \Delta U < U_{ПС i} < U_{\max ПС} - 2 \cdot \Delta U . \quad (5.7)$$

где:  $U_{\max \text{ ПС}}$  – максимальный уровень напряжения, соответствующий условиям перехода СНЭЭ в режим заряда.

сохранение режима заряда ( $k = 4$ ) –

$$U_{\min \text{ ПС}} + \Delta U < U_{\text{ПС}i} < U_{\max \text{ ПС}} - \Delta U. \quad (5.8)$$

Проверка степени заряженности выполняется до достижения максимального уровня:

$$SoC_i \leq SoC_{\max}, \quad (5.9)$$

где:  $SoC_{\max}$  – максимальный уровень степени заряженности, при достижении которого система переходит в режим ожидания.

При применении электрохимических НЭЭ максимальные токи заряда и разряда нормируются кратностью по отношению к номинальной емкости  $C_n$ . Например, для литий-железо-фосфатных аккумуляторов эксплуатация должна проводиться при токах заряда/разряда, близких к  $1C_n / 2C_n$  соответственно.

Применительно к СНЭЭ на посту секционирования, мощность которых для условий работы на постах секционирования двухпутных участков с преобладанием грузового движения составляет около 3 МВт, система на основе литий-железо-фосфатных аккумуляторов в режиме разряда/заряда должна обладать мощностью 3/1,5 МВт с соответствующими номинальными токами – 1000/500 А, при этом энергоемкость СНЭЭ должна быть принята на уровне 1500 кВт·ч.

Учитывая процесс деградации емкости литий-ионных батарей в процессе эксплуатации энергоемкость батарей выбирается с запасом больше расчетного значения:

$$W_{\text{НЭЭ}} = k_3 \cdot W_{\text{расч}}, \quad (5.10)$$

где:  $W_{\text{расч}}$  – расчетная энергоемкость, определяемая по условиям обеспечения режимов работы СНЭЭ в СТЭ;

$k_3$  – коэффициент запаса, учитывающий процесс потери энергоемкости в процессе эксплуатации.

Расчеты для рассмотренного выше участка Октябрьской железной дороги при пакетном пропуске поездов при размещении СНЭЭ на посту секционирования для порогового напряжения перехода в режим разряда равного 3000 В и максимальным током системы в режиме разряда 1000 А позволяют оценить основные энергетические показатели (таблица 5.1).

Степень заряженности СНЭЭ на  $k$ -м интервале времени по данным измерений с учетом (4.91) определяется по выражению:

$$SoC_t = \frac{\sum_{t_0}^{t_k} u_k \cdot i_k \cdot \Delta T_t}{W_{\text{НОМ НЭЭ}}} \cdot \eta \cdot 100, \quad (5.11)$$

где:  $u_k$ ,  $i_k$  – значения напряжения и тока для  $k$ -го интервала времени соответственно;

$\Delta T_t$  – шаг времени измерений.

Для сохранения степени заряженности в конце расчетного периода на начальном уровне (преобладании заряда) требуется выбрать соответствующую зарядную характеристику (рисунок 5.6).

Таблица 5.1 – Статистические показатели напряжения и тока системы

Показатель	Пост секционирования					
	ПС Коли		ПС 291 км		ПС 343 км	
	$U$ , В	$I$ , А	$U$ , В	$I$ , А	$U$ , В	$I$ , А
минимум	2951,0	0,0	2959,0	0,0	3000,0	0,0
максимум	3451,0	1002,0	3556,0	1004,0	3803,0	1009,0
среднее	3141,4	145,8	3157,5	110,8	3184,2	60,1
среднеквадратичное отклонение	143,8	275,6	159,3	247,2	151,2	168,6

Ограничение глубины разряда достигается путем увеличения емкости и выбора зарядной характеристики. Результаты расчета межпоездных интервалов приведены в таблице 5.2.

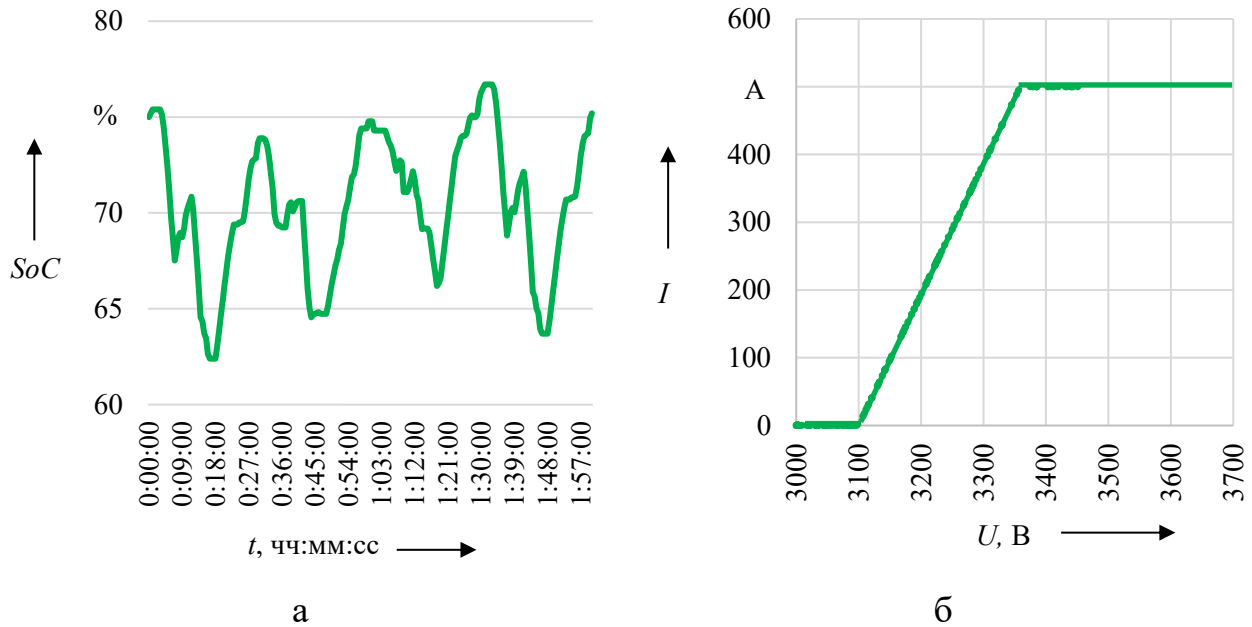


Рисунок 5.6 – График степени заряженности (а) и зарядной характеристики (б) системы накопления

Таблица 5.2 – Минимальные межпоездные интервалы

Пороговое напряжение разряда, В	Межподстанционная зона	Минимальные межпоездные интервалы, мин.					
		схема пропуска «Н-с-с-с»			схема пропуска «Н-с-Н-с»		
		базовый	1600 кВт·ч, 1000 А	900 кВт·ч, 600 А	базовый	1600 кВт·ч, 1000 А	900 кВт·ч, 600 А
3000	П – Е	19	15	15	12	8	9
	Е – З	19	15	15	13	8	8
	Т – Б	18	12	12	13	9	9
3200	П – Е	19	12	12	12	8	9
	Е – З	19	12	13	13	7	8
	Т – Б	18	11	11	13	8	9

Примечание: П, Е, З, Т, Б – тяговые подстанции участка железной дороги.

Построение зарядной характеристики осуществляется на основе данных о показателях работы СНЭЭ (ток, напряжения, степень заряженности, режим работ и др.). При изменении статистических показателей работы выполняется

перестроение характеристики путем изменения коэффициента статизма, что приводит к изменению уровня тока заряда в зависимости от напряжения на шинах [163].

Анализ графиков нагрузки и напряжения для определения условий работы СНЭЭ, обработка данных нагрузки и напряжения СТЭ постоянного и переменного тока, данных профиля пути и определение типа выполнены с помощью разработанных программ [164 – 166].

#### *Участок Свердловской железной дороги (Екатеринбург – Шаля)*

Для двухпутного участка Свердловской железной дороги наблюдаются условия формирования электротяговой нагрузки, отличные от рассмотренного участка, что связано с более интенсивным применением рекуперации на участке железной дороги, оказывающей влияние на график нагрузки СНЭЭ и уровень напряжения (рисунок 5.7).

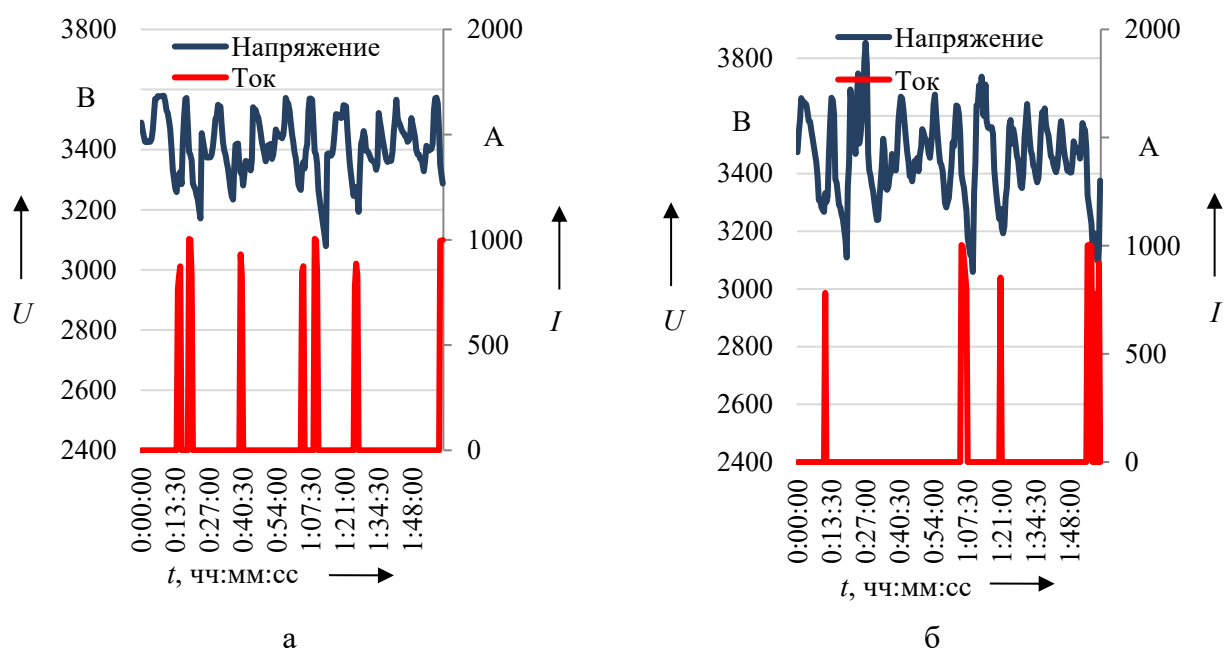


Рисунок 5.7 – График напряжения на шинах и нагрузки в режиме разряда накопителя на ПС 1 для условий Свердловской железной дороги (без рекуперации (а); с рекуперацией (б))

Результаты расчетов тока и напряжения СНЭЭ на шинах поста секционирования, имеющей мощность в режиме разряда/заряда – 3,0/1,5 МВт и энергоемкости – 1500 кВт·ч, для различных условий применения

рекуперативного торможения позволяют построить график степени заряженности (рисунок 5.8) для зарядной характеристики, обеспечивающей поддержание данного уровня (рисунок 5.9).

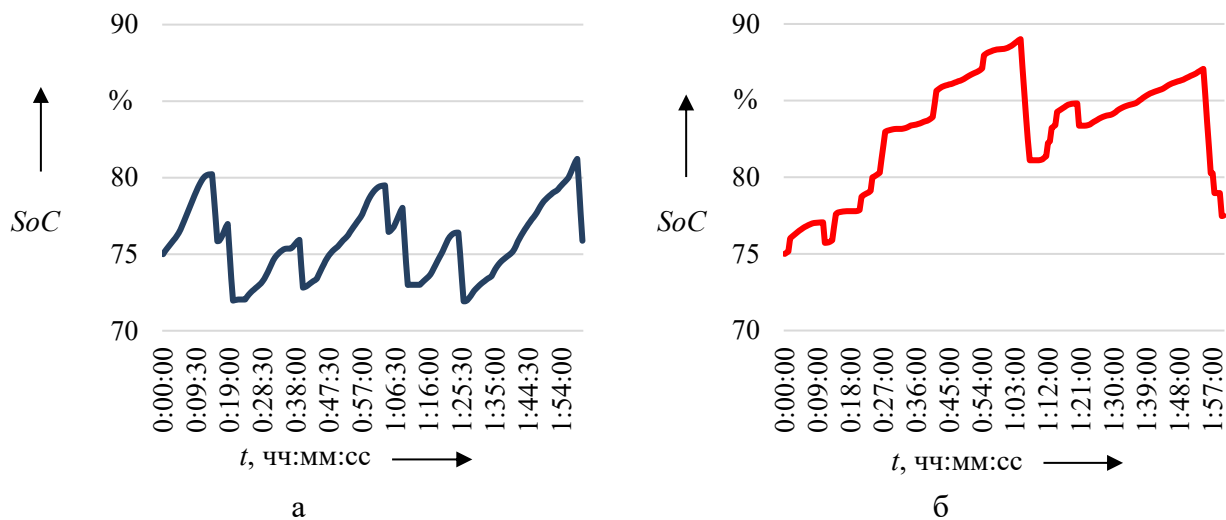


Рисунок 5.8 – График степени заряженности для системы накопления электроэнергии на посту секционирования ПС 1 (без рекуперации (а); с рекуперацией (б))

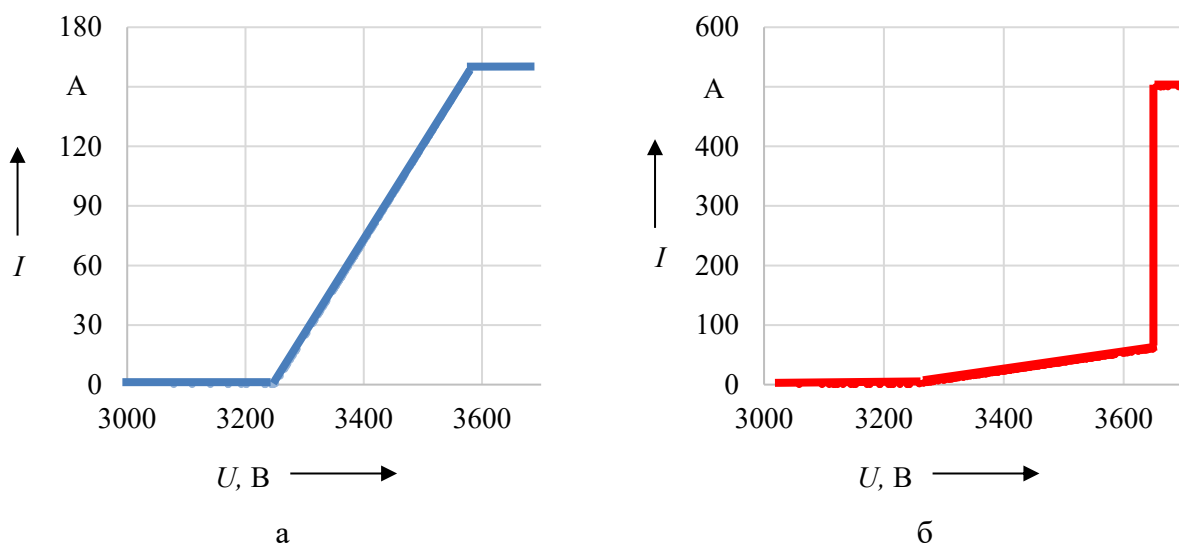


Рисунок 5.9 – Зарядная характеристика для системы накопления на посту секционирования ПС 1 (без рекуперации (а); с рекуперацией (б))

Для условий участка Екатеринбург – Шаля Свердловской количество эпизодов работы СНЭЭ при применении рекуперативного торможения снижается, коэффициент заполнения графика нагрузки устройства падает с 0,07

до 0,049, в тоже время диапазон изменения напряжения на шинах поста секционирования расширяется из-за роста напряжения до уровня 3900 В.

Коэффициент статизма (наклона) зарядной характеристики выбирается из условия обеспечения поддержания степени заряженности в пределах рассматриваемого цикла тяговой нагрузки. Рост коэффициента статизма зарядной характеристики приводит к преобладанию заряда в графике степени заряженности.

Для рассматриваемого двухпутного участка Свердловской железной дороги при пакетном пропуске поездов унифицированной массы и условия работы СНЭЭ на посту секционирования достаточным уровнем тока заряда является уровень 160 А, для которого обеспечивается поддержание степени заряженности в рамках заданного двухчасового цикла работы, для условий рекуперации – уровень 500 А.

Применение рекуперативного торможения приводит к необходимости увеличения номинальной энергоемкости для обеспечения приема энергии рекуперации и ограничения глубины разряда СНЭЭ (рисунок 5.10). При моделировании для оценки глубины разряда степень заряженности принята на уровне 75 %, для обеспечения работы СНЭЭ в режимах заряда и разряда.

На основе результатов имитационного моделирования установлено, что рекуперация оказывает влияние на нагрузку и напряжение в точке подключения СНЭЭ к контактной сети: среднее напряжения на шинах увеличивается, средний ток СНЭЭ падает, что показано в таблице 5.3.

Регулирование глубины разряда и количества циклов оказывает влияние на срок эксплуатации накопительного модуля. Например, для литий-железо-фосфатной ( $LiFePO_4$ ) технологии [19, 21] ресурс работы зависит от количества циклов. Нарботка аккумулятора до остаточной емкости  $0,8C_n$  определяется глубиной разряда ( $DoD$ ): для  $DoD$  40 – 60 % он составляет не менее 5 000 циклов, для  $DoD$  100 % – не менее 1 000 циклов. При глубине разряда до 30 % ресурс определяется не количеством циклов, а условиями эксплуатации и составляет для отечественных батарей около 8 лет. Коэффициент полезного действия

указанных аккумуляторов (без учета преобразователей) достигает 99 %. Зарубежные аналоги литий-ионных аккумуляторов и их модификаций имеют сопоставимые характеристики.

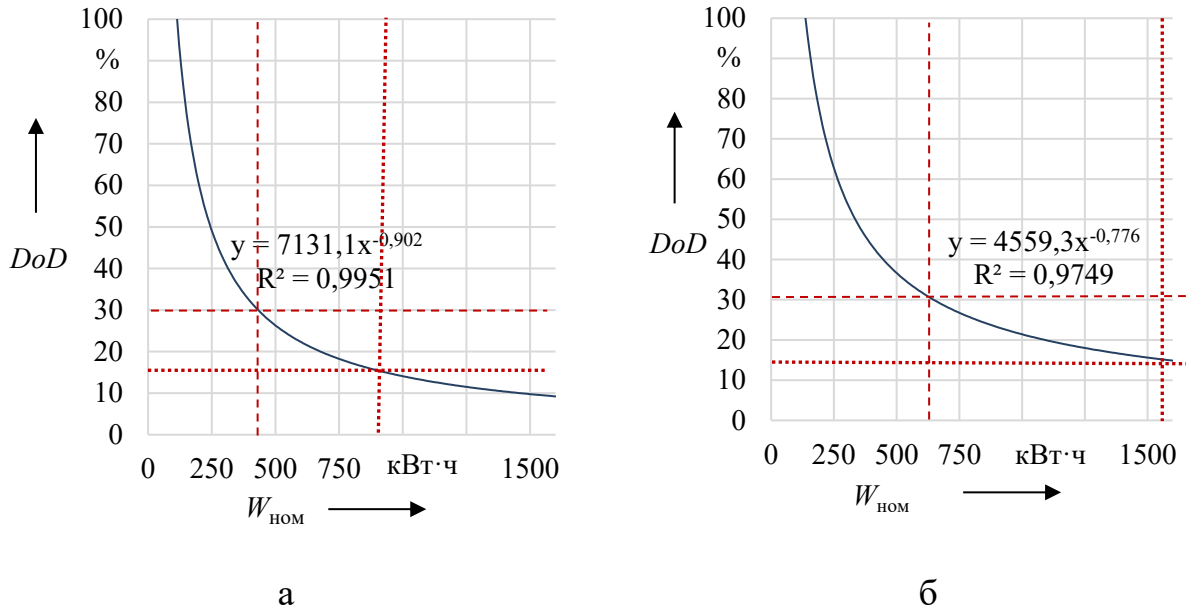


Рисунок 5.10 – Глубина разряда системы накопления электроэнергии для условий работы на посту секционирования ПС 1 (без рекуперации (а); с рекуперацией (б))

В настоящее время электрохимические НЭЭ являются одним из перспективных видов, предназначенных для построения СНЭЭ большой энергоёмкости [325]. Исследования в области применения различных материалов показывают потенциал повышения удельных энергетических характеристик литий-ионной технологии аккумулирования, например, графеновых и других видов аккумуляторов [326, 327]. Несмотря на улучшение характеристик литий-ионных аккумуляторов одной из важнейших задач остается продление срока службы батарей в зависимости от наработки и глубины разряда с учетом деградации емкости [328, 329].

Влияние мощности СНЭЭ на изменение минимального межпоездного интервала в границах межподстанционных зон оценивается по приращению тока СНЭЭ на единицу сокращения интервала с помощью коэффициента:

$$k_t = \frac{\Delta I}{\Delta t_{\text{мин}}}, \quad (5.12)$$

где:  $\Delta I$  – требуемое приращение номинального тока СНЭЭ;

$\Delta t_{\text{мин}}$  – соответствующее приращению номинального тока сокращение минимального межпоездного интервала.

Таблица 5.3 – Статистические показатели работы систем накопления электроэнергии на постах секционирования

Показатель	Пост секционирования					
	без рекуперации		с рекуперацией		Изменение тока и напряжения	
	$U, В$	$I, А$	$U, В$	$I, А$	$\Delta U, \%$	$\Delta I, \%$
<b>ПС 1</b>						
мин	3079,0	0,0	3059,0	0,0	-0,7	0,0
макс	3579,0	1005,0	3854,0	1004,0	7,1	-0,1
среднее	3410,2	71,0	3451,5	49,5	1,2	-43,4
среднеквадратичное отклонение	98,5	244,3	145,0	208,9	32,1	-16,9
<b>ПС 2</b>						
мин	3002,0	0,0	3013,0	0,0	0,4	0,0
макс	3460,0	999,0	3846,0	996,0	10,0	-0,3
среднее	3237,7	62,0	3362,0	16,5	3,7	-275,8
среднеквадратичное отклонение	111,7	241,2	160,5	127,4	30,4	-89,3

Коэффициент  $k_t$  позволяет оценить требуемую мощность СНЭЭ для сокращения межпоездного интервала. Как показывают результаты расчетов по определению пропускной способности на межподстанционных зонах постоянного тока двухпутных участков с профилями пути III и IV типов, где лимитирующим фактором является уровень напряжения на токоприемнике ЭПС, для тока (мощности) СНЭЭ в диапазоне от 500 до 1000 А (1,5 – 3 МВт) значение коэффициента  $k_t$  изменяет от 100 до 300 А/мин (0,3 – 0,9 МВт/мин).

Зарядная характеристика СНЭЭ формируется в зависимости от режимов работы и рекомендуемых заводом-изготовителем протоколов заряда. В настоящее время известно несколько протоколов зарядных характеристик: *СС-СV*, *МСС-СМ*, *СР-СV*, импульсная и бустерная зарядка, *VCP* [333].

Наиболее распространенным протоколом зарядки на сегодняшний день является *СС-СV*, который состоит из фазы зарядки постоянным током до достижения батареей порогового уровня напряжения и фазы, в которой напряжение поддерживается постоянным до момента падения тока до нуля. Время зарядки для данного протокола выше, чем для протокола непрерывной зарядки. Разновидностью данного протокола является протокол *МСС-СМ*, в фазе зарядки которого уровень тока зарядки изменяется ступенчато два и более раз.

Протокол *СР-СV* отличается от предыдущего тем, что в фазе зарядки изменяется уровень постоянного тока. Проводимые исследования, показывают возможность повышения эффективности зарядки и лучшего сохранения емкости при зарядке токами  $1C_n$  в отличие от протокола *СС-СV*.

Протоколы импульсной зарядки также направлены на сокращения времени зарядки, характеризующиеся циклическим изменением тока заряда. Бустерный заряд характеризуется высоким уровнем тока заряда в начале фазы заряда, далее уровень зарядного тока снижается до некоторого уровня, с которого возрастает до достижения напряжением порогового уровня. Оба режима позволяют сократить время заряда по сравнению с протоколом *СС-СV*.

Протоколы *VCP* основаны на переменном профиле тока зарядки, имеющем фазу возрастания до максимального уровня и снижения тока.

Для условий тяговой сети выбор протокола заряда СНЭЭ на базе литий-ионной аккумуляторной батареи выбирается с учетом условий реализации зарядной характеристики, зависящей от уровня напряжения на шинах ТП или линейных устройств. В условиях изменения уровня напряжения протокол зарядки СНЭЭ при работе в тяговой сети должен являться результатом комбинации существующих протоколов, выполняемой с учетом изменения

мощности зарядки в зависимости от электротяговой нагрузки и позволяющей увеличить скорость заряда литий-ионных батарей.

Варианты реализации СНЭЭ в тяговой энергетике не ограничиваются видами накопительных элементов на электрохимической основе. В настоящее время как в России, так и за рубежом проводится ряд исследований, посвященных рассмотрению различных элементов (кинетические накопители, суперконденсаторы, адиабатические и др.), например, как это показано на примере железных дорог Польши [250]. Одним из перспективных направлений является применение гибридных технологий [355, 356], позволяющих использовать преимущества различных видов НЭЭ.

Сравнение расчетных графиков электрической нагрузки, степени заряженности и глубины разряда позволяет сделать вывод о том, что применение рекуперативного торможения приводит к снижению коэффициента заполнения графика СНЭЭ в режиме разряда, преобладанию заряда в графике степени заряженности, снижению максимальных токов в режиме заряда (первая ступень) и одновременном увеличении тока в режиме заряда номинальными токами (вторая ступень), снижению средних токов СНЭЭ.

При применении рекуперативного торможения условия работы СНЭЭ на постах секционирования, определяемые задачей повышения пропускной и провозной способности, изменяются. Это выражается в необходимости увеличения полной энергоемкости СНЭЭ, что, несмотря на улучшение ряда показателей работы и снижение токов в режиме заряда, обусловлено необходимостью обеспечения заданной глубины разряда для увеличения ресурса работы системы и приема избыточной энергии рекуперации.

Применение СНЭЭ на постах секционирования позволяет преобразовать их из пассивных в активные за счет присоединения к шинам поста источника энергии. Подключение СНЭЭ предлагается выполнять к шинам поста секционирования через высоковольтный выключатель.

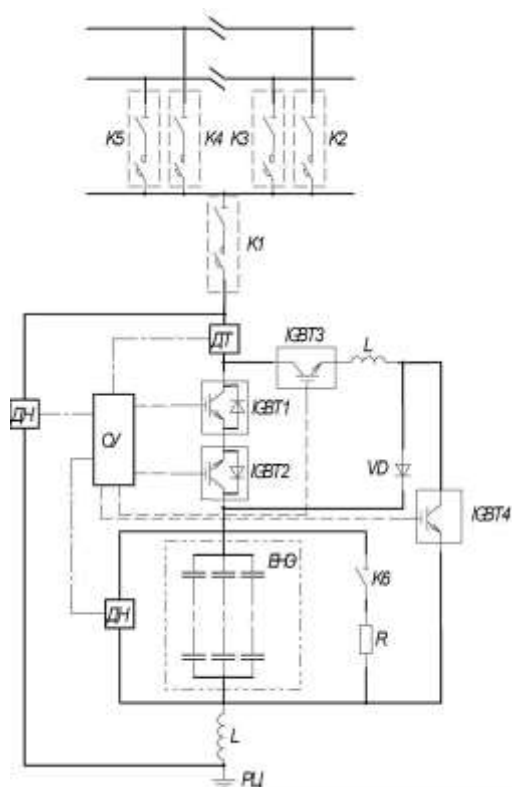


Рисунок 5.11 – Пост секционирования с накопителем электроэнергии

Пост секционирования [167, 168] содержит выключатели и разъединители (К1 – К4 на рисунке 5.11). К шинам поста секционирования подключается НЭЭ емкостного вида (ЕНЭ) через выключатель и разъединитель К1. Управление режимами работы ЕНЭ и нагрузкой осуществляется системой управления (СУ) с помощью IGBT-модулей (IGBT1 – IGBT4). Для измерения токов и напряжений СНЭЭ содержит датчики тока (ДТ) и напряжения (ДН).

Для сглаживания кривой тока схема содержит реактор (L), подключенный к рельсовой цепи (РЦ). Диод VD предназначен для обеспечения работы в режиме заряда. Для обеспечения разряда в послеаварийных режимах и проведения технического обслуживания предусмотрен разрядный резистор R, шунтирующий ЕНЭ с помощью коммутационного аппарата К6.

На постах секционирования переменного тока для определения рабочей характеристики и согласования работы СНЭЭ со средствами компенсации реактивной мощности предложено устройство измерения напряжения на посту секционирования переменного тока [169 – 171]. Реализация работы устройств осуществляется с помощью блока контроля и регулирования, который анализирует уставки и текущее состояние источника энергии (регулируемого устройства компенсации реактивной мощности и СНЭЭ) на основе информации от блока уставок и аналогово-цифрового преобразователя, определяющего коэффициент несинусоидальности по гармоникам тока и формирует команды на управление режимом работы регулируемого устройства компенсации реактивной мощности и СНЭЭ.

### 5.1.2 Однопутные участки железных дорог

#### *Участок Свердловской железной дороги (Гороблагодатское – Серов)*

Условия формирования тяговой нагрузки на двухпутных участках отличаются от однопутных. Результаты расчетов показывают, что условия пропуска при пакетном движении приводят к созданию более тяжелых условий работы СНЭЭ на однопутных участках.

Результаты расчетов для работы СНЭЭ на однопутных участках получены на примере однопутного участка Свердловской железной дороги с преобладанием грузового вида движения. Профиль пути в границах рассматриваемого участка относится к четвертому типу, расчетный подъем составляет 9‰.

Преобразование поста секционирования в активный оказывает существенное влияние на показатели нагрузочной работы СТЭ, в частности, на уровень напряжения. В качестве примера можно привести зависимости прироста напряжения на токоприемнике для рассматриваемой межподстанционной зоны Свердловской железной дороги от мощности, размещаемой на посту секционирования (ПС Ляля) (рисунок 5.12).

Мощность, требуемая на посту секционирования для поддержания минимального напряжения на токоприемнике для рассматриваемой межподстанционной зоны, составляет 7,6 МВт, ток разряда  $I_{3 \text{ мин}} = 2,3$  кА при принятии порогового напряжения для режима разряда  $U_{\text{раз}} = 3300$  В. Номинальная энергоемкость литий-ионной батареи для рассматриваемых условий без учета условий заряда и глубины разряда при принятой кратности токов разряда  $2C_n$  составит 3,8 МВт·ч.

Аналогичные расчеты для других межподстанционных зон позволяют оценить требуемую мощность СНЭЭ, размещаемую на постах секционирования для поддержания уровня минимального напряжения, в диапазоне от 6,3 до 12,5 МВт.

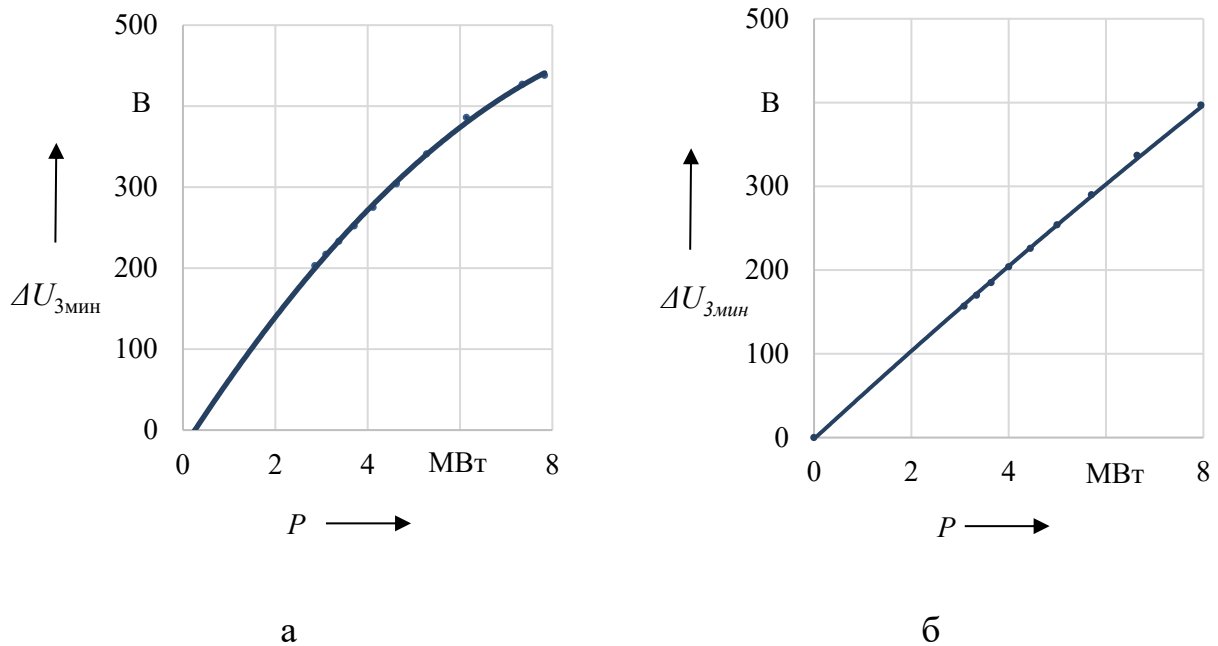


Рисунок 5.12 – Графики изменения приращения напряжения на токоприемнике при пропуске четного (а) и нечетного (б) пакетов в зависимости от мощности системы накопления электроэнергии

Результаты электрических расчетов позволяют построить графики степени заряженности и соответствующие частотные распределения для СНЭЭ в условиях пропуска пакетов поездов в четном и нечетном направлениях, на основе графика исполненного движения, приведенные на рисунке 5.13. Полученные результаты свидетельствуют о преобладании разряда в графике степени заряженности  $SoC$ .

Для поддержания начального уровня  $SoC$  СНЭЭ для условий пропуска четного и нечетного направлений номинальная энергоемкость должна составить около 7000 кВт·ч, максимальные токи заряда – 1600 А. При облегчении расчетных условий (принятие электротяговой нагрузки по графику исполненного движения поездов за отчетные сутки) требуемая номинальная энергоемкость снижается до уровня 1000 кВт·ч, ток заряда – до 100 А (рисунок 5.14).

Зависимость изменения глубины разряда для рассмотренного участка при пропуске четного и нечетного пакетов, а также для графика исполненного движения приведена на рисунке 5.15.

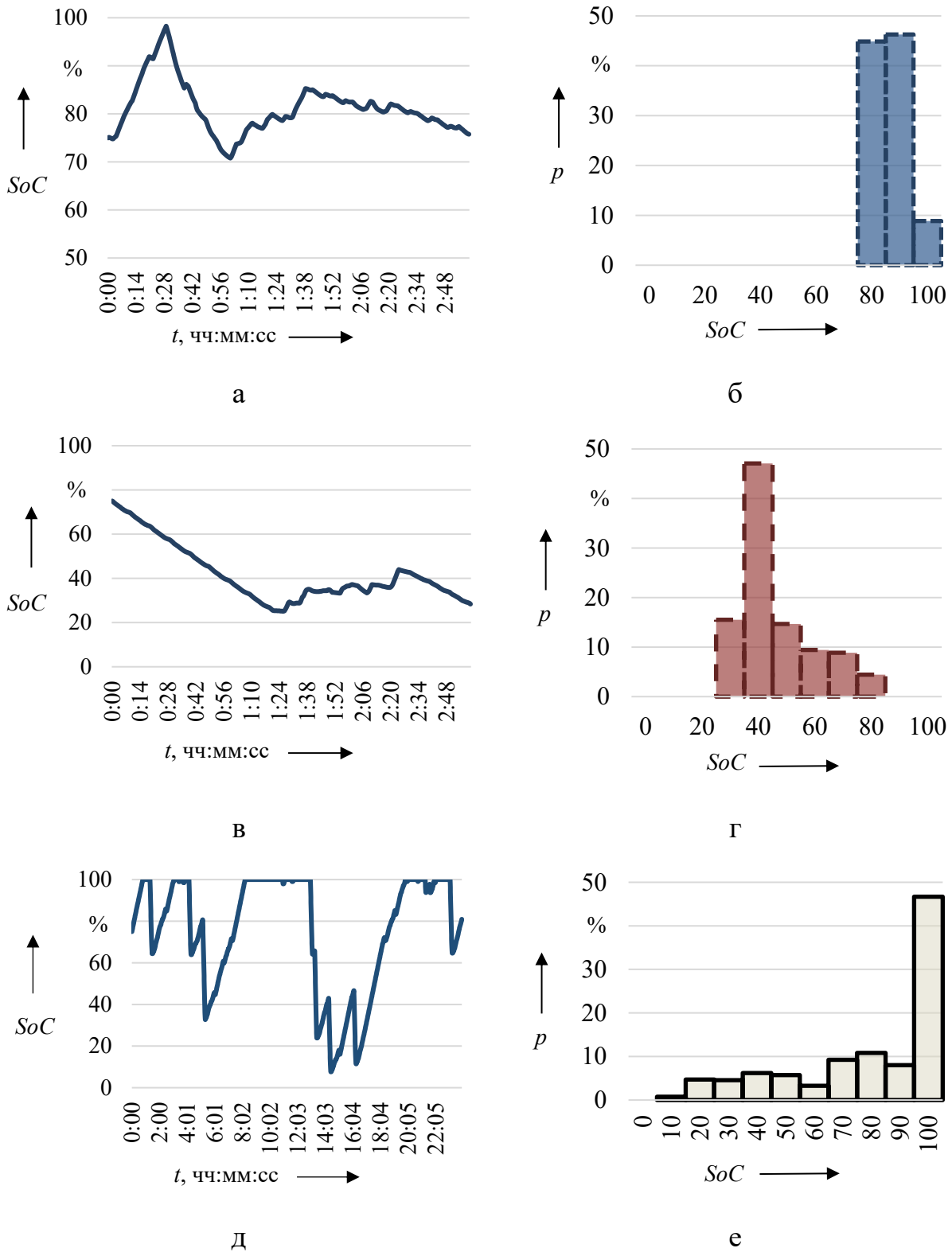


Рисунок 5.13 – Графики степени заряженности (а, б, д) и частотные распределение (в, г, е) при пропуске пакетов поездов в четном и нечетном направлении и для отчетного графика соответственно

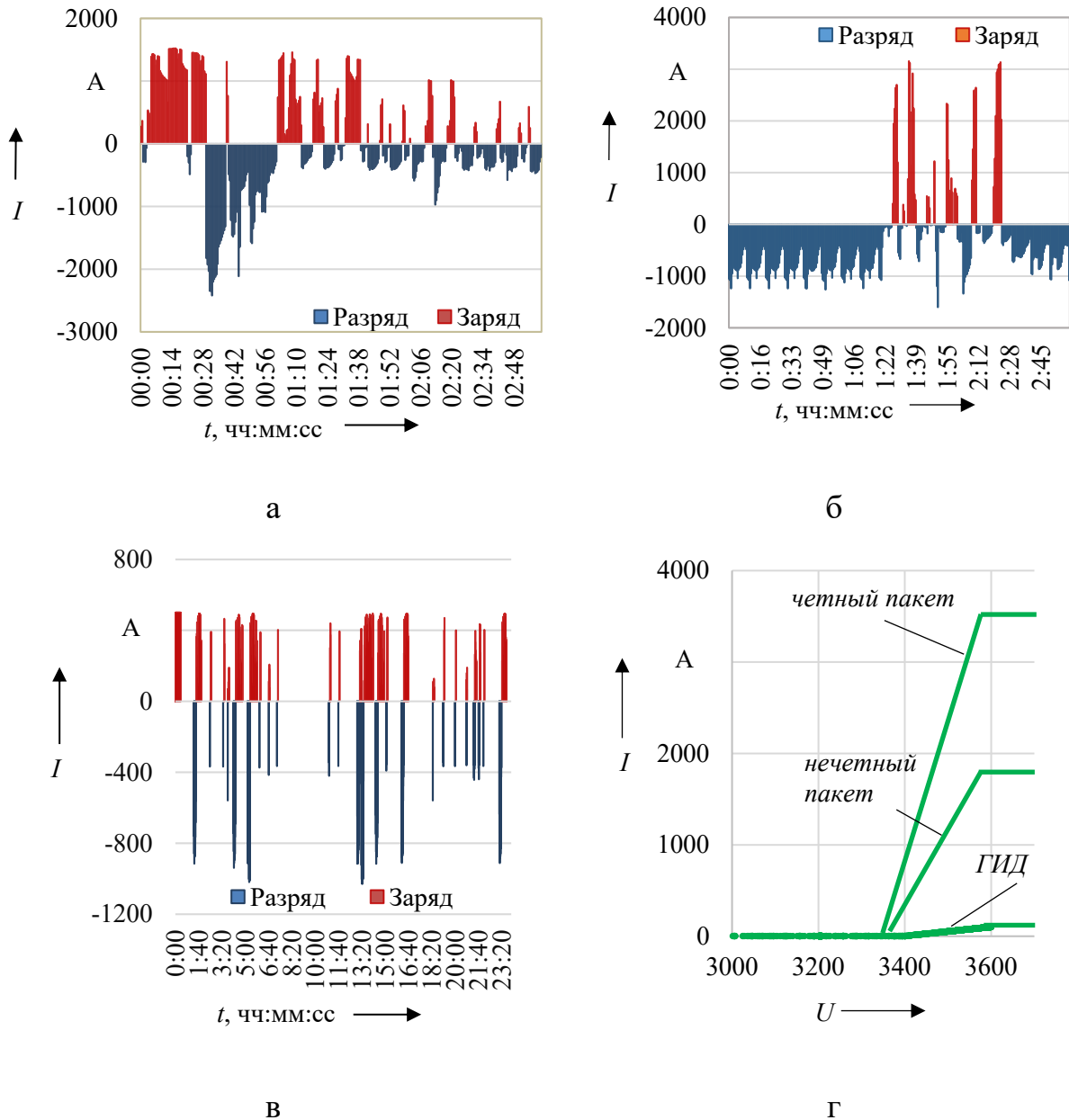


Рисунок 5.14 – Графики нагрузки для систем накопления электроэнергии при пропуске четного (а), нечетного (б) пакетов, за сутки (в) на посту секционирования и зарядные характеристики (г)

Возможность сокращения номинальной энергоемкости СНЭЭ связана с выбором других видов НЭЭ, для которых глубина разряда не оказывает значительного влияния на их ресурс работы, например, электрического и механического видов.

Для литий-ионного НЭЭ при ограничении глубины разряда до рекомендуемого значения (30 %) для рассматриваемого участка номинальная энергоемкость составит 2 300 кВт·ч, мощность разряда – 3,2 МВт, заряда –

1,8 МВт·ч. При использовании НЭЭ другого вида требуемые энергоемкость и мощность заряда падают: мощность разряда сохраняется на уровне 3,2 МВт; номинальная энергоемкость составляет 1,0 МВт·ч; мощность заряда – 0,36 МВт.

Параметры СНЭЭ на посту секционирования ПС для расчетных условий по графику исполненного движения отчетных суток приведены в таблице 5.4.

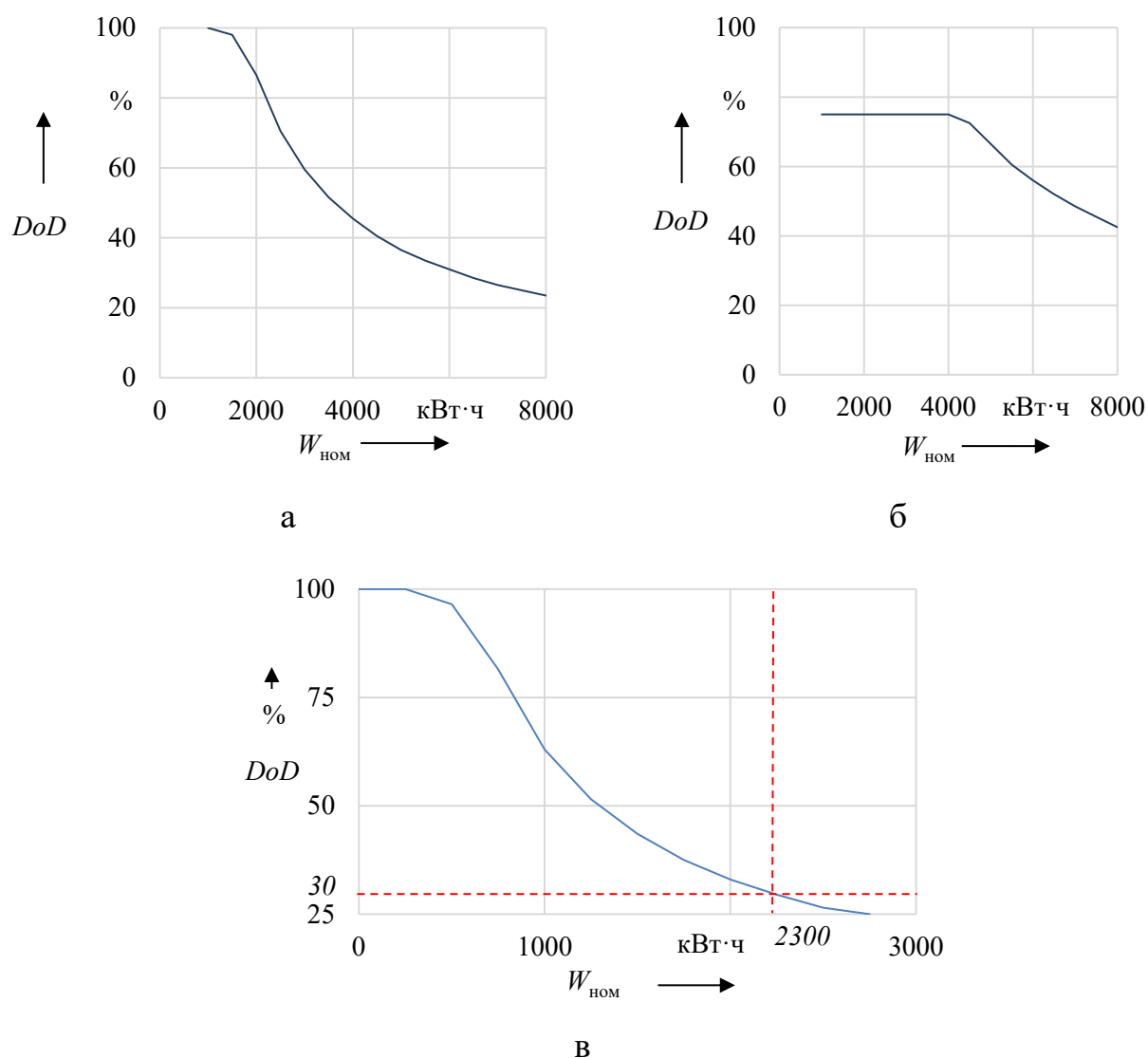


Рисунок 5.15 – Графики изменения глубины разряда системы накопления на посту секционирования при пропуске четного (а) и нечетного (б) пакетов, формировании случайного графика движения за сутки (в)

Влияние СНЭЭ на показатели нагрузочной способности СТЭ однопутных участков постоянного тока при разряде токами  $C$ -rate, равными  $2C_n$ , проявляется при увеличении номинальной мощности на постах секционирования до значений в диапазоне 3,1 – 5,8 МВт. Реализация зарядных характеристик в периоды

минимальных нагрузок приводит к падению напряжения в контактной сети до 400 В и обеспечивает поддержание степени заряженности на заданном уровне.

Таблица 5.4 – Параметры СНЭЭ для условий работы на ПС

Глубина разряда СНЭЭ, %	Номинальная мощность, кВт		Номинальная энергоемкость, кВт·ч	Продолжительность, мин		Средняя продолжительность, мин (кол-во эпизодов, шт.)	
	заряд	разряд		заряд	разряд	заряд	разряд
$DoD \leq 30$	1800	3200	2300	204,5	87,5	4,6(44)	3,7(24)
$DoD > 90$	360	3200	1000	777,0	87,5	16,2(53)	3,7(24)

Примечание: Приведенные параметры определены для графика исполненного движения

Характер изменения  $DoD$  для однопутных участков аналогичен полученному для двухпутных участков, при этом номинальная энергоемкость превышает уровень, требуемый для двухпутных участков – 1,5 МВт·ч для Октябрьской, 1,2 МВт·ч для МЦК Московской и 1,0 МВт·ч для Свердловской железных дорог.

Цикличность режимов «заряд-разряд» СНЭЭ на однопутном участке железной дороги для расчетного пакетного пропуска поездов составляет 1,5 цикла/час, для отчетного графика исполненного движения частота снижается до уровня 0,3 цикла/час, что обусловлено более легкими условиями пропуска по сравнению с расчетными. Для условий Московского центрального кольца цикличность составляет менее 0,2 циклов/час, для двухпутных участков Октябрьской и Свердловской железных дорог – достигает уровня 2 цикла/час для условий.

Таким образом, для СТЭ однопутных участков требуются большие значения номинальной мощности и энергоемкости СНЭЭ, что связано с необходимостью сохранения ресурса работы электрохимических НЭЭ. При применении НЭЭ других видов параметры накопителей как для двухпутных, так и для однопутных участков снижаются. При проведении технико-экономической оценки в качестве альтернативы накопителям электрохимического вида, могут быть рассмотрены НЭЭ других видов, глубина разряда которых не оказывает

существенного влияния на ресурс работы, а энергоемкость может быть существенно снижена.

### 5.1.3 Двухпутные участки с преобладанием пассажирского движения

#### *Условия Московской железной дороги (Московское центральное кольцо)*

Московское центральное кольцо (МЦК) является участком с интенсивным городским движением [172 – 174], формирование графика тяговой нагрузки на котором преимущественно осуществляется электропоездами серии ЭС2Г [112, 321, 322].

Отличия в формировании тяговой нагрузки, проявляются в снижении мощности тяговой нагрузки на ТП, увеличении циклов «разгон – торможение» пассажирского ЭПС и в интенсивном применении рекуперативного торможения для совершения плановых остановок.

Опыт эксплуатации новых серий пассажирского ЭПС показывает, что доля объема энергии в режиме рекуперативного торможения приближается к значениям в диапазоне 0,3 – 0,5 от тягового электропотребления. Опыт эксплуатации электропоездов серии ЭС2Г «Ласточка» на МЦК показывает, что уровень рекуперации по отдельным поездкам достигает 50 % от тягового потребления.

МЦК является участком железной дороги, на котором реализовано интенсивное городское движение электропоездов. В состав СТЭ МЦК входят пять ТП и четыре поста секционирования. В пассажирском движении на участке обращаются электропоезда серии ЭС2Г «Ласточка». Особенности организации пассажирского движения приводят к формированию суточного графика электрической нагрузки, имеющего две области максимальных значений, соответствующих пикам пассажирских перевозок.

Результаты обработки данных регистраторов параметров движения «РПД МПСУ и Д» электропоездов 2ЭСГ (*Siemens Desiro Rus*) [175] на МЦК за сутки

позволяют определить рабочие диапазоны тяговых токов и напряжений на токоприемниках ЭПС (рисунок 5.16).

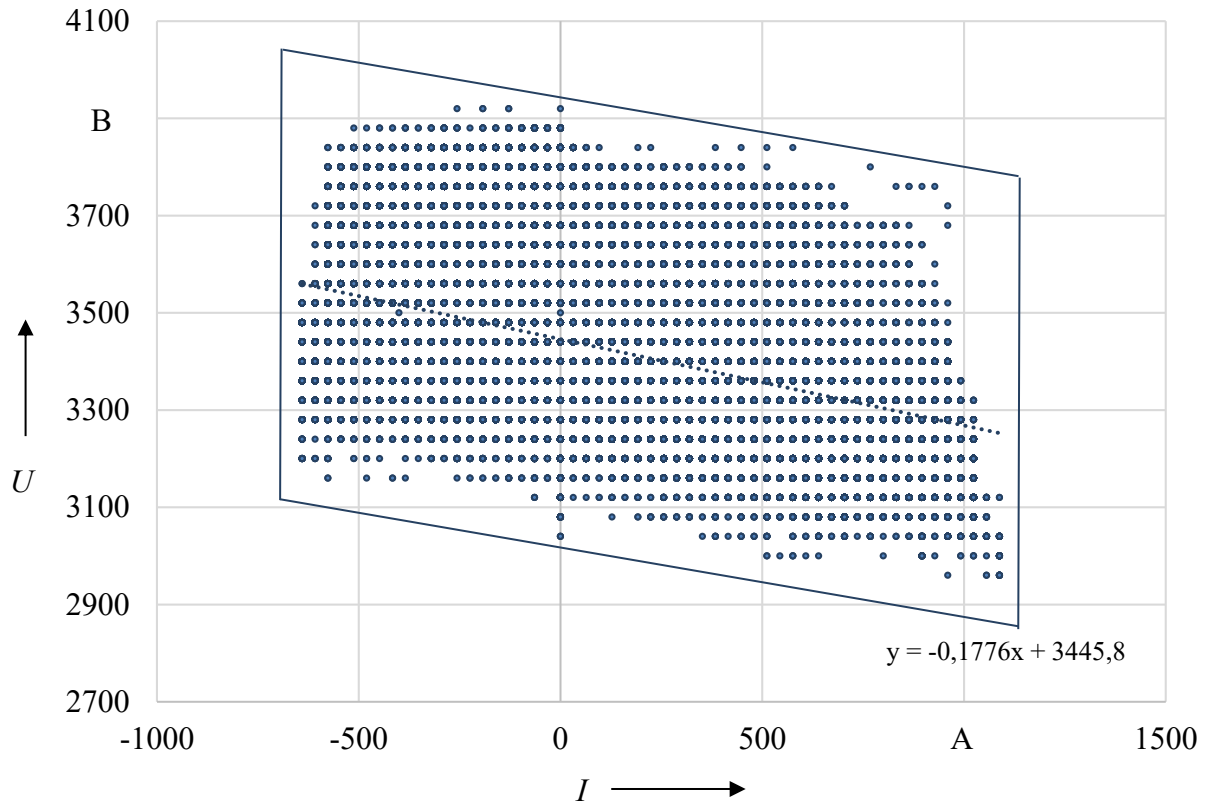


Рисунок 5.16 – Рабочие диапазоны токов и напряжений на токоприемнике электропоездов ЭС2Г на Московском центральном кольце

Характер приведенного графика отличается от аналогичных графиков для участков с преобладанием грузового движения: для условий МЦК усредненный коэффициент наклона составляет  $-0,17$  против коэффициентов  $-0,068$  и  $-0,14$ , полученных для локомотивов серий 2ЭС6 и 2ЭС10 на участках с равнинным и горным типами профиля пути соответственно [159]; диапазоны изменения напряжения на токоприемниках электропоездов ЭС2Г значительно шире и составляют в режиме тяги от 2900 до 3800 В, в режиме рекуперативного торможения – от 3100 до 3900 В.

Учитывая профиль пути участка МЦК, относящийся ко II типу (равнинный), указанные отличия следует связывать с условиями организации движения, оказывающими влияние как на тяговое электропотребление, так и на уровень потерь электроэнергии [27, 103, 129, 157]. Частотные распределения для

проведенных значений показывают, что распределение напряжения близко к нормальному закону распределения (среднее значение составляет около 3400 В), распределение тока близко к равномерному распределению в отрицательном и положительном диапазонах (для режимов рекуперативного торможения и тяги).

Диапазон рабочих токов и напряжений на токоприемнике в различных режимах работы ЭС2Г на МЦК по данным поездки по кольцу за период времени с 05:43 до 07:06 ч:мин показан на рисунке 5.17. Особенности электротяговой нагрузки МЦК являются цикличность режимов тяги и рекуперативного торможения, сопоставимость уровней токов в режимах, характерное изменение уровня напряжения, соответствующее режимам работы СНЭЭ [74, 245 – 249].

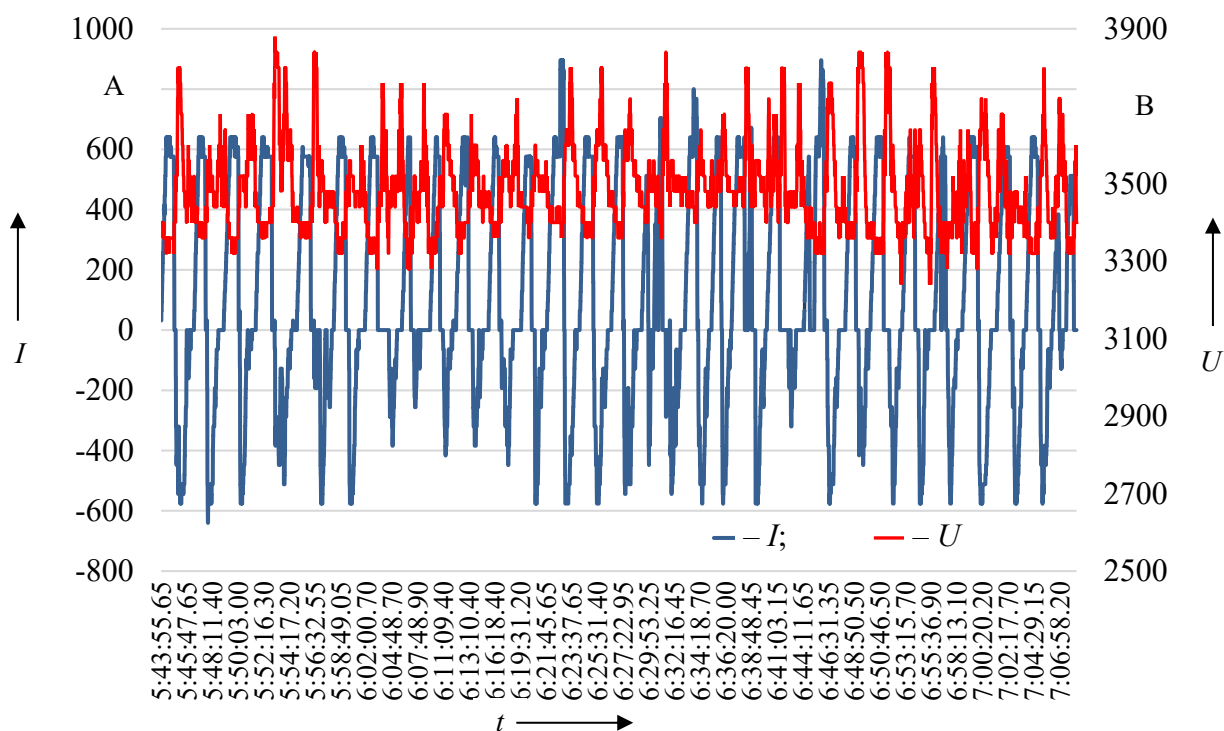


Рисунок 5.17 – График тяговой нагрузки электропоезда на МЦК

Выпрямительные преобразователи на тяговых подстанциях МЦК работают поочередно или в параллельном режиме в зависимости от сложившегося уровня нагрузки. Питание преобразовательных трансформаторов осуществляется от 1-й и 2-й секций напряжением 20 кВ, работающих изолированно. Третий преобразовательный агрегат, имеющийся на тяговых подстанциях МЦК, находится в холодном резерве. В качестве

преобразовательных трансформаторов на подстанциях эксплуатируются трансформаторы марки ТРСЗП-12500/20УХЛ1. Номинальное напряжение ВН в позиции 3 ПБВ составляет 20,0 кВ, напряжение НН – 1 305 В. Номинальный коэффициент трансформации – 15,3.

Коэффициент загрузки  $i$ -го преобразовательного агрегата без учета перегрузки по данным системы учета электроэнергии, о.е., определяется по формуле:

$$k_{\text{ПБА}i} = \frac{W_{\text{ПБА}i}}{\sum_{j=1}^N W_{\text{ПБА}j}}, \quad (5.13)$$

где:  $N$  – количество параллельно работающих агрегатов;

$W_{\text{ПБА}i}, W_{\text{ПБА}j}$  – объем электроэнергии по вводу  $i$ -го рассматриваемого агрегата и  $j$ -го агрегата тяговой подстанции.

Напряжение на выходе преобразовательного агрегата, В, определяется по формуле:

$$U_d = U_{d0} \cdot \left( 1 - \sin \frac{\pi}{m} \cdot u_k \cdot \frac{I_d}{I_{d\text{ном}}} \right), \quad (5.14)$$

где:  $m$  – количество пульсаций;

$U_{d0}$  – среднее значение выпрямленного напряжения при холостом ходе, В;

$I_d$  – ток выпрямителя, А;

$I_{d\text{ном}}$  – номинальный ток выпрямителя, А;

$u_k$  – приведенное напряжение короткого замыкания, учитывающее потери напряжения в индуктивных сопротивлениях питающих линий электропередачи, понижающем и преобразовательном трансформаторах, которое можно определить по выражению, %:

$$u_k = \frac{100 \cdot S_{1 \text{ ном}} \cdot (X_{\text{тр.преобр}} + X_{\text{тр.пониж}} + X_c)}{U_{2 \text{ ном}}^2}, \quad (5.15)$$

где:  $U_{2 \text{ ном}}$  – напряжение вторичной обмотки преобразовательного трансформатора, В;

$X_{\text{тр.преобр}}$ ,  $X_{\text{тр.пониж}}$ ,  $X_c$  – индуктивные сопротивления преобразовательного и понижающего трансформаторов, системы внешнего электроснабжения, приведенные к напряжению  $U_{2 \text{ ном}}$ , Ом;

$S_{1 \text{ ном}}$  – номинальная мощность первичной обмотки преобразовательного трансформатора, В·А.

Результаты расчета коэффициента загрузки для преобразовательных агрегатов подстанций по данным измерений приведены в таблице 5.5.

Таблица 5.5 – Расход электроэнергии и загрузка преобразовательных агрегатов

Дата измерений	ЭЧЭ-160 Андроновка		ЭЧЭ-161 Белокаменная	
	ПВА-1	ПВА-2	ПВА-1	ПВА-2
11.04.2019				
Расход, кВт·ч	17867,01	15052,26	18804,78	19398,57
Коэффициент загрузки	0,54	0,46	0,49	0,51

Сравнение внешних характеристик преобразовательных агрегатов, работающих параллельно, в связи с отсутствием систем учета и измерений на стороне постоянного тока выполняется путем определения данных на стороне напряжения 3,3 кВ на основе данных ПК «Энергия Альфа 2».

Для двенадцатипульсового выпрямителя среднее значение выпрямленного напряжения, В, определяется по формуле:

$$U_{d0} = \frac{\sqrt{6} \cdot m}{2\pi \cdot k_{cx}} \cdot U_{2\phi}, \quad (5.16)$$

где:  $m$  – количество пульсаций в кривой выпрямленного напряжения;

$k_{cx}$  – коэффициент схемы (определяется по количеству параллельно соединенных секций выпрямителя);

$U_{2\phi}$  – действующее фазное напряжение вторичной обмотки преобразовательного трансформатора, соединенного по схеме звезды, В.

Результаты измерений позволяют построить фактическую внешнюю характеристику выпрямительных преобразователей (для подстанции ЭЧЭ-160 Андроновка характеристика приведена на рисунке 5.18).

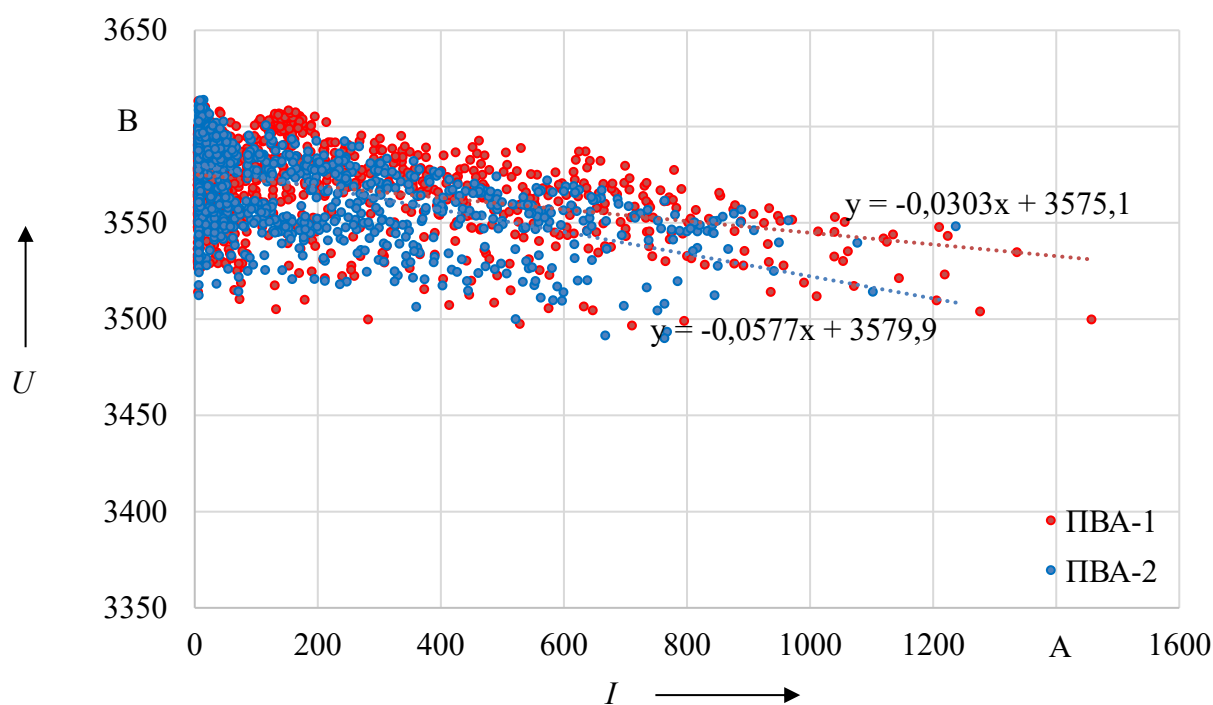


Рисунок 5.18 – Внешние характеристики ПВА-1 и ПВА-2 (ЭЧЭ-160)

Три из пяти ТП МЦК эксплуатируются с поочередной работой преобразовательных агрегатов. Коэффициент загрузки выпрямителей ТП МЦК (по данным измерений за сутки 10.04.2019 г.) не превышает значения 0,8. График изменения напряжения на шинах 3,3 кВ в течение расчетных суток (за 10.04.2019 г.) позволяет оценить изменение напряжения (для ЭЧЭ-160 приведен на рисунке 5.19).

При выполнении имитационного моделирования допустимо принять, что внешние характеристики преобразовательных агрегатов подстанции идентичны, несмотря на незначительные различия коэффициентов наклона внешних характеристик и напряжений холостого хода. Например, для тяговой подстанции

ст. Андроновка МЦК для преобразовательных агрегатов, работающих параллельно коэффициенты наклона внешних характеристик составляют  $-0,03$  и  $-0,06$ . Для целей моделирования энергообменных процессов в СНЭЭ допустимо принять усредненный коэффициент наклона внешней характеристики [69, 104].

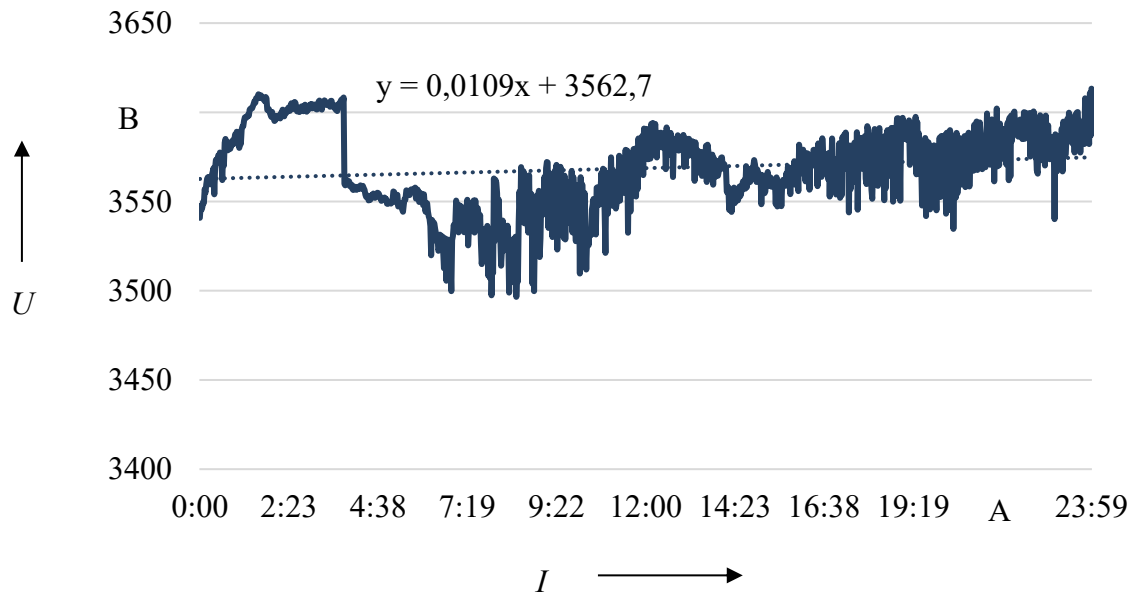


Рисунок 5.19 – График изменения напряжения на шинах 3,3 кВ ЭЧЭ-160 (Андроновка)

С целью стабилизации напряжения в контактной сети в качестве мест размещения СНЭЭ рассматриваются линейные устройства СТЭ (посты секционирования или пункты параллельного соединения). Эффективность указанных мест размещения обусловлена одновременным сокращением потерь электроэнергии в СТЭ и повышением пропускной и провозной способности в границах межподстанционной зоны [130].

По результатам имитационного моделирования для условий работы СНЭЭ на постах секционирования МЦК определены диапазоны изменения токов для условий работы на постах секционирования МЦК (средние значения (*mean*) и среднеквадратичное отклонение (*SD*) приведены на рисунке 5.20.

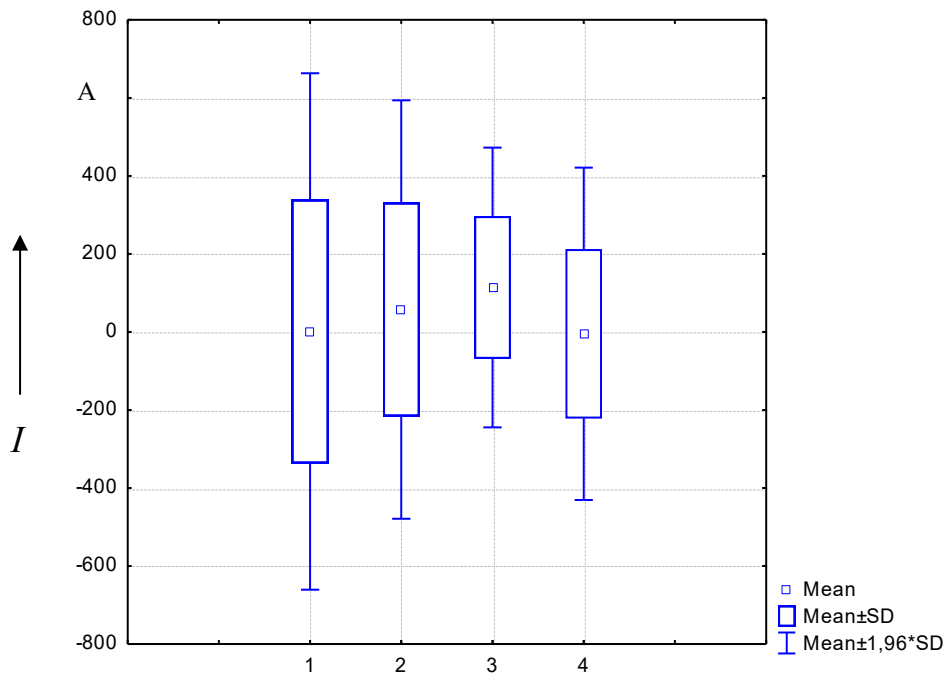
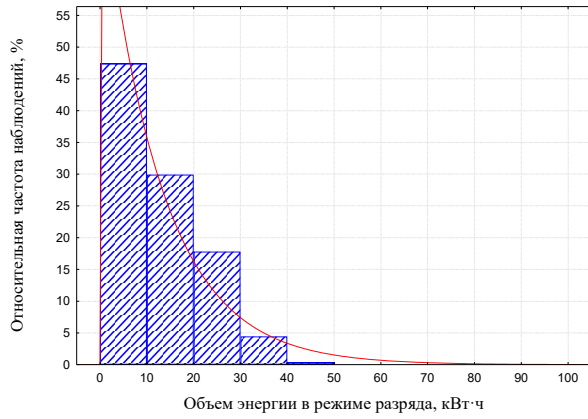


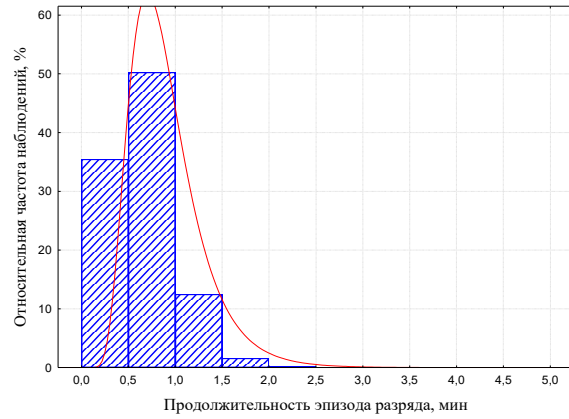
Рисунок 5.20 – Диапазон изменения нагрузки накопителей электроэнергии на шинах постов секционирования МЦК:  
1 – ПСК 270; 2 – ПСК 445; 3 – ПСК 1; 4 – ПСК Черкизово

Параметры СНЭЭ определяются объемами электроэнергии в режимах заряда и разряда, продолжительностью эпизодов работы в указанных режимах, требуемой мощностью. Расчетные характеристики для режимов разряда и заряда применительно к условиям работы СНЭЭ на посту секционирования ПСК 270 приведены на рисунке 5.21.

При решении задачи стабилизации напряжения управление режимами работы СНЭЭ осуществляется по уровню напряжения на шинах. Продолжительность эпизодов работы в различных режимах не превышает 5 мин [144, 152]. Для условий работы рассмотренного выше поста секционирования ПСК 270 продолжительность эпизодов составляет не более 2 мин, а объем электроэнергии по эпизодам не превышает 50 кВт·ч. В условиях работы на МЦК смена эпизодов заряда и разряда отличается высокой частотой – около 0,3 случаев/мин (рисунок 5.22). Аналогичные результаты получены для других постов секционирования МЦК.

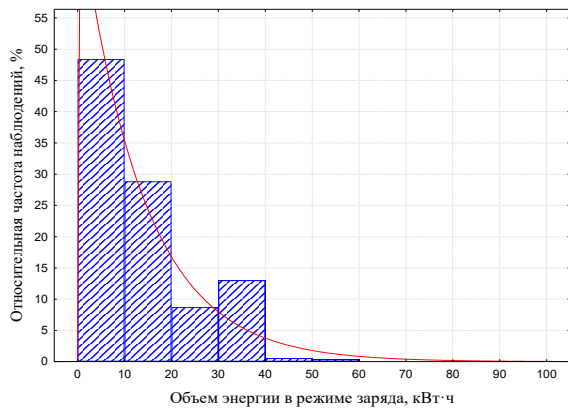


а

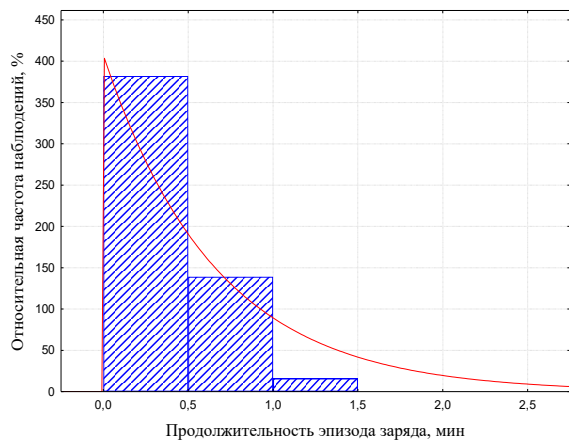


б

Рисунок 5.21 – Частотная распределение объема электроэнергии и продолжительности эпизода в режиме разряда для ПСК 270



а



б

Рисунок 5.22 – Частотное распределение объема электроэнергии и продолжительности эпизода в режиме заряда для ПСК 270

Расчет степени заряженности аккумуляторов выполняется на основе методов, в которых используются уравнения для определения заряженности Шеферда, Хаскиной – Даниленко, Романова [24, 176 – 178], другие эмпирические зависимости и уравнения, полученные с помощью аппарата регрессионного анализа или моделей искусственных нейронных сетей. Одним из простых способов оценки степени заряженности является способ, основанный на суммировании количества электричества или ватт·часов для режимов заряда и разряда.

Результаты моделирования позволяют построить график изменения кумулятивного объема энергии и определить требуемый уровень номинальной энергоемкости СНЭЭ  $W_{\text{СНЭЭ}}$  как разницу между максимальным  $W_{\text{max}}$  и минимальным  $W_{\text{min}}$  кумулятивными значениями за сутки. Указанный объем  $W_{\text{СНЭЭ}}$  позволяет оценить степень заряженности на  $k$ -м шаге расчетов по формуле (5.11).

По результатам имитационного моделирования для условий МЦК для ПСК 270 требуемая номинальная энергоемкость системы  $W_{\text{СНЭЭ}}$  составит 1185 кВт·ч, мощность – 3 МВт. Соответствующий график изменения степени заряженности (начальная степень заряженности  $SoC_0 = 50\%$ ) позволяет оценить глубину разряда  $DoD$ , достигающую 100% (рисунок 5.23, а). При введении ограничений на полезную энергоемкость в размере 500 кВт·ч график  $SoC$  не изменяет цикличность и характер в течение рассматриваемых суток (рисунок 5.23, б). Суммарный объем электроэнергии за сутки в режиме разряда во втором случае снижается относительно первого с 7054 до 5920 кВт·ч, т. е. на 16,1%, в режиме заряда – с 7166 до 6168 кВт·ч, т. е. на 13,9%.

Количество эпизодов работы в режиме заряда и разряда СНЭЭ для условий работы на постах секционирования приведено в таблице 5.6. Среднее количество для режима разряда составляет 542 эпизода, для режима заряда – 404 эпизода.

Таблица 5.6 – Оценка эпизодичности работы СНЭЭ на постах секционирования

Место размещения	Режим работы	
	разряд	заряд
ПСК 270	561	537
ПСК 445	495	451
ПСК-1	604	205
ПСК Черкизово	509	424
Среднее значение	542	404

Одним из важнейших параметров, влияющих на энергетические характеристики СНЭЭ, являются уставки порогового напряжения, определяющие работу СНЭЭ в различных режимах. Оценка энергоемкости

выполняется для условий перехода СНЭЭ в режим разряда при понижении уровня напряжения ниже 3550 В включительно, в режим заряда – 3600 В.

При отсутствии ограничений на значение энергоемкости СНЭЭ для условий ПСК 270 требуемая энергоемкость достигает 1185 кВт·ч. График изменения степени заряженности ( $SoC_{нач} = 50\%$ ) приведен на рисунке 5.23, а. При введении ограничений на энергоемкость в размере 500 кВт·ч график  $SoC$  также не изменяет цикличность и свой характер в течение рассматриваемых суток (см. рисунок 5.23, б). При ограничении энергоемкости суммарный объем электроэнергии за сутки в режиме разряда падает относительно первого случая на 16,1 % (с 7054 кВт·ч до 5920 кВт·ч), в режиме заряда на 13,9 % (с 7166 кВт·ч до 6168 кВт·ч). При увеличении ограничений на энергоемкость до 300 кВт·ч и 200 кВт·ч наблюдается снижение объемов для режима разряда на 22,2 % и 24,9 %, режима заряда – на 21,6 % и 24,7 % соответственно.

Для условий работы СНЭЭ на других постах секционирования МЦК наблюдается аналогичная картина: номинальная энергоемкость для ПСК 270 составляет 1200 кВт·ч; ПСК 445 – 1100 кВт·ч; ПСК-1 – 1300 кВт·ч; ПСК Черкизово – 950 кВт·ч.

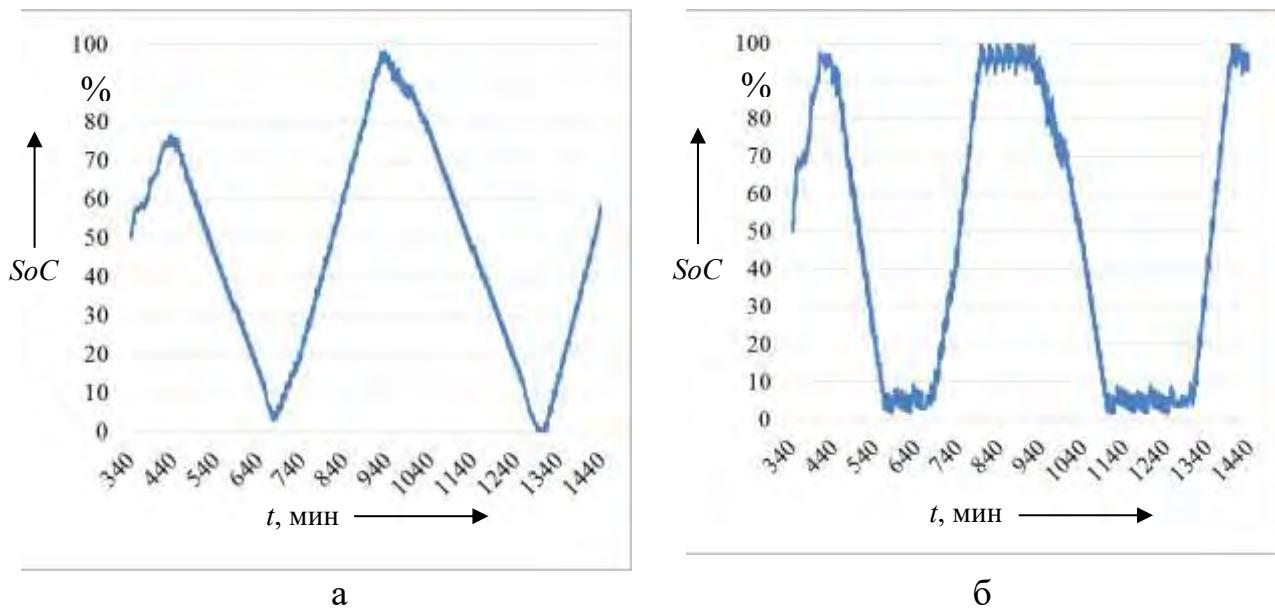


Рисунок 5.23 – График изменения  $SoC$  для накопителя на ПСК 270: без ограничений на энергоемкость (а); с ограничением 500 кВт·ч (б)

Размещение СНЭЭ на постах секционирования позволяет улучшить показатели нагрузочной способности СТЭ и повысить энергетическую эффективность перевозочного процесса.

Коэффициент загрузки выпрямительных преобразователей определяется по формуле (1.1). Изменение коэффициента загрузки выпрямителей ТП, %, определяется по выражению:

$$\Delta k_{3Bt} = \frac{k_{3Bt}^{\text{баз}} - k_{3Bt}^{\text{вар}}}{k_{3Bt}^{\text{баз}}} \cdot 100, \quad (5.17)$$

где:  $k_{н.в.т}^{\text{баз}}$ ,  $k_{н.в.т}^{\text{вар}}$  – коэффициенты загрузки выпрямителей ТП при периоде усреднения  $t$  для базового и рассматриваемого варианта соответственно.

Результаты расчета коэффициентов нагрузки выпрямителей ТП МЦК для базового варианта (баз) и варианта (вар), для которого СНЭЭ расположены на постах секционирования, приведены в таблице 5.7. Применение СНЭЭ позволяет существенно снизить коэффициент загрузки выпрямительных преобразователей ТП (таблица 5.8).

Таблица 5.7 – Коэффициенты загрузки выпрямителей подстанций

Наименование подстанции	Интервал усреднения									
	0,25 мин		2 мин		15 мин		30 мин		среднее	
	баз	вар	баз	вар	баз	вар	баз	вар	баз	вар
Андроновка	0,42	0,31	0,20	0,16	0,14	0,11	0,13	0,10	0,07	0,05
Окружная	0,60	0,46	0,32	0,25	0,21	0,17	0,21	0,17	0,11	0,09
Москва-Киевская	0,45	0,39	0,24	0,22	0,17	0,15	0,17	0,15	0,08	0,07
Покровско-Стрешнево	0,65	0,42	0,33	0,25	0,26	0,19	0,25	0,18	0,12	0,10
Белокаменная	0,34	0,27	0,20	0,19	0,13	0,11	0,13	0,11	0,07	0,06

Сравнение объемов электроэнергии СНЭЭ  $W_{\text{СНЭЭ}}$  (таблица 5.9) по постам секционирования показывает необходимость балансировки объемов электроэнергии в режимах заряда и разряда.

Наибольшее снижение коэффициента нагрузки выпрямительных преобразователей по интервалу усреднения 0,25 мин отмечается на ТП ст. Покровско-Стрешнево, за сутки – ТП ст. Андроновка.

Таблица 5.8 – Снижение коэффициентов загрузки выпрямителей от базовых значений

Наименование подстанции	Снижение коэффициента по интервалам усреднения, %				
	0,25 мин	2 мин	15 мин	30 мин	среднее
Андроновка	26,2	20,0	21,4	23,1	28,6
Окружная	23,3	21,9	19,0	19,0	18,2
Москва-Киевская	13,3	8,3	11,8	11,8	12,5
Покровско-Стрешнево	35,4	24,2	26,9	28,0	16,7
Белокаменная	20,6	5,0	15,4	15,4	14,3

Среднее повышение минимального напряжения на токоприемнике ЭПС при применении СНЭЭ от значений для варианта с выпрямительно-инверторными преобразователями на тяговых подстанциях МЦК достигает 4,1 % или около 150 В.

Таблица 5.9 – Оценка объемов электроэнергии СНЭЭ на постах секционирования

Наименование поста секционирования	Объем электроэнергии по режимам работы, кВт·ч	
	разряд	заряд
ПСК 270	9028	12100
ПСК 445	9222	3866
ПСК-1	9113	1522
ПСК Черкизово	3663	4372

По результатам расчета наибольшим потенциалом возврата электроэнергии обладает ТП ст. Андроновка, где удельный вес возврата достигает 26 % от объема принятой электроэнергии (рисунок 5.24). На остальных подстанциях доля объема возврата находится в диапазоне от 1,8 % до

12 %. Объемы электроэнергии в режиме заряда для расчетных условий превышают объемы возврата для ВИП.

В отличие от ВИП применение СНЭЭ позволяет существенно снизить коэффициент нагрузки выпрямителей ТП МЦК не менее чем на 10 %. По сравнению с применением выпрямительно-инверторных агрегатов применение СНЭЭ позволяет повысить уровень минимального напряжения в контактной сети МЦК в среднем на 4,1 % или около 150 В.

По результатам расчетов наиболее эффективными вариантами являются варианты с наименьшим электропотреблением (таблица 5.10). Результаты расчета электропотребления на тягу приведены в о. е., где за базисное значение принято электропотребление на тягу для существующего варианта СТЭ МЦК. Ряд вариантов (варианты №№ 2, 3, 4, 5, 7) имеют одинаковый потенциал повышения уровня энергетической эффективности – на 13,3 %. Уступают по энергетической эффективности в порядке значимости варианты 6 и 8.

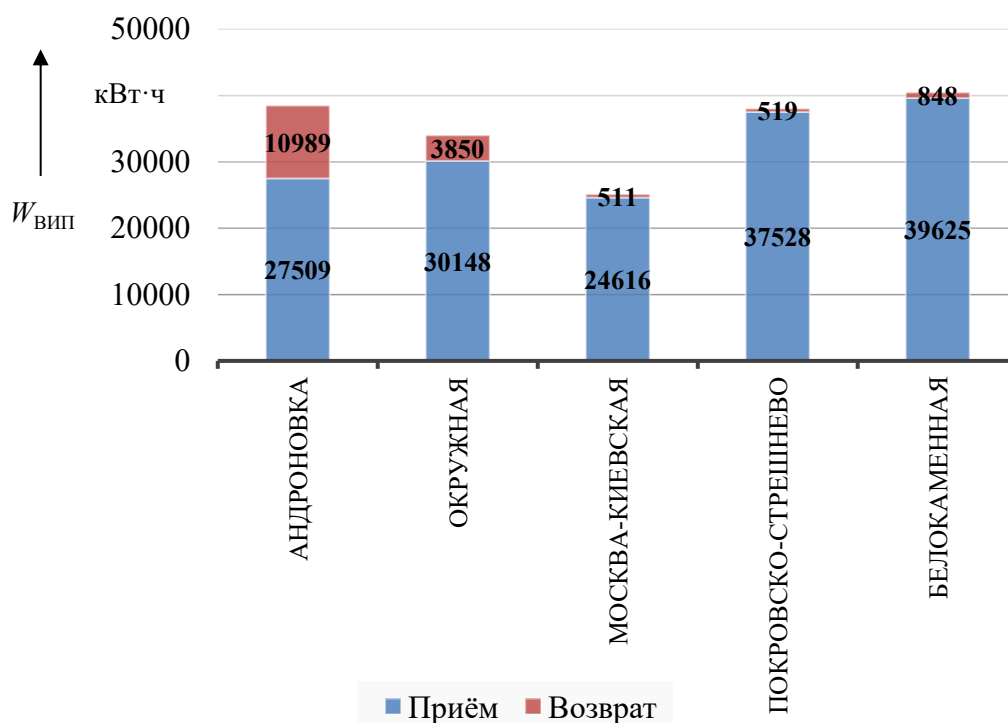


Рисунок 5.24 – Гистограмма объемов электроэнергии по тяговым подстанциям МЦК

Наибольший объем использования энергии рекуперации достигается при реализации выпрямительно-преобразовательного агрегата на ТП ст. Андроновка и СНЭЭ на постах секционирования ПСК 270 и ПСК Черкизово (рисунок 5.25).

Таблица 5.10 – Результаты расчета для различных вариантов

N	ЭЧЭ-Андроновка	ПСК 270	ПСК Черкизово	$W$ , о.е.
1	-	-	-	1,000
2	×	-	-	0,867
3	×	×	-	0,867
4	×	-	×	0,867
5	×	×	×	0,867
6	-	×	-	0,880
7	-	×	×	0,867
8	-	-	×	0,949

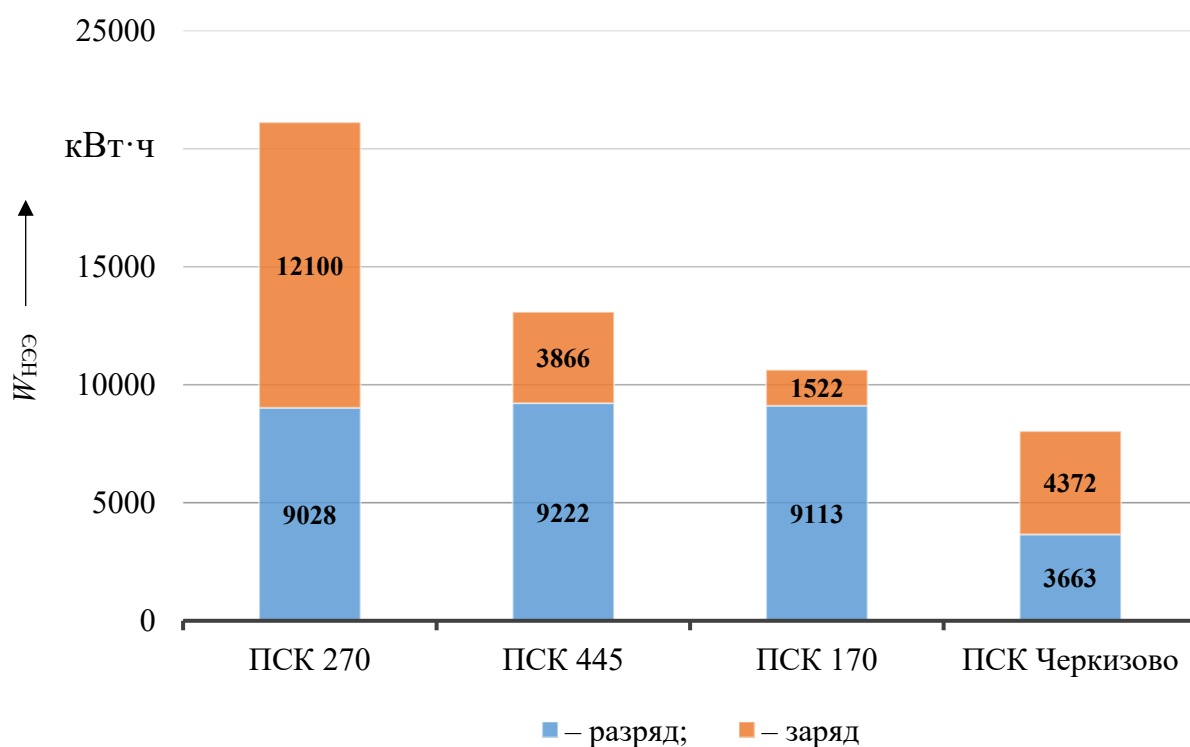


Рисунок 5.25 – Гистограмма объемов электроэнергии систем накопления электроэнергии по режимам работы

По критерию снижения показателей нагрузочной способности применение СНЭЭ на ПСК 270 и ПСК Черкизово является предпочтительным по сравнению с размещением выпрямительно-инверторного преобразователя на ТП ст. Андроновка. По критерию энергетической эффективности ряд вариантов

размещения выпрямительно-инверторного преобразователя и СНЭЭ на указанных объектах является равнозначным.

Работа СНЭЭ позволяет снизить коэффициент нагрузки выпрямителей на ТП МЦК в среднем за сутки от 12,5 до 28,6 %. Наибольшие объемы энергии в режимах заряда и разряда СНЭЭ наблюдаются для условий поста секционирования ПСК 270, для которого объемы энергии разряда и заряда относятся друг к другу как 1/1,3.

Для варианта с применением выпрямительно-инверторных преобразователей на ТП повышение энергетической эффективности перевозок составит 11,97 %, для варианта с применением СНЭЭ на постах секционирования – 11,94 %. Уровень потерь в тяговой сети для варианта с инвертором составляет 3,68 % против 3,14 % для варианта с размещением СНЭЭ на постах секционирования (таблица 5.11). Объем электроэнергии для режимов возврата и заряда для рассмотренных вариантов составляет 10,5 и 13,7 % соответственно.

Таблица 5.11 – Электропотребление на тягу для различных вариантов

Вариант	Сальдированное электропотребление на тягу, кВт·ч	Потери в тяговой сети, кВт·ч (%)	Объем возврата (заряда), кВт·ч
Базовый	181 116	6 011 (3,32)	0
С ВИПом	159 424	5 874 (3,68)	16 717
С накопителями	159 490	5 014 (3,14)	21 862

По критерию энергетической эффективности наилучшим вариантом является вариант, соответствующий размещению инвертора на тяговой подстанции ст. Андроновка и СНЭЭ электроэнергии на постах секционирования ПСК 270 и ПСК Черкизово, ограничивающих подстанции с обеих сторон. В этом случае потенциальная экономия электроэнергии за сутки для пассажирского движения составит около 24,6 тыс. кВт·ч, уровень потерь электроэнергии –

3,4 %. Альтернативным вариантом является размещение СНЭЭ на постах секционирования ПСК 270 и ПСК Черкизово, в этом случае потенциал экономии электроэнергии сохраняется (24,6 тыс. кВт·ч в сутки), а уровень потерь электроэнергии увеличивается до 3,6 %.

## 5.2 Выбор устройств накопления электроэнергии для участков систем тягового электроснабжения

Развитие технологий хранения электроэнергии и совершенствование различных видов НЭЭ обуславливает появление более мощных и энергоемких систем, улучшение их удельных характеристик и снижение стоимости. Сохранение тенденции изменения удельной стоимости различных видов НЭЭ позволяет прогнозировать снижение стоимости большинства известных СНЭЭ к 2025 г. до уровня 35 – 40 тыс. р. / кВт·ч в текущих ценах [23].

За рубежом и в России промышленностью освоен выпуск различных видов НЭЭ и соответствующих преобразователей [24], которые существенно различаются по своим параметрам и характеристикам. Наиболее мощными и энергоемкими являются гидроаккумулирующие электростанции, доля которых в существующей структуре мощности всех СНЭЭ превышает 90 %. Среди других видов наибольшее распространение получили различные электрохимические аккумуляторы, суперконденсаторы (ионисторы), кинетические накопители и накопители, использующие энергию сжатого воздуха.

Основными энергетическими параметрами СНЭЭ являются мощность и энергоемкость, примерный диапазон изменения которых для применения в транспортных системах оценивается в примерном диапазоне 1 – 5 МВт и 100 – 10000 кВт·ч соответственно и определяется видом транспортных средств и электротяговой нагрузкой.

В настоящее время НЭЭ нашли применение в метрополитенах и СТЭ пригородных линий. В СТЭ отечественного железнодорожного транспорта СНЭЭ пока не нашли применения. В качестве примера применения в России

можно привести опытную эксплуатацию СНЭЭ в Московском метрополитене [25]. За рубежом также имеется опыт успешной эксплуатации СНЭЭ в метро (напряжение – 750 В), например, в метро г. Осака (Япония), где применяются литий-ионные аккумуляторы энергоемкостью около 500 кВт·ч на напряжение 750 В, а на линиях пригородного сообщения – ст. Осака (2019 г.) с литий-ионными аккумуляторами энергоемкостью 7 000 кВт·ч (Tesla) [251].

Одним из перспективных видов для транспортных систем является накопитель кинетического вида. Исследования в области разработки инерционного НЭЭ, предназначенного для использования на МЦК, привели к появлению опытного образца, мощность которого была заявлена в диапазоне 5 – 10 МВт, энергоемкость – 100 – 150 МДж (28 – 42 кВт·ч) (таблица 5.12 [179].

Современные суперконденсаторы (ионисторы) являются конденсаторами высокой емкости, напряжение которых не превышает 1000 В. Суперконденсаторы по удельной энергоемкости уступают электрохимическим накопителям, но превосходят их по удельной мощности. Энергоемкость отдельных элементов молекулярных суперконденсаторов составляет 9 – 60 кДж, ток 670 – 4000 А (таблица 5.13) [180].

Таблица 5.12 – Основные энергетические параметры инерционного накопителя

Параметр	Значение параметра
Обменный запас электроэнергии	42 кВт·ч
Напряжение на входе ИНЭ при заряде	3550 – 4000 В
Напряжение на выходе ИНЭ при разряде	3300 – 3550 В
Максимальный ток заряда – разряда $I_{\max}$	3000 А
Длительность пика заряда – разряда	15 – 30 с
Среднеэффективное значение тока в течение часа	650 А
Среднеэффективное значение тока в течение перезаряда	1600 А
Пиковая мощность ИНЭ	10 МВт

Эффективность применения СНЭЭ для пассажирского движения показывает потенциальную экономию электроэнергии на тягу. Зарубежные

исследования показывают потенциальный эффект для СТЭ 3,3 кВ от реализации проекта СНЭЭ в пассажирском движении [250].

Имеющиеся преимущества и недостатки различных видов НЭЭ [242] привели к появлению гибридных СНЭЭ, в составе которых используются преимущества одних видов НЭЭ перед другими.

Таблица 5.13 – Характеристики молекулярных суперконденсаторов («Технокор»)

Тип, кДж/В	Напряжение, В	Ток, А	Емкость, Ф	Внутреннее сопротивление, Ом	Энергоемкость, кДж	Мощность, кВт
9/14	14	670	95,0	0,0060	9,3	8,2
40/28	28	4000	104,0	0,0055	40,8	35,6
40/64	64	2125	18,0	0,0300	36,9	34,1
40/96	96	1300	9,0	0,0600	41,5	38,4
20/150	150	750	1,8	0,2000	20,3	28,1
15/175	175	700	1,0	0,2500	15,3	30,6
60/200	200	1000	3,0	0,2000	60,0	50,0
27/220	220	1100	1,1	0,2000	27,1	60,5
18/350	350	700	0,3	0,4000	18,4	76,6
64/400	400	1000	0,8	0,4000	64,0	100,0
36/700	700	1000	0,2	0,7000	36,8	175,0

Объемы электроэнергии заряда и разряда СНЭЭ на шинах линейных устройств СТЭ позволяют определить соответствующие коэффициенты:

$$k = \frac{W_z}{W_p}, \quad (5.18)$$

где  $W_z$ ,  $W_p$  – объем электроэнергии, соответствующий режиму заряда и разряда.

Так для условий применения СНЭЭ на постах секционирования МЦК (ПСК 270, ПСК 445, ПСК 170 и ПСК Черкизово) указанные коэффициенты составляют: 1,34; 0,42; 0,17 и 1,19 соответственно. Только для двух вариантов размещения СНЭЭ, для которых  $k > 1$ , энергообменные процессы оказываются сбалансированными. Представленные результаты получены для пороговых напряжений включения режимов заряда и разряда – 3600 и 3550 В соответственно. Изменение пороговых напряжений приводит к существенному изменению картины распределения объемов электроэнергии по режимам работы и оказывает влияние на требуемый уровень полезной энергоемкости.

НЭЭ, выпускаемые с использованием литий-железофосфатной технологии (в качестве катодного материала используется  $\text{LiFePO}_4$ ), имеют относительно невысокую стоимость и срок службы не менее 8 лет [24]. При глубине разряда 80 % ресурс составляет не менее 2000 циклов «заряд – разряд». Указанный ресурс может оказаться критическим при выборе вида НЭЭ, поскольку, например, для условий МЦК в сутки ожидается два – три цикла «заряд – разряд». Глубокий разряд в данных условиях приведет к исчерпанию ресурса работы аккумуляторов за два – три года. При глубине разряда от 15 до 25 % ресурс аккумуляторов  $\text{LiFePO}_4$  будет определяться условиями эксплуатации и составит около 15 – 20 лет. Изготовителями литий-ионных аккумуляторов рекомендуются токи заряда аккумулятора при его эксплуатации на уровне  $0,2C_n - 1C_n$ , разряда –  $0,2C_n - 2C_n$ . Необходимость ограничения токов аккумуляторов требует согласованного выбора мощности и энергоемкости системы.

Буферный режим работы, для которого продолжительность режима разряда с уровня  $1,0 C_3$  до  $0,6 C_3$  током  $0,2 C_n$  составляет около 2 часов, не подходит для условий СТЭ, для которой продолжительность режимов заряда и разряда может составлять 3 – 4 часа (МЦК) или чередоваться с режимами заряда, эпизоды для которых могут не превышать 5 мин (участки с преобладанием грузового движения).

В качестве основных преимуществ применения электрохимических видов НЭЭ является относительно низкая стоимость и высокая удельная энергоемкость. В качестве основных недостатков применения необходимо выделить следующие:

- 1) недостаточный ресурс работы. Увеличение ресурса литий-ионных аккумуляторов возможно до 15 – 20 лет при реализации глубины разряда до 25 %. Это приводит к существенному росту номинальной энергоемкости аккумуляторной батареи (в четыре раза и более). Так, при полезной энергоемкости аккумуляторов для условий МЦК на уровне 500 кВт·ч, номинальная энергоемкость составит 2000 кВт·ч, для уровня 1000 – 4000 кВт·ч;

2) необходимость стабилизации по току в режимах заряда и разряда по заданной кратности  $C_n$ , что приведет к необходимости увеличения номинальной емкости для покрытия пиковых тяговых нагрузок МЦК или снижения токовой нагрузки относительно номинальной в несколько раз;

3) отсутствие необходимости буферного режима работы из-за специфики электротяговой нагрузки.

Суперконденсаторы (ионисторы, ультраконденсаторы) обладают высокими энергетическими характеристиками, большим ресурсом и сроком службы. Например, суперконденсаторы *BOOSTCAP* фирмы *Maxwell* эффективно работают в диапазоне от номинального напряжения до уровня  $\frac{1}{2}$  номинального напряжения, что позволяет использовать около 75 % доступной энергии. Данные суперконденсаторы являются электрохимическими конденсаторами двойного слоя (*EDLC*) [181].

Максимальная запасаемая энергия для конденсаторов определяется по формуле, кВт·ч:

$$W = \frac{CU^2}{7200} \quad (5.19)$$

Используемая удельная мощность, Вт/кг:

$$p = \frac{0,12U^2}{ESR_{DC}m}, \quad (5.20)$$

где:  $ESR_{DC}$  – внутреннее сопротивление постоянному току, Ом.

Суперконденсаторы характеризуются типовой постоянной времени, составляющей около 1 с. Данное время показывает продолжительность заряда суперконденсатора с 0 до 63,2 % или разряда с уровня заряженности от 100 до 36,8 %.

Суперконденсаторы подвержены деградации емкости  $C$ , выражающейся в снижении номинальной емкости на 30 %, которая зависит от температуры. Так, для напряжения, поддерживаемого на уровне 2,7 В, деградация проявляется

после 5 500 часов при температуре 65 °С, после 11 000 часов – при температуре 55 °С, после 22 000 часов – при температуре 45 °С, после 44 000 часов – при температуре 35 °С, после 88 000 часов – при температуре 25 °С. Указанная характеристика указывает на необходимость учета тепловых процессов и способов охлаждения суперконденсаторов при определении ресурса суперконденсаторов.

Изменение температуры суперконденсаторов определяется

$$\Delta T = I_{RMS}^2 ESR_{DC} R_{th}, \quad (5.21)$$

где:  $R_{th}$  – тепловое сопротивление (°С/Вт).

Расчетная продолжительность эпизодов в режимах заряда и разряда суперконденсаторов находится в примерном диапазоне 1 – 5 мин. Ресурс работы суперконденсаторов составляет свыше 100 000 циклов «заряд – разряд» и для некоторых выпускаемых образцов достигает 0,5 – 10·млн циклов. Указанные характеристики хорошо согласуются с особенностями электротяговой нагрузки по ресурсу работы, использованию энергоемкости и продолжительности циклов «заряд – разряд».

Основными преимуществами применения суперконденсаторов на МЦК являются следующие:

1) заявляемый производителями суперконденсаторов ресурс работы (более 500 000 циклов) позволяет оценивать продолжительность работы устройства по уровню деградации емкости и производительности. В данном случае ресурс работы не является критичным показателем работы. В этом случае определяющими будут процессы нагрева суперконденсатора;

2) полезная энергоемкость суперконденсаторов оценивается на уровне около 75 % от номинальной, что по сравнению с литий-ионными аккумуляторами позволяет существенно снизить номинальную энергоемкость;

3) продолжительность эпизодов в режимах заряда и разряда суперконденсатора хорошо согласуется с продолжительностью непрерывных

эпизодов работы СНЭЭ и позволяет реализовать частоту энергообменных процессов, соответствующих ГДП.

Основными недостатками суперконденсаторов, оказывающими влияние на эффективность работы СНЭЭ, являются низкие удельные энергетические характеристики и стоимостные показатели.

Выпускаемые промышленностью кинетические НЭЭ предназначены для работы в буферном режиме. Увеличение продолжительности заряда и разряда приводит к необходимости увеличения массогабаритных показателей или количества модулей в системе электромеханического накопителя электроэнергии. Известны маховичные НЭЭ кинетической энергии для городского электротранспорта серии НКЭ-3Г [182], заявленный срок службы которых составляет 20 лет. Накопитель указанной марки имеет следующие характеристики: мощность – 180 кВт, энергоемкость – 1,95 кВт·ч. Для соответствия условиям работы в СТЭ количество НЭЭ указанного вида определяется аналогично аккумуляторной батарее (например, для условий МЦК составит свыше ста штук). Указанная выше марка устройства характеризуется достаточно низким удельным весом энергоемкости – 0,55 кВт·ч/т, ожидаемая масса для энергоемкости 100 кВт·ч составит около 181 т. Ресурс подшипника оценивается на уровне пяти лет работы. Максимальное напряжение НЭЭ указанной серии составляет 825 В. Производитель не указывает данные по продолжительности времени, необходимого для полного заряда и разряда. Другие образцы кинетических накопителей имеют аналогичные характеристики [183]: время разгона – 420 с, КПД – до 97 %, время поддержания провалов напряжения – до 7 с. Соотношение продолжительности разгона/торможения составляет 60/1.

Основные недостатки, характеризующие применение кинетических НЭЭ в условиях МЦК, следующие:

- 1) несоответствие характеристик НЭЭ в режиме разгона и торможения продолжительности работы эпизодов и времени работы в режимах заряда и

разряда в условиях СТЭ (продолжительность разряда существенно меньше времени разгона ЭПС);

2) несоответствие основного режима работы (буферный режим) условиям работы в СТЭ. По данному критерию НЭЭ не удовлетворяет условиям работы в СТЭ, где требуется циклический режим работы;

3) известные отечественные образцы имеют низкие удельные характеристики, что для СТЭ приводит к существенному увеличению массы устройств.

По критерию ресурса работы НЭЭ для условий МЦК, определяемого сроком службы подшипника, не зависящим от циклическости работы устройства, общий срок службы составляет 20 лет.

Таким образом, для условий СТЭ применение аккумуляторов на основе литий-ионных технологий требует относительно высокой номинальной энергоёмкости для сохранения срока службы и условий заряда и разряда. В случае применения суперконденсаторов энергоёмкость по сравнению с литий-ионными видами аккумуляторов снижается, однако имеется ряд недостатков, связанных с деградацией ёмкости и относительно высокими стоимостными показателями. Кинетические НЭЭ электроэнергии, предназначенные для работы в буферном режиме, не удовлетворяют условиям тяговой нагрузки, расчетным графикам заряженности устройств, продолжительности эпизодов заряда и разряда и обладают низкими удельными характеристиками, современные образцы нуждаются в совершенствовании и доработке. Представленные характеристики электротяговой нагрузки и основных видов НЭЭ, расчетные режимы работы для СТЭ делают целесообразным применение гибридных технологий, включающих в себя модули на основе сочетания аккумуляторных батарей и суперконденсаторов. Гибридная СНЭЭ электроэнергии, совмещающая в себе преимущества аккумуляторной батареи и суперконденсатора, наиболее близко подходит к характеристикам электротяговой нагрузки и позволяет добиться максимальной эффективности работы устройства. Указанное направление исследований позволяет определить задачи по нахождению оптимального соотношения

энергоемкости модулей в составе указанного устройства, разработке алгоритмов управления с учетом тяговой нагрузки на смежных ТП и является предметом отдельного рассмотрения.

### 5.3 Применение систем накопления на тяговых подстанциях для снижения загрузки силового оборудования за счет использования рекуперации

Помимо решения задач по стабилизации напряжения СНЭЭ позволяют решать задачи по выравниванию графика тяговой нагрузки с целью снижения степени перегрузки силового оборудования и сокращения уровня потерь в нем [334 – 337]. Развитие технологий хранения электроэнергии с помощью НЭЭ различного вида позволяет рассматривать вопросы по их использованию и на электрическом транспорте, в том числе на тяговых подстанциях СТЭ железнодорожного транспорта [112, 322].

Выполненные в данном направлении исследования позволяют сформировать основные задачи и пути их решения с помощью СНЭЭ (см. рисунок 1.1) при применении их в СТЭ [104, 184, 185]. Если при работе СНЭЭ на постах секционирования решается задача повышения уровня напряжения [186], то при размещении устройств на тяговых подстанциях – задача снижения перегрузки силового оборудования или сокращение электропотребления на собственные нужды.

Применение СНЭЭ на ЭПС в ряде случаев, как это показано в [187], является менее эффективным мероприятием по сравнению с применением в СТЭ по причине относительно низкого коэффициента использования энергоемкости и более высоких капитальных затрат.

Допустимая перегрузка силового оборудования ТП определяется ее кратностью и продолжительностью. Для оценки эффективности работы СНЭЭ на подстанции рассматриваются различные целевые значения допустимой перегрузки: 0 (отсутствие перегрузки), 25, 50, 75 и 100 %. Перегрузка для выпрямительного преобразователя оценивается по коэффициенту загрузки,

рассчитываемому как отношение расчетного тока нагрузки  $I$  и номинального тока преобразователя  $I_{\text{НОМ}}$ :

$$k_3 = \frac{I}{I_{\text{НОМ}}} \cdot 100. \quad (5.22)$$

Для оценки условий работы СНЭЭ токи в режимах разряда и заряда должны определяться с учетом следующих условий:

– для режима разряда:

$$\begin{cases} I_p = 0 : I_{\text{ВВ-3,3}} \leq I_{\text{НОМ}} \\ I_p = I_{\text{ВВ-3,3}} - k_{zi} \cdot I_{\text{НОМ}} : I_{\text{ВВ-3,3}} > I_{\text{НОМ}} \end{cases}, \quad (5.23)$$

где:  $I_{\text{ВВ-3,3}}$ ,  $I_{\text{НОМ}}$  – ток ввода и номинального тока выпрямительного преобразователя соответственно, А;

$k_{zi}$  – коэффициент загрузки, принимающий  $i$ -е значение, соответствующее уровню перегрузки (1,25; 1,50; 1,75 и 2,00), о.е.;

– для режима заряда:

$$\begin{cases} I_3 = 0 : I_{\text{ВВ-3,3}} \geq I_{\text{НОМ}} \text{ или } U_{\text{Ш}} \leq U_{3 \text{ min}}; \\ I_3 = I_{3 \text{ ном}} \cdot \left( 1 - \frac{I_{\text{ВВ-3,3}}}{I_{\text{НОМ}}} \right) : I_{\text{ВВ-3,3}} < I_{\text{НОМ}} \text{ и } U_{31} < U_{\text{Ш}} < U_{32}; \\ I_3 = I_{3 \text{ ном}} : I_{\text{ВВ-3,3}} < I_{\text{НОМ}} \text{ и } U_{\text{Ш}} \geq U_{3 \text{ max}}; \end{cases} \quad (5.24)$$

где:  $U_{\text{ш}}$  – текущее напряжение на шинах тяговой подстанции, В;

$U_{3 \text{ min}}$ ,  $U_{31}$ ,  $U_{32}$ ,  $U_{3 \text{ max}}$  – пороговые напряжения для режима заряда, определяющие минимальное напряжение, нижнюю и верхнюю границы текущего напряжения и верхнюю границу для расчета тока заряда соответственно, В;

$I_{3 \text{ ном}}$  – номинальный ток заряда СНЭЭ, А.

Построение графиков степени заряженности и определения глубины разряда выполняется на основе ТР, выполненных для условий применения

рекуперативного торможения ЭПС и его отсутствия на примере участка Екатеринбург – Пермь II Свердловской железной дороги.

Для проведения электрических расчетов применяется ГДП с пакетным пропуском в направлении наибольшего токопотребления по расчетной схеме «Н-с-с-с» (Н – поезд повышенной массы, с – поезд средней массы) в одном направлении и потоком поездов во встречном направлении, что соответствует расчетным условиям для участков с обращением тяжеловесных поездов. Расчеты выполнены в условиях параллельной работы выпрямительных преобразователей на ТП рассматриваемого участка.

Для проведения ЭР применяется математическая модель, построенная на основе схем замещения для силового оборудования и контактной сети, решение которой выполняется с помощью метода равномерных сечений графика движения поездов путем решения мгновенных схем и позволяет определить электрические величины для установившегося режима в любой момент времени с учетом параметров СНЭЭ [188, 189].

Для рассматриваемого участка при работе СНЭЭ на ТП графики степени заряженности построены для двухчасовых периодов. При построении графиков приняты следующие исходные данные: максимальный ток СНЭЭ равен 3000 А, полная энергоемкость системы составляет 1000 кВт·ч, положительному направлению тока СНЭЭ на графике соответствует разряд, отрицательному – заряд. В качестве примера графики  $SoC$  и нагрузки приведены для одной из лимитирующих тяговых подстанций (ТП 3) участка (рисунок 5.26). Сокращение уровня допустимой перегрузки силового оборудования приводит к снижению средней степени заряженности и обуславливает максимальную глубину разряда. Так, для одной из подстанций (ТП 3) (см. рисунок 5.26) для условий допустимой перегрузки 0, 25 и 50 % в графике степени заряженности преобладает разряд, для условий допустимой перегрузки 75 и 100 % – заряд, что соответствует изменению токов в режимах заряда и разряда.

Применение рекуперативного торможения оказывает существенное влияние на условия работы СНЭЭ на тяговых подстанциях. Результаты расчетов

показывают положительное влияние рекуперации на условия работы систем, проявляющееся в увеличении средней степени заряженности и сокращения глубины разряда. Результаты расчета для одной из тяговых подстанций (ТПЗ) для расчетных условий допустимой перегрузки приведены на рисунке 5.27 (максимальный ток СНЭЭ равен 3000 А, номинальная энергоемкость системы – 1000 кВт·ч).

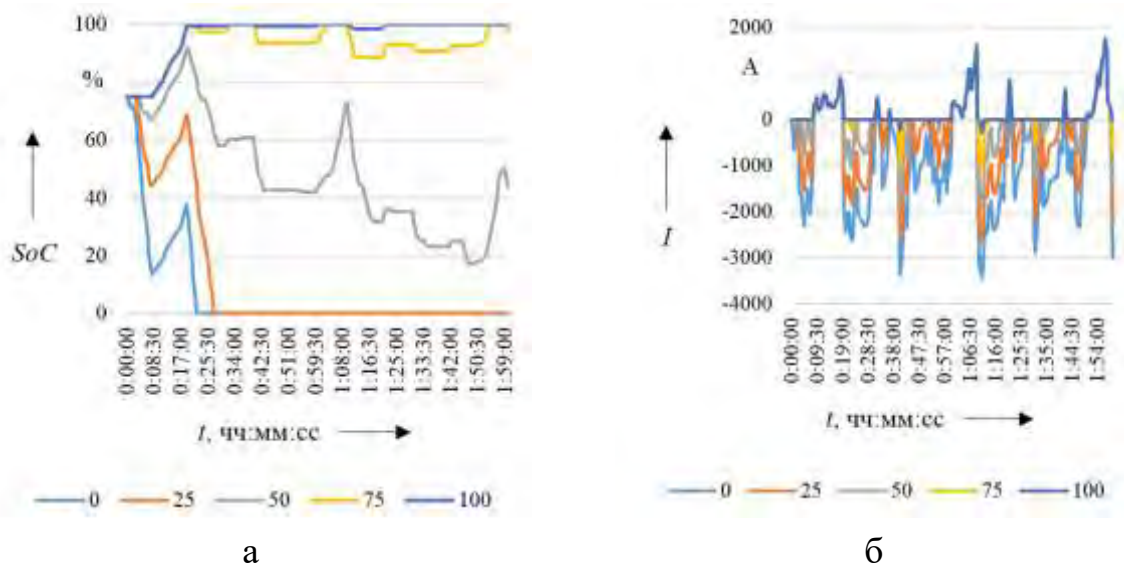


Рисунок 5.26 – Графики степени заряженности (а) и тока (б) системы накопления электроэнергии без применения рекуперации

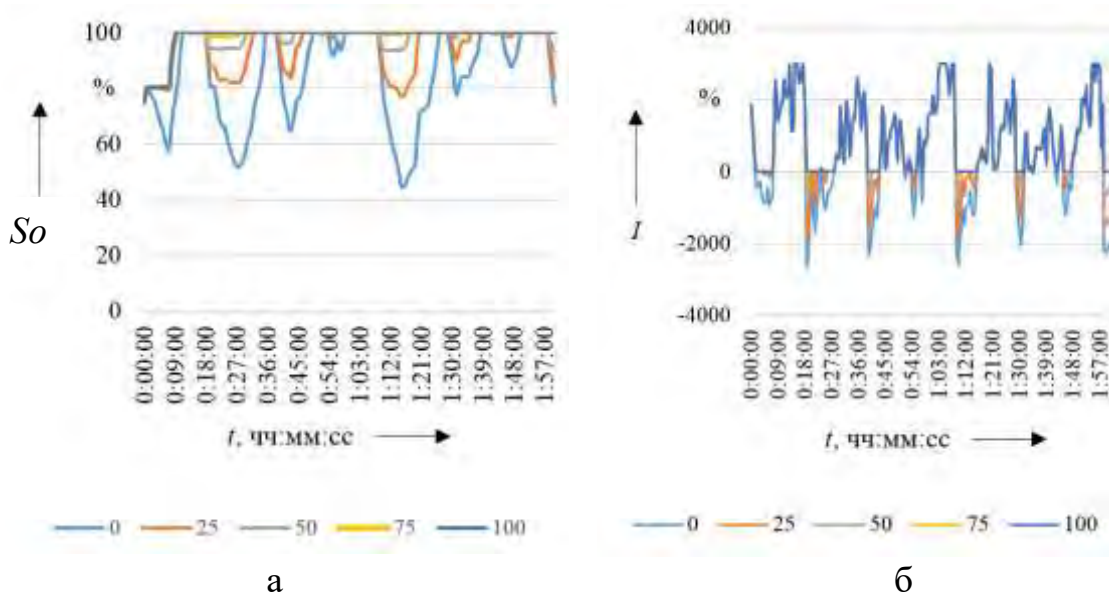


Рисунок 5.27 – Графики степени заряженности (а) и тока (б) системы накопления электроэнергии в условиях применения рекуперации

Для условий применения рекуперативного торможения средняя степень заряженности повышается и находится в диапазоне 84 – 97 %, глубина разряда падает – находится в диапазоне 29 – 60 %. Отсутствие рекуперации на участке при условии сохранения параметров движения и СТЭ приводит к снижению средней степени заряженности, наблюдаемой в диапазоне 6 – 96 % и увеличению глубины разряда, наблюдаемого в диапазоне 29 – 75 % (таблица 5.14). Выбор параметров СНЭЭ и определения зарядных и разрядных характеристик для ТП выполняется индивидуально.

Таблица 5.14 – Результаты расчета для лимитирующих тяговых подстанций

Подстанция	$SoC_{ср}, \%$		$DoD_{макс}, \%$	
	без РТ	с РТ	без РТ	с РТ
ТП 1	75	93	72	46
ТП 2	96	97	29	29
ТП 3	6	84	75	56
ТП 4	8	86	75	60

Результаты расчетов по определению  $SoC$  и тока СНЭЭ, глубины разряда  $DoD$ , параметров СНЭЭ для определения загрузки выпрямительного преобразователя на ТП при ограничении перегрузки получены при реализации алгоритма расчета, приведенного на рисунке 5.28.

Применение рекуперации не оказывает существенного влияния на формирование тяговой нагрузки, которая находится в относительно узком диапазоне, в тоже время распределение нагрузки без СНЭЭ изменяется – тяговая нагрузка смещается в сторону меньших значений.

В качестве примера на рисунке 5.29 приведены результаты сравнения тяговой нагрузки выпрямительных преобразователей тяговой подстанции ТПЗ для условий работы СНЭЭ на подстанции (для исключения перегрузки) и без нее. Аналогичные результаты получены для других ТП.

Результаты электрических расчетов тяговой нагрузки позволяют оценить изменение глубины разряда СНЭЭ в зависимости от максимального тока заряда, зарядной характеристики и полной энергоемкости.

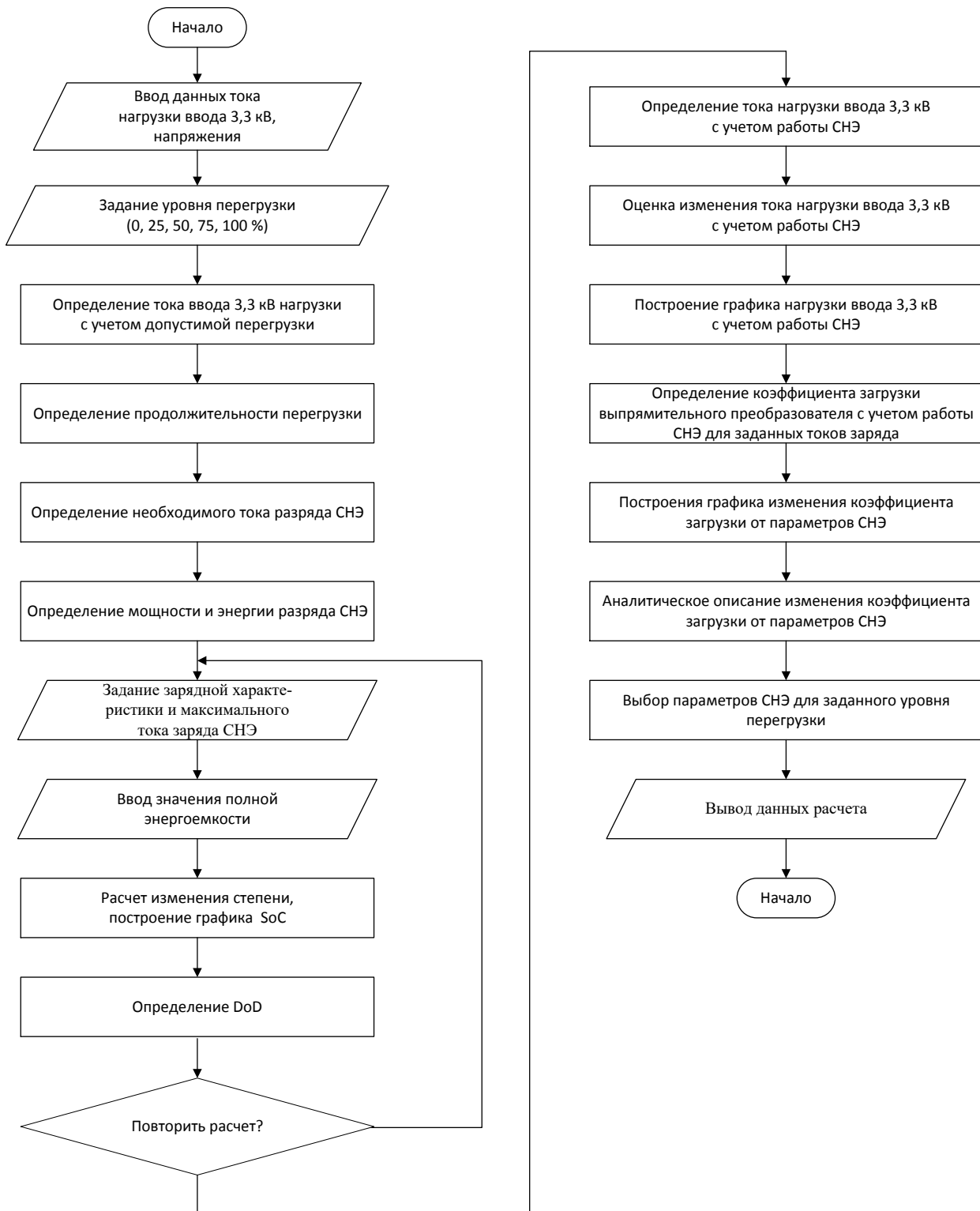


Рисунок 5.28 – Алгоритм определения параметров системы накопления электроэнергии на тяговой подстанции

В качестве примера приведены результаты определения глубины заряда для работы системы на одной из ТП рассматриваемого участка (ТПЗ), для которой увеличение тока заряда с 250 до 3000 А и полной энергоемкости до

2000 кВт·ч для условий отсутствия перегрузки не оказывают влияния на глубину разряда, достигающую 75 % при принятой начальной степени заряженности 75 %, в графике степени заряженности преобладает разряд (рисунок 5.30, а).

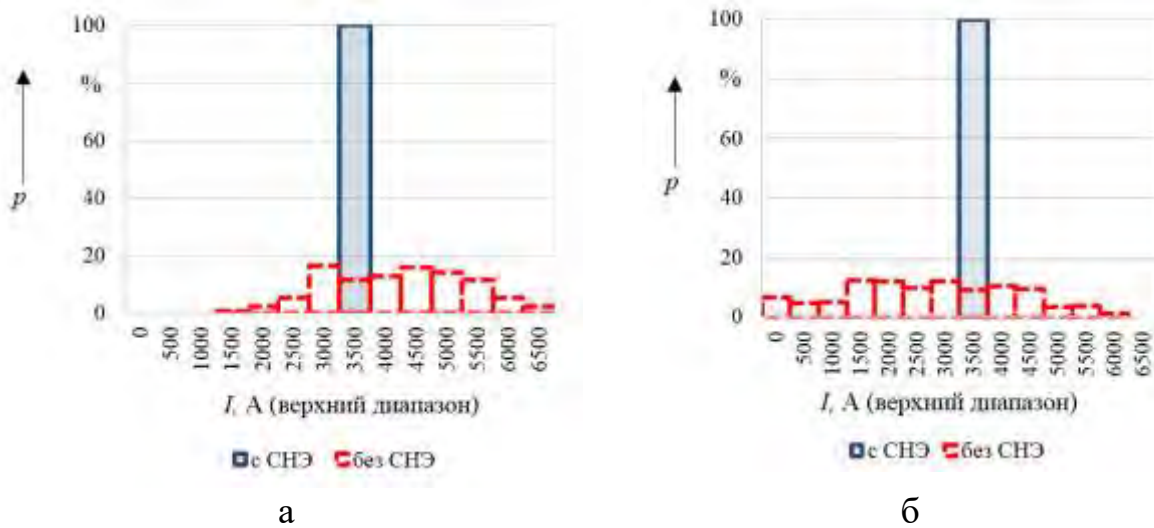


Рисунок 5.29 – Гистограммы распределения тяговой нагрузки по вводу подстанции: без рекуперации (а); с рекуперацией (б)

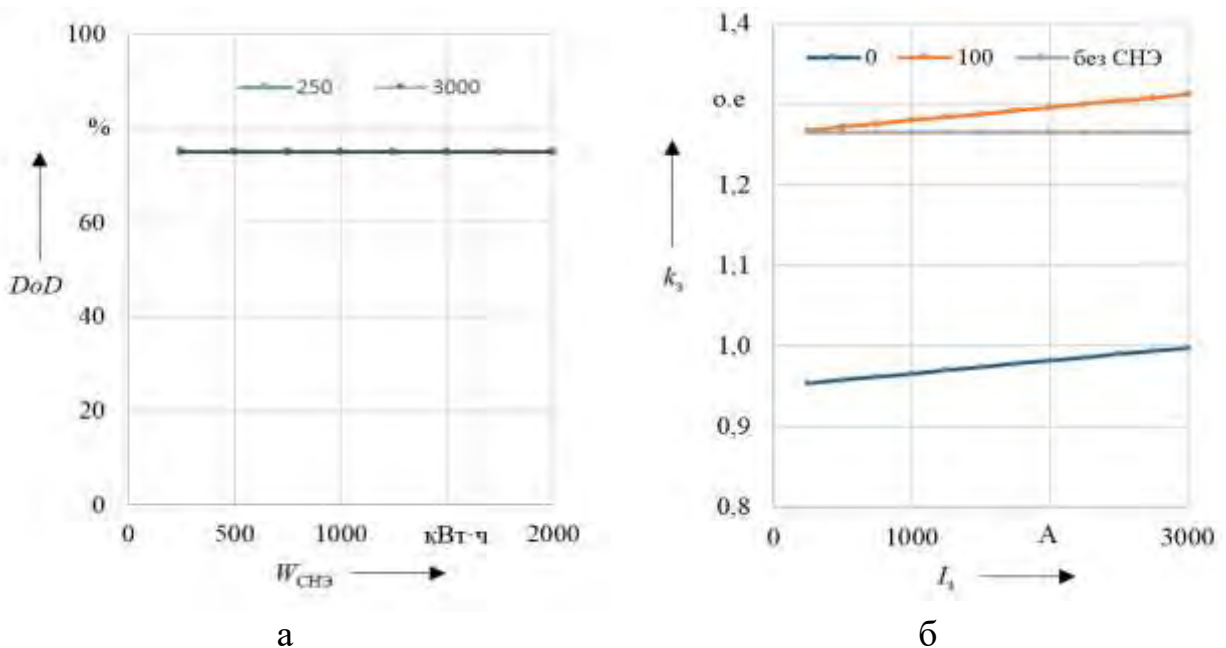


Рисунок 5.30 – Изменение глубины разряда тяговых подстанций (а) и коэффициента загрузки преобразовательного агрегата (б)

Графики изменения коэффициента загрузки выпрямительных преобразователей в зависимости от токов заряда в диапазоне значений от 250 до 3000 А для условий наличия и отсутствия СНЭЭ (при отсутствии

рекуперативного торможения) приведены на рисунке 5.30, б. Сравнение средних значений коэффициентов перегрузки для различных вариантов ограничения перегрузки при применении СНЭЭ на подстанциях показывает диапазон токов заряда, для которого коэффициент для заданного уровня перегрузки оказывается ниже, чем в отсутствии СНЭЭ. На приведенном рисунке увеличение тока заряда приводит к росту перегрузки выпрямительного преобразователя.

По сравнению с вариантом отсутствия рекуперативного торможения для варианта с рекуперацией коэффициент загрузки выпрямительных преобразователей падает. Наибольший эффект наблюдается на тяговых подстанциях с более высоким уровнем тяговой нагрузки.

Облегчение условий работы СНЭЭ приводит к выраженному влиянию токов заряда и полной энергоемкости на глубину разряда. Для рассмотренных ранее результатов работы СНЭЭ на тяговой подстанции ТПЗ увеличение токов заряда и полной энергоемкости позволяет снизить глубину разряда до 35 %, при этом коэффициенты перегрузки выпрямительных преобразователей увеличиваются и превышают уровень, соответствующий варианту отсутствия СНЭЭ на подстанции. Результаты расчета изменения глубины разряда и коэффициента загрузки в зависимости от полной энергоемкости и изменения тока заряда для подстанции приведены на рисунке 5.31.

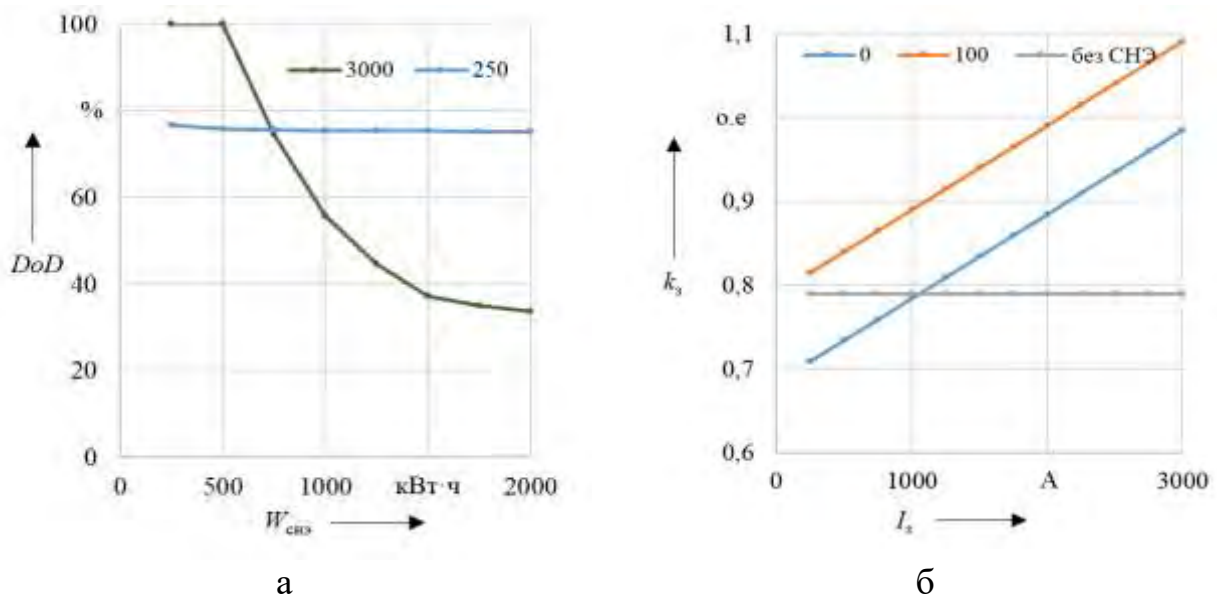


Рисунок 5.31 – Изменение глубины разряда тяговых подстанций (а) и коэффициента загрузки преобразовательного агрегата (б)

Увеличение максимальных токов заряда для различных уровней ограничения перегрузки для рассматриваемых подстанций приводит к увеличению коэффициента загрузки и для ряда диапазонов тока заряда значения коэффициентов превышают значения для базового варианта.

Требуемая мощность СНЭЭ для ТП отличается от мощности систем на постах секционирования. Если для постов секционирования требуемые токи разряда/заряда находятся на уровне 1000/500 А, то для ТП они достигают уровня номинальных токов выпрямительных преобразователей.

Для рассмотренных подстанций результаты получены для следующих условий: ток разряда/заряда – 3000/3000, полная энергоемкость – 1000 кВт·ч, допустимая перегрузка преобразователя – 0 % (таблица 5.15).

Таблица 5.15 – Результаты оценки степени заряженности и глубины разряда

Подстанция	без РТ			с РТ		
	$k_z, \%*$	$SoC_{cp}$	$DoD_{max}$	$k_z, \%*$	$SoC_{cp}$	$DoD_{max}$
ТП1	0,99/0,96	75	72	0,98/0,66	93	46
ТП2	0,99/0,78	96	29	0,98/0,74	97	29
ТП3	1,00/1,26	6	75	0,98/0,79	84	56
ТП4	0,99/1,10	8	75	0,99/0,82	86	60

Примечание: для  $k_z$  в числителе указано значение для условий применения систем накопления, в знаменателе – без систем на подстанциях.

Полная энергоемкость СНЭЭ оценивается исходя из условий обеспечения ограничения перегрузки выпрямительного преобразователя на заданном уровне, глубины разряда и преобладания заряда в графике степени заряженности. Для рассмотренного участка железной дороги с горным профилем пути мощность СНЭЭ для ТП достигает 9 МВт, полная энергоемкость – 3000 кВт·ч.

При применении рекуперативного торможения на участке использование СНЭЭ требует существенно меньшей полной энергоемкости и может рассматриваться для решения задачи снижения коэффициента загрузки преобразовательных агрегатов. Для условий внедрения СНЭЭ на основе литий-ионных технологий с номинальной мощностью 9 МВт полная

энергоёмкость увеличивается до 4500 кВт·ч для обеспечения ограничения перегрузки выпрямительного преобразователя и обеспечения устойчивости работы СНЭЭ. Указанные параметры существенно превышают значения, требуемые для повышения пропускной способности при применении СНЭЭ на постах секционирования.

При оценке показателей графика нагрузки ТП при отсутствии рекуперативного торможения наблюдается увеличение коэффициента минимума ( $I_{\min}/I_{\max}$ ) для случая без СНЭЭ и с ними в среднем со значения 0,095 до значения 0,962, увеличение коэффициента заполнения ( $I_{\text{ср}}/I_{\max}$ ) со значения 0,498 до 0,992 и изменение тока относительно максимального уровня ( $\Delta/I_{\max}$ , %) со значения 90,4 до значения 3,83 %. При применении рекуперативного торможения наблюдается аналогичное увеличение соответственно для коэффициента минимума – со значение 0,0 до 0,952, коэффициента заполнения – со значения 0,378 до 0,983, изменение тока – со значения 100,0 до значения 4,76 %. Приведенные значения позволяют оценить выравнивание графика нагрузки при ограничении перегрузки силового оборудования ТП.

При оценке эпизодичности режимов работы СНЭЭ в режимах заряда и разряда наблюдается достаточно широкий диапазон изменения значений, продолжительность отдельных эпизодов может достигать десятка минут. При этом средняя продолжительность эпизодов заряда и разряда по рассмотренным подстанциям составляет около 5 минут.

Эффективность работы СНЭЭ на ТП подтверждается снижением перегрузки преобразовательных агрегатов и их коэффициента загрузки. Степень снижения определяется параметрами СНЭЭ и тяговой нагрузки. Сравнение коэффициентов загрузки, средней степени заряженности и глубины разряда при применении СНЭЭ на ТП показывает, что работа СНЭЭ позволяет увеличить коэффициент загрузки, а применение рекуперативного торможения приводит к дополнительному снижению коэффициента, повышению средней степени заряженности и снижению глубины разряда.

#### 5.4 Применение систем накопления электроэнергии на тяговых подстанциях для питания собственных нужд

В настоящее время СНЭЭ на основе НЭЭ различных видов нашли применение в электрических сетях с возобновляемыми источниками [339, 340], системах электроснабжения населенных пунктов [341, 342], на транспортных средствах [343, 344], системах электроснабжения транспортных систем [345, 346] и др.

Развитие технологий, улучшение удельных характеристик и снижение стоимости НЭЭ различных видов обуславливают перспективы их применения на подвижном составе и в системах электроснабжения железнодорожного транспорта при решении широкого круга задач [185, 347, 190], в том числе для электроснабжения потребителей собственных нужд ТП.

Применение СНЭЭ может рассматриваться для решения задачи повышения эффективности рекуперации за счет потребителей собственных нужд подстанций.

СНЭЭ на электрических подстанциях и станциях применяются как резервный источник электроэнергии, позволяющий повысить надежность электроснабжения в случае исчезновения напряжения с шин переменного и постоянного тока собственных нужд до 1000 В. Особенностью ТП железнодорожного транспорта является появление на шинах постоянного тока избыточной энергии рекуперации, передаваемой на секции контактной сети смежных межподстанционных зон или в сеть переменного тока подстанции. Указанная энергия рекуперации в зависимости от текущего уровня нагрузки распределяется по присоединениям переменного тока ТП и частично возвращается в систему внешнего электроснабжения [191]. Одним из вариантов, направленных на повышение эффективности использования энергии рекуперации, является применение СНЭЭ, позволяющее сглаживать график тяговой нагрузки или снижать электропотребление на тяговые нужды за счет использования энергии рекуперации.

Прием избыточной энергии рекуперации на ТП осуществляется с помощью выпрямительно-инверторных (инверторных) преобразователей или поглощающих устройств (на основе реостатов).

График тяговой нагрузки по вводу выпрямительно-инверторных преобразователей позволяет оценить уровень тяговой нагрузки и рекуперации и определить статистические показатели. В качестве примера ниже приведены графики нагрузки для одной из ТП на однопутном участке Западно-Сибирской железной дороги с интенсивным применением рекуперативного торможения [192]. Фрагмент схемы главных электрических соединений ТП с выпрямительно-инверторным преобразователем, рассматриваемый при решении задачи, представлен на рисунке 5.32.

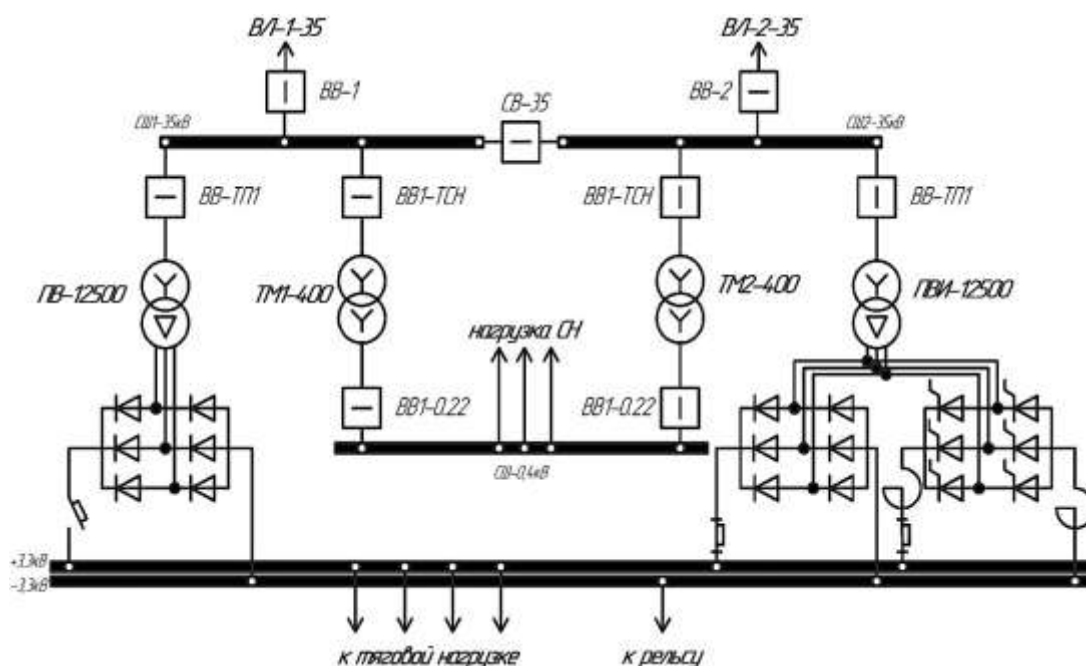


Рисунок 5.32 – Фрагмент типовой схемы тяговой подстанции постоянного тока с выпрямительно-инверторным преобразователем

На основе данных программного комплекса «Энергия Альфа 2» построены графики нагрузки и возврата энергии рекуперации с одноминутным интервалом для рассматриваемой ТП Западно-Сибирской дирекции по энергообеспечению. Для рассматриваемого случая максимальная мощность потребления тяговой нагрузки не превышает 12,5 МВт, рекуперации – 1,8 МВт (рисунок 5.33). В более

чем 80 % случаев измерений тяговая нагрузка по вводу выпрямительного преобразователя в течение суток не превышает 1,50 МВт, а для случаев рекуперации – 1,05 МВт.

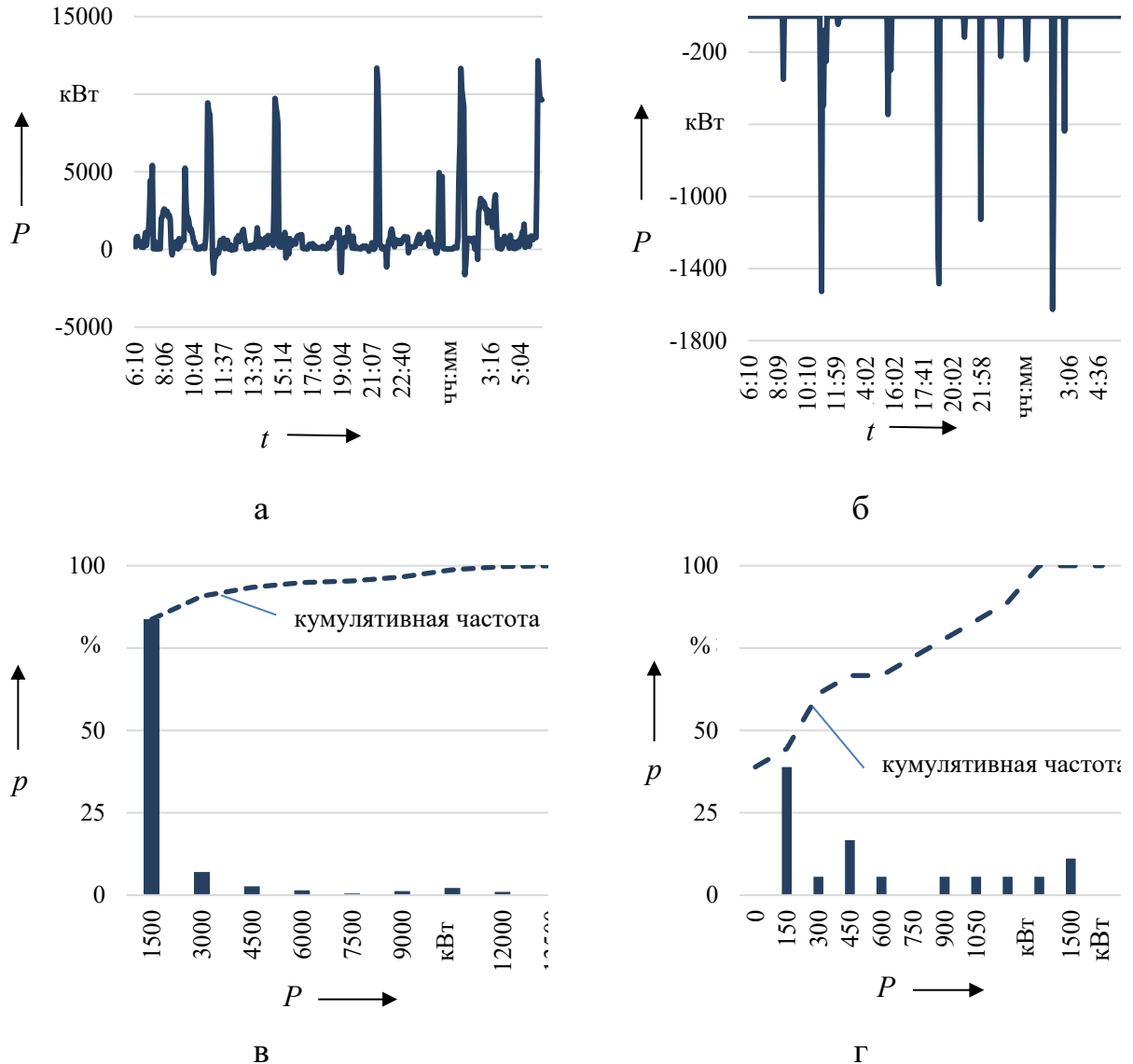


Рисунок 5.33 – Мощность тяговой нагрузки на шинах подстанции (а), рекуперации (б), распределение мощности тяговой нагрузки (в) и рекуперации (г)

Расчетные и статистические данные измерений позволяют оценить для сложившегося уровня тяговой нагрузки максимальные значения мощности рекуперации  $P_{\text{макс рек}}$  на шинах подстанции и определить мощность заряда системы накопления  $P_{\text{СНЭЭ}}$  с учетом перспективы увеличения нагрузки  $k_{\text{перс}}$ :

$$P_{\text{з СНЭЭ}} \geq k_{\text{перс}} P_{\text{макс рек}} \cdot \quad (5.25)$$

Выбор настроек режимов работы СНЭЭ выполняется на основе уровня тяговой нагрузки и напряжения на шинах [160, 189]. Уровень напряжения на шинах подстанции в режиме тяги и возврате энергии рекуперации существенно не отличается, в более чем 80 % случаев измерений фиксируется напряжение в диапазоне от 3500 до 3550 В для обоих режимов (рисунок 5.34).

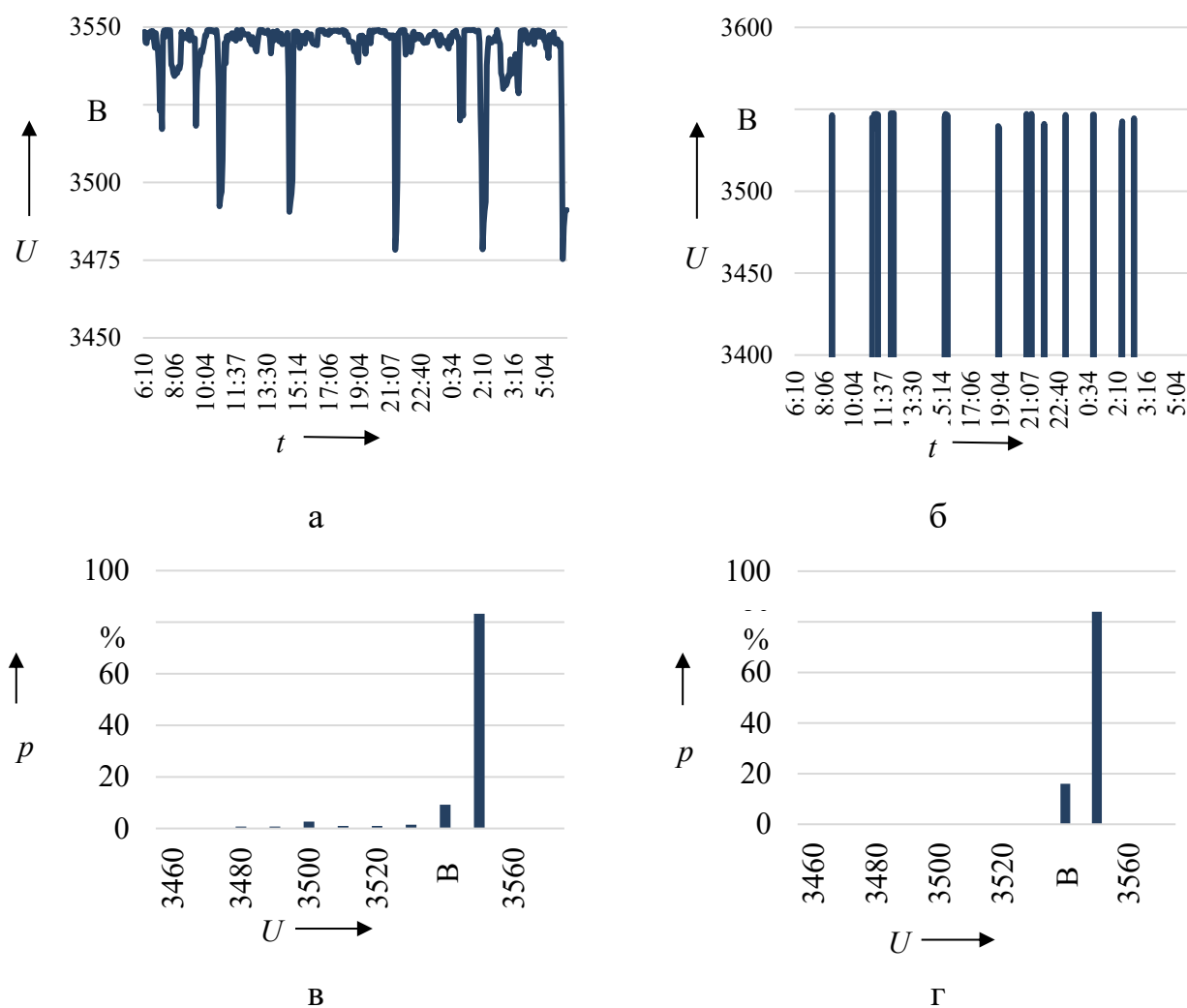


Рисунок 5.34 – Напряжения на шинах в режиме тяги (а), рекуперации (б) и распределения напряжения в режиме тяги (в) и рекуперации (г)

При настройке режимов работы условиями включения СНЭЭ на заряд будут являться отсутствие тока нагрузки по вводу 3,3 кВ и уровень напряжения, превышающий уровень напряжения холостого хода с учетом изменения напряжения на шинах высшего напряжения:

$$\begin{aligned} I_{\text{вв}3,3} &\approx 0; \\ U_{\text{ш}3,3} &\geq U_{\text{х.х.}} \end{aligned} \quad (5.26)$$

Условия работы в режиме разряда СНЭЭ определяются уровнем нагрузки собственных нужд ТП и требуемым режимом напряжения (рисунок 5.35). Уровень существующей нагрузки оценивается по данным измерений и уточняется с учетом перспективы развития.

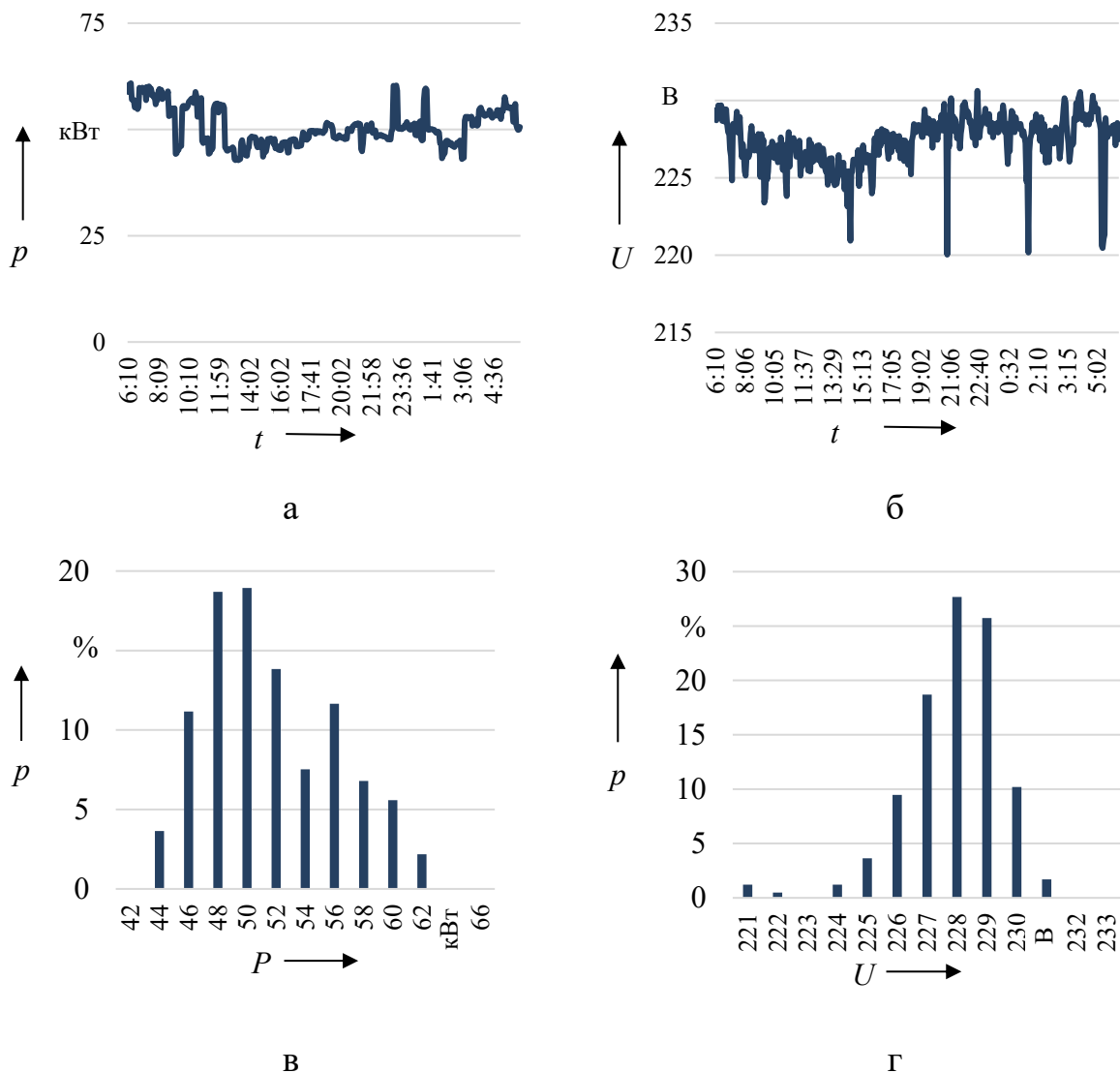


Рисунок 5.35 – Мощность (а) и напряжение (б) системы собственных нужд, распределение мощности (в) и напряжения на шинах 0,4 кВ (г)

Мощность СНЭЭ в режиме разряда будет определяться исходя из полного покрытия мощности собственных нужд с учетом запаса ( $k_3$ ):

$$\begin{aligned}
 P_{\text{р СНЭ}} &\geq k_3 P_{\text{макс СН}}; \\
 U_{\text{мин СН}} &\leq U_{\text{ш СН}} \leq U_{\text{макс СН}}.
 \end{aligned}
 \tag{5.27}$$

Оценка работы СНЭЭ для существующих и расчетных условий позволяет оценить характер изменения степени заряженности и требуемую энергоёмкость (рисунок 5.36).

Особенностью работы СНЭЭ для собственных нужд ТП является многократное превышение мощности заряда над мощностью разряда и необходимость существенного увеличения энергоёмкости для ограничения глубины разряда вследствие соотношения мощности рекуперации и собственных нужд. В рассматриваемом случае в графике степени заряженности преобладает заряд, а ограничение глубины разряда до 30 % определяет энергоёмкость на уровне 2000 кВт·ч (7200 МДж), что существенно выше, чем для ограниченных режимов работы на подстанции [184] при уровне 200 МДж.

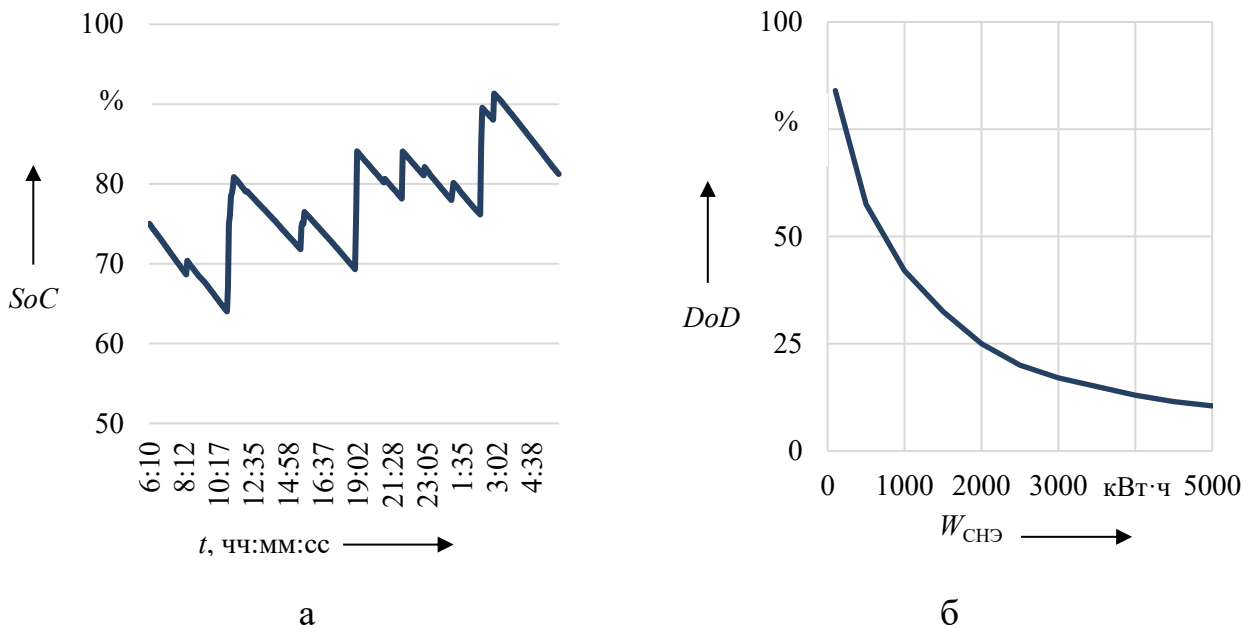


Рисунок 5.36 – Степень заряженности (а) и глубины разряда (б) системы накопления электроэнергии

Необходимо отметить кратковременность эпизодов заряда при работе СНЭЭ на ТП. Продолжительность эпизодов заряда находится в диапазоне от 1 до 24 мин, а суммарное количество эпизодов для рассматриваемого случая составляет – 14 в сутки (таблица 5.16). Указанные значения коррелируют

значениям для различного характера тяговой нагрузки на различных объектах СТЭ [104, 322, 159]. Исходя из полученной статистики эпизодичности заряда для режима разряда суммарное для рассматриваемого случая время оценивается как 94 % суточного времени, где продолжительность для эпизода разряда может составлять в среднем 96,8 мин.

Таблица 5.16 – Характеристика эпизодов заряда для рассматриваемой подстанции

$N_{\text{эпизода}}$	$I_{\text{макс}}, \text{А}$	$I_{\text{мин}}, \text{А}$	$U_{\text{макс}}, \text{В}$	$U_{\text{мин}}, \text{В}$	$t, \text{мин}$
1	98,7	98,7	3546,5	3546,5	3,4
2	22,1	431,8	3547,3	3538,3	23,8
3	4,2	12,8	3547,7	3547,6	6,8
4	1,4	1,4	3547,6	3547,6	3,4
5	34,9	153,9	3547,2	3545,3	6,8
6	84,5	84,5	3546,6	3546,6	3,4
7	372,5	419,6	3539,9	3538,7	6,8
8	32,7	32,7	3547,2	3547,2	3,4
9	0,4	0,4	3547,3	3547,3	3,4
10	318,3	318,3	3541,1	3541,1	3,4
11	62,9	62,9	3546,6	3546,6	3,4
12	61,5	67,9	3546,8	3546,8	6,8
13	257,1	459,8	3542,6	3537,7	6,8
14	179,8	179,8	3544,6	3544,6	3,4
<i>Среднее</i>	<i>109,4</i>	<i>166,0</i>	<i>3545,6</i>	<i>3544,4</i>	<i>6,1</i>

Количество элементов в накопительных модулях вне зависимости от вида определяется требуемым уровнем напряжения СНЭЭ и нагрузки путем расчета последовательно и параллельно соединенных элементов:

$$m = \frac{U_1}{U_{2\text{ном}}};$$

$$n = \frac{I_1}{I_{2\text{ном}}}.$$
(5.28)

По условиям ограничения глубины разряда применение литий-ионных аккумуляторов в СНЭЭ требует большей энергоемкости, по сравнению с другими видами НЭЭ, не чувствительными к глубине разряда, например, суперконденсаторами.

В этой связи для снижения суммарной энергоёмкости СНЭЭ рассматриваются варианты использования гибридной технологии. В качестве примера для рассматриваемой подстанции представлены графики степени заряженности для двух сочетаний энергоёмкости аккумуляторной батареи (АКБ) и суперконденсатора (СК) с равной суммарной энергоёмкостью для следующих значений:

- 1) 100/1700 (заряд) и 10/1700 (разряд) кВт и 100/500 кВт·ч соответственно с глубиной разряда 68 и 88 % для АКБ и СК соответственно (рисунок 5.37, а);
- 2) 150/1700 (заряд) и 10/1700 (разряд) кВт и 250/350 кВт·ч соответственно с глубиной разряда 58 и 100 % для АКБ и СК соответственно (рисунок 5.37, б).

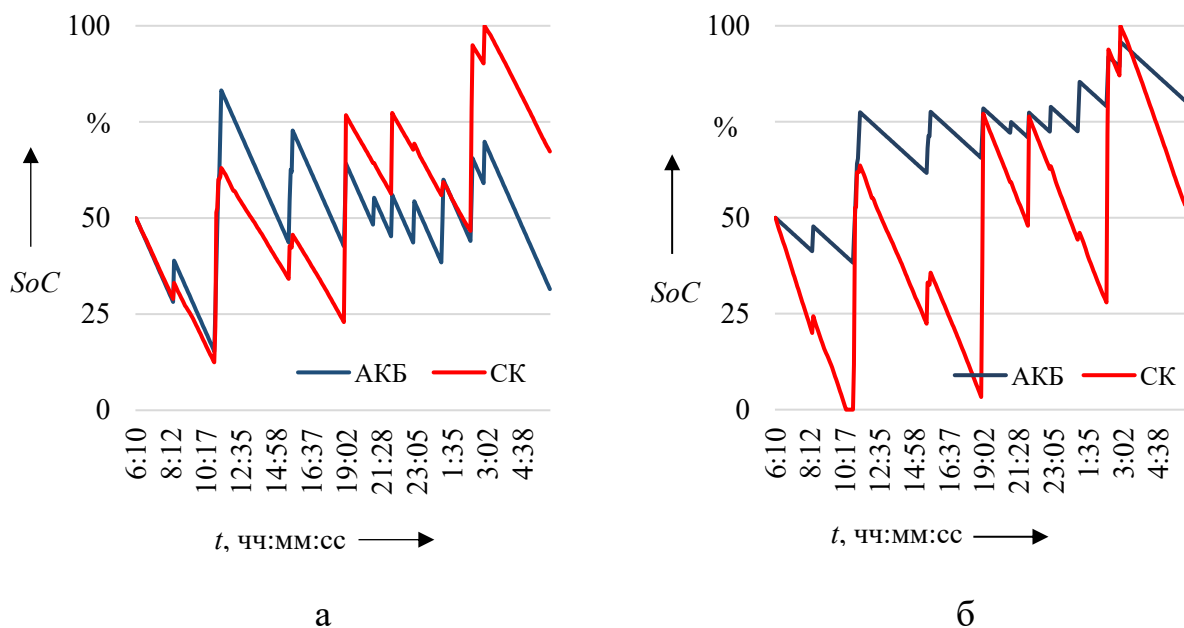


Рисунок 5.37 – Степень заряженности накопительных модулей системы накопления для первого (а) и второго (б) вариантов

В зависимости от подключения СНЭЭ к шинам постоянного тока подстанции можно выделить два варианта схемной реализации. Первый вариант – передача мощности к системе осуществляется через преобразователь постоянно-постоянного напряжения (П1), далее к шинам переменного тока собственных нужд через преобразователь постоянно-переменного напряжения П2 (рисунок 5.38). Во втором варианте передача мощности осуществляется

трехфазным током с помощью преобразователя П1, а питание шин постоянного тока подстанции от НЭЭ через преобразователь П2.

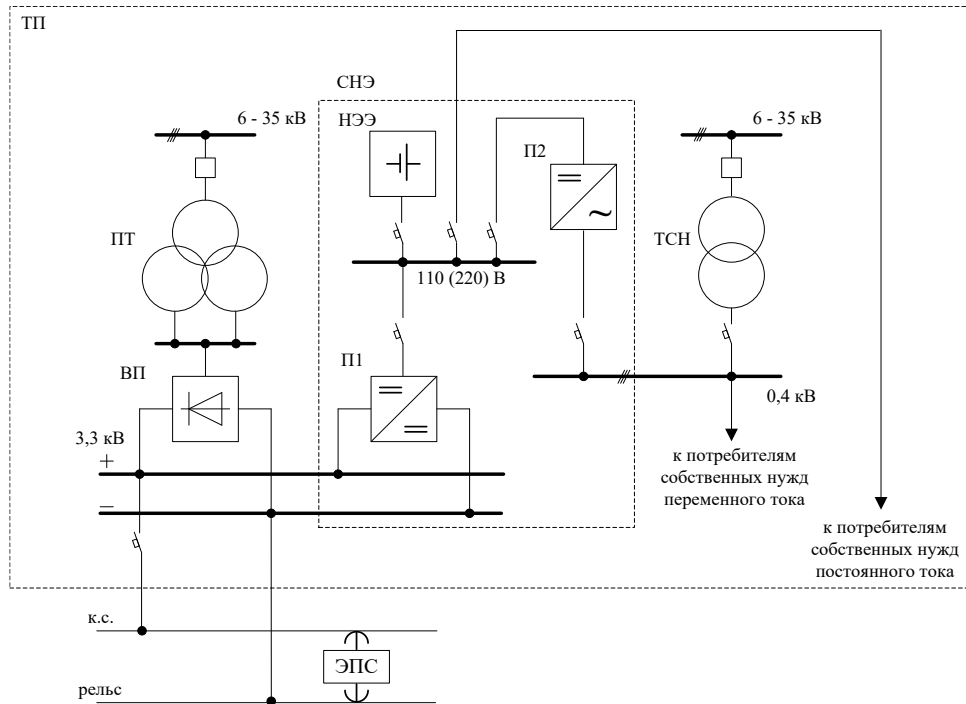


Рисунок 5.38 – Схема подключения системы накопления (вариант 1)

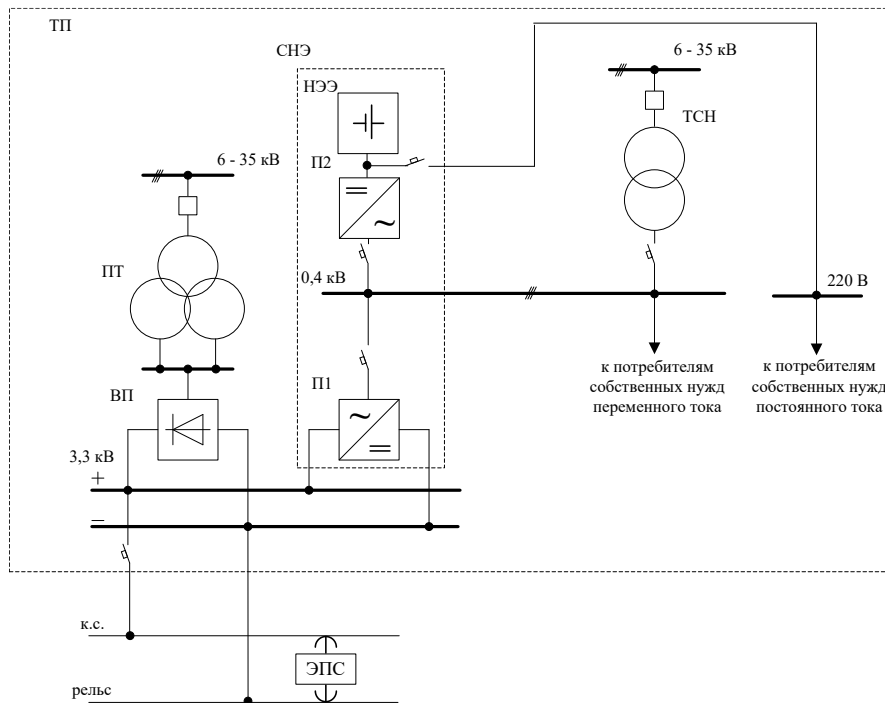


Рисунок 5.39 – Схема подключения системы накопления (вариант 2)

В обоих вариантах преобразователи П1 выполняются на максимальную мощность заряда. Преобразователь П2 для первого варианта выполняется на

максимальную мощность потребителей собственных нужд, для второго варианта мощность преобразователя П2 и П1 равны (рисунок 5.39). Мощность преобразователя П2 для второго варианта выше на величину нагрузки шин постоянного тока подстанции. Преимуществом схемы исполнения системы по второму варианту является использование напряжения 0,4 кВ, что позволяет снизить уровень номинального тока в главных цепях и сократить потери в них, недостатком – необходимость применения второго преобразователя П2 с мощностью, равной мощности П1. Для обеспечения гальванической развязки цепей для питания собственных нужд схема преобразователей включает в себя разделительный трансформатор.

Целевая функция задачи определения параметров СНЭЭ является функцией стоимости и учитывает значения параметров и их удельную стоимость (мощности и энергоёмкости). Решение задачи позволяет определить оптимальные значения мощности и энергоёмкости на основе следующей математической модели:

$$\left\{ \begin{array}{l} C = aP_{\text{ном}}^{\text{АКБ}} + bW_{\text{ном}}^{\text{АКБ}} + cP_{\text{ном}}^{\text{СК}} + dW_{\text{ном}}^{\text{СК}} \rightarrow \min; \\ P_{\text{ном зар}}^{\text{АКБ}} + P_{\text{ном зар}}^{\text{СК}} \geq \max(P^{\text{рек}} - P^{\text{СН}}); \\ P_{\text{ном разр}}^{\text{АКБ}} + P_{\text{ном разр}}^{\text{СК}} \geq \max(P^{\text{СН}} - P^{\text{рек}}); \\ P_{\text{ном}}^{\text{АКБ(СК)}} = \max(k_{\text{зар}}^{\text{АКБ(СК)}} P_{\text{ном зар}}^{\text{АКБ(СК)}}; k_{\text{разр}}^{\text{АКБ(СК)}} P_{\text{ном разр}}^{\text{АКБ(СК)}}); \\ \forall t_i \in [0; T]: 0 \leq \sum_0^{t_i} W_{t_i}^{\text{АКБ(СК)}} \leq W_{\text{ном}}^{\text{АКБ(СК)}}; \\ P_{\text{ном зар (разр)}}^{\text{АКБ}} \leq k_{\text{зар (разр)}}^{\text{АКБ}} \frac{W_{\text{ном}}^{\text{АКБ}}}{t}; P_{\text{ном}}^{\text{СК}} \geq P_{\text{макс}}^{\text{рек}}; \\ d_{\text{зар}}^{\text{АКБ}} + d_{\text{зар}}^{\text{СК}} \geq d_{\text{зар мин}}; \\ d_{\text{разр}}^{\text{АКБ}} + d_{\text{разр}}^{\text{СК}} \geq d_{\text{разр мин}}; \\ d_{\text{исп}}^{\text{СН}} \geq d_{\text{исп мин}}^{\text{СН}}; \\ d_{\text{исп}}^{\text{рек}} \geq d_{\text{исп мин}}^{\text{рек}}; \\ DoD_{\text{мин}}^{\text{АКБ(СК)}} \leq DoD^{\text{АКБ(СК)}} \leq DoD_{\text{макс}}^{\text{АКБ(СК)}}; \\ SoC_{\text{нач}}^{\text{АКБ(СК)}} - SoC_{\text{кон}}^{\text{АКБ(СК)}} \geq 0; \end{array} \right. \quad (5.29)$$

где:  $C$  – целевая функция;

$a, b, c, d$  – удельная стоимость мощности и энергоемкости аккумуляторной батареи и суперконденсатора соответственно;

$P_{\text{НОМ}}^{\text{АКБ}}, W_{\text{НОМ}}^{\text{АКБ}}, P_{\text{НОМ}}^{\text{СК}}, W_{\text{НОМ}}^{\text{СК}}$  – номинальные мощности и номинальные энергоемкости аккумуляторной батареи и суперконденсатора соответственно;

$P_{\text{НОМ зар}}^{\text{АКБ}}, P_{\text{НОМ зар}}^{\text{СК}}$  – номинальные мощности заряда аккумуляторной батареи и суперконденсатора соответственно;

$P^{\text{рек}}, P^{\text{СН}}$  – мощности рекуперации и собственных нужд соответственно;

$P_{\text{НОМ разр}}^{\text{АКБ}}, P_{\text{НОМ разр}}^{\text{СК}}$  – номинальные мощности разряда аккумуляторной батареи и суперконденсатора соответственно;

$k_{\text{зар}}^{\text{АКБ(СК)}}, k_{\text{разр}}^{\text{АКБ(СК)}}$  – коэффициенты увеличения номинальной мощности заряда и разряда для аккумуляторной батареи и суперконденсатора соответственно;

$W_{t_i}^{\text{АКБ(СК)}}, W_{\text{НОМ}}^{\text{АКБ(СК)}}$  – объем энергии на интервале эпизода  $t_i$  и номинальная энергоемкость аккумуляторной батареи и суперконденсатора соответственно;

$t$  – расчетная продолжительность режимов заряда и разряда;

$d_{\text{исп}}^{\text{СН}}$  – коэффициент использования электроэнергии собственных нужд при разряде:

$$d_{\text{исп}}^{\text{СН}} = \frac{W_{\text{разр}}}{W^{\text{СН}}}; \quad (5.30)$$

$d_{\text{исп}}^{\text{рек}}$  – коэффициент использования энергии рекуперации при заряде:

$$d_{\text{исп}}^{\text{рек}} = \frac{W_{\text{зар}}}{W^{\text{рек}}}; \quad (5.31)$$

$d_{\text{зар (разр)}}^{\text{АКБ(СК)}}$  – коэффициент использования энергии в режимах заряда и разряда для аккумуляторной батареи и суперконденсатора соответственно:

$$d_{\text{зар (разр)}}^{\text{АКБ(СК)}} = \frac{W_{\text{зар (разр)}}^{\text{АКБ(СК)}}}{W_{\text{зар (разр)}}}; \quad (5.32)$$

$W_{\text{разр}}$ ,  $W_{\text{зар}}$  – объемы энергии СНЭЭ в режиме разряда и заряда соответственно;

$W^{\text{СН}}$ ,  $W^{\text{рек}}$  – объем электроэнергии собственных нужд и рекуперации за расчетный период;

$W_{\text{зар (разр)}}^{\text{АКБ(СК)}}$  – объем электроэнергии в режиме заряда и разряда для аккумуляторной батареи и суперконденсатора соответственно.

Решение задачи выполняется в два этапа. На первом этапе в качестве исходных данных принимается график нагрузки собственных нужд подстанции и мощности избыточной рекуперации на шинах подстанции. Для заданных профилей нагрузки выполняется имитационное моделирование для различной энергоемкости и мощности НЭЭ, определяются коэффициенты использования энергии в режимах заряда и разряда.

На данном этапе определяются ограничения по максимальной мощности заряда и разряда аккумуляторной батареи и суперконденсатора, особенности работы, к которым следует отнести приоритет заряда для аккумуляторной батареи и ограничение мощности ее разряда. Для суперконденсатора задаются условия, при которых максимальная мощность данного модуля используется как дополнительная для обеспечения приема мощности рекуперации.

Имитационное моделирование работы СНЭЭ для различных вариантов сочетания энергоемкостей позволяет получить функции, описывающие изменение коэффициентов использования энергии в режимах заряда и разряда для модулей аккумуляторной батареи и суперконденсатора при различной комбинации энергоемкости и мощности. Полученные значения используются для аппроксимации полученных значений для каждого коэффициента.

На втором этапе решается задача отыскания оптимальных параметров СНЭЭ. Указанная задача относится к задачам условной нелинейной

оптимизации, решение которой выполняется прямыми и непрямыми методами. Для решения рассматриваемой задачи применяются методы спуска и штрафных функций. В методах спуска выбор направления спуска учитывает ограничения задачи в явном виде, в методах штрафных функций задачу сводят к последовательности задач безусловной оптимизации за счет добавления к целевой функции вспомогательных функций и переходе к учету ограничений в неявном виде.

График нагрузки собственных нужд и возврата энергии рекуперации на шины рассматриваемой подстанции позволяет определить характер изменения коэффициентов использования энергии модулей в режимах заряда и разряда. Графики изменения коэффициентов использования, полученные в программе Statistica, приведены на рисунке 5.40.

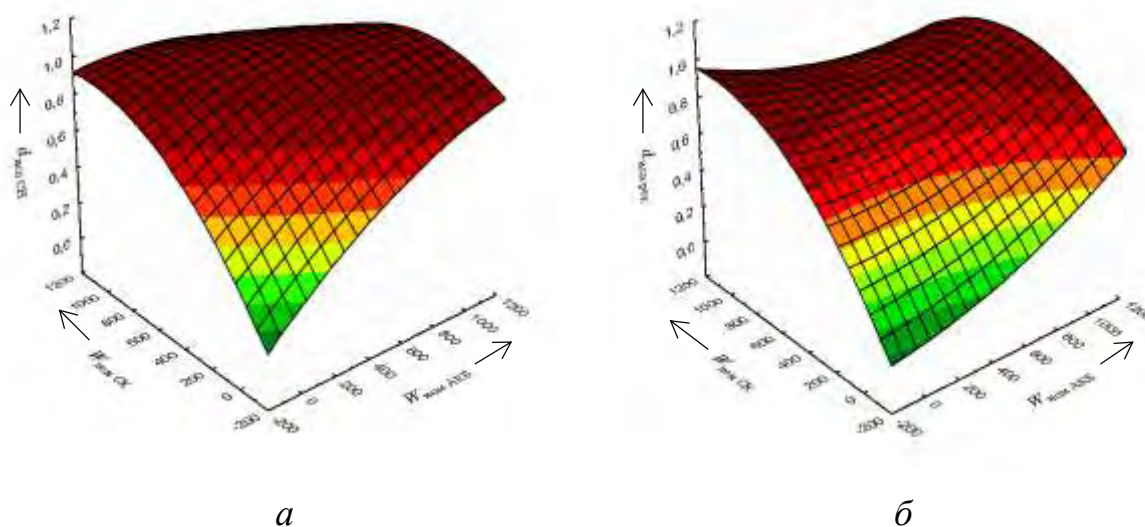


Рисунок 5.40 – Коэффициенты использования энергии собственных нужд (а) и энергии рекуперации (б)

Полученные результаты для коэффициентов аппроксимированы функциями второго порядка с достаточной точностью расчетов, которая оценивается с помощью средней абсолютной ошибки MAPE, не превышающей для приведенных выражений 5 %.

Функции для определения коэффициентов использования нагрузки собственных нужд и энергии рекуперации могут быть представлены в аналитическом виде с помощью следующих выражений:

$$d_{\text{исп}}^{\text{CH}} = 0,5007 + 0,0007 \cdot x + 0,001 \cdot y - 2,6219 \cdot 10^{-7} \cdot x^2 - 5,9361 \cdot 10^{-7} \cdot x \cdot y - 5,1047 \cdot 10^{-7} \cdot y^2, \quad (5.33)$$

$$d_{\text{исп}}^{\text{рек}} = 0,3439 + 0,0001 \cdot x + 0,0011 \cdot y + 1,9312 \cdot 10^{-7} \cdot x^2 - 4,2204 \cdot 10^{-7} \cdot x \cdot y - 5,4906 \cdot 10^{-7} \cdot y^2. \quad (5.34)$$

где:  $x$  – номинальная энергоёмкость аккумуляторной батареи  $W_{\text{НОМ}}^{\text{АКБ}}$ ;

$y$  – номинальная энергоёмкость суперконденсатора  $W_{\text{НОМ}}^{\text{СК}}$ .

Коэффициенты использования энергии разряда аккумуляторной батареи и суперконденсатора (рисунок 5.41) и описываются следующим образом:

$$d_{\text{разр}}^{\text{АКБ}} = -0,0323 + 0,0025 \cdot x - 1,4095 \cdot 10^{-17} \cdot y - 1,5934 \cdot 10^{-6} \cdot x^2 + 5,6831 \cdot 10^{-21} \cdot x \cdot y + 8,0468 \cdot 10^{-21} \cdot y^2, \quad (5.35)$$

$$d_{\text{разр}}^{\text{СК}} = 0,5329 - 0,0019 \cdot x + 0,001 \cdot y + 1,3312 \cdot 10^{-6} \cdot x^2 - 5,9361 \cdot 10^{-7} \cdot x \cdot y - 5,1047 \cdot 10^{-7} \cdot y^2. \quad (5.36)$$

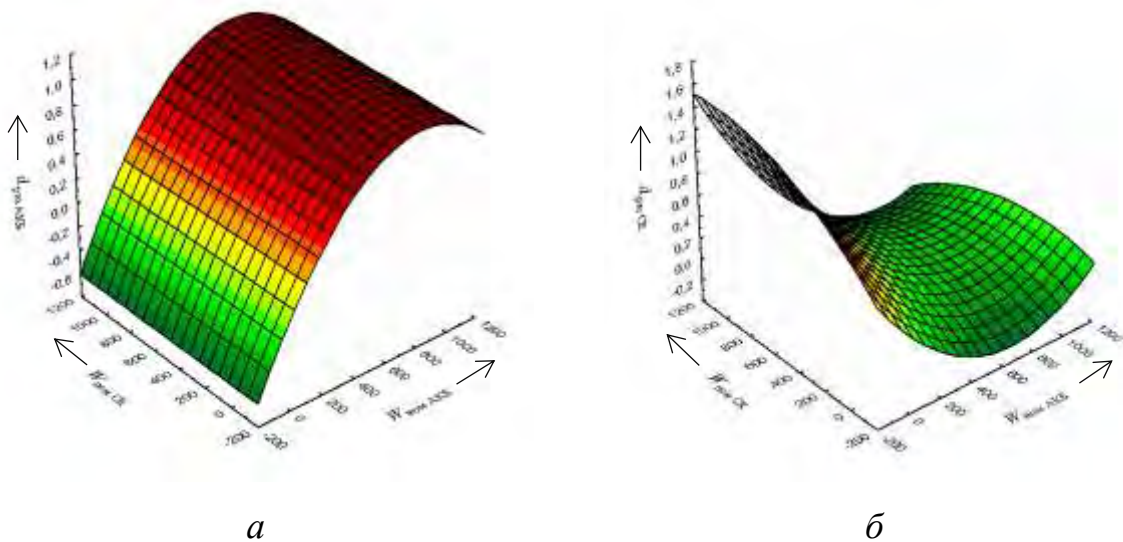


Рисунок 5.41 – Коэффициенты использования энергии разряда аккумуляторной батареи (а) и суперконденсатора (б)

Графики коэффициентов использования энергии заряда аккумуляторной батареи и суперконденсатора приведены на рисунке 5.42 и могут быть представлены в следующем аналитическом виде:

$$d_{\text{зар}}^{\text{АКБ}} = 0,0225 + 0,0012 \cdot x - 3,2526\text{E-}18 \cdot y - 5,1582\text{E-}7 \cdot x^2 + 9,7887\text{E-}21 \cdot x \cdot y - 2,1176\text{E-}21 \cdot y^2, \quad (5.37)$$

$$d_{\text{зар}}^{\text{СК}} = 0,3214 - 0,0011 \cdot x + 0,0011 \cdot y + 7,0893\text{E-}7 \cdot x^2 - 4,2204\text{E-}7 \cdot x \cdot y - 5,4906\text{E-}7 \cdot y^2. \quad (5.38)$$

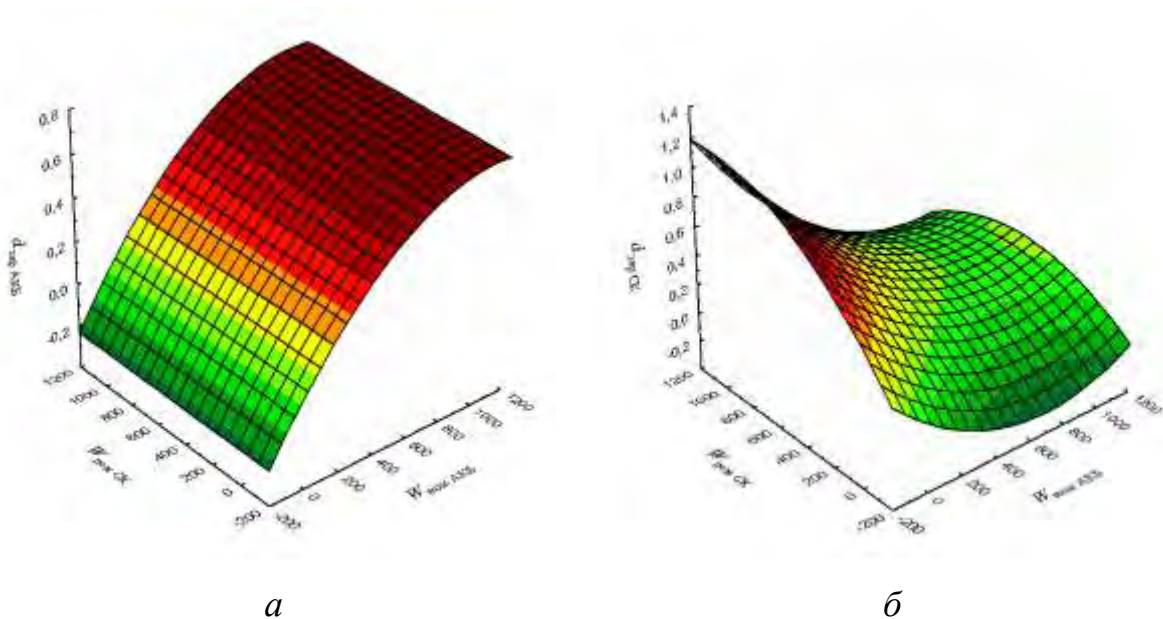


Рисунок 5.42 – Коэффициенты использования энергии заряда аккумуляторной батареи (а) и суперконденсатора (б)

Глубина разряда по результатам расчетов в аналитическом виде описывается следующим образом:

$$DoD^{\text{АКБ}} = 29,6301 + 0,1349 \cdot x - 2,4425\text{E-}15 \cdot y - 0,0001 \cdot x^2 + 9,385\text{E-}19 \cdot x \cdot y + 1,7483\text{E-}18 \cdot y^2; \quad (5.39)$$

$$DoD^{\text{СК}} = 59,2418 - 0,0526 \cdot x + 0,1388 \cdot y + 1,14\text{E-}7 \cdot x^2 + 1,8425\text{E-}5 \cdot x \cdot y - 0,0002 \cdot y^2. \quad (5.40)$$

Для решения оптимизационной задачи в среде *Matlab* математическая модель принимает следующий вид (5.24). Ниже представлены результаты

решения задачи, полученные для следующих исходных данных:  $a=30$  о.е./кВт ;  $b=40$  о.е./кВт·ч;  $c=60$  о.е./кВт ;  $d=80$  о.е./кВт·ч;  $P_{рек}=1700$  кВт;  $P_{СН} = 60$  кВт,  $P_{СК} = 1700$  кВт;  $DoD_{мин}^{АКБ(СК)} = 0\%$ ;  $DoD_{макс}^{АКБ} = 30\%$ .  $DoD_{макс}^{СК} = 100\%$ . Расчет целевой функции выполняется в относительных единицах стоимости.

$$\begin{aligned}
 & f = ax_1 + bx_2 + cx_3 + dx_4 \rightarrow \min : \text{целевая функция} \\
 & -x_1 - x_3 + 1700 \leq 0 : \text{ограничение по мощности} \\
 & -x_1 \leq 0 : \text{положительные значения} \\
 & -x_2 \leq 0 \\
 & -x_3 \leq 0 \\
 & -x_4 \leq 0 \\
 & x_1 \leq 2000 : \text{ограничение области положительных значений} \\
 & x_2 \leq 10000 \\
 & x_3 \leq 2000 \\
 & x_4 \leq 10000 \\
 & -0,2x_2 + x_1 \leq 0 : \text{соотношение мощности и энергоемкости АКБ} \\
 & -5x_4 + x_3 \leq 0 : \text{соотношение мощности и энергоемкости СК} \\
 & \left. \begin{aligned}
 & x_2 + x_4 - 10000 \leq 0 : \text{суммарная энергоемкость} \\
 & -x_2 - x_4 + 500 \leq 0 : \text{минимальная энергоемкость} \\
 & 0,3994 - 0,0006 \cdot x_2 - 0,001 \cdot x_4 + 2,1E-7 \cdot x_2^2 + \\
 & + 5,9E-07 \cdot x_2 \cdot x_4 + 5,1E-07 \cdot x_4^2 \leq 0 : \text{доля использования} \\
 & \text{энергии нагрузки собственных нужд} \\
 & 0,5561 - 1,0e-4 \cdot x_2 - 0,0011 \cdot x_4 - 1,9E-7 \cdot x_2^2 + \\
 & + 0,00422E \cdot x_2 \cdot x_4 + 5,5E-7 \cdot x_4^2 \leq 0 : \text{доля использования} \\
 & \text{энергии рекуперации} \\
 & 29,6301 + 0,1349 \cdot x_2 - 2,4425E-15 \cdot x_4 - 0,0001 \cdot x_2^2 + \\
 & + 9,385E-19 \cdot x_2 \cdot x_4 + 1,7483E-18 \cdot x_4^2 : \text{глубина разряда АКБ} \\
 & 59,2418 - 0,0526 \cdot x_2 + 0,1388 \cdot x_4 + 1,14E-7 \cdot x_2^2 + \\
 & + 1,8425E-5 \cdot x_2 \cdot x_4 - 0,0002 \cdot x_4^2 : \text{глубина разряда СК.}
 \end{aligned} \right\} \quad (5.41)
 \end{aligned}$$

Представление задачи в среде *Matlab* принимает следующий вид.

---

```

>> A=[-1,0,-1,0;0,0,1,-5;0,1,0,1;0,-1,0,-1];
b=[-1700;0;10000;-500];
Aeq=[1,-0.2,0,0];
beq=0;
lb = [0,0,0,0];
ub = [2000,10000,2000,10000];
a1=30;b2=40;c3=60;d4=80;
x0=[100;1000;100;1000];
fun= @(x)a1*x(1)+b2*x(2)+c3*x(3)+d4*x(4);
nonlcon = @unitdisk;
x=fmincon(fun,x0,A,b,Aeq,beq);
[x,fval,exitflag,output,lambda,grad,hessian] =
fmincon(fun,x0,A,b,Aeq,beq,lb,ub,nonlcon)

```

---

### Результаты решения задачи.

---

```

x(1) = 0.2693 · 103
x(2) = 1.3463 · 103
x(3) = 1.4307 · 103
x(4) = 0.2861 · 103
fval = 1.7066e+05
      iterations: 12
      funcCount: 65
constrviolation: 5.6843e-14
      stepsize: 7.2468e-06
      algorithm: 'interior-point'
firstorderopt: 2.0000e-06
      cgiterations: 0

```

---

Значение целевой функции для заданных условий составило 170,7 тыс. о.е. стоимости при следующих параметрах СНЭЭ: мощность и энергоёмкость аккумуляторной батареи – 269,3 кВт и 1346 кВт·ч, суперконденсатора – 1430,1 кВт и 286,1 кВт·ч.

Предложенная математическая модель позволяет получить основные параметры гибридной СНЭЭ с минимальной стоимостью на основе исходных данных о нагрузке и рекуперации на тяговой подстанции, заданных ограничениях и принятых допущениях. В качестве целевой функции в модели может быть принята стоимость жизненного цикла с учетом изменения срока службы накопительных элементов, скорости саморазряда, деградации,

воздействия на окружающую среду и др. Решение указанной задачи позволяет определить параметры СНЭЭ и для других объектов СТЭ [151, 348].

На основе полученных результатов предложены технические решения по применению СНЭЭ на ТП для резервирования системы собственных нужд и на ЭПС для резервирования тягового привода. Подключение СНЭЭ выполняется в обоих случаях к шинам постоянного тока [193, 194]. Предложено техническое решение по применению НЭЭ при включении преобразовательных трансформаторов, позволяющее снизить падение напряжения в момент включения [195].

Полученные результаты решения позволяют оценить параметры гибридной СНЭЭ для нужд ТП и ЭПС на сети железных дорог России и за рубежом.

### 5.5 Выводы по пятой главе

Выполнен анализ результатов, выявлены особенности нагрузки и определены факторы, оказывающие влияние на параметры СНЭЭ в условиях преобладания грузового и пассажирского движения на одно- и двухпутных участках.

Обоснован подход к применению СНЭЭ на тяговых подстанциях для решения задачи снижения загрузки силового оборудования.

Предложены технические решения по применению СНЭЭ для СТЭ на постах секционирования контактной сети, на тяговых подстанциях и на ЭПС в условиях применения рекуперативного торможения на участке.

Установлены основные зависимости временных и энергетических показателей и параметров СНЭЭ в зависимости от уровней пороговых напряжений и электротяговой нагрузки, принятых для управления режимами работы в режиме заряда и разряда. Оценка снижения потерь электроэнергии в тяговой сети составляет около 0,5 %.

Предложена имитационная модель гибридной СНЭЭ, позволяющая оценить изменение коэффициентов использования энергии рекуперации и

энергетических показателей в целом и отдельно по накопительным элементам системы.

Разработана математическая модель, позволяющая на основе изменения коэффициентов использования энергии рекуперации и собственных нужд по накопительным элементам определить мощность и номинальную энергоемкость СНЭЭ по критерию стоимости системы.

## 6 РАСЧЕТНЫЕ МОДЕЛИ ГИБРИДНЫХ СИСТЕМ НАКОПЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ПРИ РАСЧЕТАХ СИСТЕМЫ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

В данной главе представлены разработанные имитационные модели систем тягового электроснабжения и гибридных систем накопления электроэнергии. Приведены результаты имитационного моделирования работы систем накопления электроэнергии для пассивной и активной топологий при их применении в системе тягового электроснабжения. Представлены результаты моделирования работы гибридной системы накопления электроэнергии при работе с профилем тяговой нагрузки на разработанной физической модели. Выполнен анализ результатов имитационного моделирования на основе рассмотренных гибридных моделей, показана их эффективность.

### 6.1 Анализ способов управления системами накопления электроэнергии

Показатели работы СТЭ зависят от множества факторов, параметров и регулирования режимов работы. Оперативно-технологическое управление СТЭ реализуется на основе данных, формируемых рядом информационно-управляющих систем [27, 196 – 202]. Развитие интеллектуальных систем управления позволяет перейти на цифровые системы мониторинга состояния и управления СТЭ, обеспечивающие поддержку в принятии решений эксплуатирующему персоналу. Получение информации о параметрах и показателях работы СТЭ подразумевает построение систем управления, адаптирующихся к изменениям внешних и внутренних параметров и реализующих концепции обработки данных в информационно-технологической сфере, прежде всего таких, как большие данные – Big Data [203].

Основой системы управления техническим объектом является алгоритм, реализующий тот или иной метод математического расчета [204]. В теории управления не существует универсального способа решения задач синтеза

алгоритма управления, позволяющего отыскать оптимальный алгоритм для любой задачи.

Структура программно-технического комплекса, осуществляющего управление СТЭ с управляемыми элементами, в т.ч. СНЭЭ, включает в себя совокупность элементов, состояние и взаимосвязи между которыми описываются с помощью информационно-управляющих систем. Задачей программно-технического комплекса является управление системой по заданному критерию в режиме реального времени.

В настоящее время большинство крупных электроэнергетических и железнодорожных компаний в мире, в том числе и холдинг «РЖД», разрабатывают или используют информационные системы мониторинга и управления системами электроснабжения, в том числе тягового, в режиме реального времени, подпадающие под определение концепции «интеллектуальные сети электроснабжения» [205, 206, 349, 350]. Развитие цифровых технологий для управления СТЭ [207 – 209] создает возможности для использования различных технологий повышения эффективности работы, в т.ч. за счет применения СНЭЭ.

Управление СНЭЭ в СТЭ осуществляется с учетом специфики электротяговой нагрузки в зависимости от следующих показателей [160, 351 – 353]:

- степени заряженности;
- глубины разряда;
- уровня напряжения;
- количества эпизодов работы СНЭЭ в различных режимах;
- продолжительности эпизодов заряда и разряда;
- преобладания заряда или разряда в графике степени заряженности;
- расчетной температуры нагрева НЭЭ;
- скорости протекания процессов и др.

Требования, предъявляемые к системам управления, зависят от топологии СНЭЭ и ее параметров и показателей, изменения параметров и показателей

работы СТЭ и др. Для гибридных СНЭЭ системы управления должны решать задачу координации работы НЭЭ различного вида.

Выбор способа управления гибридной СНЭЭ зависит от вида решаемой задачи: стабилизация напряжения в точке присоединения к сети; выравнивание графика нагрузки; прием избыточной энергии рекуперации; повышение энергетической эффективности работы СТЭ; улучшение качества электроэнергии; повышение надежности электроснабжения и др. Решение указанных задач осуществляется с учетом выбора преобразователей энергии для режимов «заряд – разряд», стоимости системы управления, скорости отклика системы управления и преобразователей, архитектуры гибридизации и др.

Система управления и контроля гибридной СНЭЭ включает в себя две основные части:

1) блок управления режимами, реализующий алгоритм управления СНЭЭ. Управление осуществляется на основе контроля за рядом показателей, состав которого зависит от вида решаемой задачи (входные и выходные значения тока, мощности и напряжения на шинах, качества электроэнергии, уровня энергетической эффективности и др.);

2) блок управления распределением мощности между видами накопительных модулей гибридной СНЭЭ. Управление осуществляется на основе алгоритма, регулирующего мощность накопительных модулей различного вида.

Способы управления и контроля, применяемые для гибридных СНЭЭ, подразделяются по математическому аппарату на группу классических способов и способов, связанных с аппаратом математического программирования и нейронных сетей [354]. Классификация способов управления и контроля приведена на рисунке 6.1.

Представленные способы двух групп предназначены для управления гибридными СНЭЭ следующих видов:

– двухуровневой системой, позволяющей снижать колебания мощности генераторов [355];

– системой, построенной на суперконденсаторах, позволяющей регулировать высокочастотную составляющую колебания мощности генераторов [356];



Рисунок 6.1 – Классификация методов управления и контроля энергопотребления для гибридных систем накопления

– гибридными системами с динамической системой управления потоками мощности накопительных модулей [357];

– гибридной системой с прогнозным управлением, основанным на поддержании в заданных пределах тока электрохимического накопителя, состояния заряженности батареи, тока и напряжения накопителя электрического вида [358]. Управление реализуется за счет работы контроллера, распределяющего мощность между электрическим и электрохимическим НЭЭ;

– СНЭЭ с алгоритмом управления, построенном на основе нейронных сетей [359].

Указанные алгоритмы реализуют способы централизованного управления системой с помощью каналов связи между накопительными элементами и системой управления. Потеря управляемости системой наблюдается при сбое в каналах связи, что приводит к снижению надежности [360 – 362].

Применение суперконденсаторов в гибридных СНЭЭ связано с относительно высокой нагрузочной способностью и малым временем заряда, позволяющими снижать амплитуду высокочастотных колебаний мощности. При работе в буферном режиме суперконденсаторы обеспечивают оптимальный режим работы аккумуляторной батареи. Управление указанными гибридными системами реализуется с помощью схем с частотным разделением, построенных на основе фильтров нижних и верхних частот [363]. Указанная схема позволяет обеспечить работу суперконденсатора при высокочастотных колебаниях мощности, а работу аккумуляторной батареи – при низкочастотных колебаниях. Недостатком данного решения является использование суперконденсатора как приемника высокочастотной составляющей, не позволяющего в полной мере использовать его располагаемую мощность для динамического улучшения качества электроэнергии.

Задачи, стоящие перед гибридными СНЭЭ, определяют выбор системы управления, позволяющей решать задачи по стабилизации напряжения, снижению высокочастотных колебаний мощности, обеспечению работы в буферном режиме и ряд других.

Топология гибридных систем зависит от вида решаемых задач и определяет требования к составу их оборудования и стоимости. Топология гибридных систем подразделяется на следующие виды: активную, полуактивную и пассивную [364]. Первая топология подразделяется на

следующие виды: активная топология, параллельная активная топология, изолированная активная топология, многоуровневая топология (рисунок 6.2).

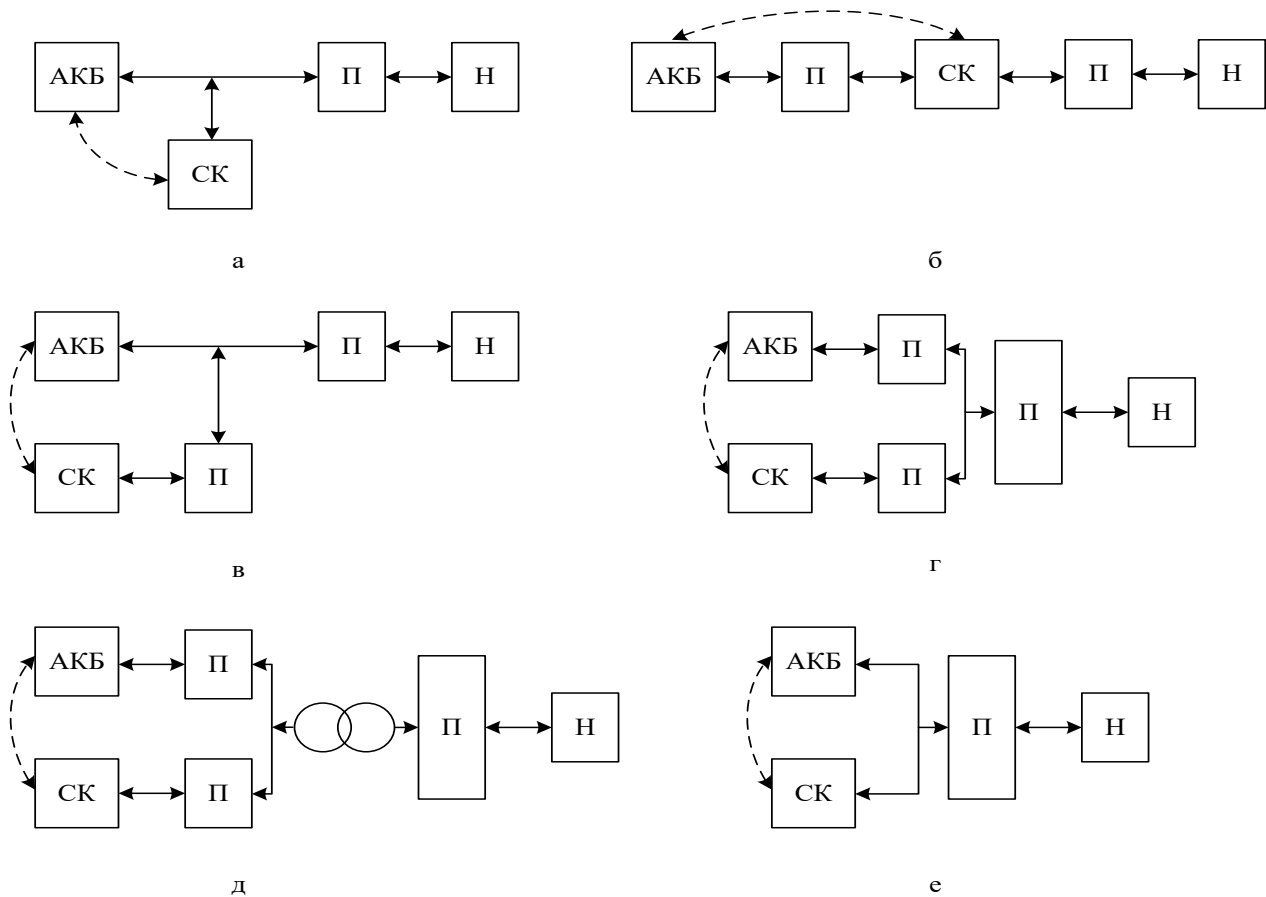


Рисунок 6.2 – Топология гибридных систем накопления электроэнергии: пассивная (а); полуактивная (б); ряд активной топологии (в); параллельная активная (г); изолированная активная (д); многоуровневая (е)

Способ и алгоритм управления определяются топологией гибридной системы и характеристикой нагрузки. При реализации пассивной топологии управление накопительными элементами отсутствует, полуактивной топологии – один из накопительных модулей является неуправляемым, другой – управляется по уровню напряжения на шинах постоянного тока. При применении активной топологии управление выполняется по входной и выходной мощности накопительных модулей или уровню напряжения, при этом способ и алгоритм управления определяются в зависимости от поставленной задачи.

Показатели нагрузки определяют требования по быстродействию и эффективности работы, уровню номинальной энергоемкости накопительных модулей, их мощности, управляемости, гибкости и стоимости.

Активная топология гибридной системы характеризуется относительно низким уровнем энергоэффективности, связанным с наличием в схеме преобразователей и трансформаторов, обеспечивающих работу систем в режимах заряда и разряда. Характеристики управляемости и гибкости для активной топологии выше, чем для полуактивной и пассивной, что обусловлено схемными решениями.

Пассивная топология отличается относительной простотой схемной реализации, недостатком которой является отсутствие возможности управления режимами заряда и разряда. С точки зрения управляемости и гибкости схемы с учетом различных ограничений на уровень степени заряженности и глубину разряда пассивная топология уступает активной и полуактивной.

В отличие от пассивной полуактивная топология позволяет управлять основными показателями работы гибридной системы наряду с ограничениями в области управляемости по сравнению с активной топологией.

## 6.2 Построение имитационной модели системы тягового электроснабжения с гибридной системой накопления электроэнергии

Режим работы СНЭЭ в СТЭ определяется графиком электрической нагрузки и уровнем напряжения на шинах ТП и линейных устройств.

Построение имитационной модели СТЭ, содержащей СНЭЭ, выполняется на основе схемы питания и секционирования контактной сети, режимов работы СТЭ, параметров тяговой сети межподстанционной зоны и показателей тяговой нагрузки.

Имитационная модель СТЭ включает в себя модели следующих объектов: ТП, тяговой сети, линейных устройств, ЭПС и СНЭЭ.

Отсутствие программных комплексов для проведения тяговых и электрических расчетов СТЭ, содержащей гибридные СНЭЭ, обуславливает необходимость построения имитационной модели с использованием существующего или разработки нового программного обеспечения. Построение имитационной модели выполняется в программном комплексе *Matlab-Simulink*.

При моделировании работы СТЭ используется два способа моделирования, отличающихся порядком проведения тяговых и электрических расчетов – последовательным и совместным. При использовании первого способа расчетов имитационная модель ЭПС в *Matlab* выполняется с использованием управляемого источника тока, дополненного переменным сопротивлением, как это показано в [210], изменяющего значение тока в соответствии с тяговым расчетом. В этом случае модель принимает вид, приведенный на рисунке 6.3.

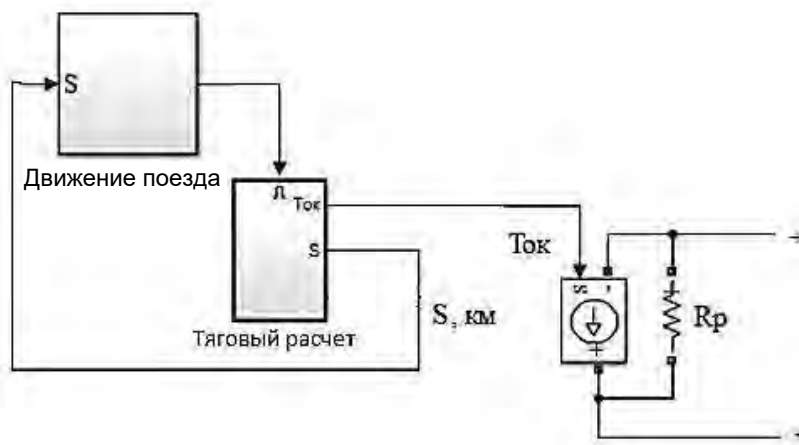


Рисунок 6.3 – Имитационная модель электроподвижного состава

Исходными данными для имитационного моделирования электротяговой нагрузки являются следующие:

- 1) спрямленный и приведенный профили пути электрифицированного участка;
- 2) ограничения скоростей движения на элементах профиля пути;
- 3) тяговые, тормозные и токовые характеристики ЭПС;
- 4) расчетная масса поезда.

В блоке «Тяговый расчет» решаются дифференциальные уравнения движения поезда:

$$\frac{d^2s}{dt^2} = \xi f_y; \quad (6.1)$$

$$s = \frac{dv}{dt}, \quad (6.2)$$

где:  $s$  – пройденный поездом за интервал времени  $dt$  путь;

$v$  – скорость движения поезда;

$f_y$  – результирующая удельная сила, равная алгебраической сумме удельных сил, действующих на поезд, и представляющая ускоряющую силу в режиме тяги либо замедляющую силу в режимах выбега и торможения;

$\xi$  – коэффициент, равный отношению ускорения свободного падения к коэффициенту инерции вращающихся частей поезда.

Структурная схема блока «Тяговый расчет» приведена на рисунке 6.4. Основными элементами данного блока являются два интегратора, включенных последовательно и решающих дифференциальные уравнения (6.1) и (6.2). Различные режимы движения поезда реализованы в виде подсистем «Режим пуска», «Режим тяги», «Режим выбега», «Режим торможения», содержащих характеристики соответствующего режима.

Блок «Тяговый расчет» реализует следующий порядок расчетов:

1) для заданной начальной скорости движения ЭПС и начального режима движения поезда определяется удельное ускоряющее усилие;

2) мгновенная скорость и координаты локомотива вычисляются путем интегрирования производной пути по времени (6.4);

3) потребляемый ток локомотива рассчитывается на основе токовых характеристик (блок «Определение тока электровоза») для соответствующей скорости и ординаты участка.

Приведенный порядок расчета рассматриваемого «Тягового блока» соответствует принятому порядку выполнения тяговых расчетов [120].

Преимуществом данного способа моделирования движения поезда и определения тока локомотива является возможность выполнения тягового расчета для заданного профиля пути [53].

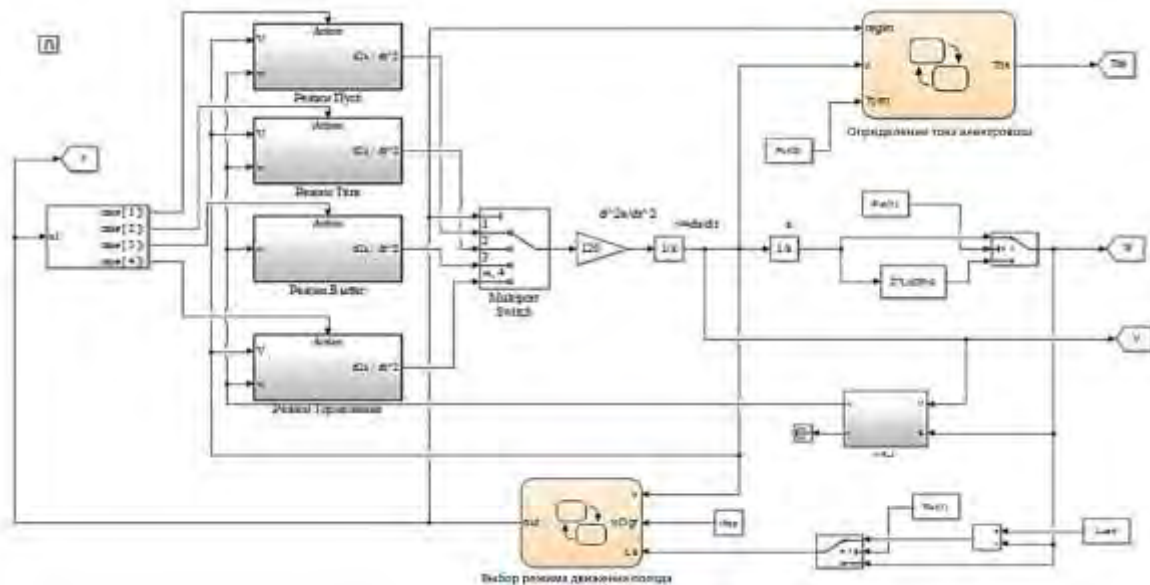


Рисунок 6.4 – Структурная схема блока «Тяговый расчет»

Модификацией первого способа моделирования электротяговой нагрузки является формирование графика нагрузки на основе данных ранее выполненного тягового расчета или данных регистрации параметров движения поезда, полученных по результатам поездки. В этом случае данные на управляемый источник тока поступают из внешнего файла базы данных. Модель в *Matlab* для данного способа приведена на рисунке 6.5.

Реализация второго способа расчетов выполняется с учетом изменения напряжения на токоприемнике, в этом случае модели выполнения тяговых расчетов и формирования тяговой нагрузки корректируются с учетом уровня напряжения в контактной сети.

Данные регистраторов параметров движения поезда РПДА или МСУЛ РПМ являются дискретными [159] и загружаются в файл *matlab.mat*. График

тяговой нагрузки электровоза серии 2ЭС10 за время поездки по одному из участков железной дороги приведен на рисунке 6.6.

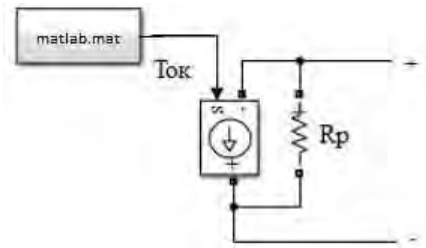


Рисунок 6.5 – Модель электроподвижного состава в *Matlab*

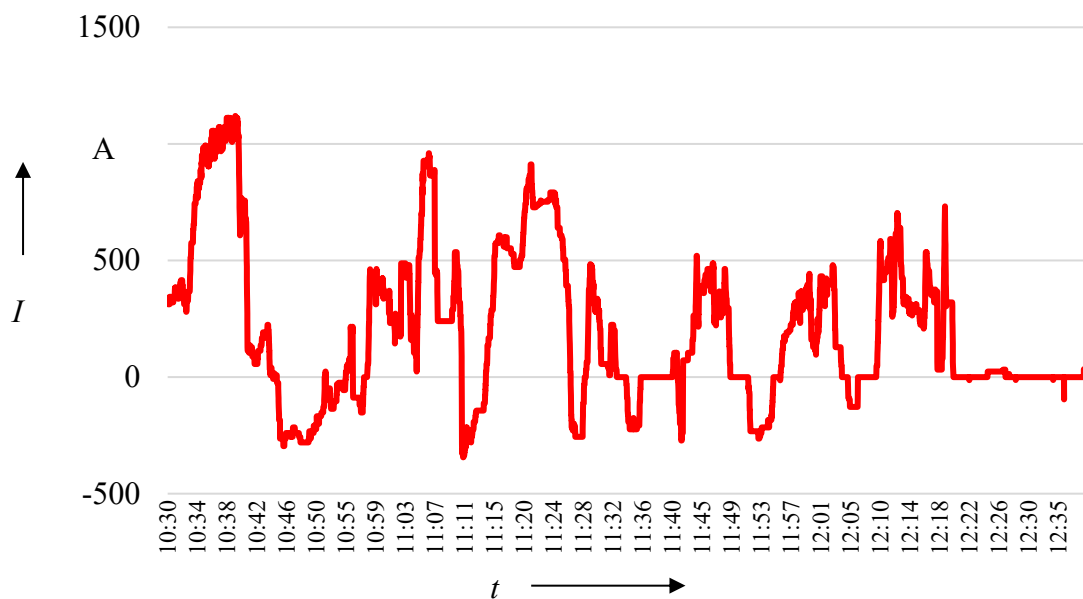


Рисунок 6.6 – График тока локомотива серии 2ЭС10

Представленный график загружается в блок с помощью файла *matlab.mat* в табличном виде с заданным шагом дискретизации, принимаемом в дальнейшем для имитационного моделирования работы СНЭЭ.

Исследования законов распределения наблюдаемых значений тяговой нагрузки и напряжений на токоприемнике показывают, что по критериям Пирсона и Колмогорова ни одна из гипотез о теоретическом законе распределения не является верной [211]. Для проведения имитационного моделирования используется тяговая нагрузка, задаваемая случайным образом, закон распределения которой соответствует эмпирическому закону распределения для каждого режима работы ЭПС с учетом следующих

характеристик: минимальное и максимальное значения напряжения на токоприемнике, полный ток локомотива, объемы потребления и возврата электроэнергии, частота и продолжительность режимов работы и т. д. [26].

Схема питания межподстанционных зон СТЭ для проведения имитационного моделирования, состоит из следующих элементов: тяговая сеть двухпутного участка; тяговые подстанции (ТП1 – ТП4), два пассивных поста – секционирования и один активный пост секционирования с гибридной СНЭЭ (рисунок 6.7).

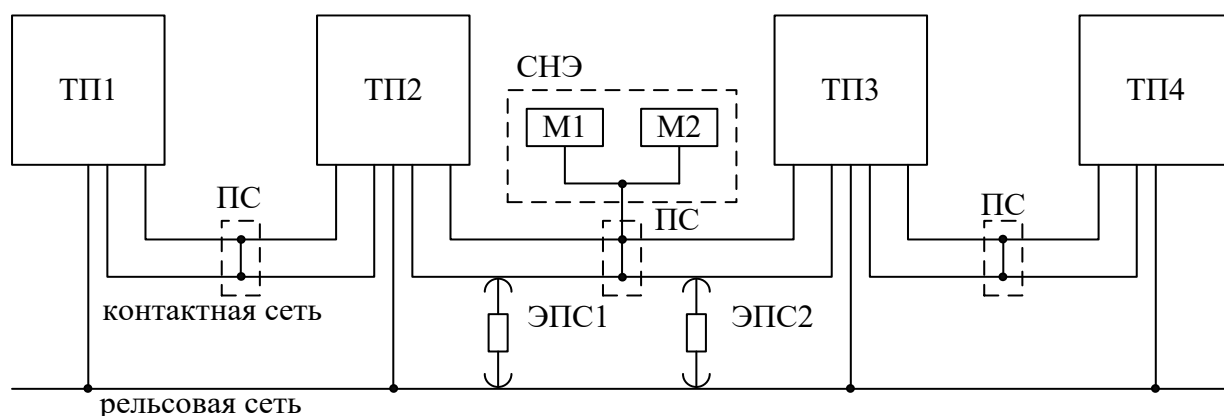


Рисунок 6.7 – Схема питания межподстанционных зон

Имитационное моделирование выполняется для следующих условий: движение электроподвижного состава (ЭПС1 и ЭПС2) осуществляется в границах межподстанционной зоны между тяговыми подстанциями ТП2 и ТП3 постоянного тока, на которой расположен пост секционирования с гибридной СНЭЭ. Режим питания межподстанционной зоны – двусторонний узловый.

Модель ТП содержит идеальный источник напряжения с эквивалентным внутренним сопротивлением  $R_0$ , включающим в себя сопротивление системы внешнего электроснабжения, силовых трансформаторов и преобразовательных агрегатов ТП. Мощность электроподвижного состава ЭПС1 и ЭПС2 является входной информацией для имитационной модели СТЭ как в режиме тяги, так и в режиме рекуперативного торможения.

При следовании единиц ЭПС между тяговой подстанцией ТП и постом секционирования ПС при линейном изменении сопротивления тяговой сети слева  $R_1$  и справа  $R_2$  от ЭПС определяются по выражениям:

$$R_1 = (1 - \delta) \cdot R_{\text{ТП-ПС}}; \quad (6.3)$$

$$R_2 = \delta \cdot R_{\text{ТП-ПС}}; \quad (6.4)$$

где:  $R_{\text{ТП-ПС}}$  – активное сопротивление участка контактной сети между тяговой подстанцией и постом секционирования, Ом;

$\delta$  – расстояние между тяговой подстанцией и постом секционирования, пройденное ЭПС, о.е.:

$$\delta = \frac{x_{\text{ПС}} - x_{\text{ЭПС}}}{l}, \quad (6.5)$$

$x_{\text{ЭПС}}$ ,  $x_{\text{ПС}}$  – ординаты ЭПС и поста секционирования соответственно (направление движения четное – в сторону увеличения ординаты; в случае нечетного направления знаки перед ординатами меняются на противоположные);

$l$  – протяженность участка от ТП до поста секционирования.

Имитационная модель в *Matlab* для СТЭ, содержащей гибридную СНЭЭ на посту секционирования, приведена на рисунке 6.8. Запись результатов имитационного моделирования осуществляется с помощью блока регистрации параметров моделирования (рисунок 6.9): токов в ветвях и напряжений в узлах схемы замещения; мощности и объемов электроэнергии по тяговым подстанциям, постам секционирования, СНЭЭ и единицам ЭПС. При имитационном моделировании применяется шаг интегрирования одна секунда.

Имитационная модель СНЭЭ состоит из электрохимического (аккумуляторная батарея) и электрического (суперконденсатор) НЭЭ. Модели для аккумуляторной батареи (АКБ) и суперконденсатора (СК) учитывают основные параметры данных устройств, в число которых входят уровень

заряженности, внутреннее сопротивление накопительного элемента, зарядные и разрядные характеристики. Для имитационного моделирования используются соответствующие блоки указанных моделей в *Matlab*.

Зарядные и разрядные характеристики позволяют определить уровень напряжения элементов в зависимости от продолжительности и уровня заряда и разряда. Обобщенное соотношение Шеферда [365, 366] позволяет определить напряжение на батарее по формуле:

$$U_{batt} = E_0 - Ri - K \frac{Q}{(Q - \int idt)} i + A \left( e^{-B \int idt} - 1 \right), \quad (6.6)$$

где:  $\int idt$  – количество электричества, А·ч;

$R$  – внутреннее активное сопротивление батареи, Ом;

$V_{batt}$  – напряжение батареи (В);

$i$  – ток батареи, А;

$A$ ,  $B$  – коэффициенты, характеризующие величину падения напряжения в экспоненциальной зоне разряда, В, и обратную величину емкости батареи в конце экспоненциальной зоны разряда, А·ч, соответственно;

$K$  – поляризационное сопротивление, Ом.

Модель гибридной СНЭЭ, состоящая из двух модулей – АКБ и СК – для имитационного моделирования в *Matlab* приведена на рисунке 6.10.

Модель аккумуляторной батареи, учитывающая внутреннее сопротивление, емкость и степень заряженности АКБ приведена на рисунке 6.11. Величина напряжения на клеммах батареи определяется исходя из разрядного тока с учетом степени заряженности.

Модель аккумуляторной батареи в *Matlab* формируется с помощью управляемого источника напряжения *Controller Voltage Source* (блок 1 на рисунке 6.11).

Зарядная и разрядная характеристики формируются с помощью данных, содержащихся в блоке *Lookup Table* (блок 2 на рисунке 6.11). Зарядные и разрядные характеристики определяются на основе линейной интерполяции дискретных данных зарядных и разрядных характеристики АКБ и СК.

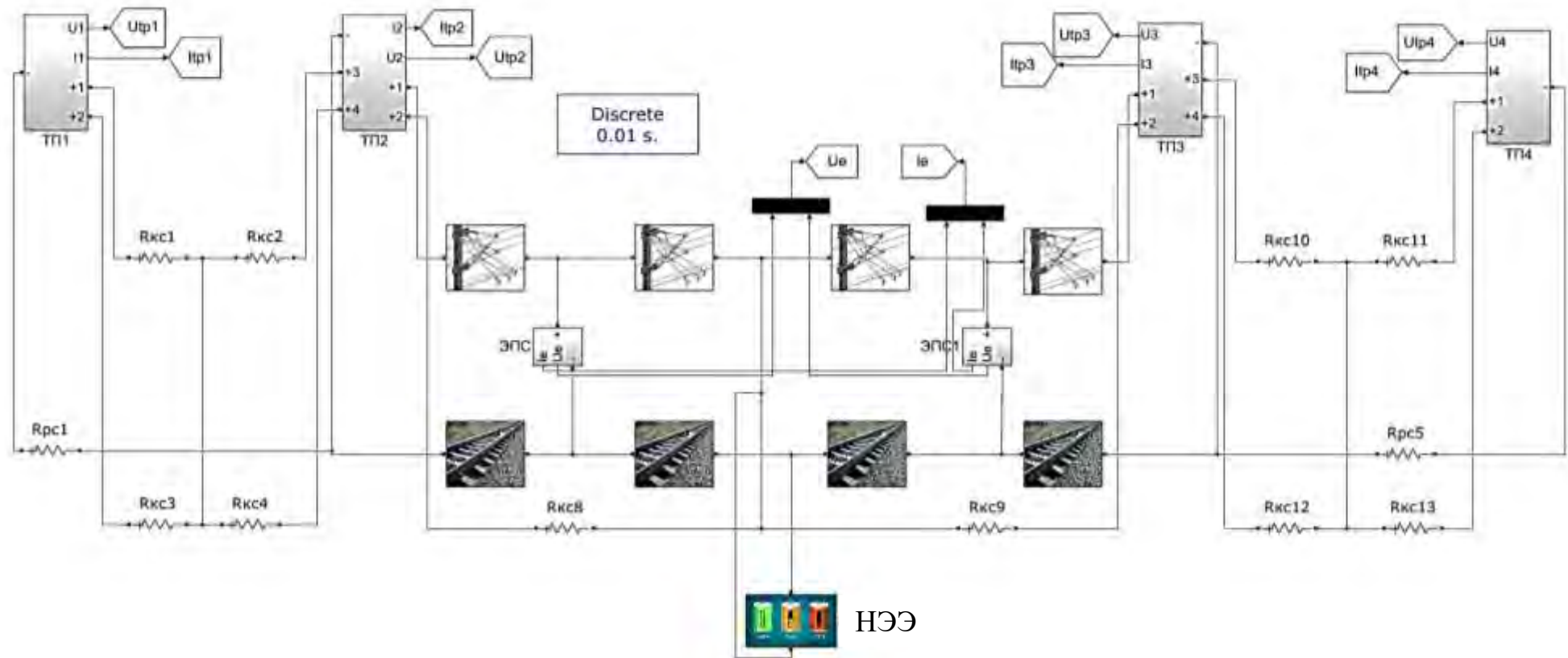


Рисунок 6.8 – Имитационная модель системы тягового электроснабжения в *Matlab*

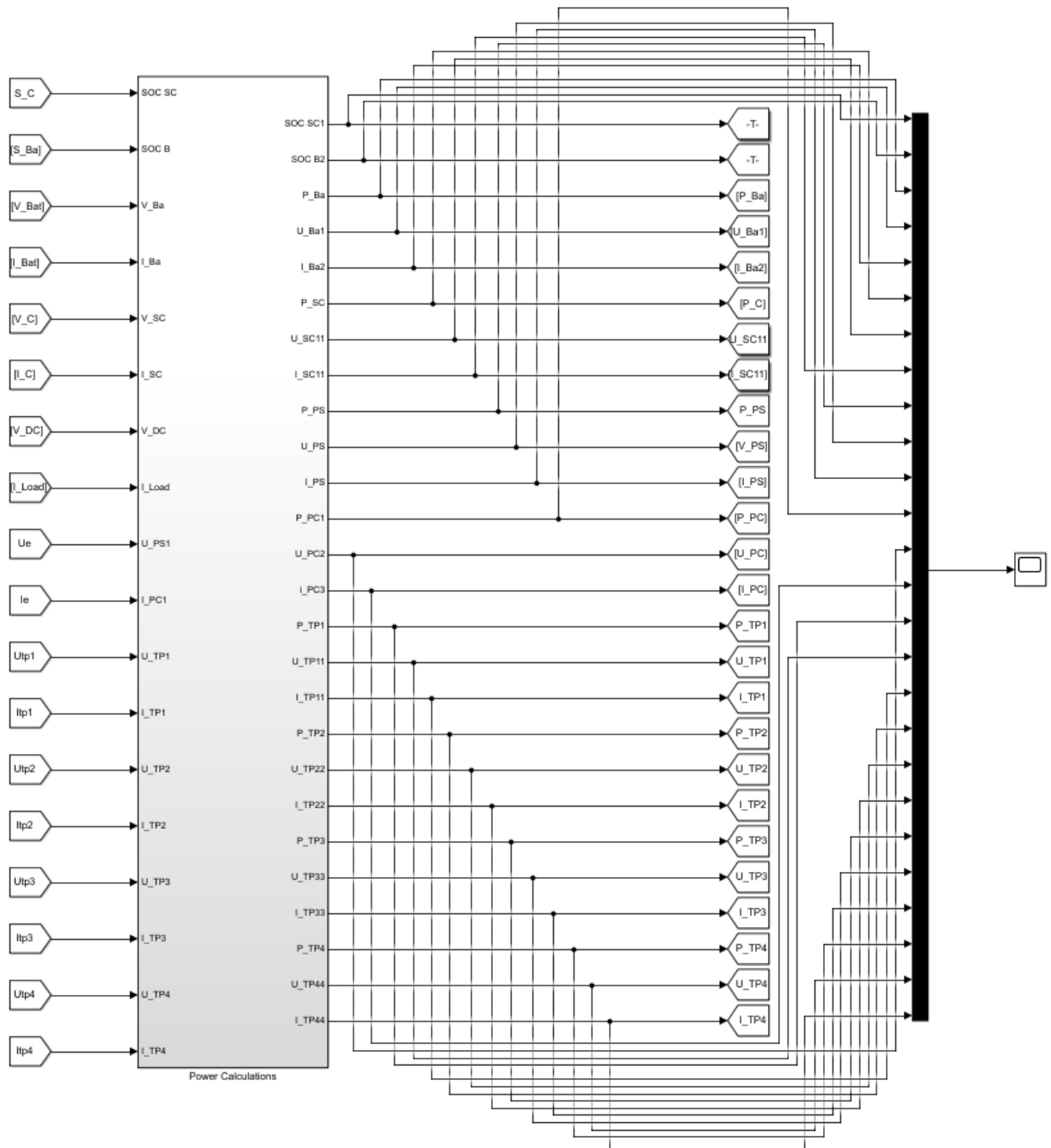


Рисунок 6.9 – Блок записи параметров моделирования в *Matlab*

Алгоритм управления режимами работы по уровню напряжения на шинах поста секционирования реализован с помощью набора логических элементов сравнения с постоянной *Compare to constant* (блок 3 на рисунке 6.12).

Аналогичным образом в *Matlab* построена модель суперконденсатора, содержащая управляемый источник напряжения, блоки формирования

зарядной и разрядной характеристик и реализации алгоритма управления режимами (рисунок 6.13).

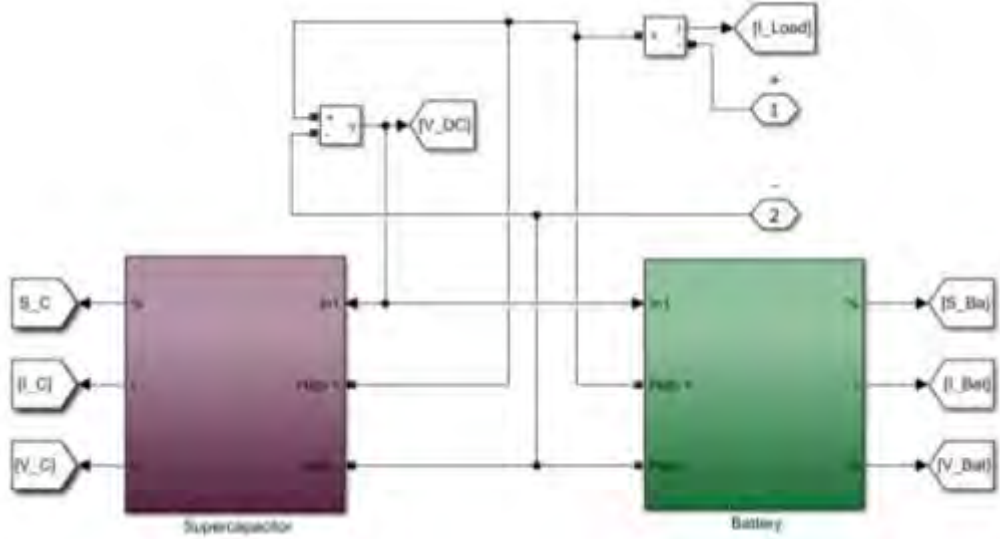


Рисунок 6.10 – Модель гибридной системы накопления в *Matlab*

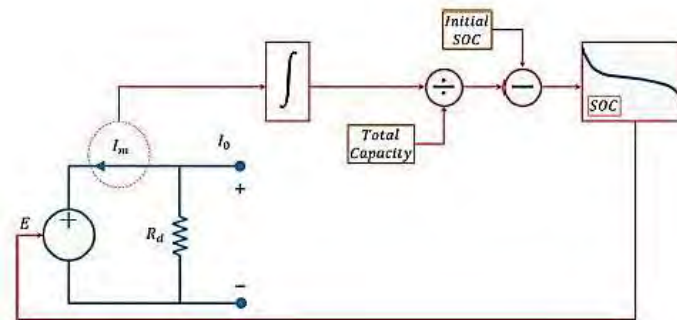


Рисунок 6.11 – Модель аккумуляторной батареи

Имитационное моделирование выполняется для двух вариантов: базового, в котором СНЭЭ отсутствует; варианта с размещением СНЭЭ на посту секционирования. В качестве характеристик базового варианта приняты следующие: СНЭЭ на посту секционирования отсутствует; график нагрузки формируется случайным образом с помощью блока *Uniform Random Number*, обеспечивающего равномерное распределение тока по рабочим диапазонам, полученного для мощностей продолжительного режима ЭПС в тяге на уровне

8,4 МВт, рекуперативного торможения – на уровне 4,0 МВт. Скорость движения ЭПС принята постоянной и равной 60 км/ч.

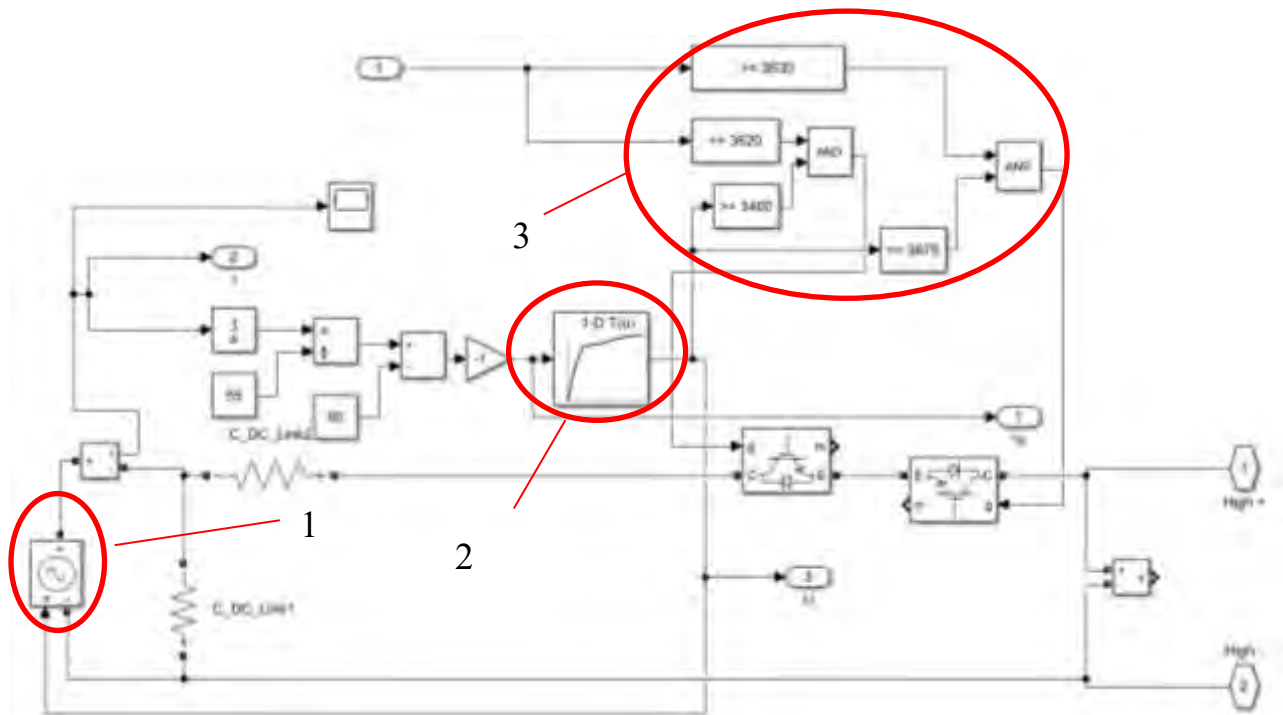


Рисунок 6.12 – Модель АКБ в *Matlab*

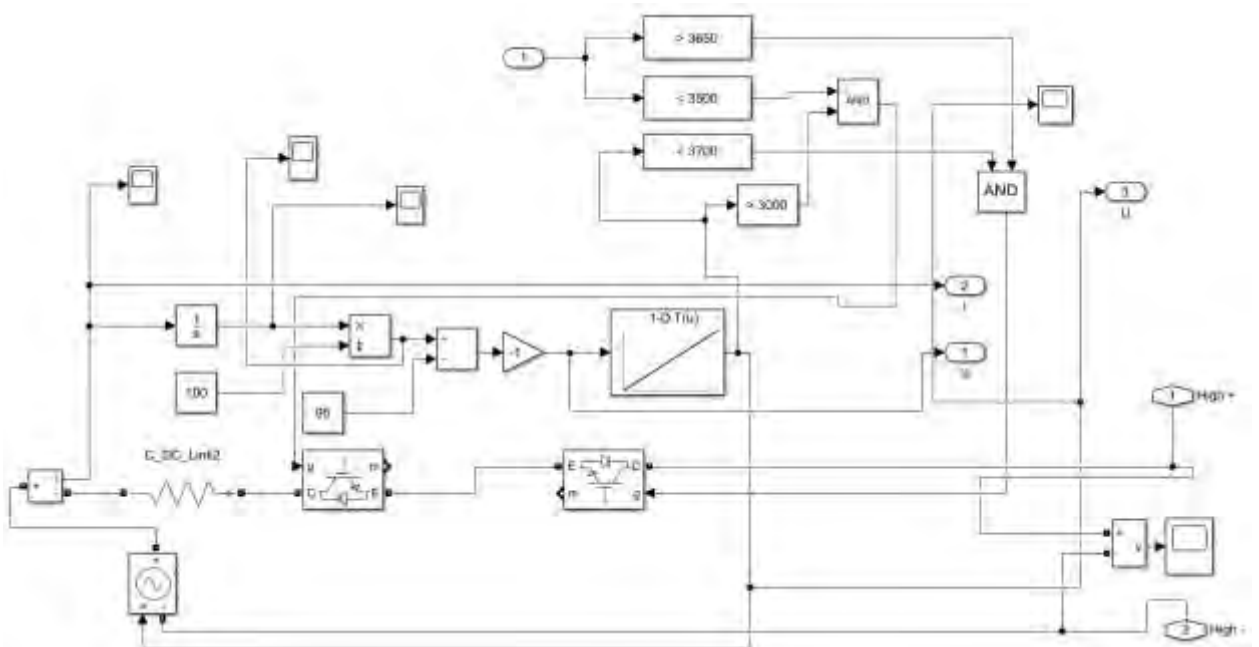


Рисунок 6.13 – Модель СК в *Matlab*

По результатам имитационного моделирования получены графики токов присоединений и напряжений на шинах моделируемых ТП и линейных устройствах (рисунки 6.14, 6.15 соответственно).

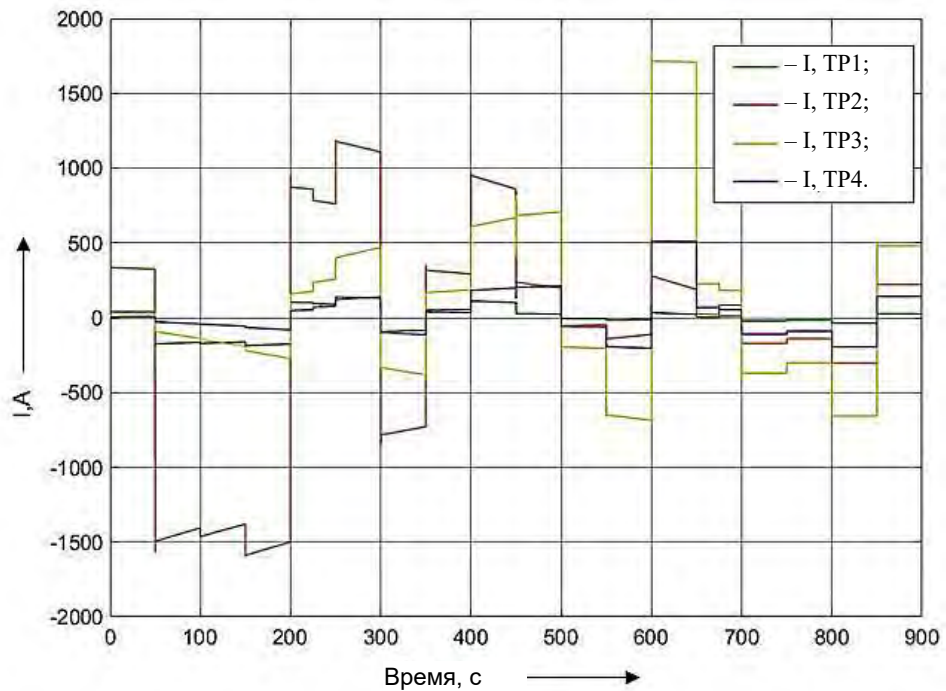


Рисунок 6.14 – График тока по присоединениям контактной сети тяговых подстанций по результатам моделирования

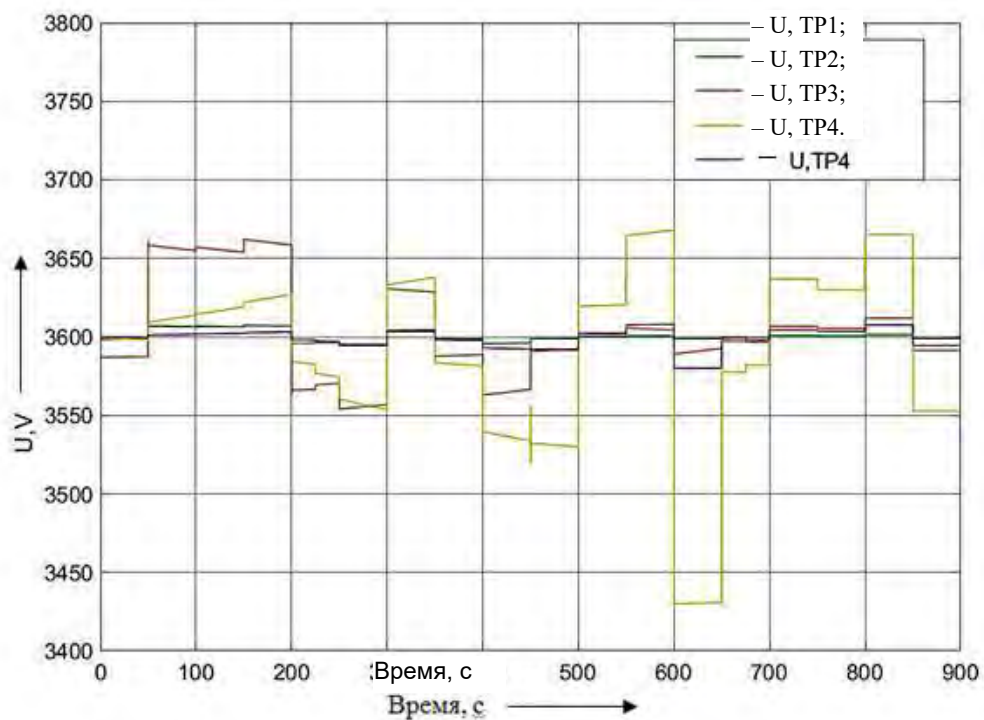


Рисунок 6.15 – График напряжения на шинах тяговых подстанций по результатам моделирования

Результаты имитационного моделирования, выполненные для рассмотренного участка железной дороги, заданных пороговых напряжений для режимов заряда и разряда, зарядных и разрядных характеристик позволяют определить основные энергетические показатели работы СТЭ и ЭПС.

В качестве примера ниже приведены результаты определения структуры тягового электропотребления по подстанциям для двух случаев: с применением ЭПС рекуперативного торможения и без его применения. В структуру электропотребления помимо тяговых подстанций ТП1 – ТП4 включены потери электроэнергии (*electrical loss*) в СТЭ (рисунок 6.16).

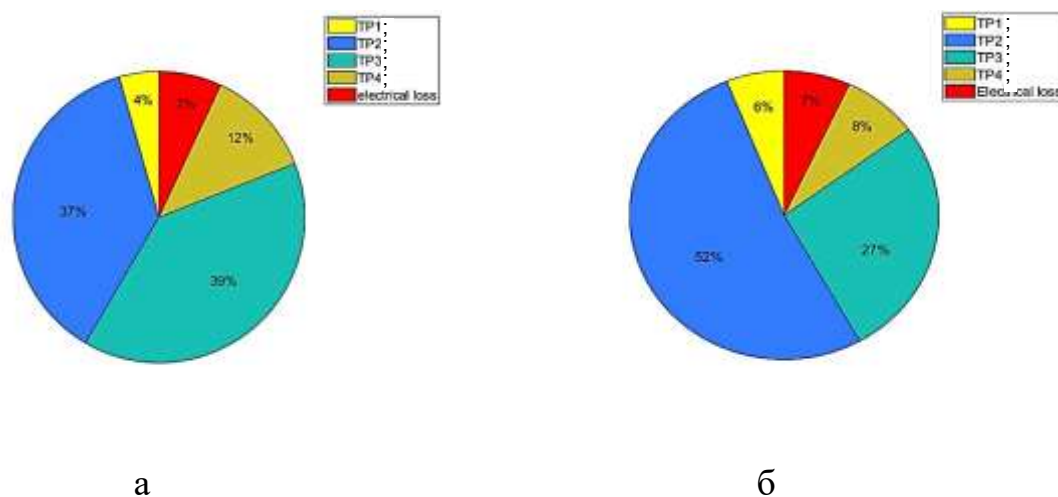


Рисунок 6.16 – Распределение электрической энергии по тяговым подстанциям в режиме тяги (а) и в режиме рекуперации (б) без накопителя

Разработанная имитационная модель СТЭ с гибридной СНЭЭ позволяет выполнять расчеты основных энергетических показателей, зависящие от заданных профиля пути, характеристик ЭПС, массы поезда, параметров СТЭ и СНЭЭ, с учетом характеристик НЭЭ. Модель позволяет оценить требуемые параметры гибридной СНЭЭ, их влияние на показатели нагрузочной способности СТЭ, эффективность алгоритмов управления СНЭЭ и снижение уровня потерь электроэнергии в тяговой сети для двух основных топологий – пассивной и активной.

### 6.3 Системы накопления электроэнергии с пассивной топологией

Пассивная топология построения гибридной СНЭЭ характеризуется относительными простотой исполнения и низкой стоимостью. Органы управления накопительными элементами представляют собой коммутационные аппараты, позволяющие коммутировать главные цепи в нормальном и аварийном режимах. Недостатком данной топологии является отсутствие гибкой управляемости накопительных модулей в различных режимах по пороговому напряжению. Указанное обстоятельство приводит к снижению энергетических показателей работы СНЭЭ. Примером реализации пассивной топологии является СНЭЭ, испытанная в условиях Филевской линии Московского метрополитена, не имеющая функции управления режимами [25].

Моделирование тяговой нагрузки ЭПС в *Matlab* выполняется с помощью источника сигнала, реализующего равномерное распределение. Источник сигнала характеризуется следующими параметрами: максимальный уровень мощности в тяговом и рекуперативном режимах; продолжительность режимов и их количество за время следования по участку. Мощность в тяговом и рекуперативном режимах выбрана исходя из мощности продолжительного режима локомотивов серии 2ЭС10 (8,4 и 4,0 МВт соответственно). Модель для формирования тяговой нагрузки ЭПС в *Matlab* приведена на рисунке 6.17.

Моделирование графика тяговой нагрузки выполнено с допущением, что изменение мощности ЭПС осуществляется дискретно с ограничением шага изменения до 1000 кВт. При имитационном моделировании полная емкость накопительных модулей аккумуляторной батареи и суперконденсатора приняты для двух вариантов соответственно: 1) 50 А·ч (АКБ) и 50 А·ч (СК); 2) 75 А·ч (АКБ) и 25 А·ч (СК).

Фрагменты графика тока и напряжения на токоприемнике ЭПС, полученные на основе разработанной модели, приведены на рисунке 6.18.

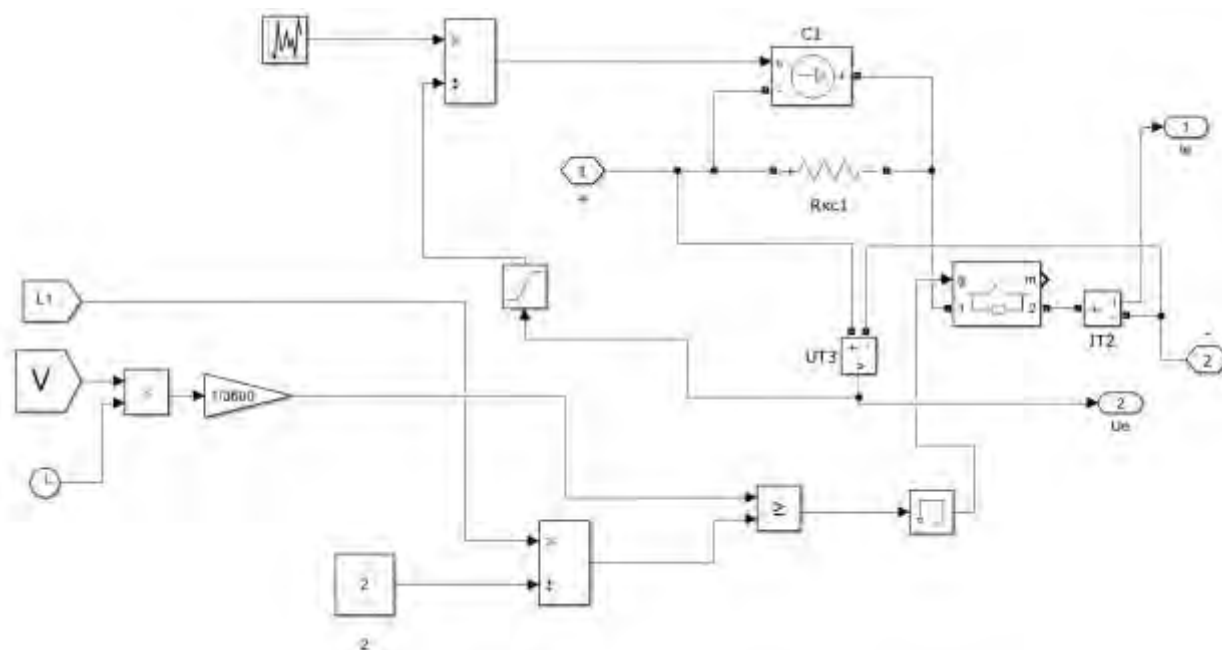


Рисунок 6.17 – Модель для формирования тяговой нагрузки электроподвижного состава

Алгоритм управления работой СНЭЭ с пассивной топологией на основе уровня напряжения на шинах поста секционирования приведен на рисунке 6.19.

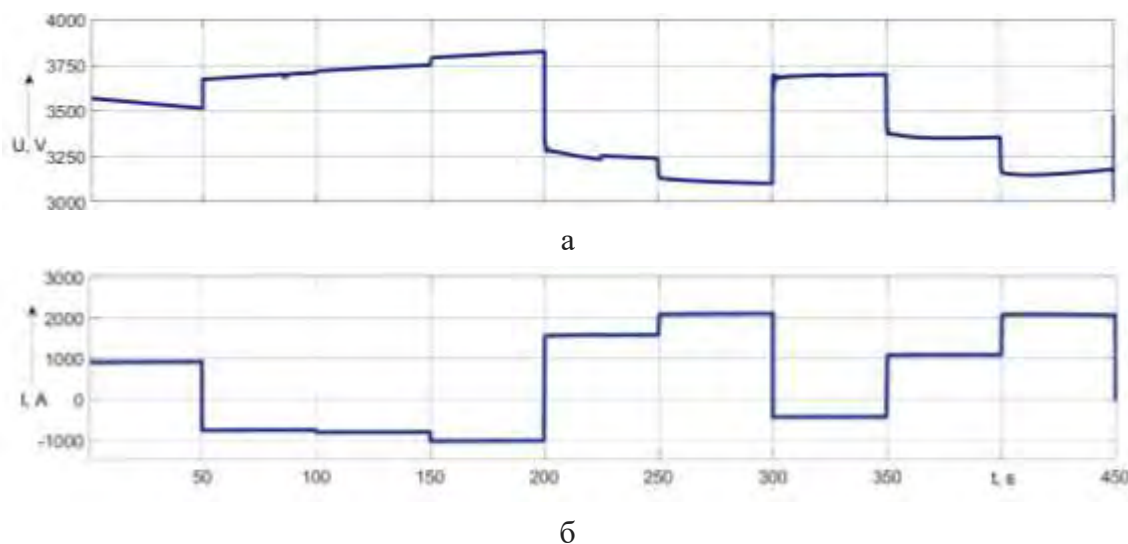


Рисунок 6.18 – Фрагмент графика напряжения (а) и тока (б) на токоприемнике электроподвижного состава

С помощью указанного алгоритма реализуется следующее управление режимами работы СНЭЭ. В начальный момент времени определяются готовность устройства к работе и уровень напряжения на шинах устройства (поста секционирования (ПС))  $U_{ПС}$ .

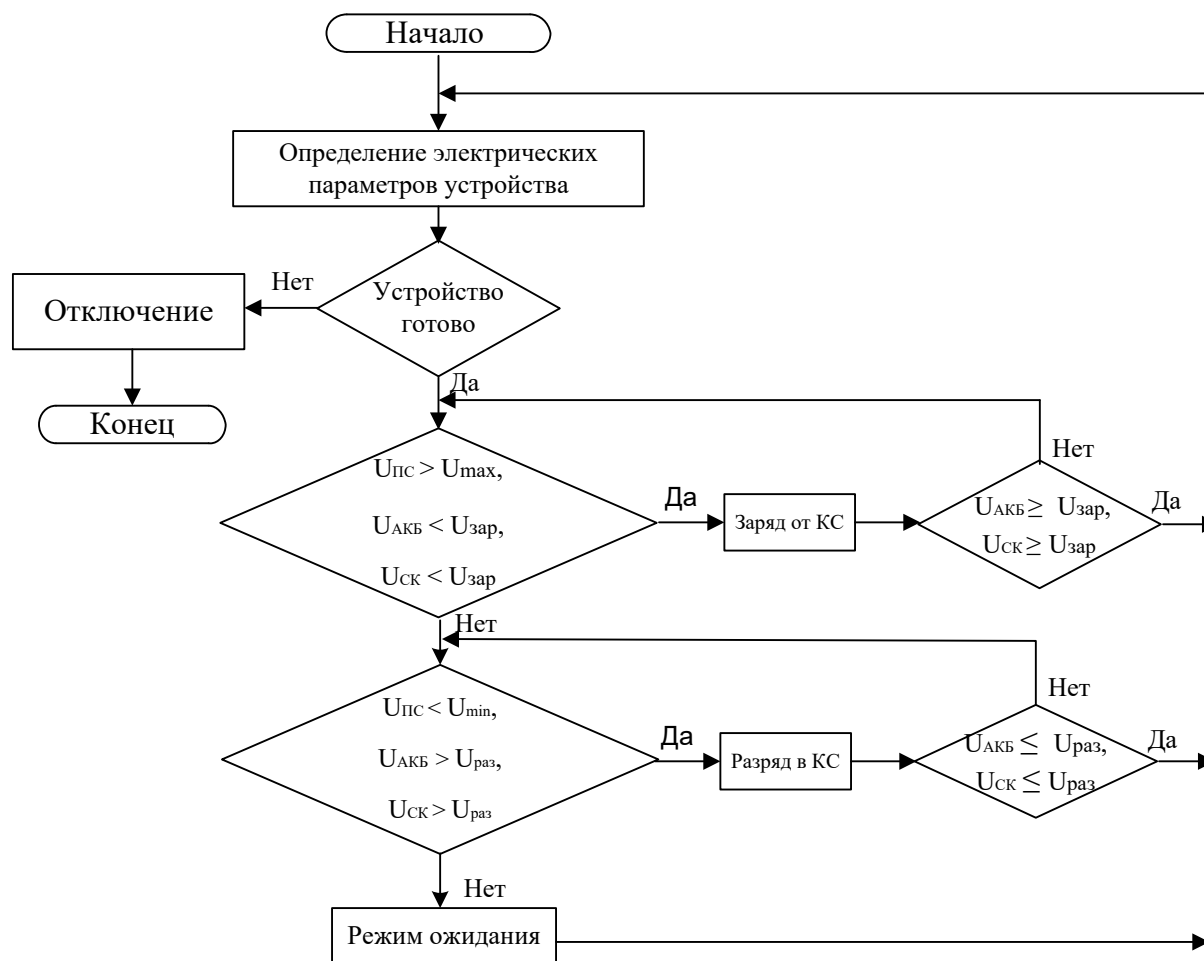


Рисунок 6.19 – Алгоритм работы гибридного накопителя энергии с пассивной топологией

При повышении напряжения на шинах ПС  $U_{ПС}$  до уровня  $U_{\max}$ , соответствующего возможности заряда, и напряжении на АКБ  $U_{АКБ}$  ниже максимально возможного уровня  $U_{зар}$ , соответствующего полному заряду АКБ, напряжении на СК  $U_{СК}$  ниже максимально возможного уровня  $U_{зар}$ , соответствующего полному заряду СК, АКБ и СК переходят в режим заряда. При понижении напряжения на шинах ПС  $U_{ПС}$  до уровня  $U_{\min}$  и напряжении на АКБ и СК  $U_{АКБ}$  и  $U_{СК}$  выше уровня  $U_{раз}$ , обеспечивающего разряд, АКБ и СК переходят в режим разряда в контактную сеть. При отсутствии условий для перехода АКБ и СК в режим разряда или заряда СНЭЭ на ПС находится в режиме ожидания (коммутационный аппарат отключен). Алгоритм работы предусматривает прекращение работы АКБ и СК при возникновении аварийного режима.

На уровень потерь электроэнергии в тяговой сети оказывают влияние параметры и режимы работы СНЭЭ. Одним из факторов, влияющих на уровень потерь электроэнергии в тяговой сети, является уровень порогового напряжения для смены режимов работы СНЭЭ.

Графики изменения потерь электроэнергии в тяговой сети в зависимости от изменения пороговых напряжений для режимов заряда и разряда гибридной системы позволяют определить диапазон напряжений, соответствующий минимальному уровню потерь электроэнергии  $\Delta W$  (рисунок 6.20), для емкости накопительных элементов АКБ и СК 75 и 25 А·ч соответственно.

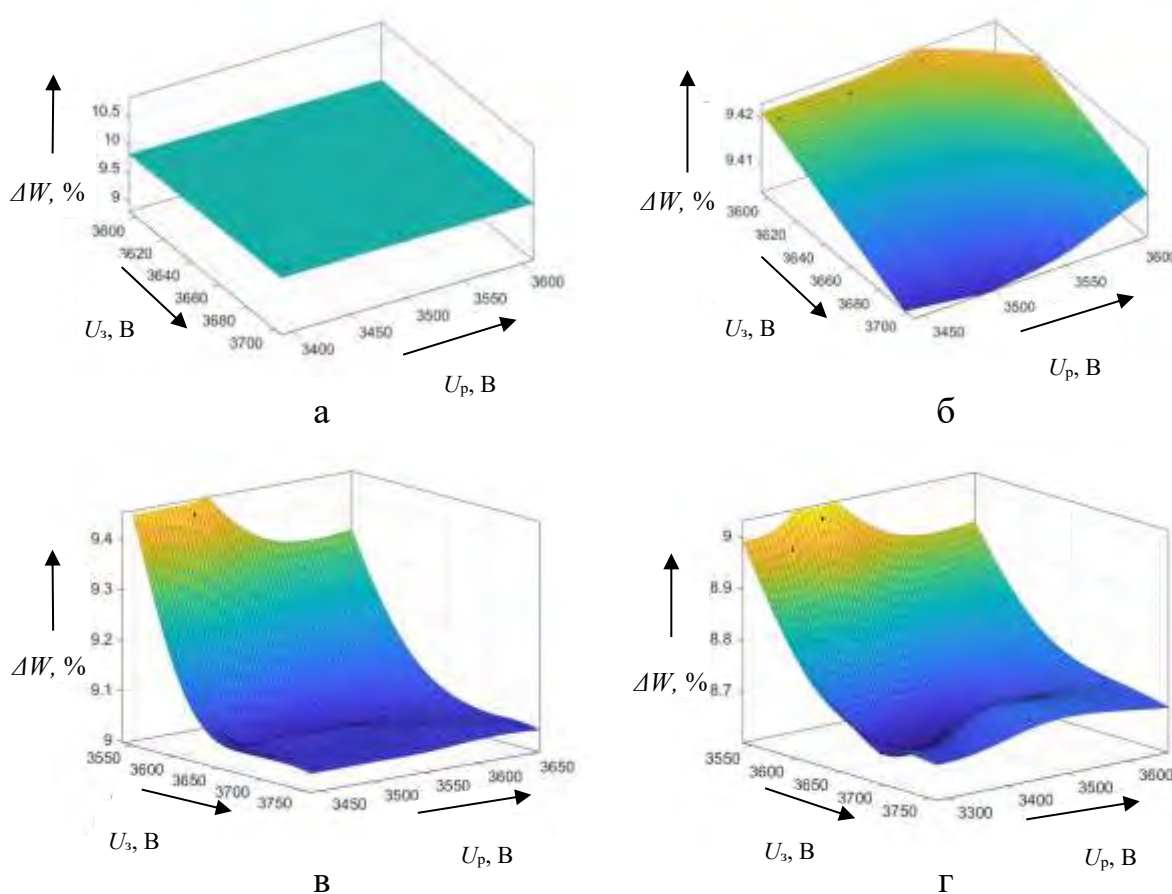


Рисунок 6.20 – График изменения потерь электроэнергии в зависимости от режима работы гибридной системы при возврате электроэнергии поездом, кВт·ч: до 20 (а); до 60 (б); до 120 (в); до 160 (г)

Потери электроэнергии зависят от уровня возврата электроэнергии и пороговых напряжений. Увеличение объема возврата электроэнергии

приводит к снижению потерь электроэнергии при соответствующем изменении пороговых напряжений (см. рисунок 6.18).

Степень заряженности накопительных модулей зависит от уровня пороговых напряжений. Результаты моделирования позволяют построить графики уровня заряженности накопительных модулей для режима рекуперации ЭПС с объемом электроэнергии 160 кВт·ч и минимального отличия пороговых напряжения для режимов заряда и разряда – 3550 и 3450 В соответственно (рисунок 6.21, а). При росте отклонения пороговых напряжений для режимов заряда и разряда друг от друга изменяется характер изменения степени заряженности – наблюдается преобладание режима разряда – на рисунке 6.19, б приведены графики степени заряженности для пороговых напряжений заряда и разряда – 3750 и 3550 В соответственно.

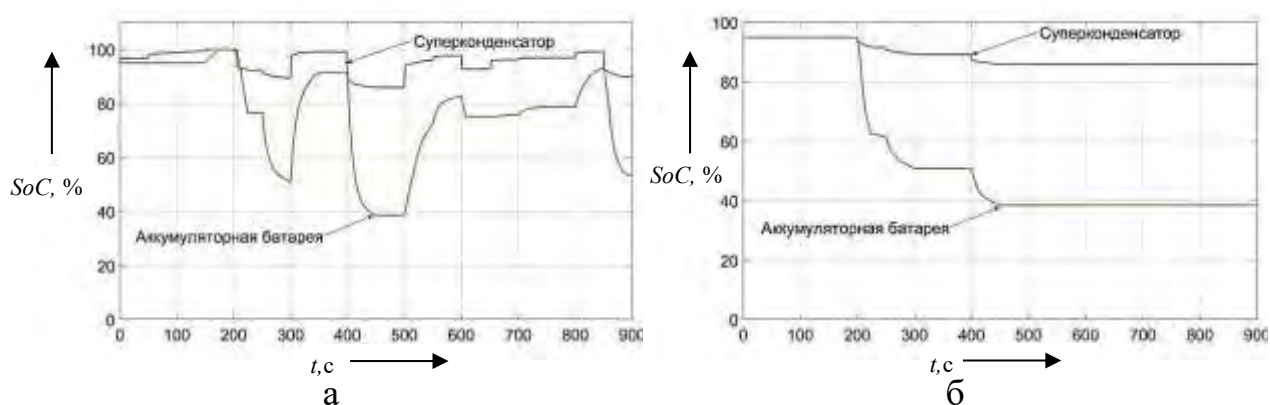


Рисунок 6.21 – График уровня заряженности накопительных модулей гибридной системы от пороговых напряжений для режимов заряда и разряда соответственно: 3550 и 3450 В (а); 3750 и 3550 В (б)

Диапазоны изменения напряжения на шинах ТП для рассматриваемых случаев моделирования при применении СНЭЭ на посту секционирования и без него представлены на рисунке 6.22.

Результаты моделирования показывают, что увеличение объема рекуперации приводит к росту максимального уровня напряжения на шинах ТП. Для рассматриваемого случая максимальный уровень напряжения соответствует наибольшему возврату электроэнергии поездом – 160 кВт·ч. Применение СНЭЭ на посту секционирования позволяет сократить диапазоны изменения напряжения на шинах ТП. Наибольшее сокращение диапазона

наблюдаемых значений напряжения отмечается на тяговых подстанциях ТП2 и ТП3 моделируемого участка, на межподстанционной зоне, между которыми установлена гибридная СНЭЭ (рисунок 6.20, а), при этом наблюдается эффект стабилизации напряжения – повышение уровня минимального (на 3,4 %) и снижение уровня максимального напряжения (на 1,4 %) по тяговым подстанциям относительно базового варианта, при котором отсутствует СНЭЭ (рисунок 6.22, б).

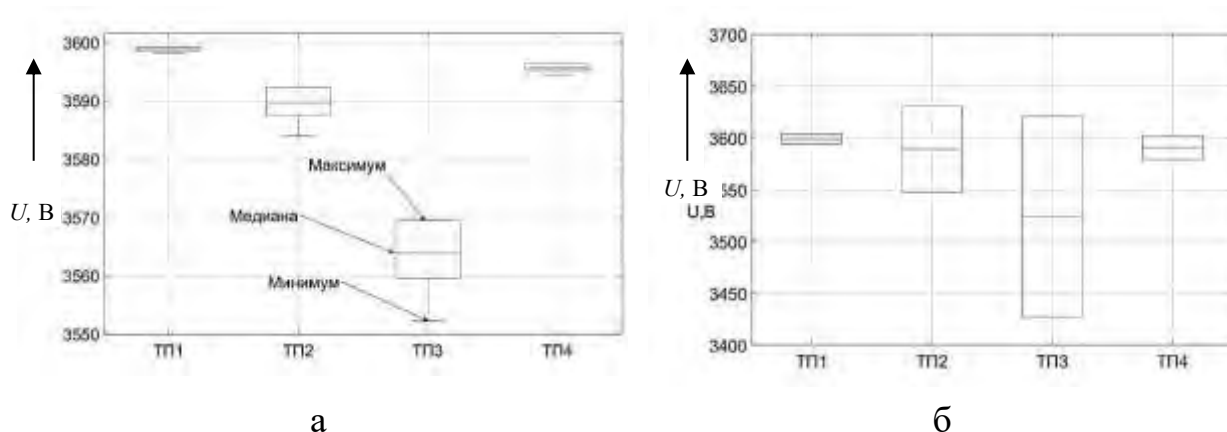


Рисунок 6.22 – Диапазоны изменения напряжения на шинах тяговых подстанций при установленной системе накопления (а) и без нее (б)

Аналогично получены диапазоны изменения тока по присоединениям ТП, для условий размещения СНЭЭ на посту секционирования и при ее отсутствии (рисунок 6.23). Применение гибридной СНЭЭ позволяет решать задачу по выравниванию графика нагрузки – сокращается диапазон изменения тока по присоединениям ТП.

Графики изменения потерь электроэнергии в тяговой сети в зависимости от пороговых напряжений режимов заряда и разряда гибридной системы при емкости накопительных модулей АКБ и СК 50 и 50 А·ч соответственно приведены на рисунке 6.24. Характер изменения потерь электроэнергии в контактной сети носит нелинейный характер и диапазон наблюдений – от 0,01 до 5,5 %. Минимальные значения потерь в контактной сети наблюдаются в диапазоне пороговых напряжений для режима заряда – от 3650 до 3750 В, разряда – от 3300 до 3500 В. При этом расход электроэнергии по отдельным тяговым подстанциям сокращается на величину до 1,37 %.

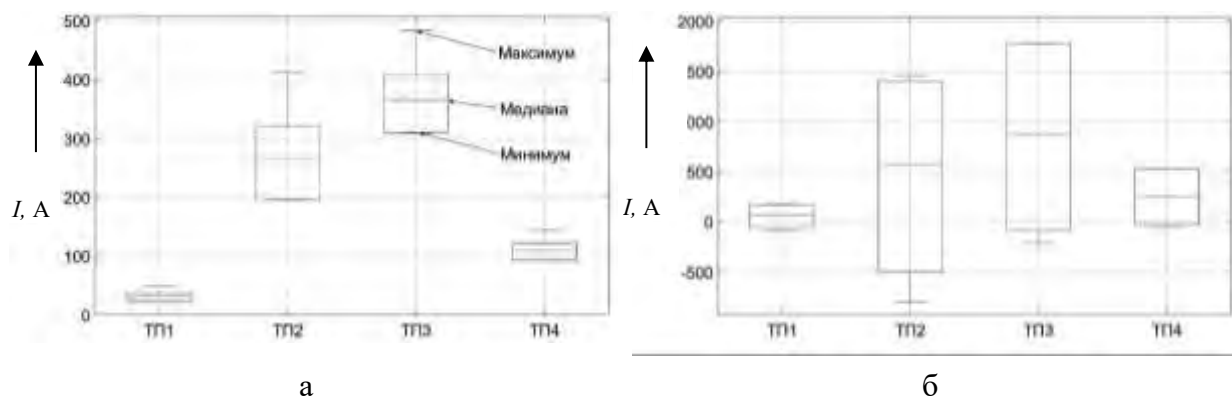


Рисунок 6.23 – Диапазоны тока тяговых подстанций при применении системы накопления на посту секционирования (а) и без нее (б)

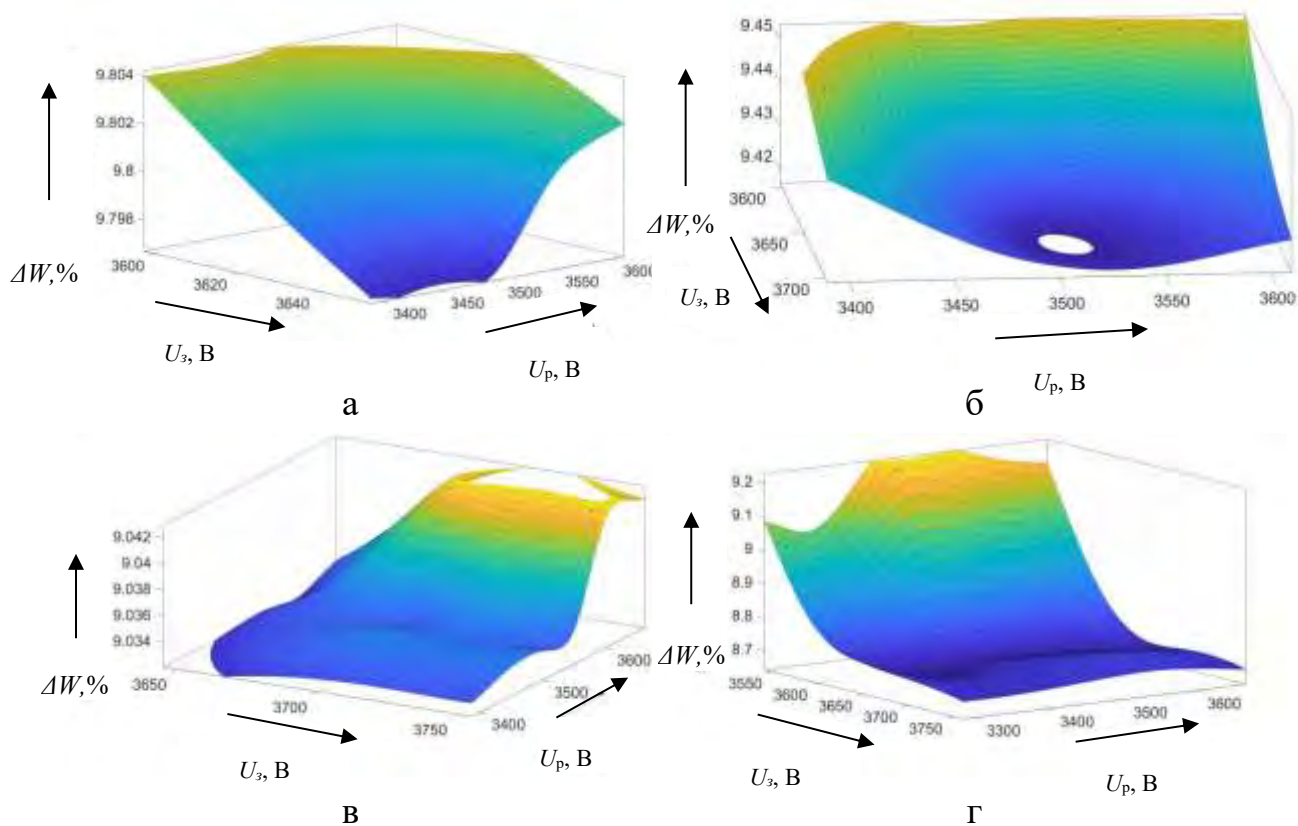


Рисунок 6.24 – График изменения потерь электроэнергии в условиях работы гибридной системы при возврате электроэнергии поездом, кВт·ч: до 20 (а); до 60 (б); до 120 (в); до 160 (г)

Для рассматриваемого случая графики степени заряженности накопительных модулей при наибольшем возврате электроэнергии ЭПС 160 кВт·ч и минимальном различии пороговых напряжений заряда и разряда – 3550 и 3450 В соответственно – приведены на рисунке 6.25, а, для максимального различия уставок включения устройства на заряд и последующий разряд 3750 и 3550 В соответственно – на рисунке 6.25, б.

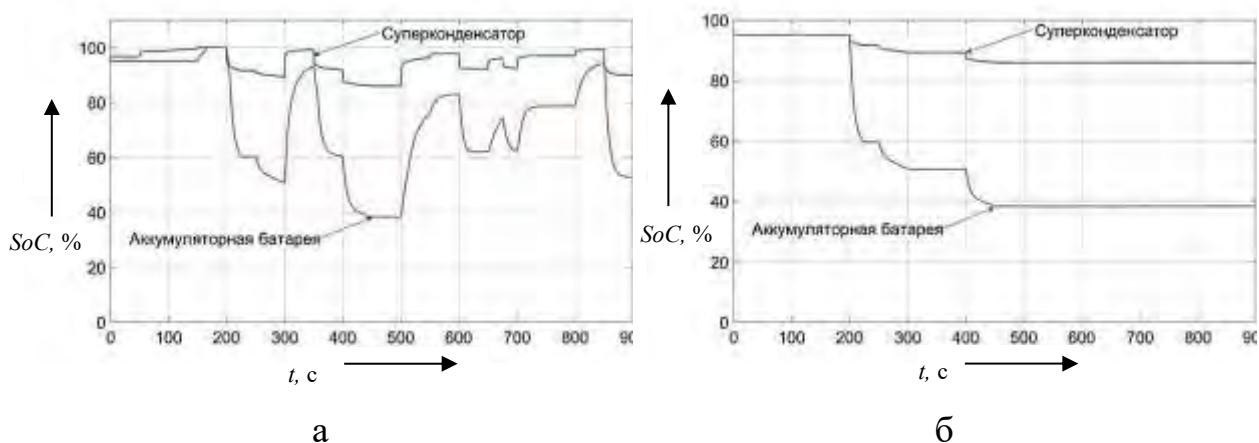


Рисунок 6.25 – График уровня заряженности гибридного накопителя энергии для пар уставок по напряжению: 3550 и 3450 В (а); 3750 и 3550 В (б)

Диапазоны изменения напряжения на шинах ТП для рассматриваемого случая представлены на рисунке 6.26. Максимальный уровень напряжения соответствует наибольшему для рассматриваемого случая возврату электроэнергии поездом 160 кВт·ч.

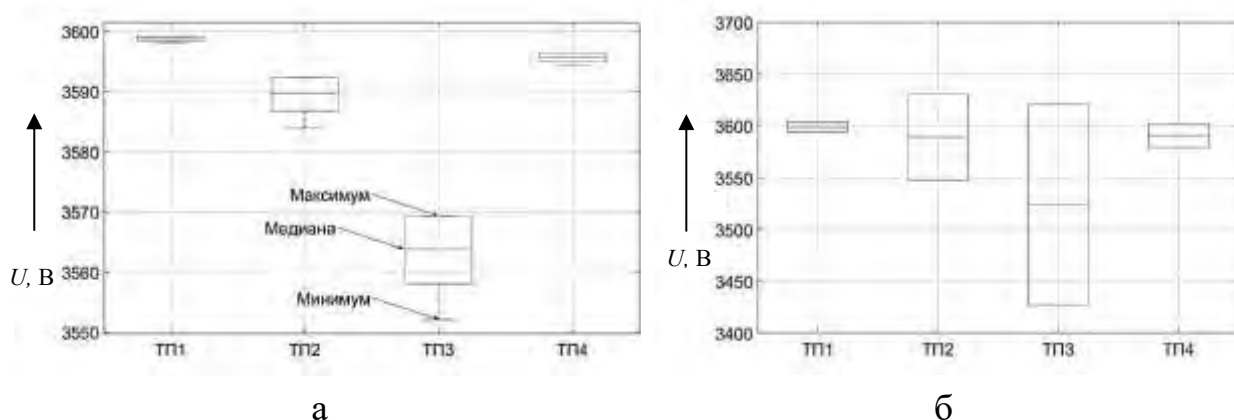


Рисунок 6.26 – Диапазон изменения уровня напряжения на шинах тяговых подстанций при применении системы накопления (а) и без нее (б)

Наибольшее влияние СНЭЭ на уровень напряжения наблюдается на тяговых подстанциях ТП2 и ТП3, при этом рост уровня минимального напряжения составляет 3,6 %, снижение уровня максимального напряжения – на 1,7 % по ТП участка относительно базового варианта, в котором СНЭЭ отсутствует.

Диапазоны изменения значений тока, протекающего по присоединениям ТП, представлены на рисунке 6.27. При изменении пары значений емкости элементов АКБ и СК с 75 и 25 А·ч до 50 и 50 А·ч соответственно, т. е. при

росте емкости суперконденсатора, наблюдается расширение диапазона наиболее наблюдаемых значений тока по присоединениям ТП в сторону увеличения максимальных значений для подстанций ТП2 и ТП3, ограничивающих межподстанционную зону с СНЭЭ на посту секционирования.

При значении емкостей накопительных модулей АКБ и СК равной 50 А·ч среднее напряжение на шинах ТП ниже, а средний ток подстанций выше соответствующих уровней для варианта с распределением емкостей между модулями 75 и 25 А·ч на АКБ и СК соответственно.

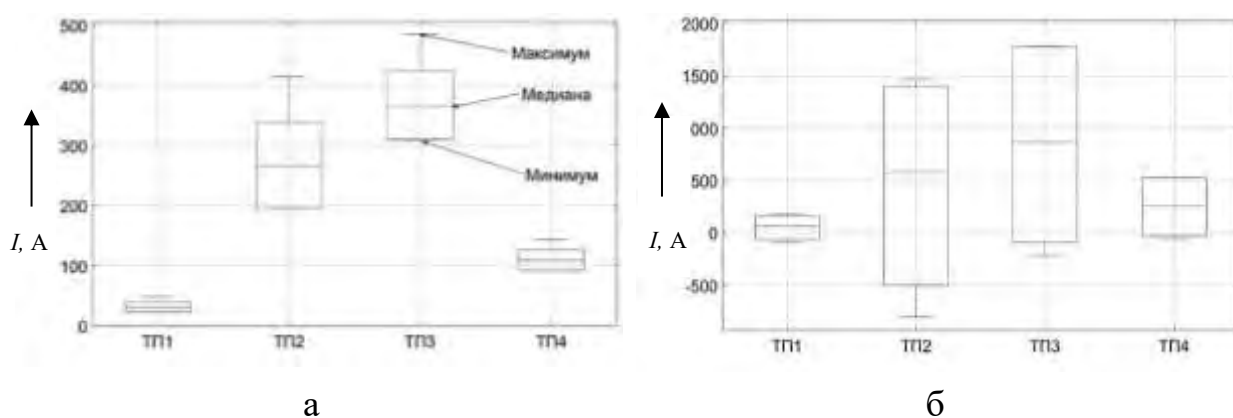


Рисунок 6.27 – Диапазон изменения тока тяговых подстанций для случая с применением системы накопления электроэнергии (а) и без нее (б)

Для рассмотренных вариантов комбинации емкости модулей АКБ и СК изменение потерь электроэнергии в тяговой сети при изменении пороговых напряжений заряда и разряда гибридной системы имеет нелинейный характер. При емкости накопительных модулей АКБ и СК равной 50 А·ч изменение потерь электроэнергии в контактной сети наблюдается в диапазоне от 8,6 до 9,8 % от общего объема расхода электроэнергии по ТП, снижение расхода электроэнергии составляет до 2,05 %. Для варианта распределения емкости накопительных модулей АКБ и СК 75 и 25 А·ч соответственно изменение потерь наблюдается в диапазоне от 8,7 до 9,8 %, снижение расхода электроэнергии – до 1,37 %.

Применение гибридной СНЭЭ повышает равномерность загрузки ТП, выравнивает график напряжения и нагрузки по ТП. Увеличение емкости СК

позволяет в большей степени стабилизировать напряжение на шинах поста секционирования.

Соотношение емкости для элементов гибридной СНЭЭ пассивной топологии определяется в зависимости от решаемой задачи по выравниванию графика нагрузки или стабилизации напряжения, снижения уровня электропотребления и потерь энергии в тяговой сети.

#### 6.4 Системы накопления электроэнергии с активной топологией

Активная топология гибридной СНЭЭ характеризуется возможностью контролировать входную и выходную мощность модулей, определять режим их работы на основе выбранного алгоритма. В отличие от пассивной, в активной топологии управление преобразователем позволяет регулировать мощность в режимах заряда и разряда.

Алгоритм управления гибридной СНЭЭ с активной топологией по уровню напряжения и току нагрузки приведен на рисунке 6.28. Отличием алгоритма от аналогичного с пассивной топологией является регулирование токов заряда и разряда в соответствующих режимах.

При повышении напряжения на шинах ПС  $U_{ПС}$  до уровня  $U_{\max}$ , соответствующего режиму рекуперативного торможения поезда, при напряжении на АКБ  $U_{АКБ}$  и СК  $U_{СК}$  ниже максимально возможного уровня  $U_{зар}$ , соответствующего полному заряду, АКБ и СК переходят в режим заряда. При этом преобразователь поддерживает постоянным значение напряжения, подаваемого на вход накопительных модулей  $U_{вх}$  и ограничивает ток заряда до величины  $I_{зар \max}(t)$ .

При понижении напряжения на шинах ПС  $U_{ПС}$  до уровня  $U_{\min}$  и напряжении на АКБ и СК  $U_{АКБ}$  и  $U_{СК}$  выше уровня  $U_{раз}$ , обеспечивающего разряд, АКБ и СК переходят в режим разряда в контактную сеть. При этом в процессе падения напряжения на накопительных модулях преобразователь энергии поддерживает постоянным уровень выходного напряжения  $U_{вых}$ ,

снижая при этом ток в зависимости от заданной разрядной характеристики  $I_{\text{раз max}}(t)$ .

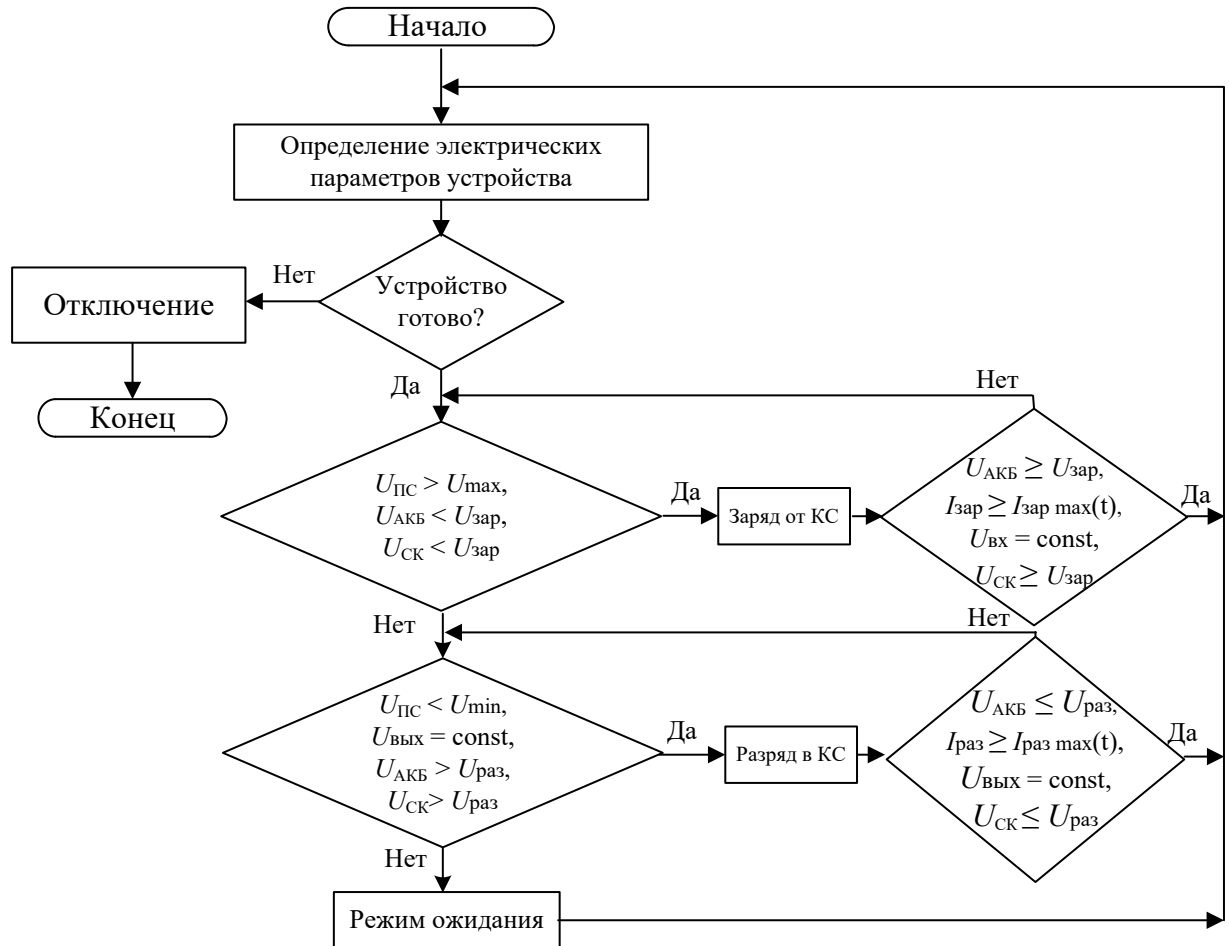


Рисунок 6.28 – Алгоритм работы активной топологии гибридного накопителя

При отсутствии условий для перехода АКБ и СК в режим разряда или заряда СНЭЭ на ПС находится в режиме ожидания. Алгоритм работы предусматривает прекращение работы АКБ и СК в аварийных режимах.

В принятой имитационной модели используется два силовых полупроводниковых преобразователя с двунаправленным потоком энергии по одному на каждый накопительный модуль.

Для исследования характера изменения энергетических показателей, сокращения времени расчетов для проведения моделирования используется модель преобразователя на базе идеальных источников тока и напряжения (рисунок 6.29), потерями в преобразователе в данном случае пренебрегают.

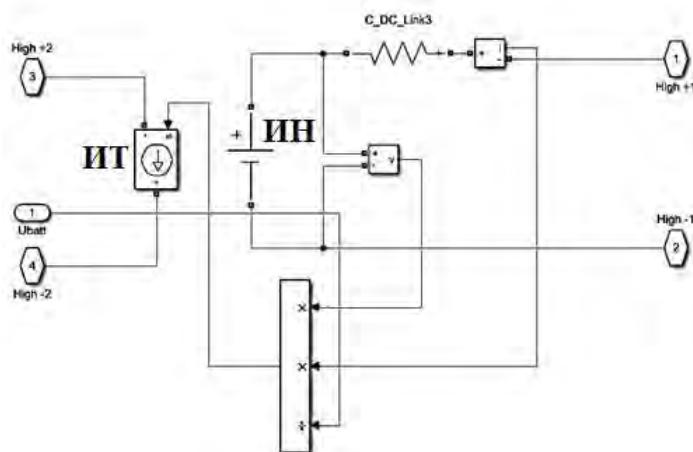


Рисунок 6.29 – Модель преобразователя в *Matlab*

Идеальный источник постоянного напряжения (ИН) подключен к выводам *High+1* и *High-1*. Учет внутренних потерь осуществляется за счет последовательно подключенного активного сопротивления *C\_DC\_Link3*. Измеряемые ток и напряжение позволяют выполнить расчет потребляемой мощности и определить значение тока, который будет сниматься с зажимов АКБ и СК через управляемый источник тока (ИТ).

График мощности, реализуемой ЭПС для рассматриваемых вариантов, соответствует ранее принятым исходным данным. Для имитационного моделирования емкость накопительных элементов аккумуляторной батареи и суперконденсатора принимается 360 и 90 А·ч, напряжение на модулях – 1000 В. Для повышения напряжения используются преобразователи.

Графики изменения потерь электроэнергии в контактной сети в зависимости от пороговых напряжений заряда и разряда гибридной СНЭЭ при использовании преобразователей позволяют определить диапазоны напряжений, при которых достигаются минимальные уровни потерь электроэнергии (рисунок 6.30). Минимальные значения уровня потерь электроэнергии наблюдаются при минимальных значениях напряжения разряда. Характер изменения потерь электроэнергии является нелинейным и наблюдается в диапазоне от 0,3 до 1,2 %. Область минимальных значений находится в диапазоне пороговых напряжений заряда от 3500 до 3650 В,

разряда – от 3300 до 3400 В. При этом расход электроэнергии по отдельным ТП сокращается до 2,2 %.

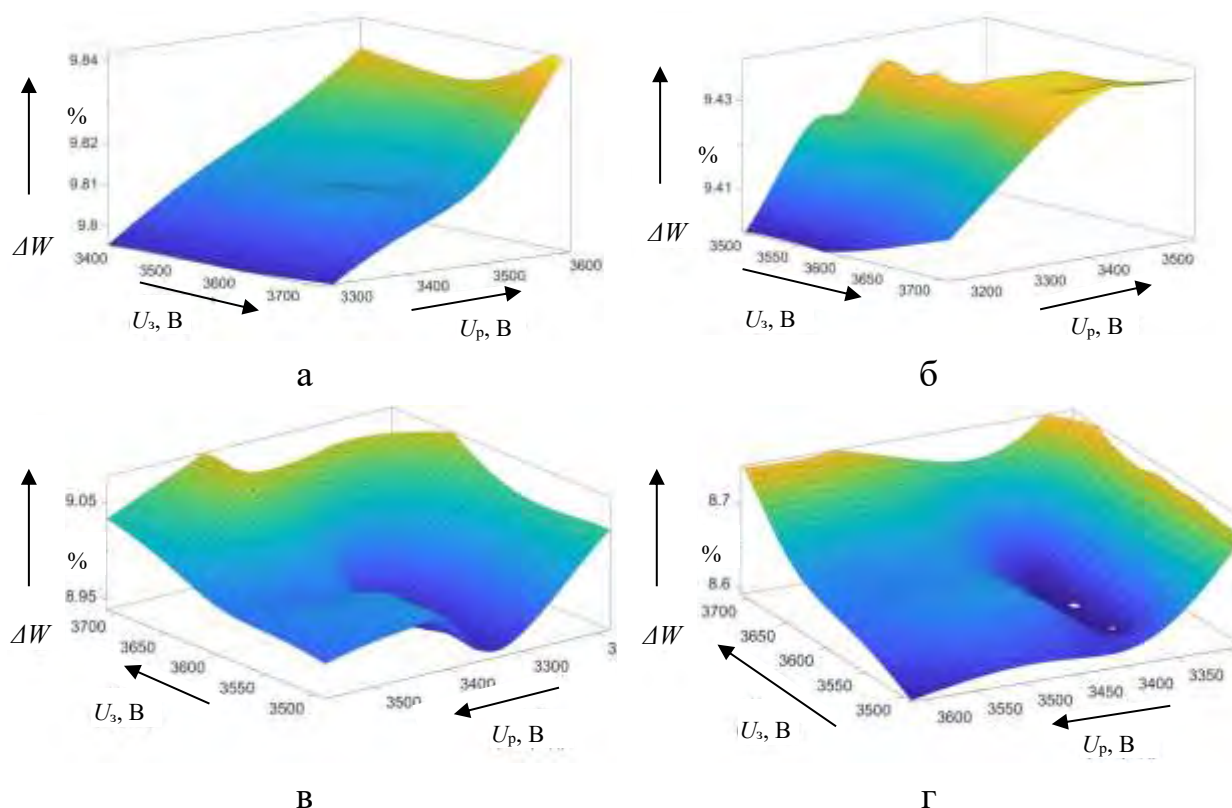


Рисунок 6.30 – График изменения потерь электроэнергии при возврате электроэнергии поездом, кВт·ч: до 20 (а); до 60 (б); до 120 (в); до 160 (г)

Графики степени заряженности накопительных модулей при наибольшем возврате электроэнергии (160 кВт·ч) и минимальном диапазоне уставок включения устройства на заряд и последующий разряд 3550 и 3450 В соответственно, представлены на рисунке 6.31, а, на рисунке 6.31, б – при увеличении диапазона пороговых напряжения заряда и разряда – 3700 и 3600 В соответственно. Диапазоны изменения напряжения на шинах ТП, показывающие эффективность работы СНЭЭ, приведены на рисунке 6.32.

Аналогичным образом СНЭЭ позволяют выравнивать график нагрузки, что иллюстрируется сужением диапазоном изменения тока нагрузки присоединений контактной сети ТП (рисунок 6.33).

При изменении пороговых напряжений режимов заряда и разряда потери электроэнергии в контактной сети изменяются нелинейно в диапазоне от 8,6 до 9,8 % от объема расхода электроэнергии по тяговым подстанциям.

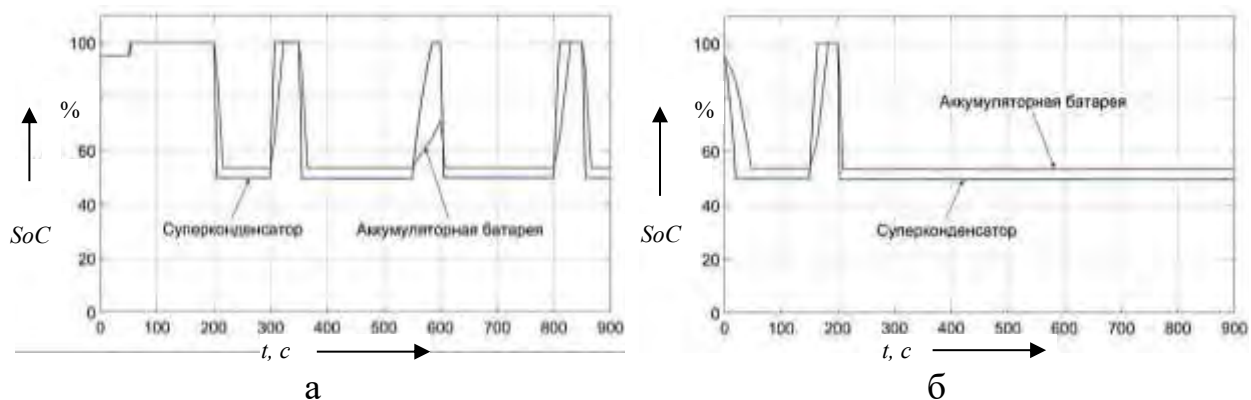


Рисунок 6.31 – График уровня заряженности гибридной системы накопления электроэнергии для диапазона уставок заряда и разряда: 3550 и 3450 В (а); 3700 и 3600 В (б)

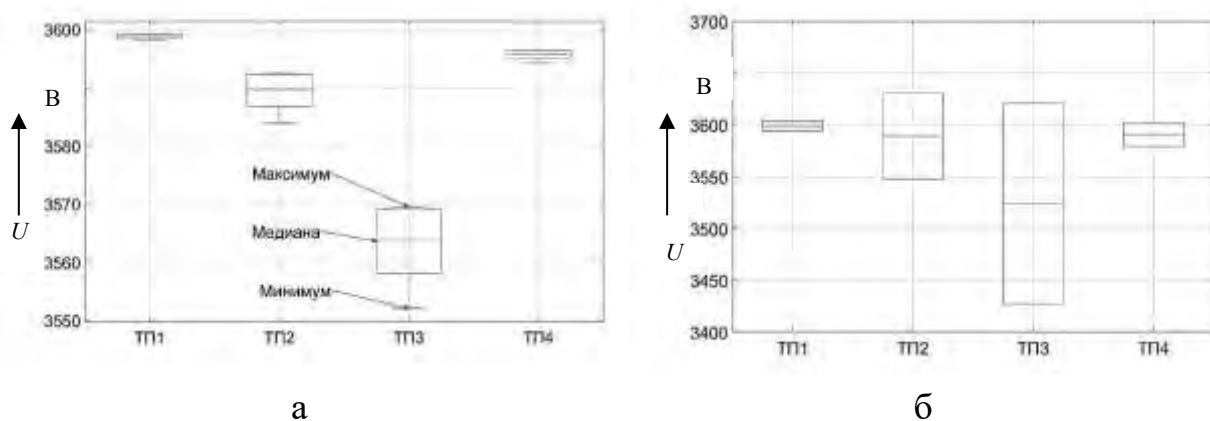


Рисунок 6.32 – Диапазон изменения уровня напряжения на шинах тяговых подстанций при применении системы накопления электроэнергии (а) и без нее (б)

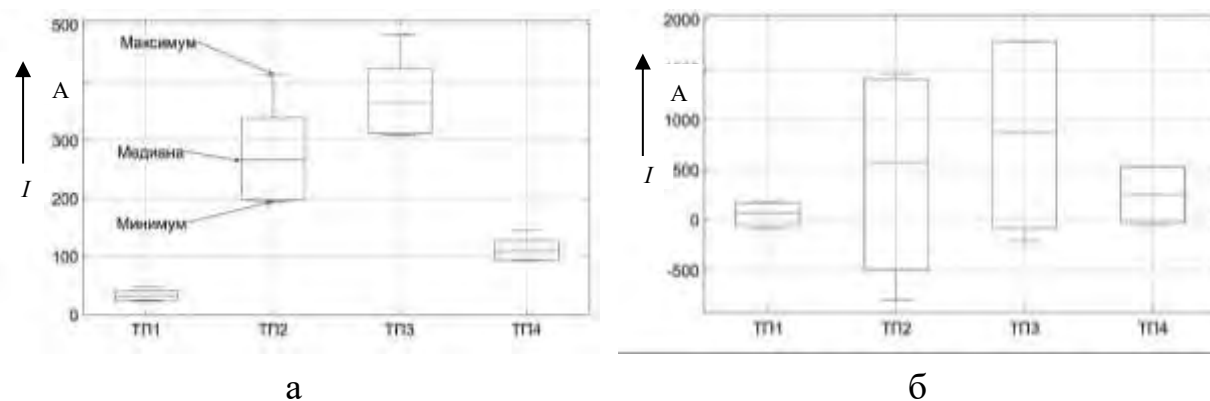


Рисунок 6.33 – Диапазон изменения величины протекающего тока по присоединениям контактной сети тяговых подстанций с установленной системой накопления энергии (а) и без нее (б)

Применение преобразователей энергии позволяет снизить величину напряжения на клеммах накопительных модулей, необходимую для обеспечения режимов заряда и разряда, управлять режимами заряда и разряда,

и, тем самым, эффективно использовать накопительные модули и регулировать степень заряженности и глубину разряда для обеспечения заданного ресурса работы.

### 6.5 Физическое моделирование работы системы накопления электроэнергии

Апробация топологии гибридной СНЭЭ и алгоритмов работы выполняется на физической модели, содержащей два модуля – АКБ на литий-ионных аккумуляторах и СК на суперконденсаторах и модель СТЭ.

Физическое моделирование позволяет оценить показатели работы накопительных модулей и СНЭЭ в целом в различных режимах. Моделирование работы СНЭЭ позволяет определить степень заряженности, глубину разряда и эффективность настройки режимов.

При построении физической модели за основу принята СТЭ, состоящая из ТП постоянного тока, тяговой сети однопутного участка (контактной (к. с.) и рельсовой сетей) и поста секционирования (ПС) с размещенной на нем СНЭЭ (рисунок 6.34).

В качестве электроподвижного состава используются две единицы – ЭПС1 и ЭПС2 с заданным графиком электротяговой нагрузки. Для целей моделирования принято, что ЭПС1 реализует только тяговый режим, а ЭПС2 – три режима (тяги, выбега и рекуперативного торможения).

Схема замещения моделируемой СТЭ приведена на рисунке 6.35. В схеме замещения ТП с преобразовательным агрегатом (ПА) представлена в виде источника постоянного напряжения с неуправляемыми вентилями, тяговая сеть (ТС) – в виде сопротивления  $R_{ТС}$ .

Расположение поста секционирования ПС с СНЭЭ и электроподвижного состава ЭПС1 и ЭПС2 соответствует приведенной схеме моделируемой СТЭ. Расположение ЭПС вблизи поста секционирования позволяет принять сопротивление тяговой сети от поста секционирования до моделей ЭПС равным нулю.

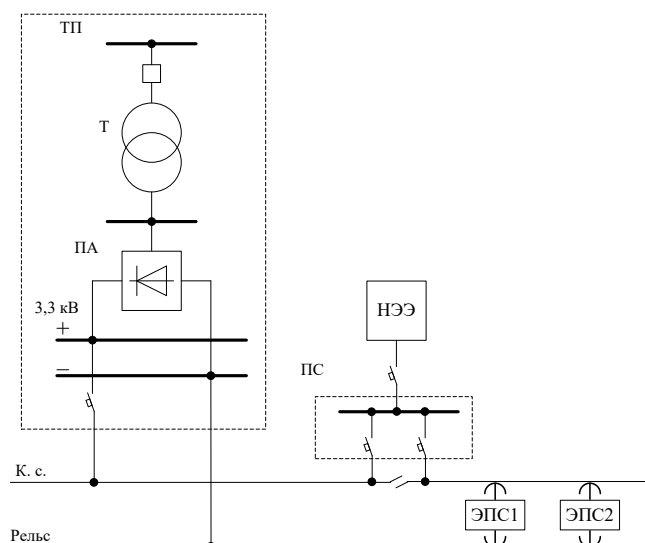


Рисунок 6.34 – Схема моделируемой системы тягового электроснабжения с электротяговой нагрузкой

Структурная схема физической модели, построенной в соответствии со схемой замещения приведена на рисунке 6.36. В качестве регулируемого источника постоянного напряжения 1 применяется блок питания Б-5-300S, неуправляемого вентиля 2 – диод VS-20TQ045.

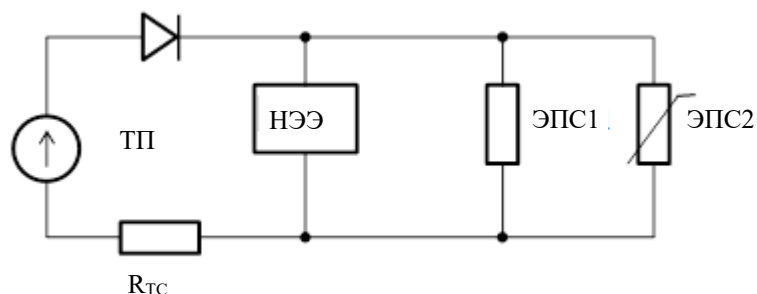


Рисунок 6.35 – Схема замещения, реализованная в физической модели

В схеме использованы резисторы 3  $R_{к.с}$  (0,2 Ом) и вспомогательные сопротивления 4 и 5 (0,1 Ом), обеспечивающие измерения тока и напряжения. Электроподвижной состав ЭПС1 представлен в виде активной нагрузки 6. Для регистрации электрических величин в схеме применяется цифровой самописец марки *S-Recorder E 7*, позволяющий выполнить измерение и регистрацию токов и напряжений моделируемой тяговой подстанции, ЭПС,

накопительных модулей системы и напряжений на шинах модулей и в контактной сети.

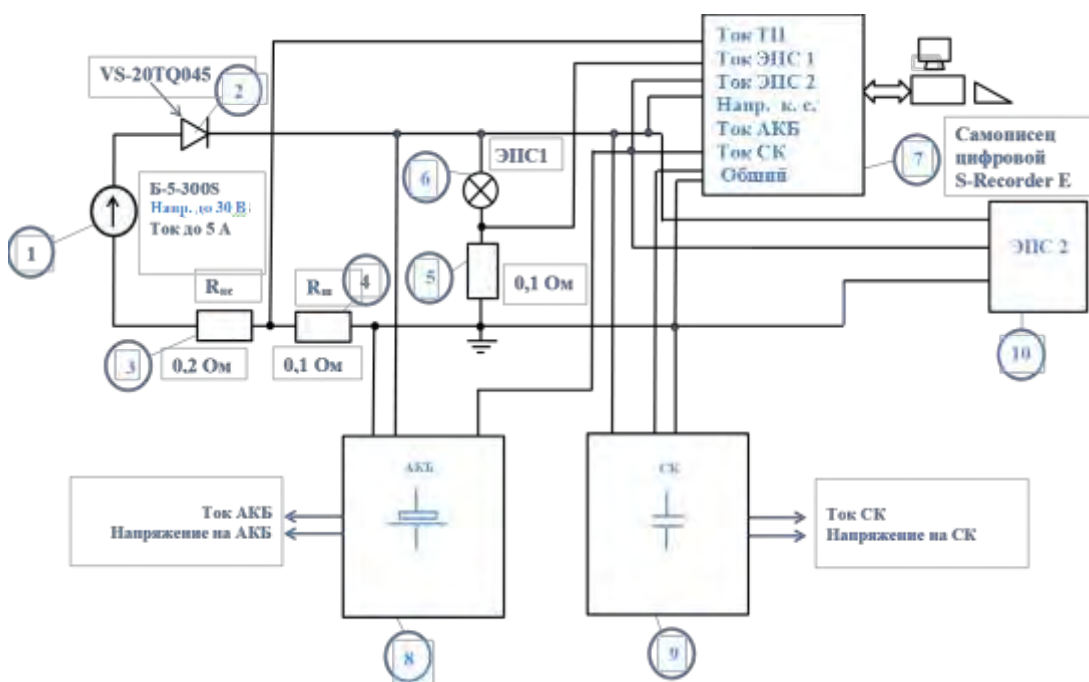


Рисунок 6.36 – Структурная схема физической модели

В схеме реализуется структура гибридной СНЭЭ, состоящая из модуля на базе *Li-ion* аккумуляторных батарей 8 и модуля 9 на базе суперконденсаторов. Электроподвижной состав ЭПС2, следующий попеременно в тяговом режиме, режиме выбега и рекуперативного торможения, представлен в виде блока 10, реализованного с помощью платы *Arduino Uno*.

Напряжение на блоке питания принято постоянным, а токи системы складываются из токов двух накопительных модулей – АКБ и СК. Напряжения и токи в модели определяются следующим образом:

$$\begin{cases} E_{\text{ТП}} = \text{const}; \\ I_{\text{НЭЭ}} = I_{\text{АКБ}} + I_{\text{СК}}; \\ I_{\text{ЭПС1}} = f(U_{\text{к.с.}}); \\ I_{\text{ЭПС2}} = f(t); \\ I_{\text{ТП}} = I_{\text{ЭПС1}} + I_{\text{ЭПС2}} - I_{\text{НЭЭ}}, \end{cases} \quad (6.7)$$

где:  $E_{\text{ТП}}$  – напряжение на шинах моделируемой подстанции ТП;

$I_{\text{НЭЭ}}, I_{\text{АКБ}}, I_{\text{СК}}$  – суммарный ток накопителя, ток модулей АКБ и СК соответственно;

$I_{\text{ЭПС1}}, I_{\text{ЭПС2}}$  – ток электроподвижного состава ЭПС1 и ЭПС2;

$U_{\text{к.с}}$  – напряжение в контактной сети;

$t$  – время моделирования.

Соответствующая структурной схеме физическая модель, состоящая из регулируемого блока питания 1, платы, включающей в себя диод 2 и резисторы 3 – 5, активное сопротивление 6, платы с батареей *Li-ion* аккумуляторов 8, платы с батареей суперконденсаторов 9 и платы регулируемой нагрузки 10, приведена на рисунке 6.37 (нумерация блоков соответствует нумерации, использованной на рисунке 6.36).

Уровень напряжения и тяговой нагрузки, принятый для моделирования работы гибридной СНЭЭ, получен на основе данных измерений напряжения и тяговой нагрузки с использованием коэффициента масштабирования  $m = 400$ . Электрические величины для элементов модели определены по формулам:

$$i_{\text{мод}} = \frac{i}{m}; \quad u_{\text{мод}} = \frac{u}{m}; \quad p_{\text{мод}} = i_{\text{мод}} \cdot u_{\text{мод}} = \frac{p}{m^2}, \quad (6.8)$$

где:  $i_{\text{мод}}, u_{\text{мод}}, p_{\text{мод}}$  – ток, напряжение и мощность источника питания и ЭПС физической модели соответственно;

$i, u, p$  – ток, напряжение и мощность, полученные по данным измерений электрических величин на тяговых подстанциях и ЭПС.

Основные электрические параметры моделируемой СТЭ и ЭПС для физической модели приведены в таблице 6.1.

Модель электроподвижного состава ЭПС2 использует график нагрузки, полученный по данным регистраторов параметра движения поезда для локомотива серии 2ЭС10, следующего в режиме тяги и рекуперативного торможения. Структурная схема модели ЭПС2 включает в себя управляющий контроллер марки *Arduino Uno 2*, позволяющий задавать произвольный график нагрузки и изменять режим работы путем подачи сигналов на плату

управления 3 (рисунок 6.38). Величина мощности, потребляемая в режиме тяги, изменяется с помощью управляемого резистора 5.

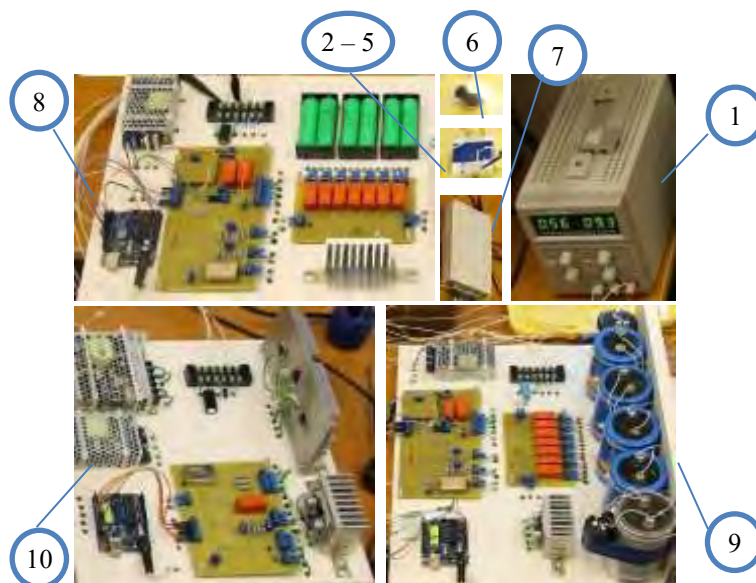


Рисунок 6.37 – Физическая модель системы тягового электроснабжения, электроподвижного состава и гибридного накопителя электроэнергии

Таблица 6.1 – Параметры физической модели

Параметр модели	Значение параметра
<i>Тяговая подстанция</i>	
Марка блока питания	Б-5-300S
Напряжение холостого хода (В)	8,75
Максимальный ток (А)	2,5
Выходное сопротивление (Ом)	0,3
<i>Технические характеристики АКБ</i>	
Марка аккумулятора	Li-ion 18650
Емкость (мА·ч)	2600 × 6 шт.
Номинальное напряжение (В)	3,8
<i>Технические характеристики СК</i>	
Марка суперконденсатора	К50-35
Номинальное напряжение (В)	10 (макс); заряд до 5,4
Емкость (Ф)	0,15 × 6 шт.
<i>Электроподвижной состав</i>	
Марка регулируемого источника тока	Arduino Uno
Ток (А)	2,5
Напряжение (В)	10
Мощность (Вт)	25

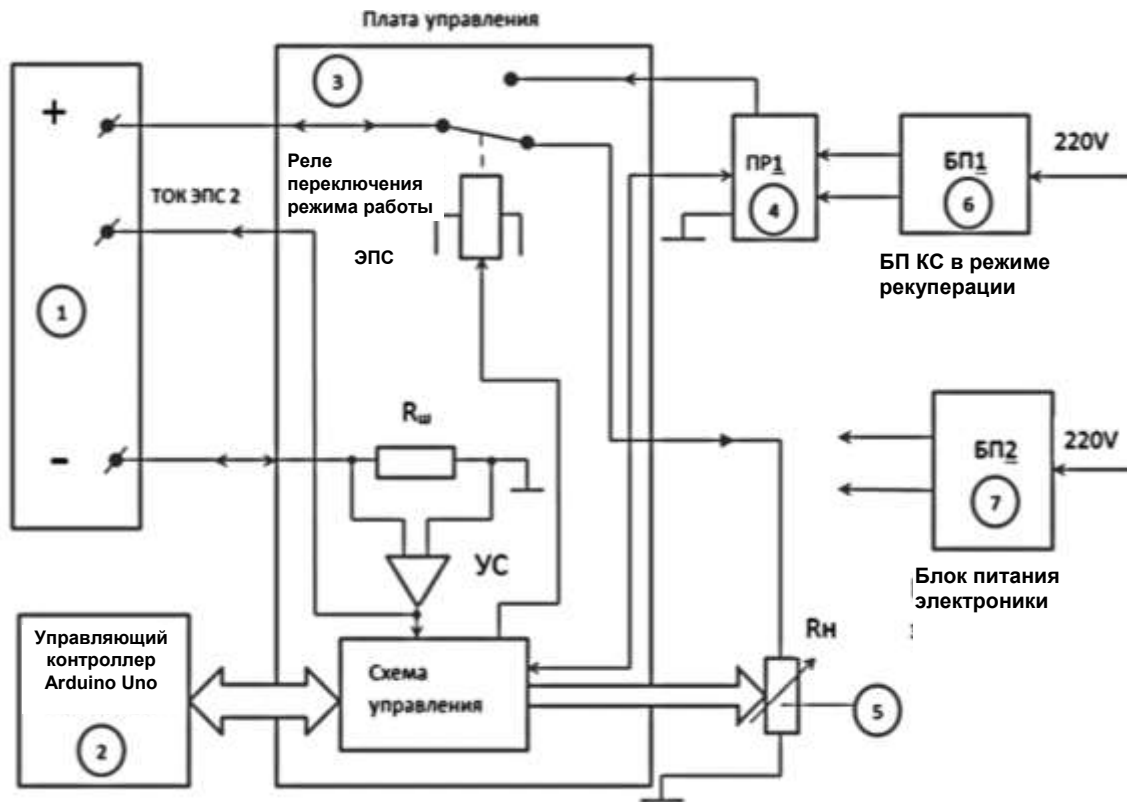


Рисунок 6.38 – Структурная схема модели электроподвижного состава

Моделирование процесса рекуперативного торможения в модели выполнено путем подключения дополнительного блока питания 6 через преобразователь напряжения 4 посредством электромагнитного реле в составе платы управления. Модель электровоза подключается к модели контактной сети через клеммную коробку схемы 1 (см. рисунок 6.38).

Питание электроники управления осуществляется от блока питания 7. Для усиления сигнала тока на плате управления используется усилитель сигнала (УС). Преобразователь напряжения ПР1 присоединен к блоку питания БП1 для управления уровнем напряжения в контактной сети в режиме рекуперации.  $R_n$  – сопротивление электроподвижного состава ЭПС2 в режиме тяги. Внешний вид физической модели электроподвижного состава ЭПС2 приведен на рисунке 6.39.

Графики тяговой нагрузки электроподвижного состава ЭПС2 и напряжения на его токоприемнике, используемые в модели и полученные путем обработки данных поездки локомотива серии 2ЭС10, приведены на рисунке 6.40. Продолжительность фрагмента представленного графика, пересчитанного с использованием принятого коэффициента масштабирования, составляет 10 мин и

включает в себя режимы тяги, выбега и рекуперативного торможения (область отрицательных значений).

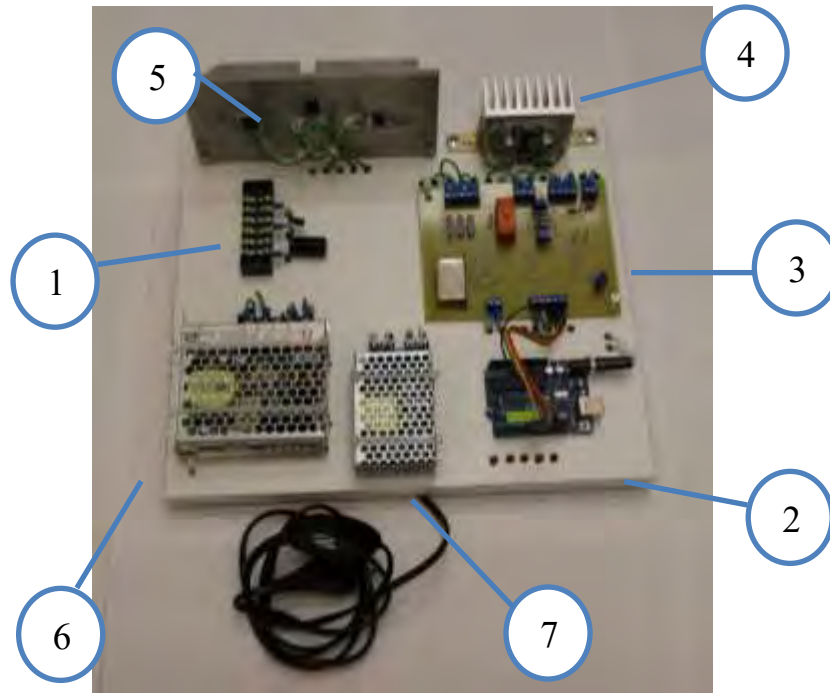


Рисунок 6.39 – Физическая модель электроподвижного состава

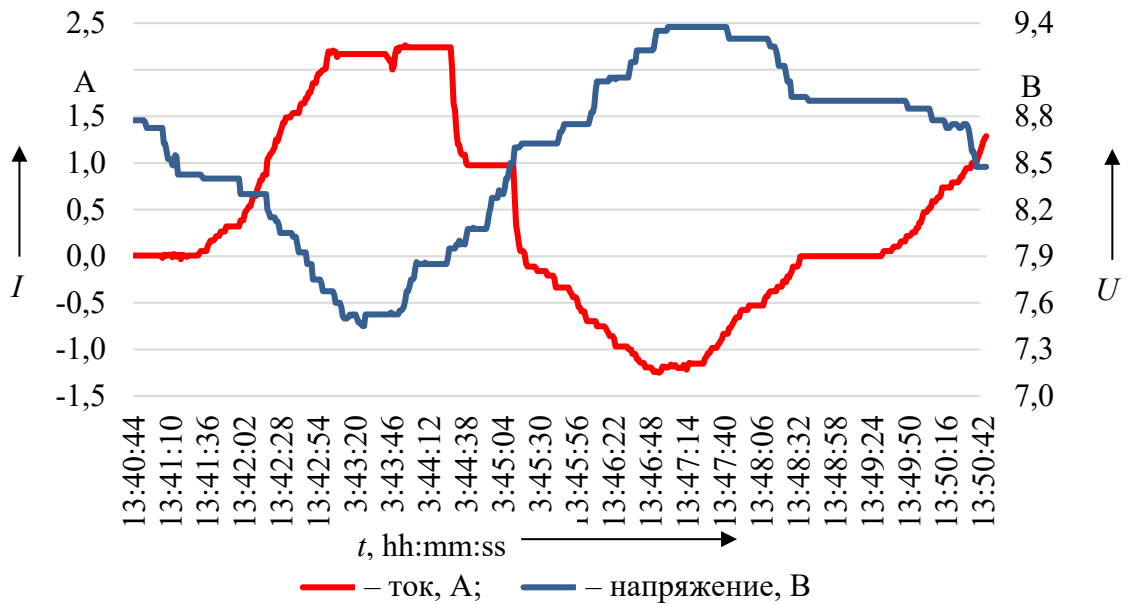


Рисунок 6.40 – График электротяговой нагрузки и напряжения на токоприемнике

Физические модели СНЭЭ на аккумуляторных батареях и суперконденсаторах имеют единую структуру, схема подключения которых

приведена на рисунке 6.41. Внешний вид физических моделей на литий-ионных аккумуляторах и суперконденсаторах приведен соответственно на рисунках 6.42 и 6.43.

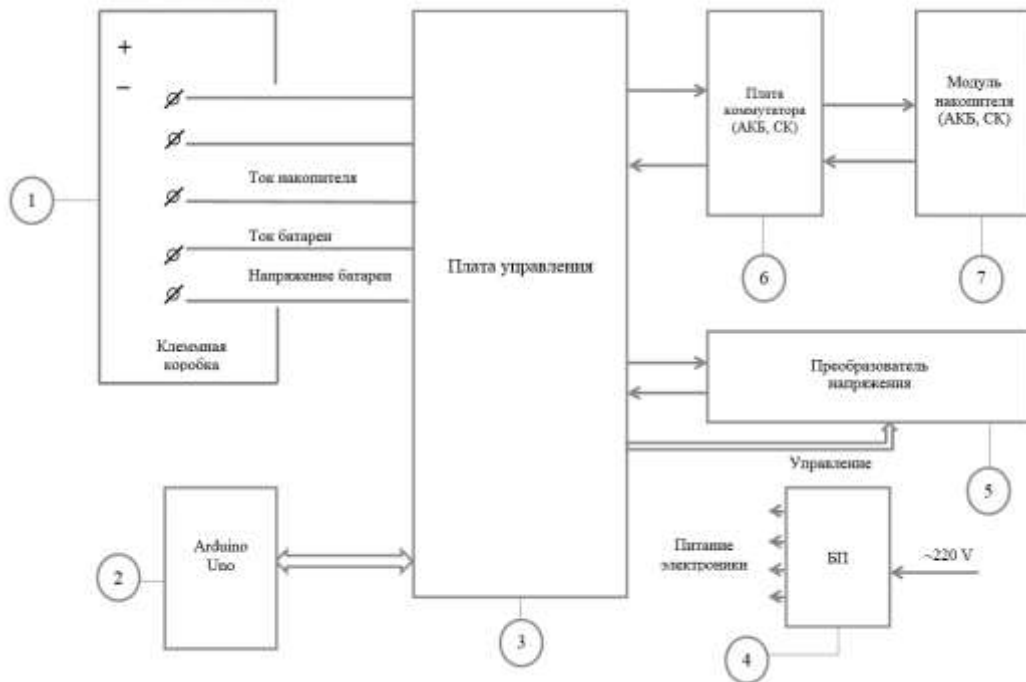


Рисунок 6.41 – Структурная схема модели гибридной системы накопления электроэнергии

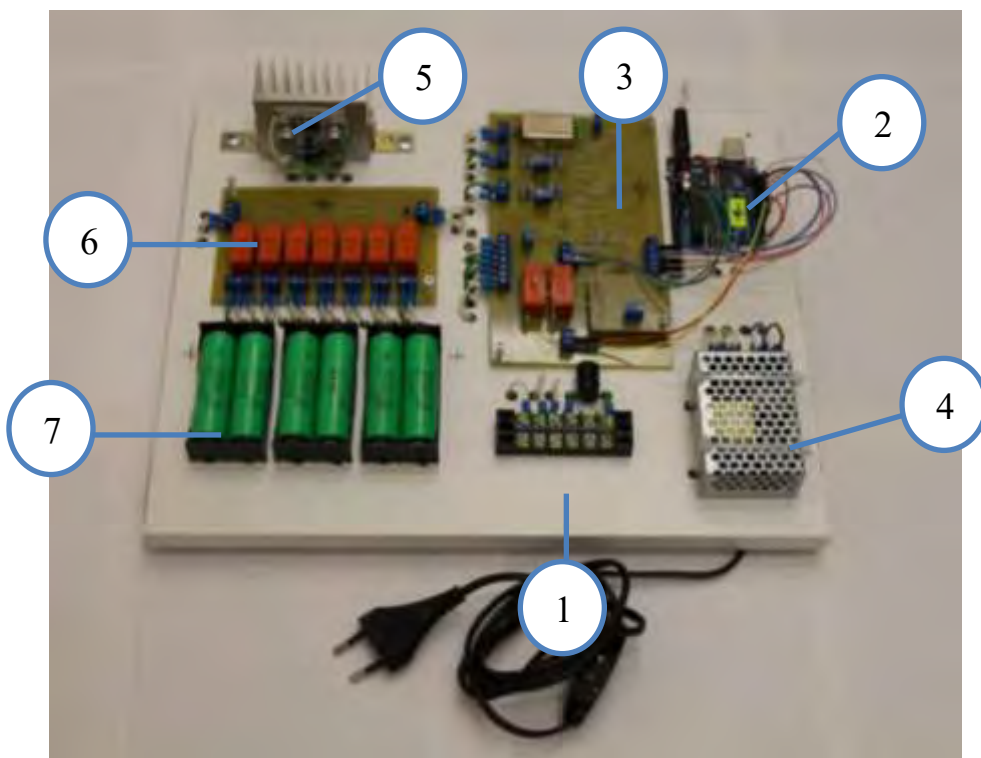


Рисунок 6.42 – Внешний вид физической модели накопителя электроэнергии на литий-ионных аккумуляторах

Схемы АКБ и СК содержат клеммную коробку 1, управляющий контроллер Arduino Uno 2, плату управления 3, блок питания электроники управления 4, преобразователь напряжения 5, платы коммутатора батареи 6, и АКБ 7.

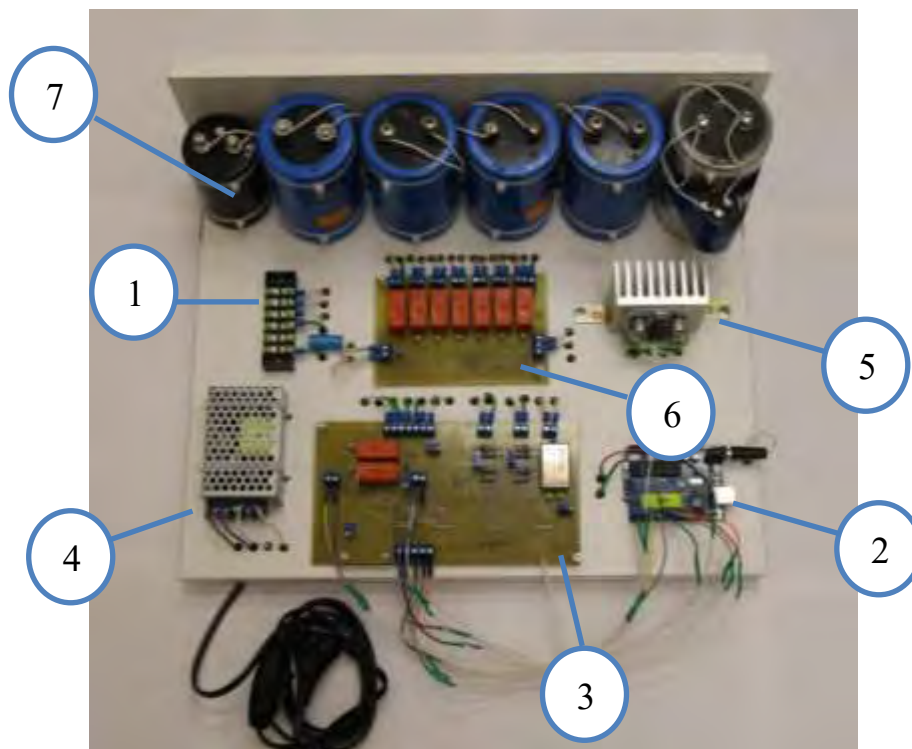


Рисунок 6.43 – Внешний вид физической модели накопителя электроэнергии на суперконденсаторах

Клеммная коробка обеспечивает подключение схемы к цепям физической модели СТЭ и к входам цифрового самописца. С помощью клеммной коробки моделируемое напряжение в контактной сети поступает на плату управления 3, которая взаимодействует со всеми остальными элементами схемы. Алгоритм работы схемы целиком определяется управляющей программой контроллера 2, который производит измерение значений токов и напряжений, формируя на их основе управляющие сигналы, поступающие на плату управления 3.

Обе названные модели используют шесть отдельных накопительных элементов – аккумуляторов и суперконденсаторов 7, которые включаются

параллельно в режиме заряда и последовательно в режиме разряда посредством платы коммутатора 6.

Необходимое значение напряжения на накопительных элементах в режиме их заряда и выходного напряжения схемы в режиме разряда формируется преобразователем напряжения 5, управляемым платой управления и смонтированным на теплоотводящем радиаторе для исключения его перегрева в процессе работы. Питание элементов схемы осуществляется от блока питания 4.

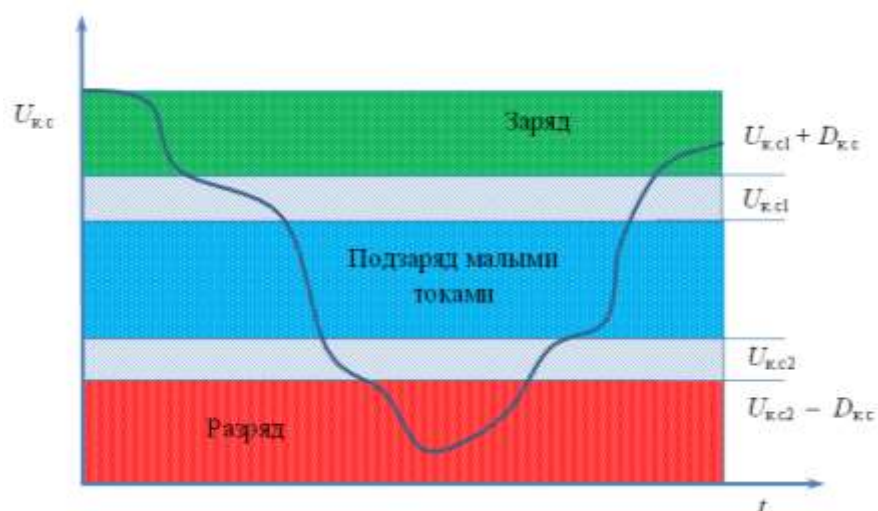


Рисунок 6.44 – Условия переключения режимов работы накопителя энергии

В процессе работы модели накопительных модулей могут находиться в следующих основных режимах работы, определяемых напряжением в контактной сети  $U_{к.с}$  [153]: заряд, разряд и ожидание (рисунок 6.44).

Для устойчивой работы схемы при смене режимов используются «зоны нечувствительности»  $U_{к.с1}$  и  $U_{к.с2}$ , реализующие переключение режимов по гистерезисной характеристике. В частности, при выполнении условия  $U_{к.с} > U_{к.с1} + D_{к.с}$  СНЭЭ переходит в режим заряда, переход в режим заряда малыми токами осуществляется при понижении напряжения до уровня  $U_{к.с1}$ . При несоблюдении условия  $U_{к.с} > U_{к.с1} + D_{к.с}$  производится проверка условия  $U_{к.с} < U_{к.с2} - D_{к.с}$ , при выполнении которого система переходит в режим разряда. Если условие  $U_{к.с} < U_{к.с2} - D_{к.с}$  не соблюдается, выполняется проверка условия

осуществления заряда СНЭЭ малыми токами  $U_{к.с2} \leq U_{к.с} \leq U_{к.с1}$ , при выполнении которого СНЭЭ переходит в режим заряда малыми токами.

Работа физической модели с целью сравнения показателей работы рассматривается для четырех вариантов работы СНЭЭ:

- 1) система отключена;
- 2) в работе находится модуль на аккумуляторных батареях, модуль на суперконденсаторах выключен;
- 3) в работе находится модуль на суперконденсаторах, модуль на аккумуляторных батареях отключен;
- 4) система работает с обоими модулями (АКБ и СК).

#### 6.5.1 Работа физической модели без системы накопления энергии

График нагрузки ЭПС для моделирования принимается по данным расшифровки регистратора параметров движения поезда с электровозом серии 2ЭС10 на одном из участков Свердловской железной дороги с учетом коэффициента масштабирования. Результаты измерений напряжения в контактной сети и токов тяговой подстанции физической модели с учетом масштабирования приведены на рисунке 6.45.

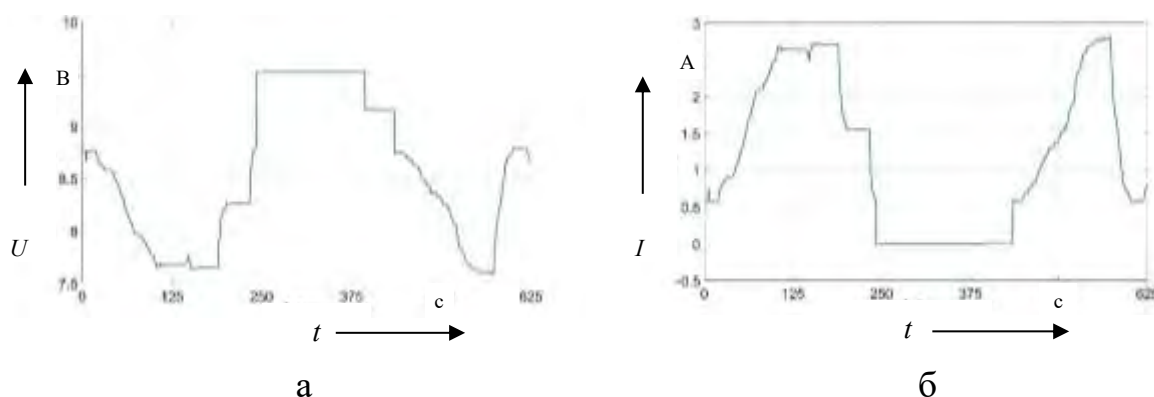


Рисунок 6.45 – График измерений напряжения (а) и тока (б) модели подстанции

Максимальное и минимальное напряжения составили 9,52 и 7,59 В соответственно (в контактной сети – 3808 и 3036 В соответственно).

Максимальный ток составляет 2,82 А (тяговой подстанции 1128 А), минимальный уровень – отсутствие тока.

В физической модели используется модель электроподвижного состава ЭПС2, реализующая три режима работы, и электроподвижного состава ЭПС1, реализующего тяговый режим. Результаты моделирования тока указанных единиц ЭПС1 и ЭПС2 представлены на рисунке 6.46. Максимальный ток в режиме рекуперативного торможения составляет 0,592 А (поезда – 236,8 А).

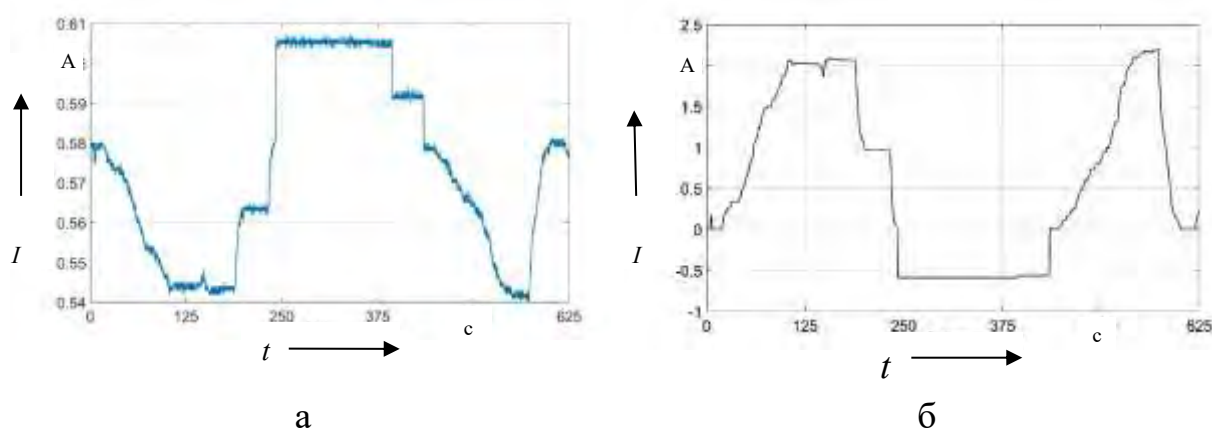


Рисунок 6.46 – График тока ЭПС1 (а) и ЭПС2 (б)

Полученные результаты моделирования процесса взаимодействия СТЭ и ЭПС с заданным профилем нагрузки используются для сравнения с результатами моделирования для вариантов различного исполнения СНЭЭ.

### 6.5.2 Работа физической модели с использованием модуля аккумуляторной батареи

Моделирование режимов работы СНЭЭ при заданной электротяговой нагрузке в условиях применения накопительного модуля на базе аккумуляторных элементов показывает характерные изменения напряжения и тока для режимов заряда и разряда (рисунок 6.47).

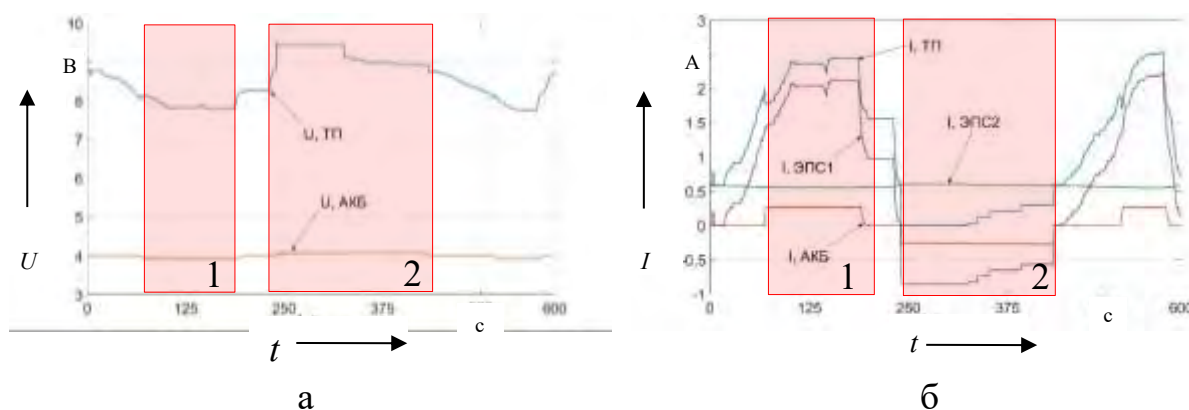


Рисунок 6.47 – График измерений напряжения (а) и тока (б)

Полученные результаты моделирования позволяют выделить два участка для режима разряда и заряда – зоны 1 и 2. В зоне 1 – разряд – наблюдается падение напряжения на аккумуляторной батарее с 3,99 до 3,93 В, или на 1,6 %. В зоне 2 – заряд – наблюдается повышение уровня напряжения на батарее с 3,99 В до максимального значения 4,08 В, или на 2,2 %. Построенный по результатам моделирования график степени заряженности аккумуляторной батареи приведен на рисунке 6.48.

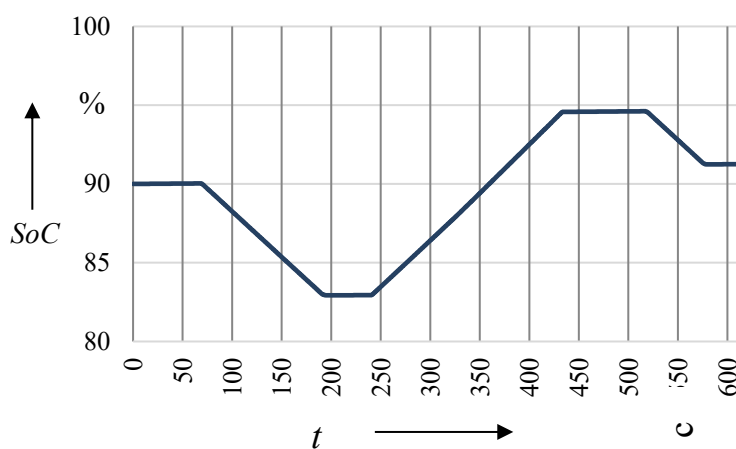


Рисунок 6.48 – График уровня заряженности аккумуляторной батареи

Продолжительность режимов разряда и заряда составляет 127 и 193 с соответственно. Объем энергии на разряд составляет 18,0 Вт·ч, на заряд – 44,8 Вт·ч, при этом уровень заряда АКБ не превышает 95 % при заряде и не снижается ниже 82 %.

### 6.5.3 Работа физической модели с модулем суперконденсатора

Моделирование режимов работы системы при заданной электротяговой нагрузке в условиях применения НЭЭ на базе суперконденсаторов показывает изменение продолжительности режимов заряда и разряда НЭЭ. При работе системы, состоящей из модуля суперконденсаторов, аналогичные изменения графика напряжения и тока в режимах заряда и разряда наблюдаются в зонах 1 и 2 на графиках (рисунок 6.49).

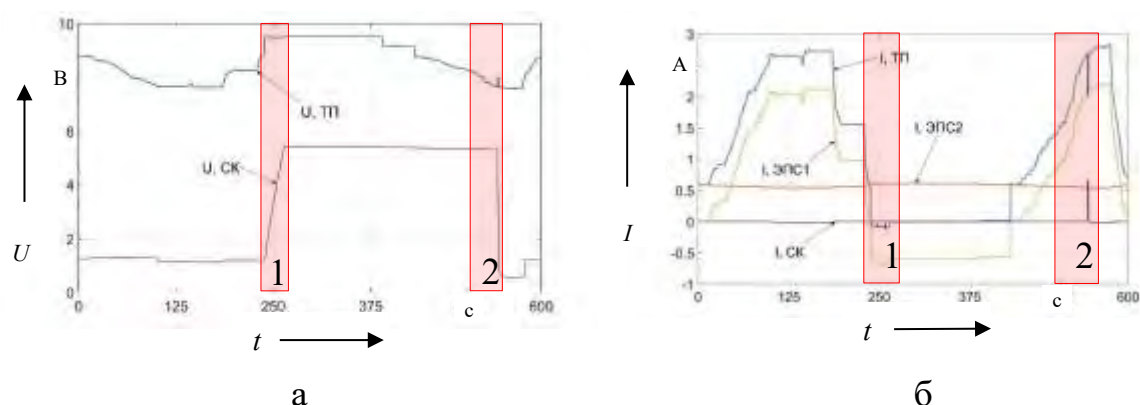


Рисунок 6.49 – График напряжения (а) и тока (б) подстанции и электроподвижного состава

Зона 1 соответствует режиму заряда системы, в котором напряжение на модулях суперконденсаторов возрастает с 1,20 до 5,41 В, или на 88 %, а величина зарядного тока изменяется в диапазоне от 0,12 до 0,01 А. Зона 2 соответствует режиму разряда системы, при котором напряжение на суперконденсаторе падает с 5,00 до 0,73 В, или на 86 %. Величина разрядного тока достигает значения 0,67 А. График степени заряженности суперконденсатора, построенный по результатам моделирования, представлен на рисунке 6.50.

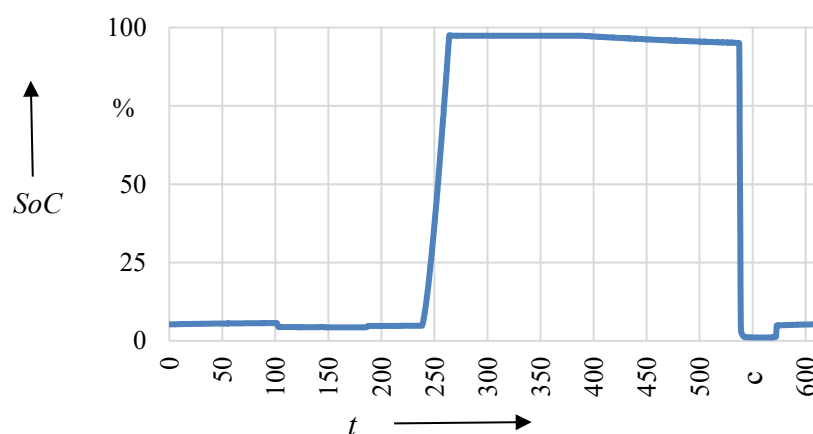


Рисунок 6.50 – График уровня заряженности аккумуляторной батареи

Продолжительность режимов разряда и заряда составляет 33 и 8 с соответственно. Объем энергии на разряд составляет 3,7 Вт·ч, на заряд – 0,85 Вт·ч, при этом уровень заряда СК не превышает 98,0 % при заряде и не понижается ниже 2,8 % при разряде.

#### 6.5.4 Работа физической модели с использованием гибридной системы накопления электроэнергии

При работе системы, состоящей из двух модулей – аккумуляторных батарей и суперконденсаторов, участки заряда и разряда для условий заданной электротяговой нагрузки наблюдаются в зонах 1 и 2, графики изменения напряжения и тока для которых приведены на рисунке 6.51.

Зона 1 соответствует режиму разряда системы, при этом величина напряжения на аккумуляторной батарее снижается с 3,99 до 3,92 В, или на 1,8 %, а на суперконденсаторе – с 5,43 до 0,60 В, или на 89 %. Ток в режиме разряда достигает максимальных значений для аккумуляторного накопителя и суперконденсатора 0,28 и 0,48 А соответственно. Зона 2 соответствует режиму заряда. Напряжение в данном режиме на аккумуляторной батарее возрастает с 3,92 до 4,08 В, или на 3,8 %, на суперконденсаторе – с 0,60 до 5,41 В, или на 89 %. Максимальный ток заряда для аккумуляторной батареи и суперконденсатора составляет 0,29 и 0,73 А.

Объемы энергии и продолжительность режима разряда аккумуляторной батареи составляют 18 Вт·ч и 127 с соответственно, в режиме заряда – 45 Вт·ч и 195 с. Объем энергии и время в режиме разряда суперконденсатора составляют 0,9 Вт·ч и 7 с, в режиме заряда – 3,9 Вт·ч и 50 с.

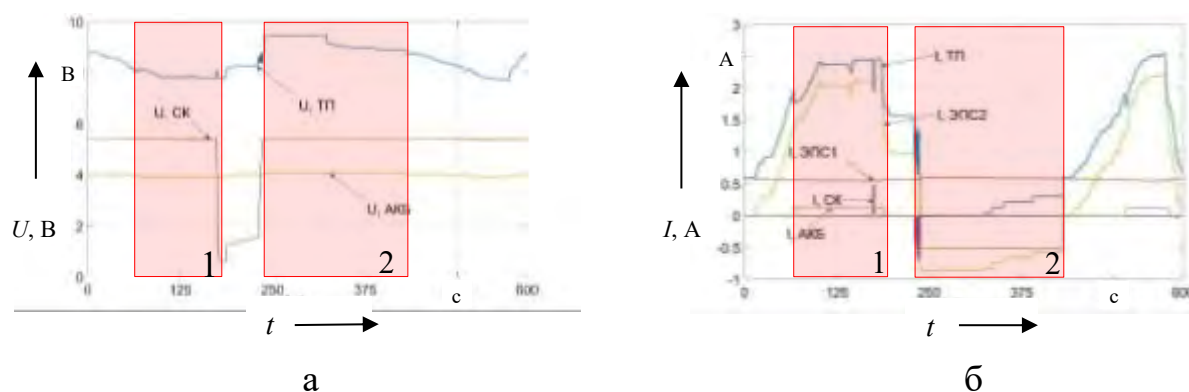


Рисунок 6.51 – График измерений напряжения (а) и тока (б)

Графики степени заряженности аккумуляторной батареи (а) и суперконденсатора (б) при работе СНЭЭ представлены на рисунке 6.52.

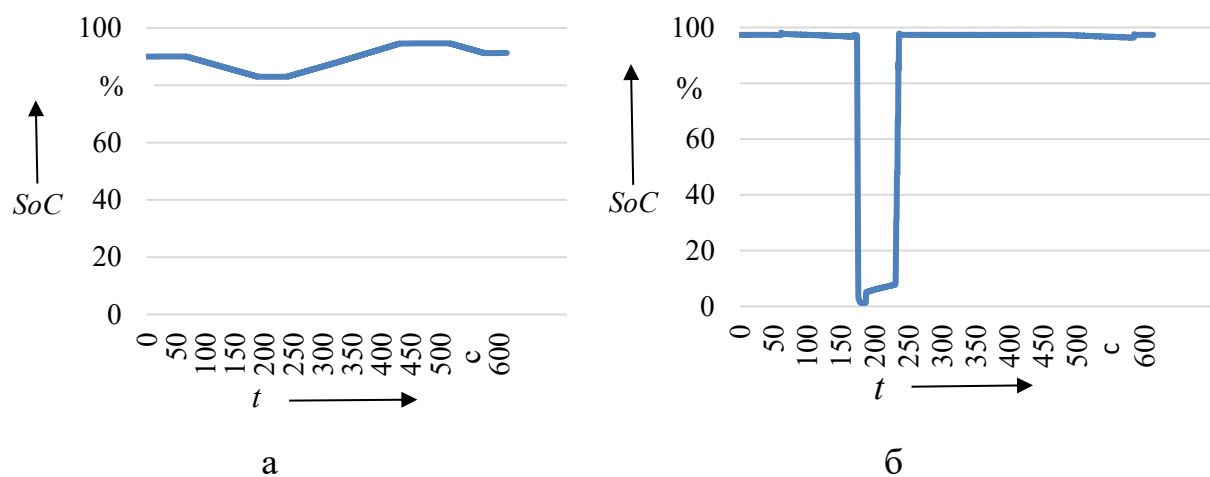


Рисунок 6.52 – График степени заряженности аккумуляторной батареи (а) и суперконденсатора (б)

Полученные результаты моделирования показывают, что объемы и продолжительность работы для аккумуляторной батареи и суперконденсатора отличаются – для аккумуляторов данные показатели на порядок превышают показатели для суперконденсатора. Полученные результаты моделирования

соответствуют параметрам модели: номинальная энергоёмкость литий-ионных аккумуляторов (6 шт.) составляет 60 Вт·ч, максимальная для суперконденсатора (с учетом схемы соединения) – 13 Вт·ч. Соотношение показателей обуславливает необходимость отыскания оптимального соотношения номинальной энергоёмкости аккумуляторной батареи и суперконденсатора гибридной СНЭЭ и алгоритма управления режимами их работы.

Сравнение полученных результатов для рассмотренных моделей показывает, что напряжение в контактной сети при применении модулей системы стабилизируется, что связано с условиями работы накопительных модулей по границам диапазона и подтверждается сужением диапазона с [7,5; 9,5] В до [7,7; 9,4] В, т. е. на 10 % (рисунок 6.53).

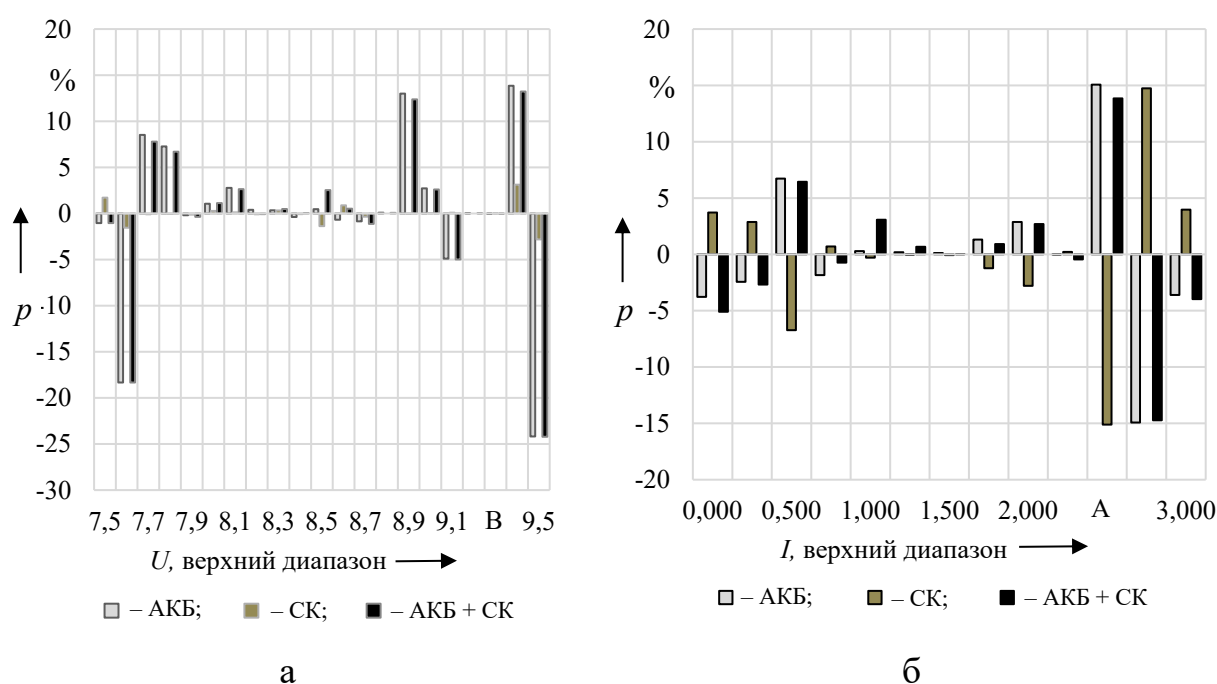


Рисунок 6.53 – Частотные гистограммы изменения напряжения (а) и тока (б) модели системы

Для моделей СНЭЭ с использованием аккумуляторной батареи и гибридного варианта наблюдается изменение частотной диаграммы для тока тяговой подстанции и напряжения в контактной сети в части уменьшения минимальных и максимальных значений, что приводит к выравниванию графика нагрузки. При применении суперконденсаторов ток подстанции

существенно не изменяется в связи с их малой емкостью в рассматриваемой модели. В физической модели соотношение номинальных емкостей модулей аккумуляторной батареи и суперконденсаторов составляет 1/5 (номинальная энергоемкость *Li-ion* батареи – 60 В·А, суперконденсаторов – 13 В·А). Предлагаемая физическая модель позволяет оценить соотношение энергоемкости модулей, получить результаты при их изменении указанного соотношения по условиям выравнивания графика нагрузки подстанции и стабилизации напряжения в контактной сети.

#### 6.6 Сравнительный анализ результатов моделирования работы гибридной системы накопления в тяговом электроснабжении

Рассмотренные физические модели в вариантах 1 – 4 созданы для СТЭ, содержащей одну ТП, две единицы электроподвижного состава ЭПС1 и ЭПС2, заданных в виде статической и переменной нагрузки, контактную и рельсовую сети в виде резистора с эквивалентным сопротивлением. Данная модель позволяет моделировать процессы заряда и разряда СНЭЭ при изменении электротяговой нагрузки заданной конфигурации. Переход к СТЭ, содержащей несколько ТП и линейных пунктов с СНЭЭ, приводит к существенному усложнению физической модели, росту ее стоимости, но не позволяет получить качественно иные результаты моделирования работы СНЭЭ.

Имитационная модель лишена указанных недостатков, поскольку не имеет существенных ограничений по реализации состава оборудования СТЭ и количеству единиц ЭПС. В имитационной модели электротяговая нагрузка является динамической нагрузкой с изменяющейся ординатой на межподстанционной зоне участка. Исполнение гибридной системы, рассмотренное при физическом моделировании в вариантах 1 – 4, принято для имитационной модели.

Представляется целесообразным обработку алгоритмов управления режимами работы СНЭЭ выполнять на физической модели, а оценку влияния работы СНЭЭ по указанным алгоритмам управления на энергетические показатели СТЭ – на имитационной модели.

Результаты моделирования позволяют сопоставить характер изменения основных показателей работы СТЭ для различных вариантов исполнения СНЭЭ. При моделировании характер изменения тяговой нагрузки был принят одинаковым для обеих моделей (для физической модели – с учетом масштабирования). Характер изменения напряжения на шинах ТП физической модели соответствует графику изменения напряжения на шинах тяговой подстанции ТП2, к которой приближен ЭПС. На рисунке 6.54 представлены графики напряжений на шинах ТП, полученные по результатам имитационного (а) и физического (б) моделирования с учетом масштабирования тяговой нагрузки. При сравнении качественных графиков напряжения характер изменений идентичен, различия в количественной оценке обусловлены связаны со схемой питания – четыре подстанции содержатся в имитационной модели и одна – в физической.

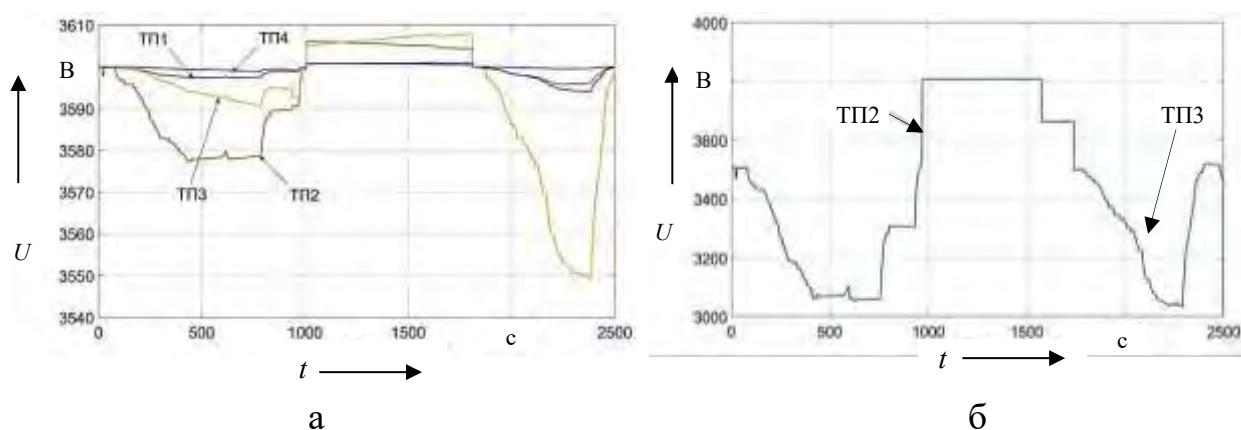


Рисунок 6.54 – Графики напряжений на шинах тяговых подстанций при имитационном (а) и физическом (б) моделировании

Графики тока ЭПС, полученные при моделировании (рисунок 6.55) имеют аналогичный характер в режимах тяги и рекуперативного торможения.

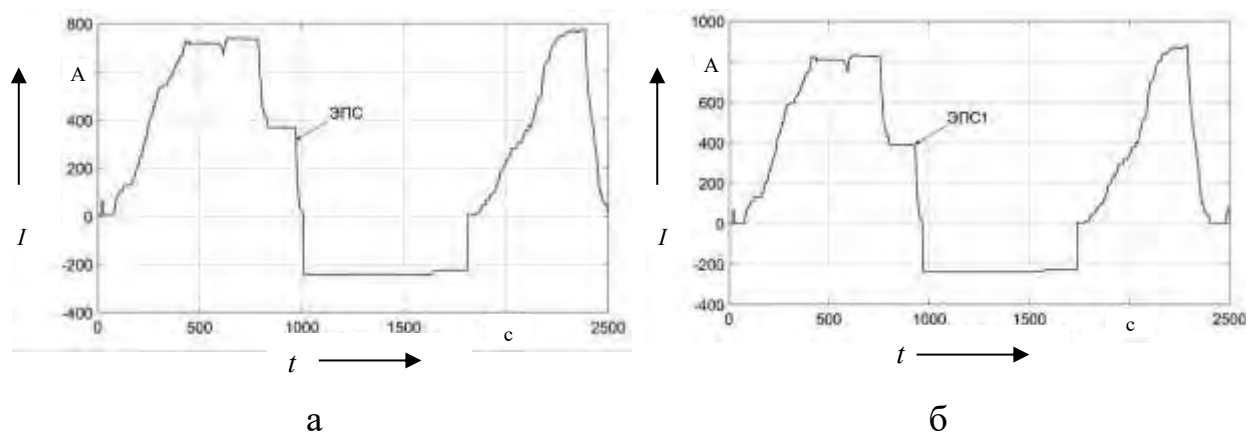


Рисунок 6.55 – Графики тока электроподвижного состава при имитационном (а) и физическом (б) моделировании

На рисунке 6.56 представлены графики напряжения и тока на накопительных элементах (АКБ и СК), построенные по результатам физического (а, б) и имитационного (в, г) моделирования.

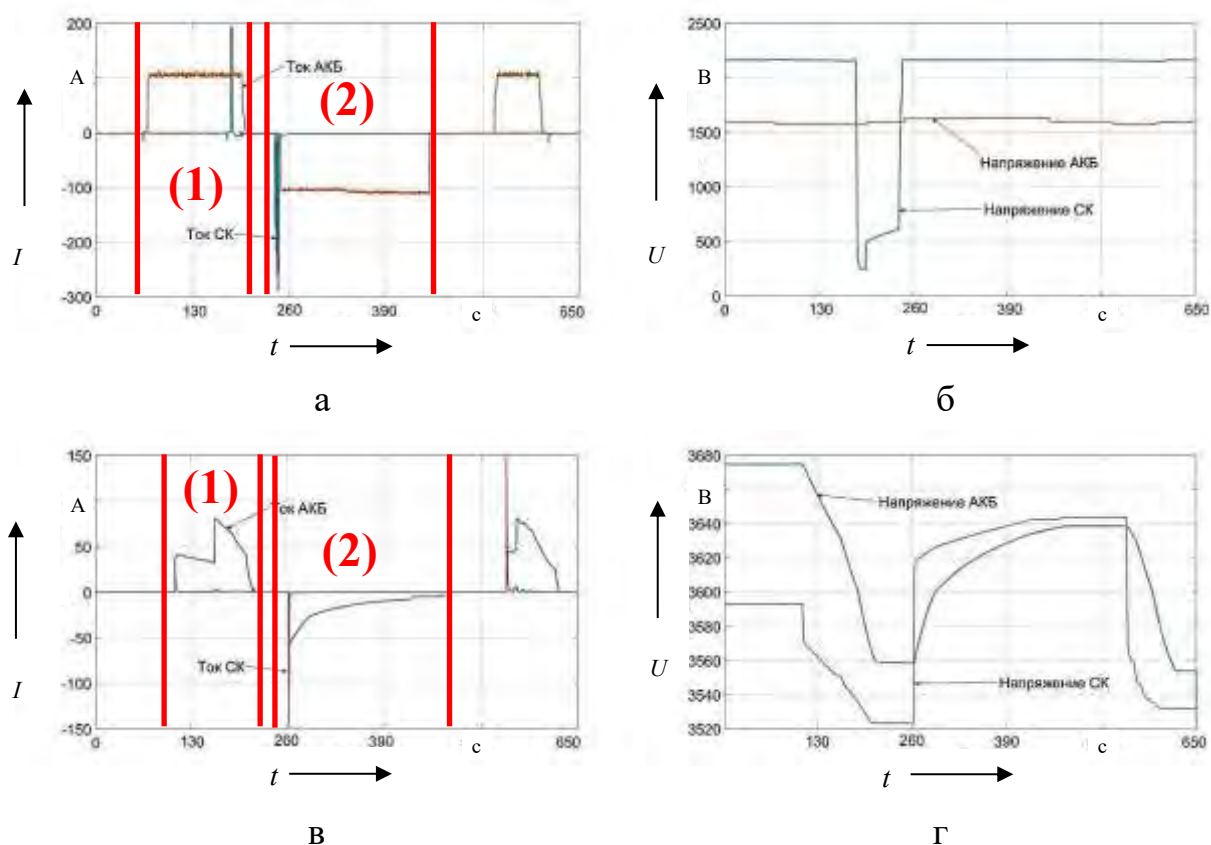


Рисунок 6.56 – Графики тока и напряжения на накопительных модулях при физическом (а, б) и имитационном (в, г) моделировании

На графиках приведены процессы «разряда – заряда» накопительных элементов. Различия в характере изменения токов и напряжений обусловлены особенностями реализации схем управления в моделях.

Особенностью построения гибридной системы в физической модели является использование преобразователя, позволяющего повысить напряжение в контактной сети относительно уровня напряжения на модулях СК и АКБ. В связи с этим напряжение на модулях ниже, чем напряжение в контактной сети.

Полученные результаты имитационного и физического моделирования для различных расчетных режимов позволяют сделать вывод о том, что разработанные модели, отличающиеся схемами управления, позволяют исследовать процессы «заряда – разряда» при тяговой нагрузке, учитывающей режимы работы ЭПС.

В этом случае для определения степени заряженности и глубины разряда целесообразно использовать физическую модель, учитывающую особенности зарядных и разрядных характеристик конкретных образцов, а для исследования процессов – имитационную модель с идеализированными характеристиками. Полученные результаты с учетом принятого масштабирования согласуются с данными измерений на ЭПС. Уровень потерь энергии в имитационной модели соответствует наблюдаемым эксплуатационным значениям, баланс энергии и мощности соблюдается. Полученные результаты позволяют оценить необходимые энергоемкость и мощность, продолжительность работы в режимах заряда и разряда, степень заряженности и ресурс работы НЭЭ.

На основе предложенных моделей разработаны следующие технические решения: пост секционирования постоянного тока с гибридной СНЭЭ [214]; гибридная СНЭЭ для СТЭ постоянного тока энергии [215, 216]; пост секционирования переменного тока с гибридной СНЭЭ [217]; устройство для автоматического регулирования напряжения в СТЭ [218].

Технические решения для гибридного накопителя электроэнергии на для СТЭ постоянного и переменного тока приведены на рисунке 6.57 а, б

соответственно. Пост секционирования контактной сети постоянного тока приведен на рисунке 6.55 а.

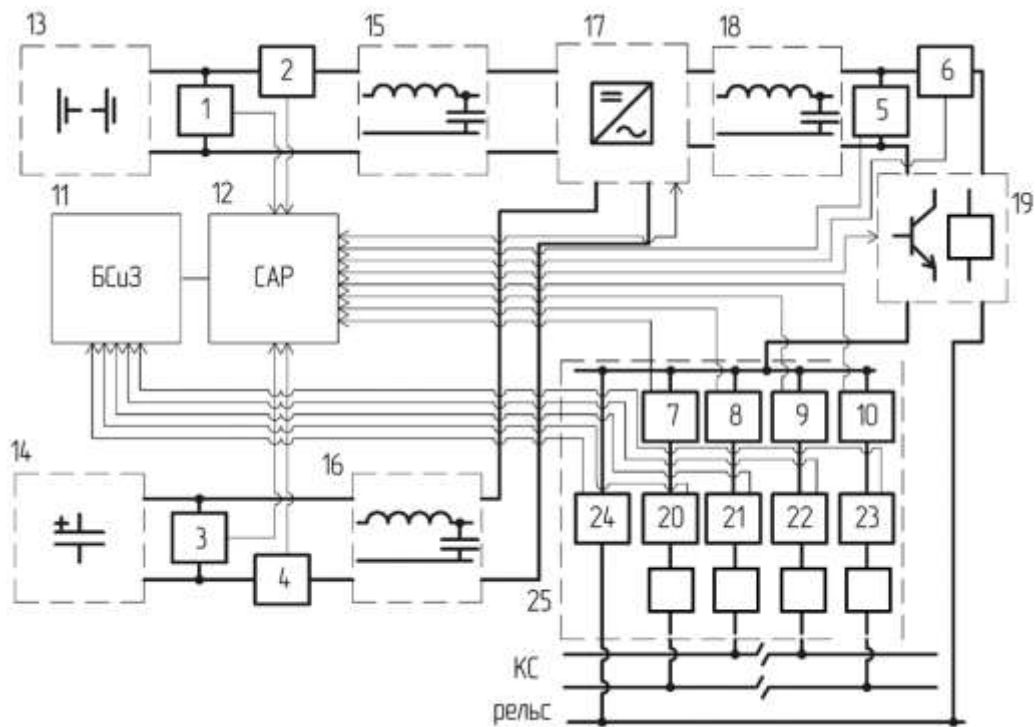
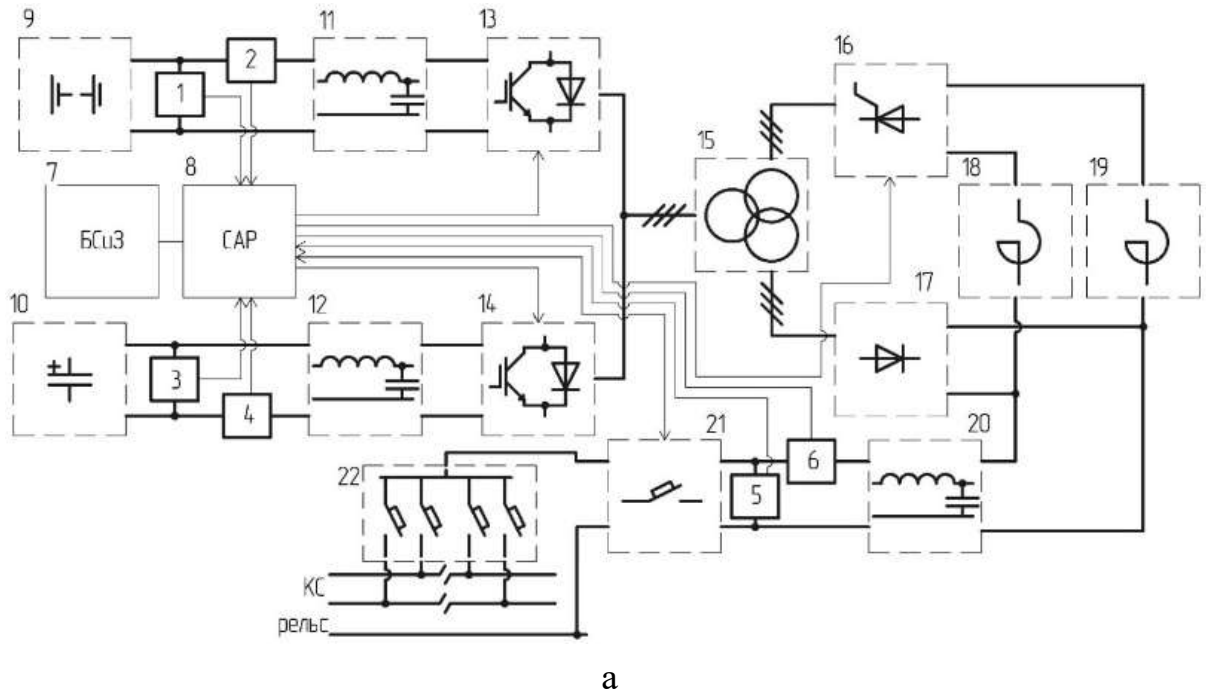


Рисунок 6.57 – Гибридный накопитель для системы тягового электроснабжения постоянного (а) и переменного (б) тока

Гибридная СНЭЭ подключается с помощью блока коммутации 21 и содержит фильтрующее устройство 20 и инвертор 16. Система

автоматического регулирования (САР) 8 предназначена для управления режимами работы в зависимости от уровня напряжения, измеряемого датчиком 5, и условий работы, определяемых блоком сигнализации и защиты (БСиЗ) 7. Напряжения с помощью преобразовательного трансформатора 15 понижается до уровня низшего напряжения. САР 8 на основе данных измерений уровня напряжения (датчик 5) и тока системы (датчик 6), датчиков напряжения 1 и 3, датчиков тока 2 и 4, определяет степень заряженности и глубину разряда НЭЭ, необходимость заряда НЭЭ первого 9 и второго 10 вида, подавая управляющие импульсы на выбранный управляемый двунаправленный преобразователь 13 или 14 соответственно. Выпрямленное напряжение через низковольтные фильтрующие устройства 11 и 12 поступает на накопители электроэнергии. В режиме разряда электроэнергия, поступающая от накопителей 9 или 10, в зависимости от режима разряда, выбранного САР 8, на основе анализа степени заряженности и глубины разряда на основе измерений от датчиков напряжения 1, 3 и датчиков тока 2, 4, и уровня нагрузки при помощи датчика напряжения 5, поступает через низковольтные фильтрующие устройства 11 или 12 на двунаправленный преобразователь 13 или 14 соответственно. Ключевой режим работы полупроводниковых приборов низковольтных преобразователей 13 или 14 формирует последовательность импульсов, скважность которых изменяется по закону, определяемому моделирующим сигналом, что позволяет сформировать переменное напряжение на вторичной обмотке трансформатора 15, которое повышается до заданного значения. Переменное напряжение на первичной обмотке трансформатора 15 выпрямляется с помощью неуправляемого преобразователя 17 и поступает через высоковольтное фильтрующее устройство 20 и блок коммутации 21 к шинам подстанции или линейного устройства (пост секционирования) и, далее, к электротяговой нагрузке.

Управление мощностью и регулирование характеристики в режиме заряда и разряда, на основе анализа данных измерений САР токов и

напряжений, протекающих в цепях преобразователя, реализуется при помощи выбора режима работы низковольтных преобразователей 13 или 14 с НЭЭ первого и второго рода. Фильтрующие устройства 11, 12 и 20 позволяют снизить переменную составляющую в токах заряда и разряда, протекающих в цепях преобразователя. Реакторы 18 и 19 служат для ограничения циркуляционного тока в цепи выпрямитель-инвертор, уменьшения скорости нарастания тока опрокидывания инвертора для устойчивой работы защит.

Пост секционирования переменного тока контактной сети с гибридной СНЭЭ приведен на рисунке 6.57, б. Устройство содержит датчики напряжения 1, 3 и 5, датчиков тока 2, 4 и 6, датчики высших гармонических составляющих 7 – 10, БСиЗ 11, САР 12, накопитель электрохимического типа 13 и суперконденсатор 14, низковольтные фильтрующие устройства 15 и 16, преобразователь постоянно-переменного напряжения 17, высоковольтное фильтрующее устройство 18, блок коммутации 19, подключаемого к посту секционирования.

На посту секционирования установлены трансформаторы тока 20 – 23 и трансформатор напряжения 24. Реализация работы предлагаемого устройства осуществляется с помощью блока САР 12, управляющего режимами работы поста секционирования и позволяющего реализовывать различные характеристики в режиме заряда и разряда в зависимости от тяговой нагрузки по данным измерений коэффициента содержания высших гармонических составляющих, напряжения на шинах поста секционирования, степени заряженности накопителей и глубины их разряда.

Технический результат предложенных решений заключается в стабилизации напряжения в контактной сети постоянного и переменного тока и направлен на повышение пропускной и провозной способности и энергетической эффективности электрифицированного участка железной дороги.

## 6.7 Выводы по шестой главе

Предложена имитационная модель гибридной СНЭЭ в СТЭ, позволяющая определить энергетические показатели, энергоёмкость и мощность при реализации пассивной и активной топологии.

Разработана и реализована физическая модель гибридной СНЭЭ для моделирования режимов работы устройства с электротяговой нагрузкой. На основе физической модели проведена апробация имитационной модели гибридной СНЭЭ при работе на посту секционирования СТЭ.

Выполнена апробация физической модели гибридной системы на основе данных электротяговой нагрузки локомотива. Полученные результаты по оценке энергетических показателей суперконденсатора и литий-ионного аккумулятора для различных режимов работы аналогичны результатам имитационного моделирования.

Предложены технические решения по построению гибридных СНЭЭ в СТЭ постоянного и переменного тока.

Показано, что применение преобразователей энергии позволяет снизить уровень напряжения на клеммах накопительных модулей, необходимый для реализации режимов заряда и разряда, управлять режимами работы. Управление гибридной системой с активной топологией в отличие от пассивной позволяет реализовать регулирование степени заряженности и глубины разряда накопительных модулей, уровня минимального и максимального напряжения, снижение уровня потерь электроэнергии в тяговой сети при этом составляет около 0,5 % и сохранение ресурса работы аккумуляторной батареи.

## 7 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ СИСТЕМ НАКОПЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ДЛЯ СИСТЕМ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

В настоящей главе представлены разработанные модели прогнозирования пропускной и провозной способности при изменении условий работы тягового электроснабжения с учетом систем накопления электроэнергии. Приведены результаты, позволяющие оценить влияние параметров систем накопления электроэнергии на показатели нагрузочной способности системы тягового электроснабжения для различных условий формирования электротяговой нагрузки. Показаны области эффективного применения систем накопления электроэнергии в качестве стационарных (в системе тягового электроснабжения) и бортовых (на электроподвижном составе) устройств. Разработана методика оценки влияния систем накопления электроэнергии на пропускную и провозную способность участка железной дороги.

### 7.1 Разработка модели прогнозирования пропускной и провозной способности при применении систем накопления электроэнергии

Провозная способность участка железной дороги определяется размерами и параметрами движения [212, 213] по формуле, млн т нетто/год:

$$\Gamma = 365 \cdot n_{\text{рез. гр}} \cdot \varphi \cdot Q_{\text{бр}} \cdot 10^{-6}, \quad (7.1)$$

где:  $n_{\text{рез. гр}}$  – результирующие размеры в грузовом движении по расчетному участку, поездов/сутки. При рассмотрении мероприятий по усилению в хозяйстве электроснабжения принимаются заданные условия пропуска поездов на участке;

$Q_{\text{бр}}$  – средневзвешенная масса брутто грузовых поездов, проследующих по участку в грузовом направлении, т;

$\varphi$  – отношение массы состава нетто к массе состава брутто с учетом порожнего количества вагонов, следующих в грузовом направлении, о.е.

Пропускная способность в грузовом движении по устройствам тягового электроснабжения определяется для межподстанционных зон по показателям нагрузочной способности СТЭ:

$$n_{\text{гр}} = \frac{(1440 - T_{\text{тех}}) \cdot \alpha_{\text{н}} - J_{\text{зад}} \cdot (n_{\text{пс}} \varepsilon_{\text{пс}} + n_{\text{пр}} \varepsilon_{\text{пр}})}{J_{\text{д min}}}, \quad (7.2)$$

где:  $T_{\text{тех}}$  – время, необходимое для обслуживания технических устройств, мин;

$\alpha_{\text{н}}$  – коэффициент надежности технических устройств СТЭ.

Для однопутных электрифицированных железнодорожных линий принимается равным 0,93, для двухпутных электрифицированных железнодорожных линий – 0,96, для однопутных железнодорожных линий, имеющих отдельные двухпутные перегоны или вставки для безостановочного проследования встречных поездов электрифицированных железнодорожных линий, – 0,95;

$J_{\text{зад}}$  – заданный межпоездной интервал в пассажирском движении, мин;

$J_{\text{д min}}$  – минимальный допустимый межпоездной интервал по рассматриваемому показателю нагрузочной способности устройств межподстанционной зоны, мин;

$n_{\text{пс}}$  – число поездов в пассажирском движении, шт.;

$n_{\text{пр}}$  – число поездов в пригородном движении, шт.;

$\varepsilon_{\text{пс}}$  – коэффициент съема пассажирских поездов, о.е.;

$\varepsilon_{\text{пр}}$  – коэффициент съема пригородных поездов, о.е.

Минимальный допустимый межпоездной интервал  $J_{\text{д min}}$  определяется по следующим показателям: загрузка силового оборудования ТП, уровень напряжения на токоприемниках ЭПС, температура нагрева проводов тяговой сети и силового оборудования. На указанные показатели оказывают влияние параметры СНЭЭ (рисунок 7.1).

Имеющаяся линейная зависимость провозной способности в зависимости от пропускной для участка железной дороги (рисунок 7.2) позволяет оценить влияние параметров СНЭЭ на межпоездной интервал, провозную способность по формуле (5.33) или с помощью одного из методов аппроксимации.



Рисунок 7.1 – Параметры системы накопления, оказывающие влияние на показатели работы системы тягового электроснабжения

Особенностью применения регрессионных моделей для описания характера изменения пропускной и провозной способности является необходимость исключения мультиколлинеарности факторов, относящихся к параметрам СНЭЭ: объем энергии разряда, пороговое напряжение разряда, ток заряда и др. Исключение факторов приводит к существенному упрощению модели, позволяющей оценить провозную способность участка для рассматриваемых параметров СНЭЭ.

Исходными данными для прогнозирования провозной способности являются результаты имитационного моделирования, полученные для заданного диапазона изменения номинальной энергоемкости СНЭЭ.

Провозная способность определяется с помощью разработанной модели нейронной сети, позволяющей учитывать изменение объема электроэнергии

СНЭЭ в режимах заряда и разряда для различных значений пороговых напряжений.

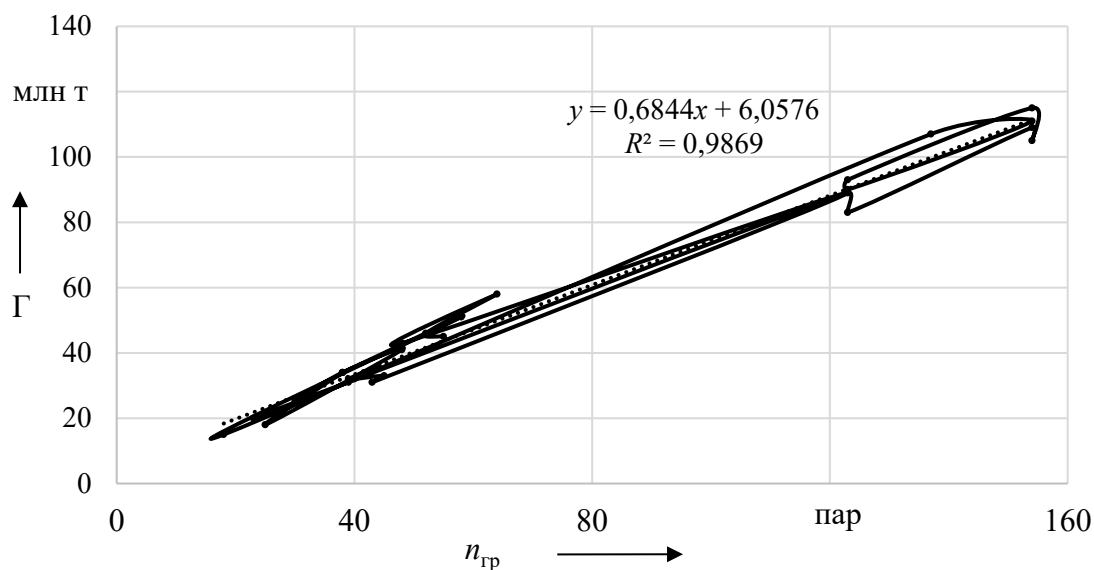


Рисунок 7.2 – График изменения провозной способности участка на примере Восточного полигона

Наиболее значимыми переменными функции провозной способности являются пороговое напряжение и объем электроэнергии режима разряда СНЭЭ. Наличие двух переменных функции позволяет использовать нейронные сети прямого распространения. Для построения модели принимается многослойный персептрон, на вход которого подаются значения двух переменных. Общий вид нейронной сети, используемой для прогнозирования провозной способности на межподстанционной зоне, приведен на рисунке 7.3.

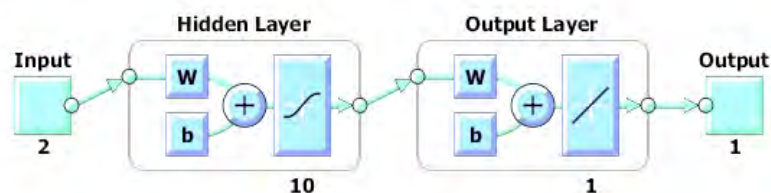


Рисунок 7.3 – Вид нейронной сети, используемой для прогнозирования провозной способности

Для повышения точности при построении модели использовано десять скрытых слоев, в качестве алгоритма обучения используется алгоритм

Левенберга – Марквардта. Для обучения модели используется 70 % выборки, для тестирования и оценки – 30 % (по 15 % соответственно).

Применение модели на основе многослойного персептрона позволяет получить следующие результаты: средняя квадратичная ошибка для выборки, используемой для оценки, – ниже 0,01, для полной выборки – ниже 0,1 (рисунок 7.4).

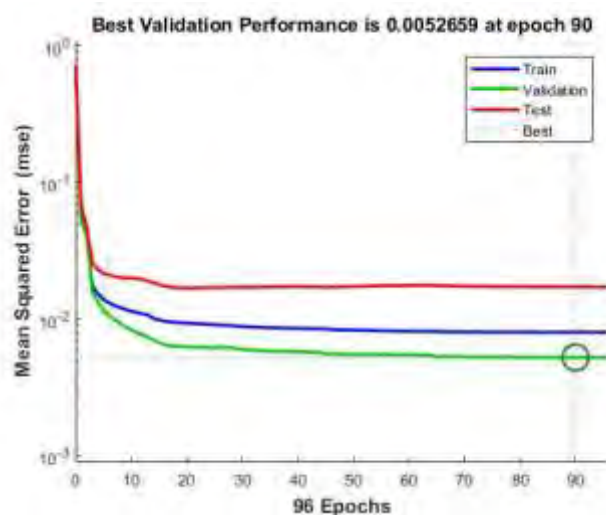


Рисунок 7.4 – График изменения среднеквадратичной ошибки по итерациям

Коэффициент регрессии модели для тестируемой выборки составляет 0,91, для полной выборки – 0,96 (рисунок 7.5).

Характер изменения провозной способности в границах межподстанционной зоны в зависимости от порогового напряжения режима разряда и суммарного за сутки объема электроэнергии СНЭЭ в режиме разряда приведен на рисунке 7.6.

При уменьшении значений объема энергии и порогового напряжения в режиме разряда снижается влияние СНЭЭ на посту секционирования, а значение провозной способности для межподстанционной зоны приближается к уровню базового варианта, соответствующему отсутствию СНЭЭ на шинах поста секционирования.

Регрессионное уравнение полученной зависимости (см. рисунок 7.6) приведено ниже:

$$\Gamma = p_{00} + p_{10} \cdot U_p + p_{01} \cdot W_p + p_{20} \cdot U_p^2 + p_{11} \cdot U_p \cdot W_p, \quad (7.3)$$

ГДЕ:  $p_{00}, p_{10}, p_{01}, p_{20}, p_{11}$  – коэффициенты уравнения.

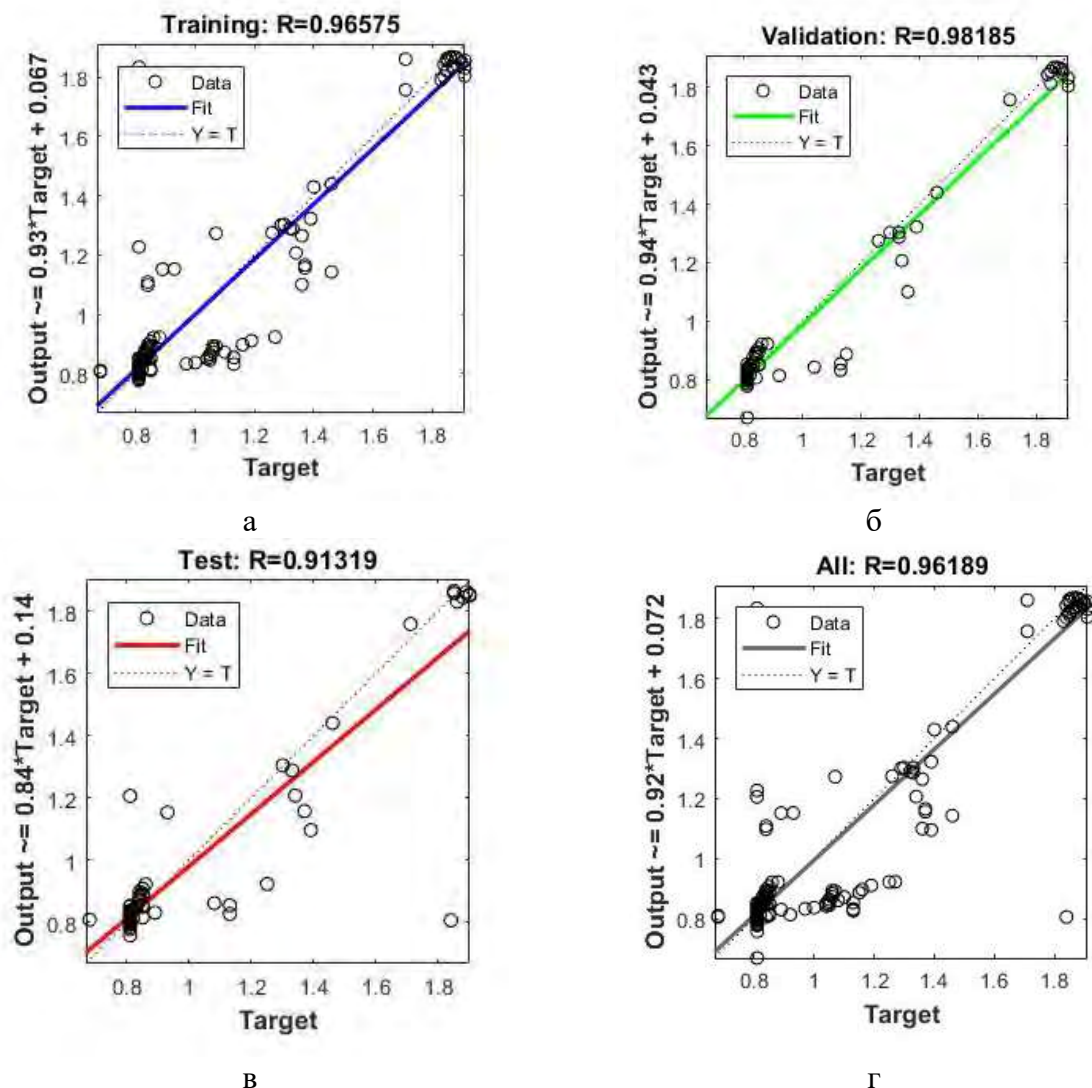


Рисунок 7.5 – Графики отклонения результатов модели от целевых значений для выборок: обучения (а); оценки (б); теста (в); полная (г)

Для участка Транссиба Западно-Сибирской железной дороги (на примере Тайга – Мариинск) уравнение (5.35) имеет следующие значения коэффициентов (см. рисунок 7.6):

$$p_{00} = -21,6, p_{10} = 11,5 \cdot 10^{-3}, p_{01} = 0,102 \cdot 10^{-3}, p_{20} = -1,42 \cdot 10^{-6}, p_{11} = -2,64 \cdot 10^{-8}.$$

Коэффициент детерминации равен 0,991, среднеквадратичная ошибка – 0,033.

Расширение перечня входных переменных модели позволяет незначительно повысить точность обученной нейронной сети. Результаты определения средней квадратичной ошибки ( $MSE$ ) для полученной модели приведены на рисунке 7.7.  $MSE$  при обучении, проверке и тестировании

составили менее 0,01. Коэффициент детерминации для полученной модели составляет не ниже 0,99 (для тестируемой выборки), для полной выборки – 0,99.

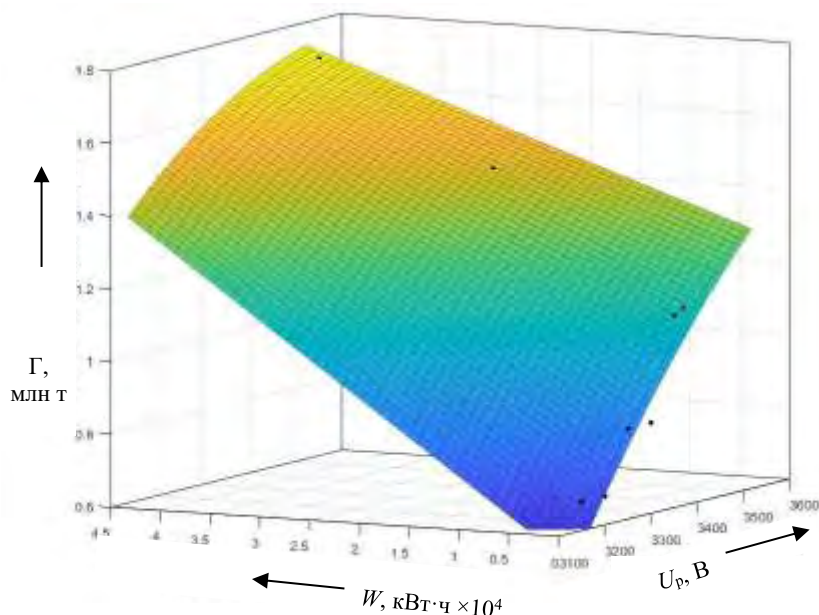


Рисунок 7.6 – График изменения провозной способности

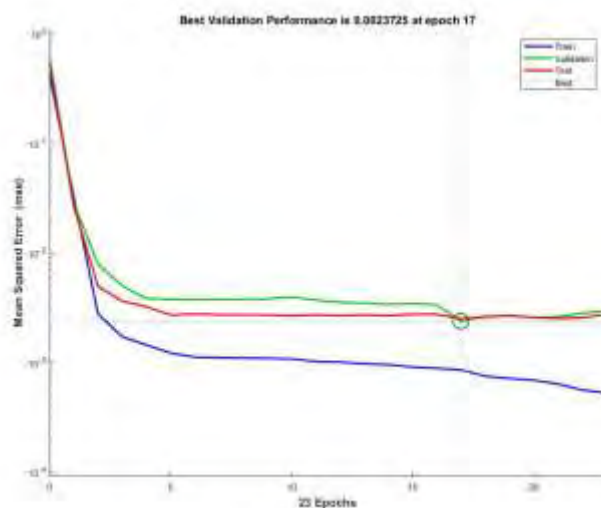


Рисунок 7.7 – График изменения среднеквадратичной ошибки ( $MSE$ ) по итерациям

Коэффициент детерминации для модели с двумя входными переменными (напряжения стабилизации разряда и объем энергии разряда за расчетные сутки) – 0,91 ниже, чем для модели, учитывающей все параметры СНЭЭ, – 0,99. Средняя квадратичная ошибка для второй модели меньше, чем для модели с двумя входными переменными, – 0,01 против значения 0,1 для полных выборок.

## 7.2 Анализ влияния систем накопления электроэнергии на показатели нагрузочной способности

Показатели работы СТЭ определяются профилем пути, массой поезда и условиями проследования поездов по участку и другими факторами, как это показано в [26, 27] и различаются для участков железной дороги вследствие уникальности их характеристик.

Оценка влияния СНЭЭ на показатели работы СТЭ на примере участка, расположенного на полигоне Транссиба в границах Западно-Сибирской железной дороги – филиале ОАО «РЖД», приводится ниже.

Рассматриваемый участок полигона обладает следующими характеристиками: участок двухпутный; СТЭ постоянного тока; размеры движения на участке составляют 65 пар; протяженность участка – 181,9 км. На участке обращаются грузовые поезда с унифицированными массами 4200 и 6500 т. Объем тоннокилометровой работы на участке составляет: в нечетном направлении – 51,9 млн ткм брутто, в четном – 44,8 млн ткм брутто, суммарный грузооборот – 96,7 млн ткм брутто. График поездов формируется случайным образом для условий преобладания грузового движения (таблица 7.1).

Таблица 7.1 – Структура масс составов на участке

Направление движения					
нечетное			четное		
масса, т	количество поездов	удельный вес, %	масса, т	количество поездов	удельный вес, %
629	2	3,1	629	2	3,1
1065	7	10,8	1065	18	27,7
4200	38	58,5	4200	29	44,6
6500	18	27,7	6500	16	24,6
Средняя масса поезда, т		4389,4	Средняя масса поезда, т		3788,1

Характер изменения показателей нагрузочной способности СТЭ для двух межподстанционных зон участка определяется в зависимости от режима

работы СНЭЭ, графика тяговой нагрузки и номинальной энергоемкости системы. Для определения провозной способности участка в расчете используются максимальные размеры движения, которые определяются для заданной массы поездов.

Расчет минимальных интервалов движения выполняется для условий пропуска поездов с заданными унифицированными массами и размещения СНЭЭ в СТЭ на постах секционирования.

Расчеты пропускной и провозной способности выполняются с помощью программного комплекса «Кортэс». С помощью указанного программного комплекса выполняется имитационное моделирование СНЭЭ на основе теории подобия [219, 220].

Диапазоны изменения напряжения на токоприемнике ЭПС в режиме тяги и рекуперативного торможения перекрываются в диапазоне значений 3200 – 3600 В [159], что обуславливает необходимость корректировки пороговых напряжения в границах межподстанционных зон в зависимости от режимов питания.

Ниже приведены результаты моделирования работы СНЭЭ для следующих диапазонов пороговых напряжений: заряда  $U_{\text{вкл зар}}$  – от 3500 до 3900 В; разряда  $U_{\text{вкл раз}}$  – от 3100 до 3500 В. Напряжение холостого хода на ТП принято на уровне 3500 В. Моделирование рабочих режимов СНЭЭ (режимы заряда, ожидания и разряда) выполняется для соответствующих диапазонов напряжения на шинах объекта СТЭ:

$$\begin{cases} U_{\text{вкл зар}} \leq U_{\text{ш}} : \text{режим заряда;} \\ U_{\text{вкл раз}} < U_{\text{ш}} < U_{\text{вкл зар}} : \text{режим ожидания;} \\ U_{\text{ш}} \leq U_{\text{вкл раз}} : \text{режим разряда,} \end{cases} \quad (7.4)$$

где:  $U_{\text{ш}}$  – напряжение на шинах 3,3 кВ подстанции или линейного устройства;  
 $U_{\text{вкл зар}}$ ,  $U_{\text{вкл раз}}$  – пороговые напряжения СНЭЭ в режимах заряда и разряда соответственно.

Комбинация пороговых напряжений позволяет определить соответствующие границы рабочих диапазонов для режимов заряда и разряда (таблица 7.2).

Таблица 7.2 – Варианты пар значений пороговых напряжений

Значения пар напряжения стабилизации		$U_{\text{вкл раз}}, \text{ В}$							
		3500	3450	3400	3350	3300	3250	3200	3150
$U_{\text{вкл зар}}, \text{ В}$	3550	×	×	×	×	×	×	×	×
	3600	×	×	×	×	×	×	×	—
	3650	×	×	×	×	×	×	—	—
	3700	×	×	×	×	×	—	—	—
	3750	×	×	×	×	—	—	—	—
	3800	×	×	×	—	—	—	—	—
	3850	×	×	—	—	—	—	—	—
	3900	×	—	—	—	—	—	—	—

Примечание. «×» – расчет выполняется; «—» – расчет не выполняется.

Имитационное моделирование выполнено для двух межподстанционных зон с параллельным режимом питания, профиль пути которых относится к горному. Схема питания и секционирования контактной сети рассматриваемого участка протяженностью 38,7 км (рисунок 7.8) включает в себя посты секционирования (ПС1 и ПС2) и пункты параллельного соединения (ППС). Моделирование тяговой нагрузки выполнено для условий преобладания грузового движения. Распределение масс поездов по направлениям работы приведено в таблице 7.3.

Эквивалентное сопротивление тяговых подстанций ТП1, ТП2 и ТП3 составляет 0,01, 0,03 и 0,03 Ом соответственно. Рассматриваемый диапазон напряжений стабилизации для режима заряда СНЭЭ на постах секционирования ПС1 и ПС2 – от 3550 до 3900 В, для режима разряда – от 3150 до 3500 В. Эквивалентное сопротивление СНЭЭ принято равным 0,03 Ом.

Основные параметры ТП рассматриваемого участка, принятые для имитационного моделирования, приведены в таблице 7.4. Для оценки влияния параметров СНЭЭ на энергетические показатели работы СТЭ и провозную способность участка рассматривается работа устройства со статичной внешней характеристикой и изменяемыми пороговыми напряжениями для управления режимами работы устройства.

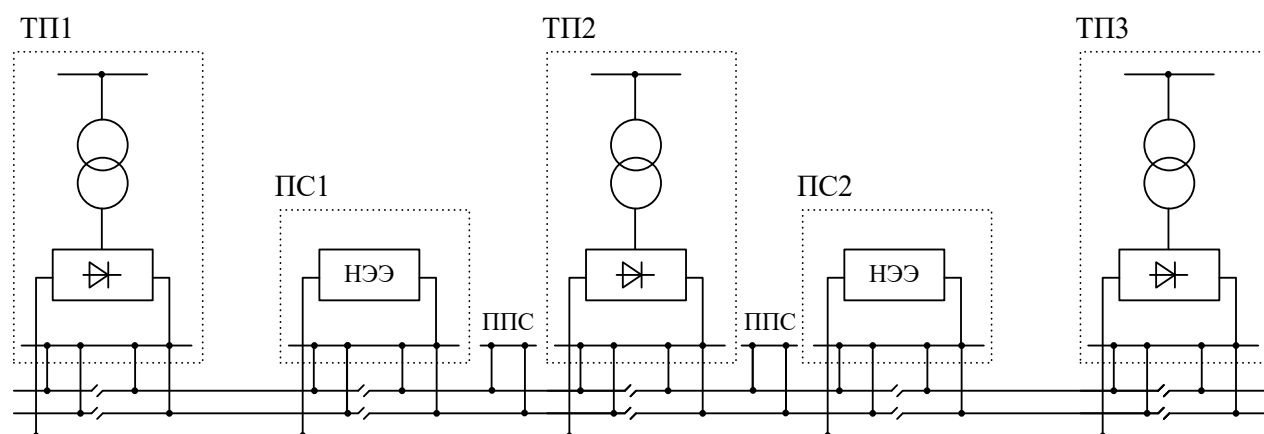


Рисунок 7.8 – Схема питания и секционирования контактной сети рассматриваемого участка

Таблица 7.3 – Удельный вес поездов, обращающихся на участке

Направление движения					
нечетное			четное		
масса, т	количество поездов	удельный вес, %	масса, т	количество поездов	удельный вес, %
629	2	3,1	629	2	3,1
1065	7	10,8	1065	18	27,7
4200	38	58,5	4200	29	44,6
6500	18	27,7	6500	16	24,6
Средняя масса поезда, т		4389,4	Средняя масса поезда, т		3788,1

В ходе расчетов определяется изменение следующих показателей нагрузочной способности СТЭ: среднего тока выпрямителя; среднего напряжения на шинах постов и подстанций; коэффициентов загрузки выпрямителей и преобразовательных трансформаторов; коэффициентов загрузки и температуры силовых трансформаторов; температуры обмоток силовых трансформаторов; температуры контактной сети

межподстанционной зоны; минимального напряжения (усредненные на интервале три минуты); расхода и потерь электроэнергии; значений межпоездного интервала, пропускной и провозной способности рассматриваемого участка.

Таблица 7.4 – Параметры силового оборудования рассматриваемого участка

Тяговая подстанция	Понижающие трансформаторы		Преобразовательные трансформаторы		Сопротивление $R_B$ , Ом	Номинальный ток $I_{ном B}$ , А
	$S_{пт}$ , МВ·А	кол-во	$S_{пр.т}$ , МВ·А	кол-во		
ТП1	15	1	11400	1	0,01	3150
ТП2	16	1	11400	1	0,03	3150
ТП3	16	1	11400	2	0,03	3150

Изменение среднего тока СНЭЭ и напряжения на шинах постов секционирования носит нелинейный характер – при увеличении порогового напряжения режима разряда возрастает средний ток системы и увеличивается среднее напряжение на шинах поста секционирования. Увеличение порогового напряжения заряда оказывает слабое влияние на средний ток системы и приводит к незначительному увеличению напряжения на шинах поста секционирования.

Изменение пороговых напряжений для режимов работы СНЭЭ в заданных рабочих диапазонах показывает, что средний ток устройства при снижении порогового напряжения разряда со значения 3500 до 3100 В снижается с 600 до 100 А (рисунок 7.9).

Изменение порогового напряжения заряда для СНЭЭ на ПС1 в режим заряда не оказывает значительного влияния на изменение среднего тока системы. При увеличении порогового напряжения режима разряда в диапазоне от 3100 до 3500 В происходит увеличение среднего напряжения на шинах с 3400 до 3500 В (на 2,9 %) при постоянном значении порогового напряжения для режима заряда на уровне 3550 В. При повышении порогового напряжения разряда до 3900 В происходит увеличение среднего напряжения на шинах от 3500 до 3550 В. Аналогичный характер изменения средних значений тока и

напряжения наблюдается для условий поста секционирования ПС2 (см. рисунок 7.10).

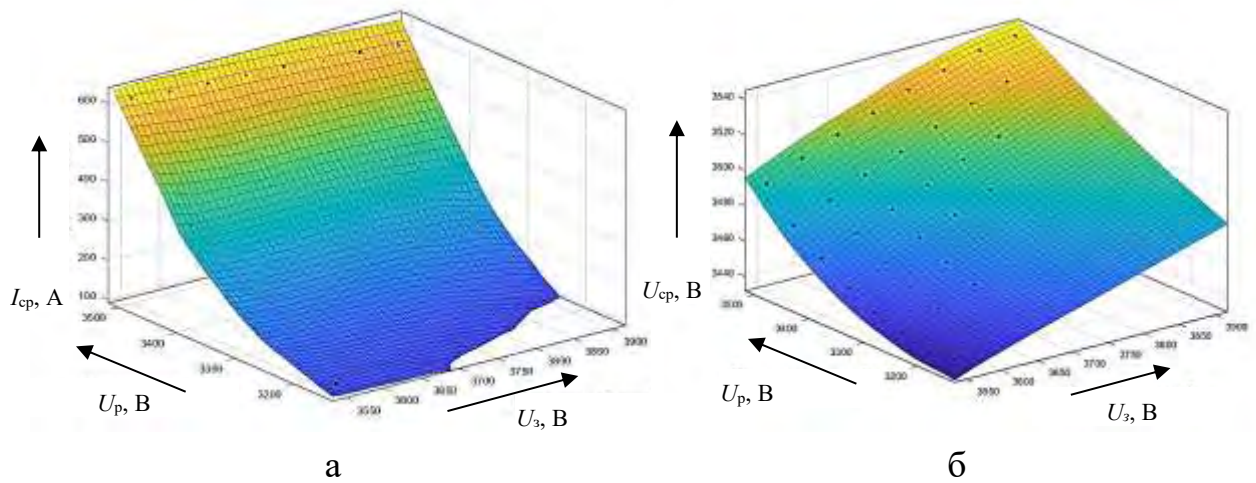


Рисунок 7.9 – Графики изменения среднего тока (а) и напряжения на шинах (б) в зависимости от пороговых напряжений системы накопления на ПС1

Работа СНЭЭ на постах секционирования (ПС1 и ПС2) позволяет снизить средний коэффициент загрузки выпрямителей и повысить среднее напряжение на шинах 3,3 кВ.

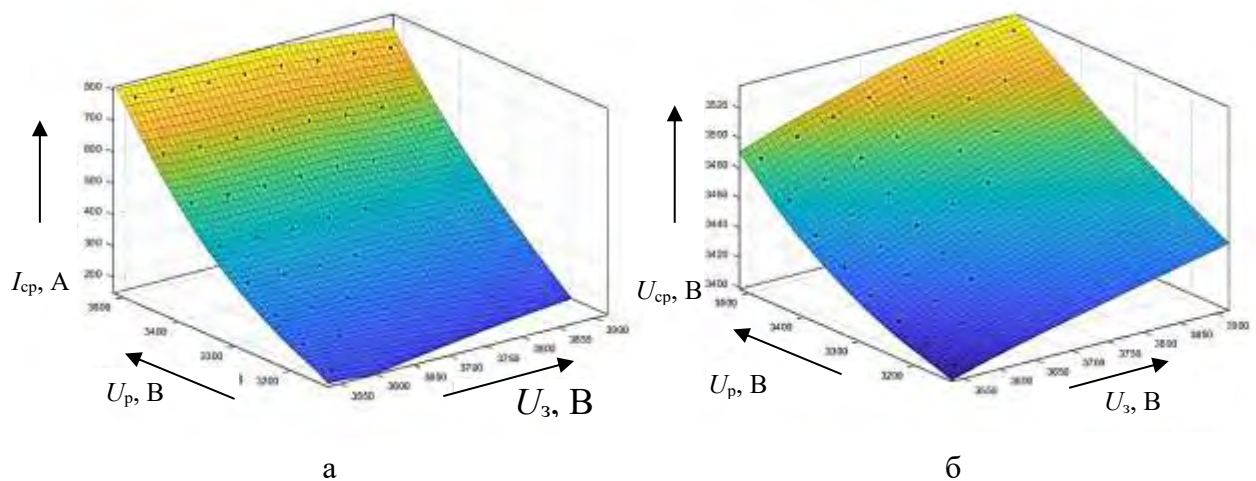


Рисунок 7.10 – Графики изменения среднего тока (а) и напряжения на шинах (б) от пороговых напряжений системы накопления на ПС2

Повышение пороговых напряжений заряда устройств в диапазоне от 3550 до 3900 В приводит к незначительному росту среднего напряжения на шинах в среднем на 50 В.

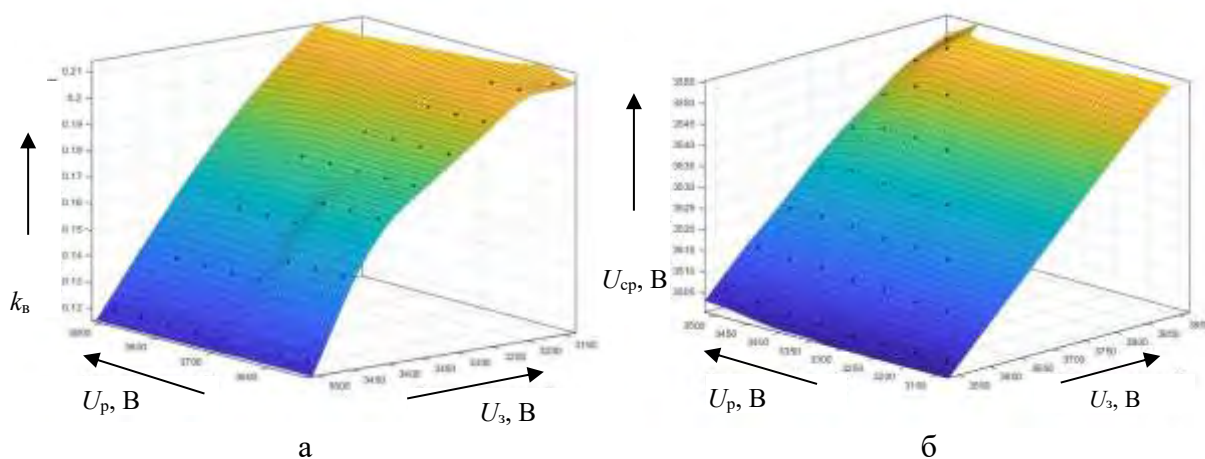


Рисунок 7.11 – Графики изменения загрузки выпрямителей (а) и среднего напряжения (б) на шинах подстанции ТП1

Аналогичное влияние работа СНЭЭ оказывает на температуру нагрева проводов контактной сети. Для подстанций рассматриваемого участка (ТП1 – ТП3) расчетная максимальная температура нагрева для трехминутного интервала усреднения составляет 231, 96 и 232°C соответственно. При увеличении порогового напряжения разряда СНЭЭ на постах секционирования (ПС1 и ПС2) температура нагрева проводов контактной сети для ТП1 – ТП3 снижается и находится в диапазоне от 20 до 60°C (для тяговой подстанции ТП1 графики приведены на рисунке 7.12, а). При этом минимальное напряжение на токоприемнике ЭПС (на интервале усреднения три минуты) для двух межподстанционных зон участка при изменении порогового напряжения с 3150 до 3500 В в режиме разряда увеличивается до 200 В (рисунок 7.12, б).

Расчетный характер изменения объемов электроэнергии СНЭЭ для режимов заряда и разряда определяется пороговыми напряжениями (рисунки 7.13, 7.14). Для устройства на посту секционирования ПС1 расчетные объемы электроэнергии для режимов разряда и заряда составляют  $4 \cdot 10^4$  и  $9 \cdot 10^3$  кВт·ч соответственно, для второго устройства (на ПС2) –  $6 \cdot 10^4$  и  $7,5 \cdot 10^3$  кВт·ч соответственно.

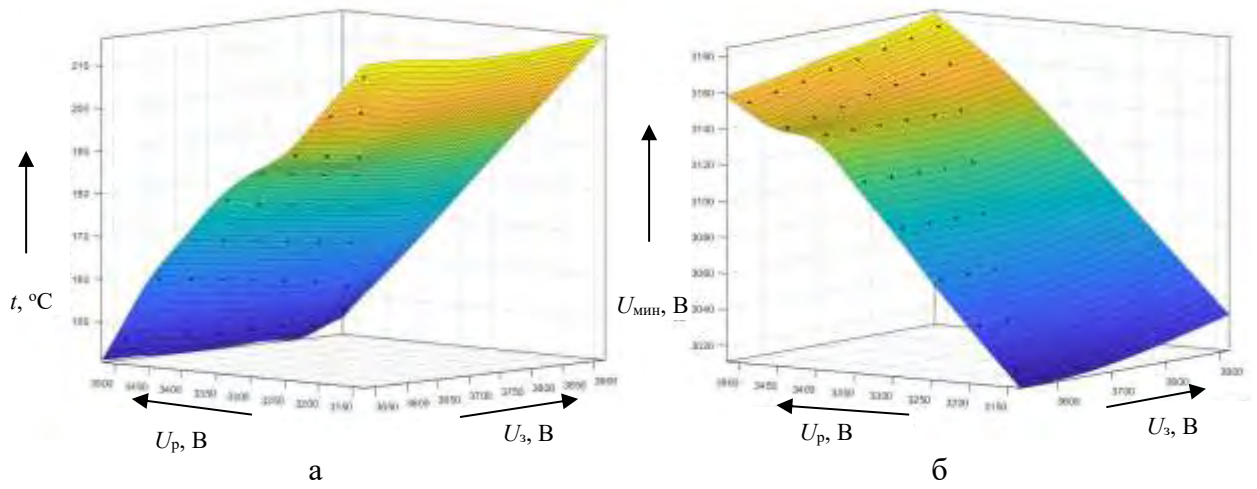


Рисунок 7.12 – Графики изменения нагрева проводов (а) и минимального напряжения (б) для ТП1

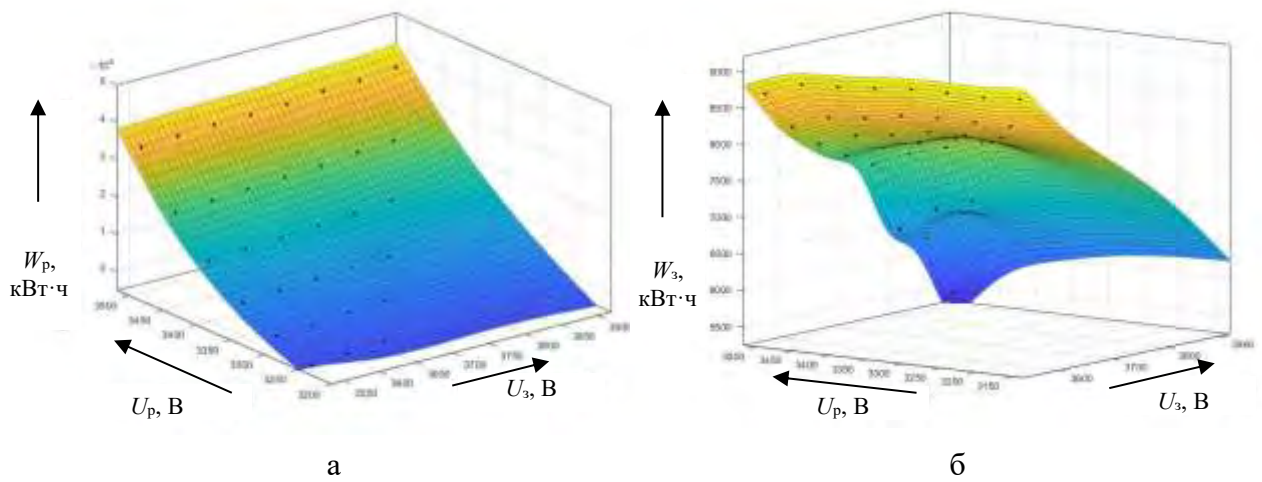


Рисунок 7.13 – Графики изменения объемов электроэнергии для режима разряда (а) и для режима заряда (б) на ПС1

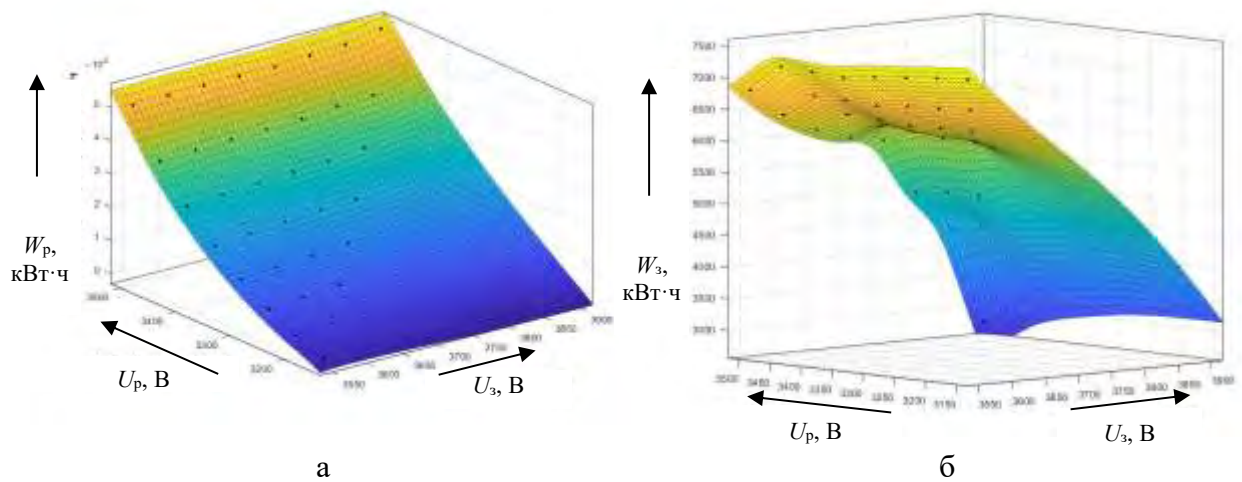


Рисунок 7.14 – Графики изменения объемов электроэнергии для режима разряда (а) и для режима заряда (б) на ПС2

Сокращение межпоездного интервала и повышение провозной способности достигается путем повышения порогового напряжения разряда. Пороговое напряжение заряда не оказывает влияния на рассматриваемые показатели. Повышение напряжения для режима разряда позволяет сократить минимальный расчетный межпоездной интервал для расчетного участка с 16 до 6 мин и повысить провозную способность с 0,6 до 1,8 млн т в сутки (рисунки 7.15, 7.16). Результаты, полученные для условий размещения СНЭЭ на постах секционирования, аналогичны друг другу.

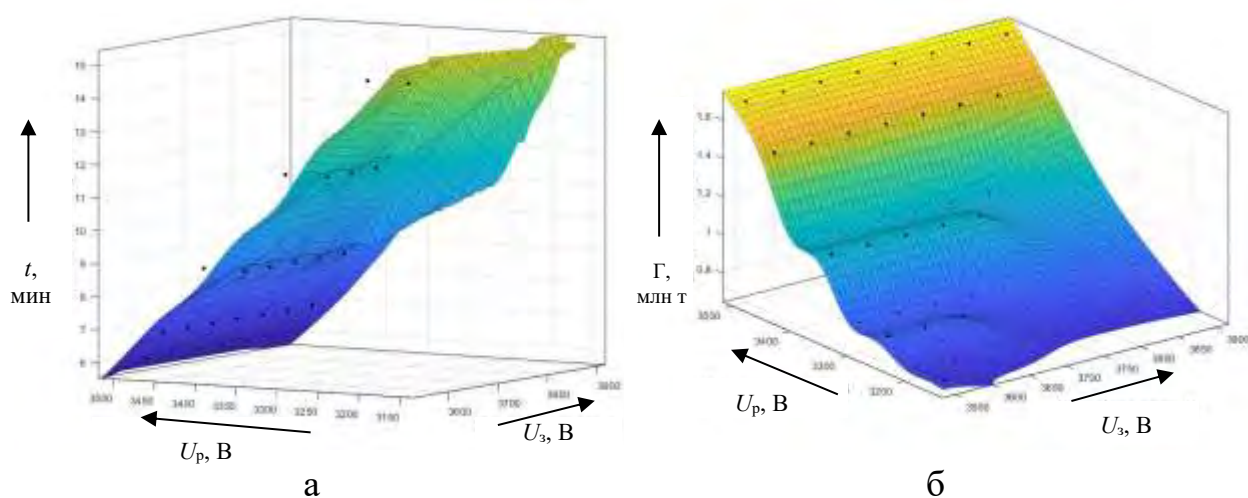


Рисунок 7.15 – Графики изменения минимального интервала (а) и провозной способности (б) для системы на ПС1

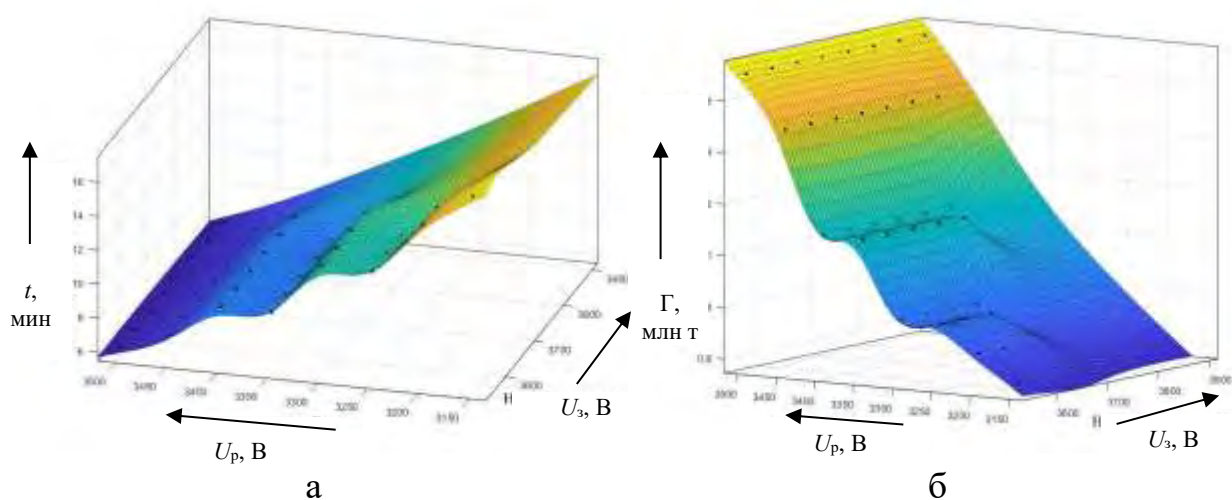


Рисунок 7.16 – Графики изменения минимального интервала (а) и провозной способности (б) для системы на ПС2

Рабочий диапазон напряжений, фиксируемый на шинах постов секционирования (ПС1 и ПС2), при работе СНЭЭ за сутки – от 3200 до 3600 В, диапазон изменения нагрузки СНЭЭ при их работе на ПС1 и ПС2 (рисунок 7.17) от – 1500 до 3000 А.

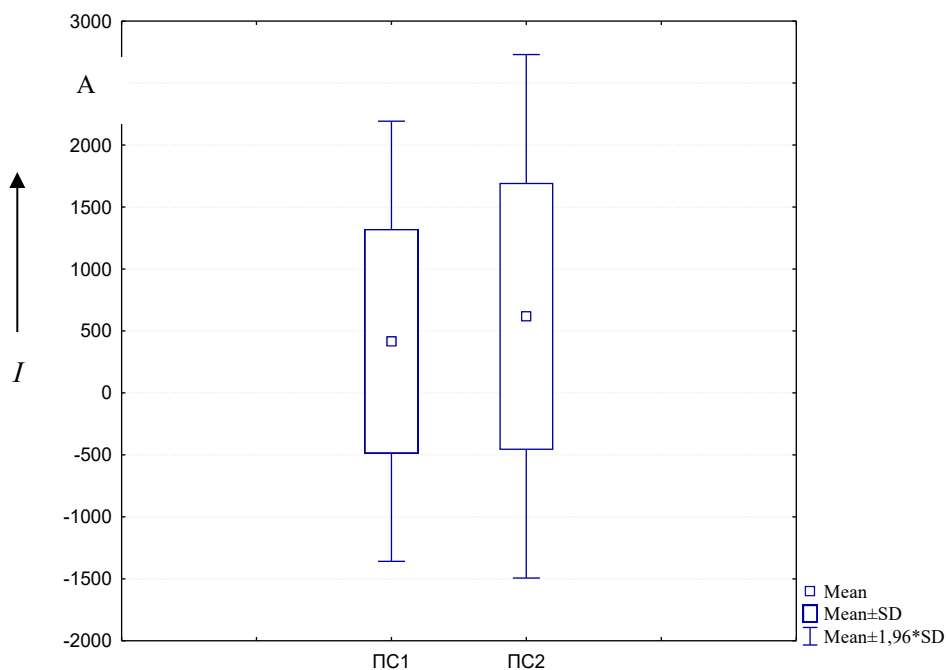


Рисунок 7.17 – Диапазоны изменения нагрузки систем накопления электроэнергии на ПС1 и ПС2

Продолжительность эпизодов работы СНЭЭ на постах секционирования (ПС1 и ПС2) находится в диапазоне 0 – 24 мин для режима разряда и 0 – 5 мин для режима заряда (рисунки 7.18 и 7.19 соответственно).

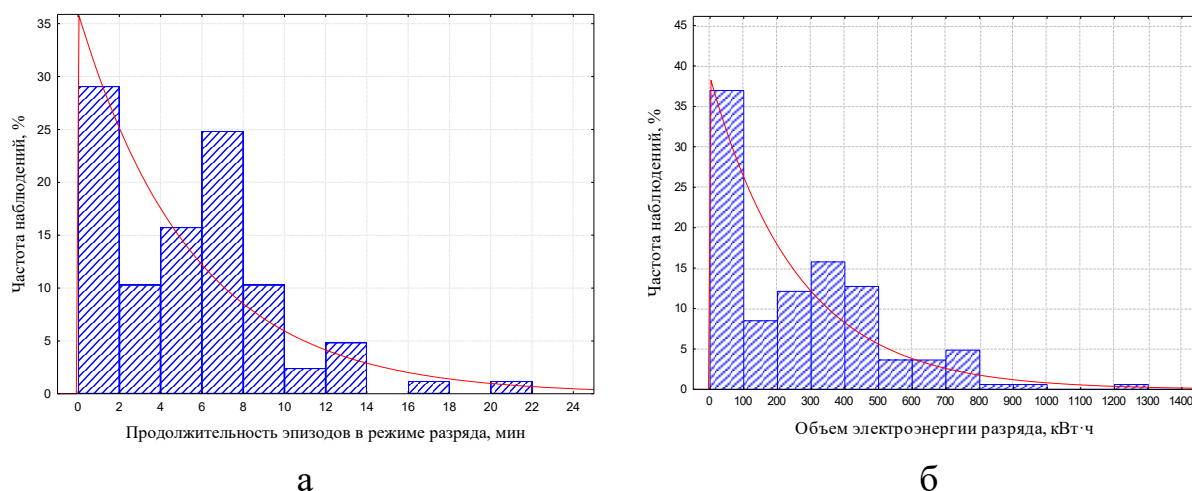


Рисунок 7.18 – Графики распределения продолжительности (а) и объема электроэнергии (б) для режима разряда системы накопления на ПС1

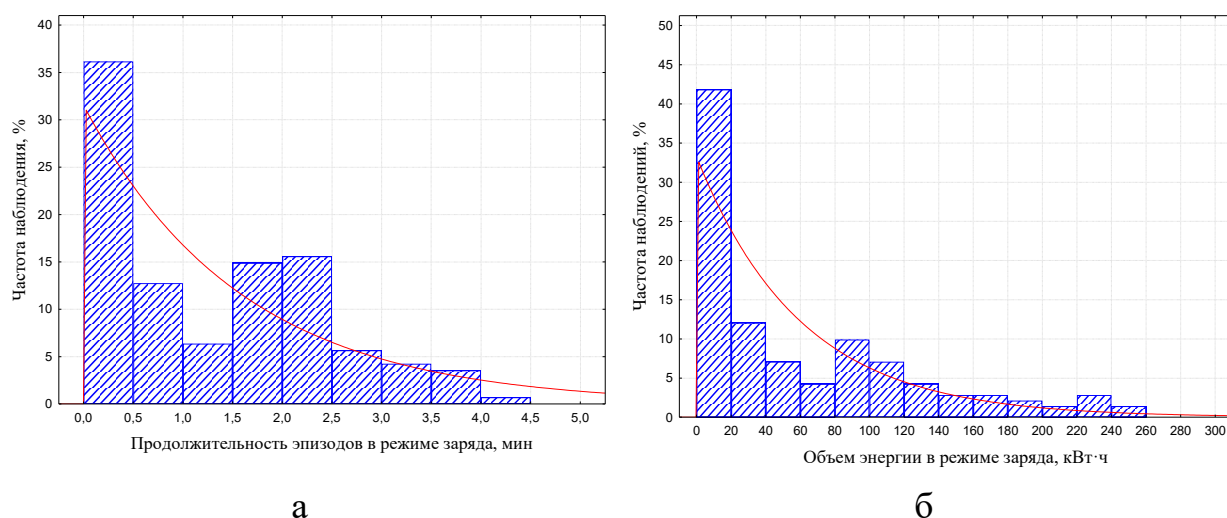


Рисунок 7.19 – Графики распределения продолжительности (а) и объема электроэнергии (б) для режима заряда системы накопления электроэнергии на ПС1

Объем энергии для режима разряда не превышает 1400 кВт·ч, для режима заряда – 300 кВт·ч. Аналогичные результаты получены для условий работы СНЭЭ на посту секционирования ПС2 (рисунки 7.20 и 7.21 соответственно), что позволяет определить средние временные характеристики режимов.

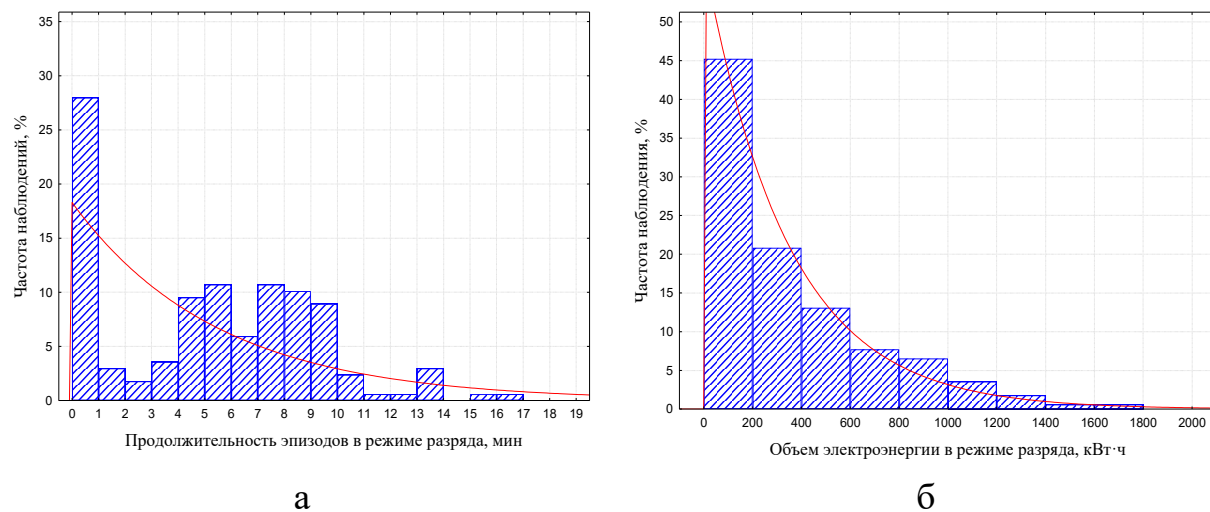


Рисунок 7.20 – Графики распределения продолжительности (а) и объема электроэнергии (б) для режима разряда накопителя на ПС2

На уровень заряженности СНЭЭ оказывают влияние режим заряда и зарядная характеристика.

Режим заряда реализуется на основе измерений напряжения и токов:

- на шинах поста секционирования;
- на шинах смежных ТП.

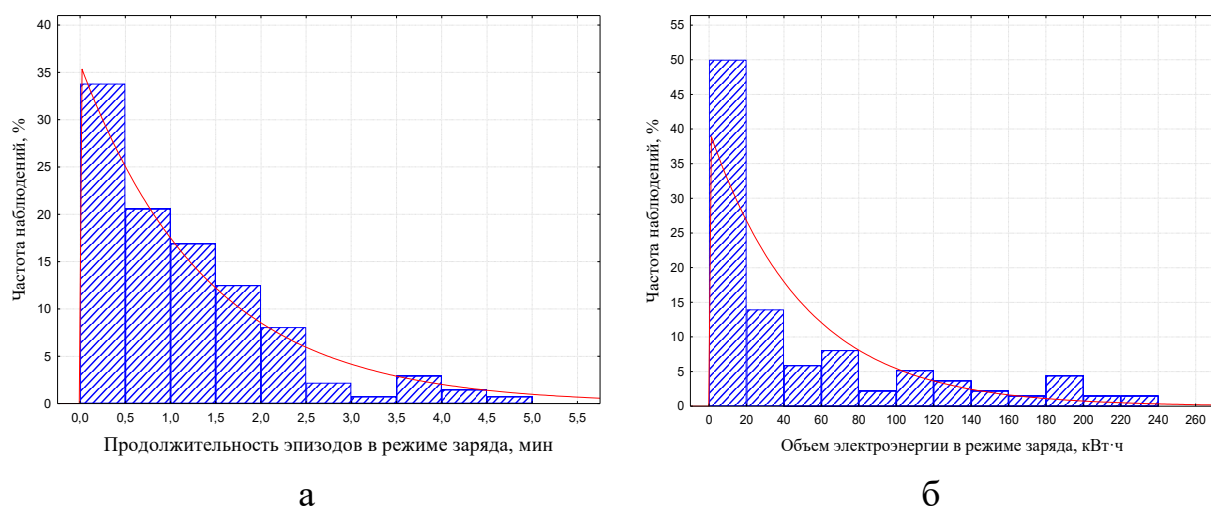


Рисунок 7.21 – Графики распределения продолжительности (а) и объема электроэнергии (б) для режима заряда накопителя на ПС2

Результаты определения номинальной энергоемкости СНЭЭ, полученные для токов от 50 до 500 А для условий стабилизации тока заряда по верхней границе 50, 100, 250 и 500 А приведены на рисунке 7.22.

Снижение энергоемкости в диапазоне значений напряжения разряда от 3500 до 3450 В обусловлено сокращением продолжительности эпизодов разряда. При дальнейшем снижении порогового напряжения разряда происходит увеличение требуемой энергоемкости из-за необходимости обеспечения поглощения мощности при заряде.

Степень заряженности НЭЭ определяется: начальным напряжением, внутренним сопротивлением, количеством электричества, емкостью, током разряда (заряда). В зависимости от принятых в расчетах уточнений степени заряженности используются эмпирические зависимости или уравнения, полученные с помощью аппарата регрессионного анализа или моделей искусственных нейронных сетей.

Для оценки степени заряженности применяется способ, основанный на счетчике ампер-часов или количестве электричества. Модификацией данного способа является способ, основанный на счетчике ватт-часов для режимов заряда и разряда, который используется в дальнейшем для оценки энергообменных процессов.

Построение графика степени заряженности накопителей базируется на энергообменных процессах, полученных для заданных параметров движения поездов в условиях пакетного пропуска (рисунок 7.23).

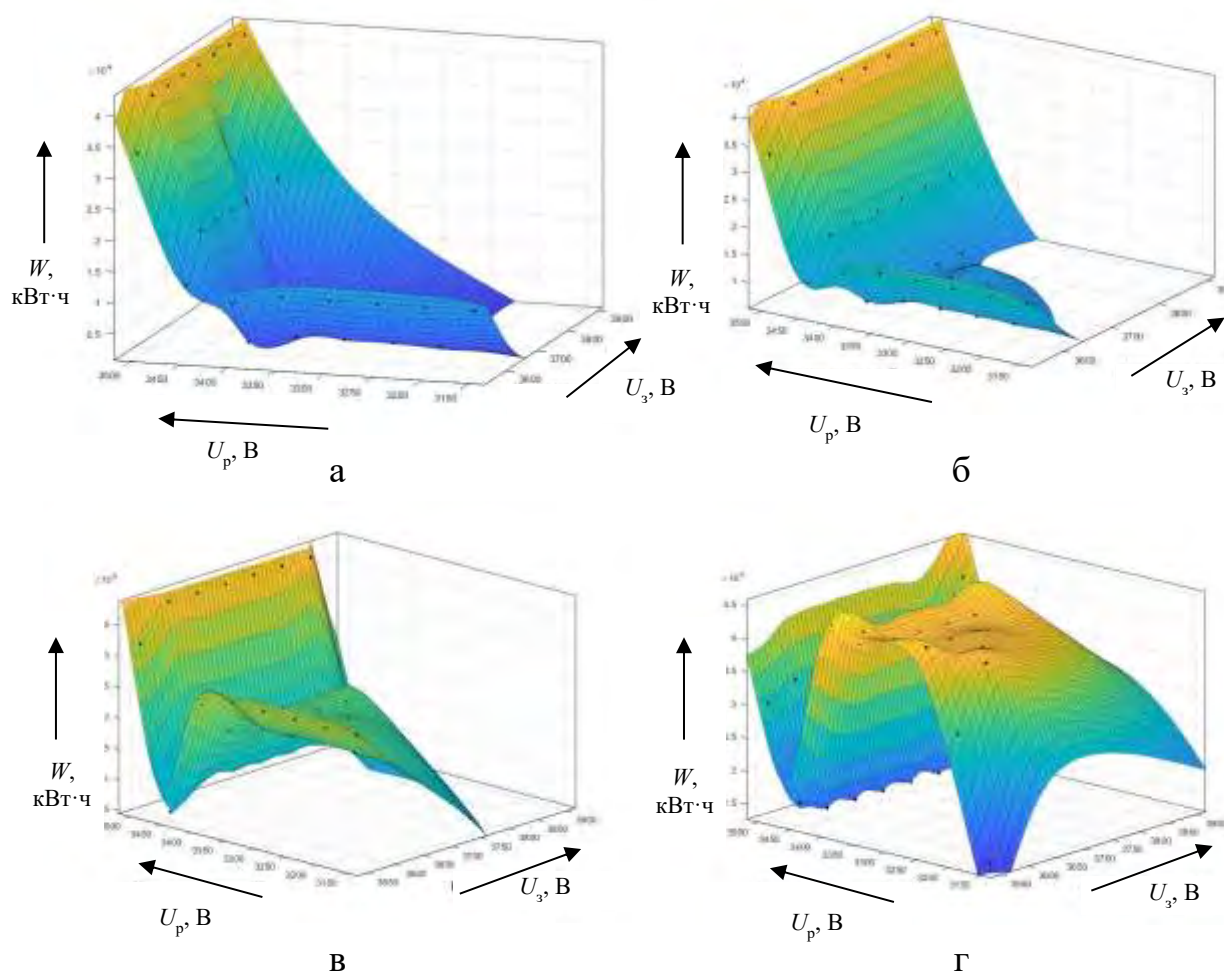


Рисунок 7.22 – Графики изменения необходимой энергоемкости накопителя электроэнергии на ПС1 при токах заряда, А: 50 (а); 100 (б); 250 (в); 500 (г)

Пороговые напряжения для режимов работы СНЭЭ определяют эффективность их работы. Сравнение полученных результатов при введении ограничений на энергоемкость и изменение токов заряда проводится с помощью весовых коэффициентов объемов электроэнергии в режимах заряда и разряда  $i$ -го варианта энергоемкости относительно базового при отсутствии ограничений на энергоемкость соответственно по формулам:

$$k_{zi} = \frac{W_z^i}{W_z^{\text{баз}}} \text{ и } k_{pi} = \frac{W_p^i}{W_p^{\text{баз}}}, \quad (7.5)$$

где:  $W_z^i$ ,  $W_p^i$  – объемы электроэнергии для  $i$ -го варианта расчета в режимах заряда и разряда соответственно;

$W_z^{\text{баз}}$ ,  $W_p^{\text{баз}}$  – объемы электроэнергии для базового варианта расчета в режимах заряда и разряда.

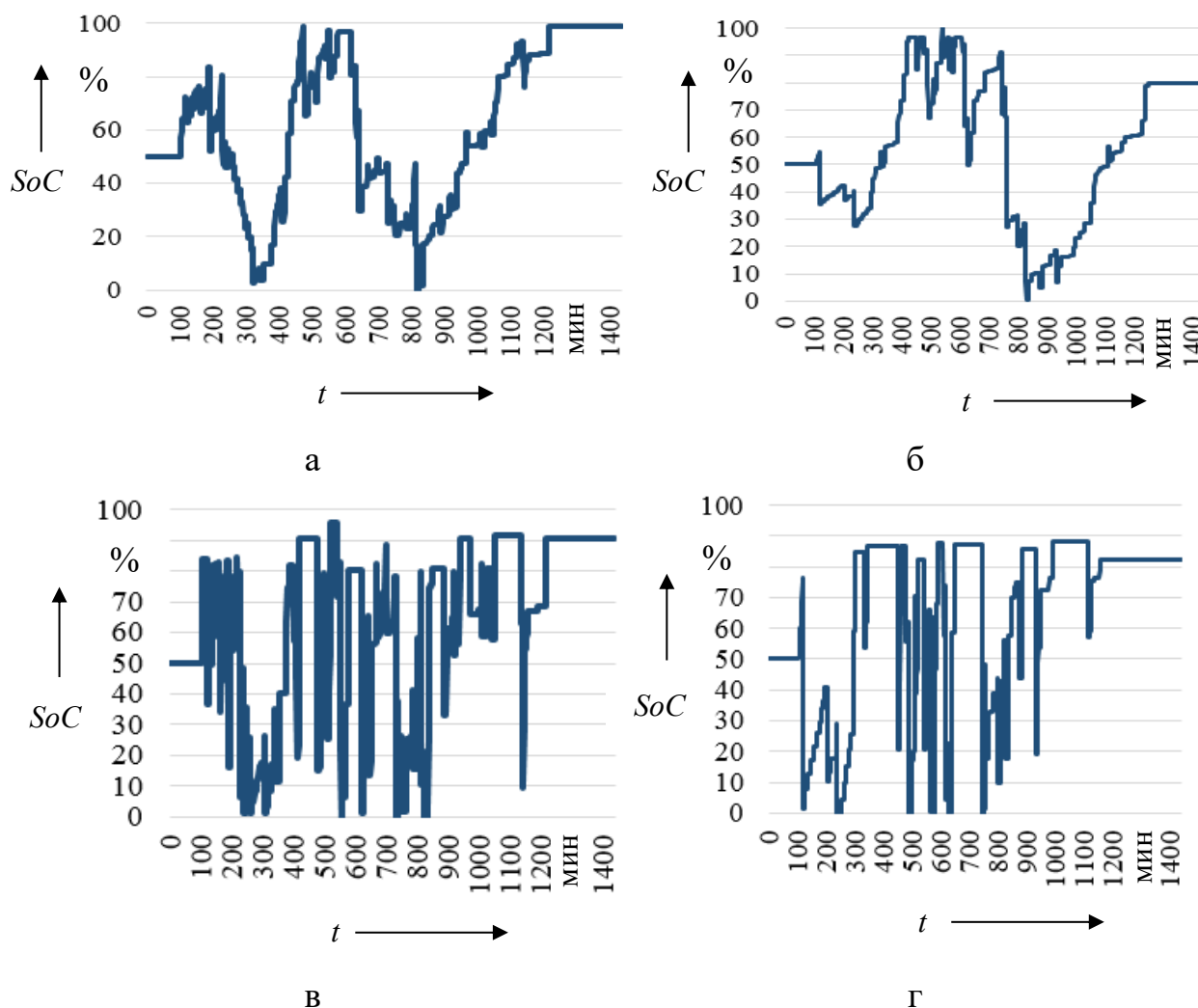


Рисунок 7.23 – Графики изменения степени заряженности  $SoC$ :  
 ПС1, 1275 кВт·ч (а); ПС2, 1780 кВт·ч (б);  
 ПС1, 300 кВт·ч (в); ПС2, 300 кВт·ч (г)

Результаты расчетов при ограничении энергоемкости и изменении тока заряда позволяют определить характер изменения коэффициентов  $k_{zi}$  и  $k_{pi}$  в зависимости от изменения пороговых напряжений для режимов заряда и разряда для условий поста секционирования (ПС1) (рисунки 7.24, 7.25).

Область максимальных значений коэффициентов соответствует пороговым напряжениям для режима разряда, находящихся в диапазоне – 3400 – 3500 В, и пороговым напряжениям для режима заряда в диапазоне – 3550 – 3650 В.

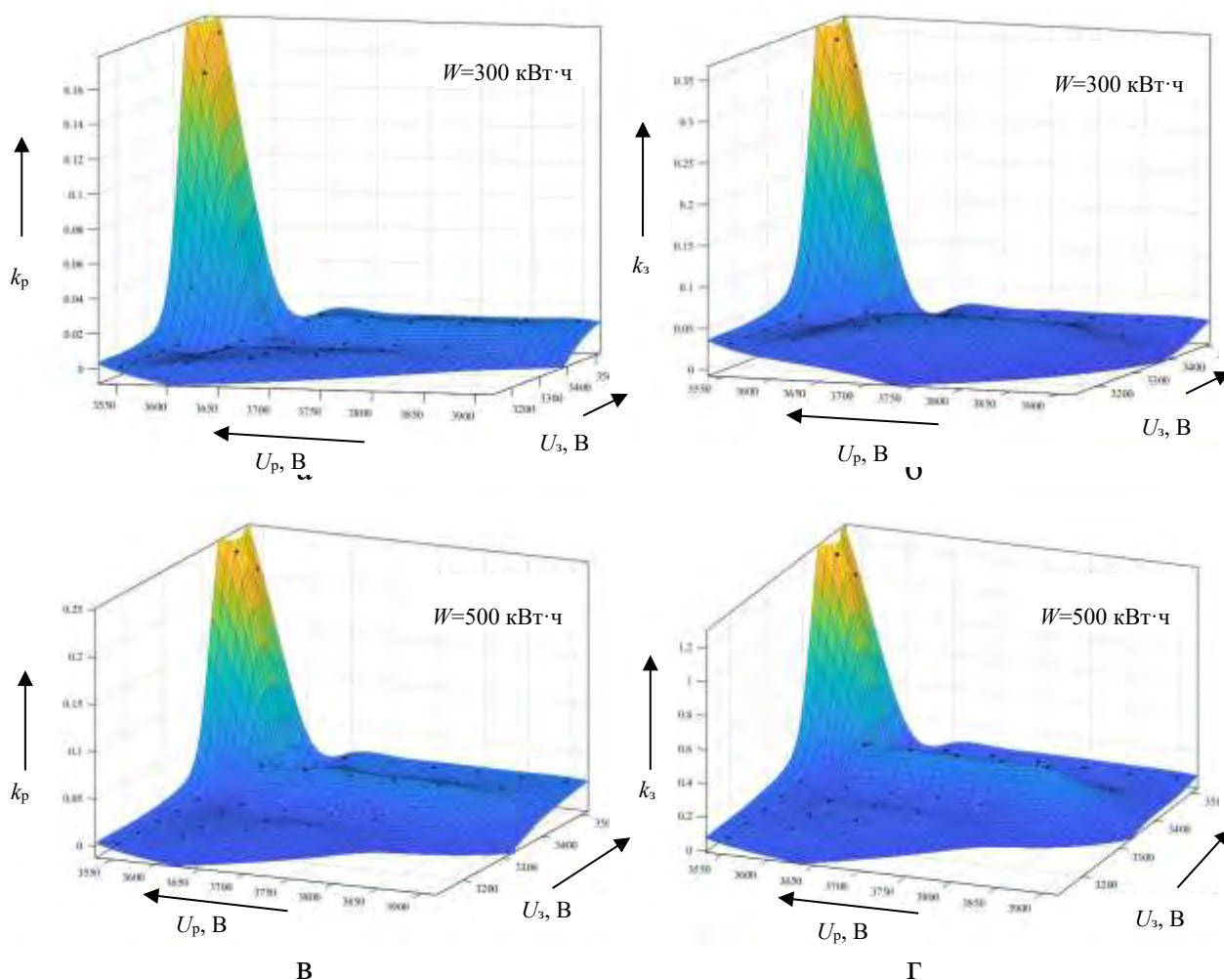


Рисунок 7.24 – Графики изменения коэффициентов для ПС1 при ограничении энергоемкости и тока заряда: 300 кВт·ч, 50 А (а, б); 500 кВт·ч, 150 А (в, г)

При увеличении энергоемкости СНЭЭ и тока заряда наблюдается рост коэффициента  $k_p$ ; до максимальных значений (0,17 – для пары значений «энергоемкость и ток заряда» – 300 кВт·ч и 50 А соответственно, до 0,45 – для пары значений «энергоемкость и ток заряда» – 1000 кВт·ч и 500 А).

Максимальные значения коэффициентов  $k_3$  достигают уровня 0,35 – для пары значений «энергоемкость и ток заряда» – 300 кВт·ч и 50 А соответственно, уровня 2,2 – для пары значений «энергоемкость и ток заряда» – 1000 кВт·ч и 500 А. Кратное увеличение значений  $k_3$  обусловлено

увеличением тока заряда, уровень которого позволяет обеспечить полную зарядку НЭЭ.

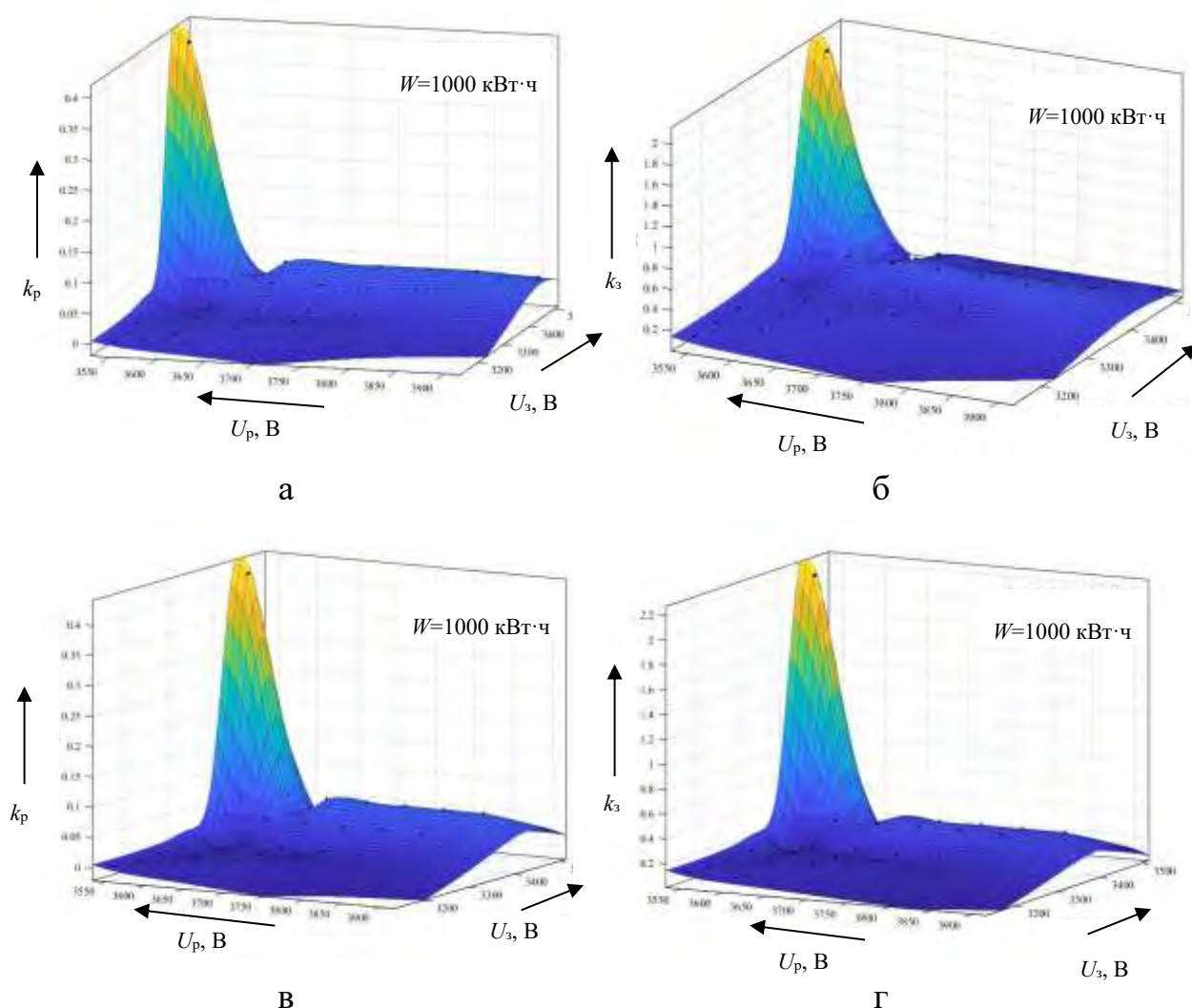


Рисунок 7.25 – Графики изменения коэффициентов для ПС1 при ограничении энергоемкости и тока заряда: 1000 кВт·ч, 400 А (а, б); 1000 кВт·ч, 500 А (в, г)

Расчетная провозная способность рассматриваемой межподстанционной зоны при изменении пороговых напряжений для поста секционирования (ПС1) изменяется в диапазоне от 0,68 до 1,71 млн т.

Результаты расчета корреляционной связи между рассмотренными параметрами для МПЗ1 (ПС1) приведены в нормированной корреляционной матрице (таблица 7.5). Коэффициент корреляции для объема энергии, реализуемого в режиме разряда, и провозной способностью равен 0,95.

Таблица 7.5 – Нормированная корреляционная матрица параметров межподстанционной зоны МПЗ1 (ПС1)

Параметр	$U_3$ , В	$U_p$ , В	$I_{cp}$ , В	$U_{cp}$ , В	$W_p$ , кВт·ч	$W_3$ , кВт·ч	$t$ , мин	$\Gamma$ , млн т
$U_3$ , В	1,00	–	–	–	–	–	–	–
$U_p$ , В	0,50	1,00	–	–	–	–	–	–
$I_{cp}$ , В	0,45	0,96	1,00	–	–	–	–	–
$U_{cp}$ , В	0,84	0,88	0,87	1,00	–	–	–	–
$W_p$ , кВт·ч	0,50	0,90	0,97	0,87	1,00	–	–	–
$W_3$ , кВт·ч	-0,96	-0,60	-0,58	-0,88	-0,64	1,00	–	–
$t$ , мин	-0,49	-0,98	-0,93	-0,85	-0,86	0,57	1,00	–
$\Gamma$ , млн т	0,48	0,96	0,98	0,87	0,95	-0,60	-0,96	1,00

Средние значения тока  $I_{cp}$  и напряжения  $U_{cp}$ , объем энергии в режиме разряда  $W_p$  являются зависимыми переменными, имеется корреляционная связь между объемом энергии в режиме разряда и напряжением разряда.

Наличие мультиколлинеарности между указанными переменными обуславливает необходимость исключения переменных при получении регрессионного уравнения. Влияние объема электроэнергии в режиме разряда СНЭЭ на пропускную способность (для МПЗ1) определяется на основе регрессионного уравнения:

$$\Gamma = 0,026 \cdot 10^{-3} \cdot W_p + 0,811. \quad (7.6)$$

Коэффициент детерминации для регрессионного уравнения (7.6) равен 0,90. Представление первой части уравнения в виде произведения объема энергии в режиме разряда для базового варианта и весового коэффициента позволяет представить уравнение (7.6) в следующем виде:

$$\Gamma_i = 0,026 \cdot 10^{-3} \cdot k_{pi} \cdot W_p^{баз} + 0,811. \quad (7.7)$$

Применение полученного уравнения позволяет получить расчетное значение провозной способности для  $i$ -го варианта с соответствующими значениями пары напряжений стабилизации и уровня заряда СНЭЭ в режиме ожидания. Для других межподстанционных зон указанные уравнения могут

быть определены аналогично, исходя из параметров СТЭ, характеристик ЭПС и организации движения поездов на участке.

### 7.3 Влияние тяговой нагрузки на параметры систем накопления электроэнергии

Режимы работы СНЭЭ электроэнергии и условия рекуперативного торможения ЭПС оказывают влияние на уровень напряжения в контактной сети. СНЭЭ позволяет как повышать напряжение в нагрузочных режимах, так и понижать его уровень при рекуперативном торможении. В последнем случае уровень напряжения определяется режимами работы электротяговой нагрузки и выбранной зарядной характеристикой.

Решение задачи поддержания минимального уровня напряжения на токоприемнике ЭПС позволяет определить параметры СНЭЭ, зависящие от минимального уровня напряжения на шинах объекта и коэффициента загрузки по напряжению (1.7).

При определении тока (мощности) в режиме разряда и цикличности работы СНЭЭ определяющим фактором выступает электротяговая нагрузка. Другие параметры СНЭЭ определяются исходя из необходимости обеспечения времени заряда и максимального ресурса работы системы. Определение указанных параметров в большей степени относится к электрохимическому виду НЭЭ, например, литий-ионным аккумуляторам различных модификаций или другим видам.

Ток заряда ограничивается минимальным напряжением на шинах подстанции или линейного устройства (объекта) с СНЭЭ. Номинальный ток системы определяется как максимальное значение тока заряда  $I_{з\max}$ , которое должно удовлетворять условию (для СТЭ постоянного тока):

$$I_{з\max} \leq \frac{U_{\max} - U_{\min}}{r_{к.с}}, \quad (7.8)$$

где:  $U_{\max}$  – максимальное напряжение на шинах объекта в режиме заряда, В;

$U_{\min}$  – минимальное допустимое напряжение на шинах объекта в режиме заряда по условиям пропуска поездов, В;

$r_{к.с}$  – сопротивление секции контактной сети от тяговой подстанции до поста секционирования, Ом.

После выбора значения  $I_{з \max}$  ток заряда  $I_з$  СНЭЭ для стабилизации напряжения на шинах объекта при  $U_{ш i} > U_{\min}$  в  $i$ -й момент времени (при  $U_{ПС i} \leq U_{\min}$  принимается, что  $I_з = 0$ ) определяется по формуле:

$$I_{з i} = \frac{U_{ш i} - U_{\min}}{U_{\max} - U_{\min}} \cdot I_{\max}, \quad (7.9)$$

где:  $U_{ш i}$  – фактическое напряжение на шинах объекта в  $i$ -й момент времени.

Падение напряжения в контактной сети при реализации зарядной характеристики первой ступени (в диапазоне токов от 0 до  $I_{ном}$ ) будет определяться наклоном зарядной характеристики. Доля падения напряжения от роста нагрузки, обусловленного реализацией зарядной характеристики, будет определяться напряжением на шинах, сопротивлением контактной сети, номинальным током и пороговыми напряжениями первой и второй степени зарядной характеристики:

$$\Delta U = U_{ш i} + r_{к.с} I_{з \max} \left( 1 - \frac{U_{ш i}}{U_{пор 2} - U_{пор 1}} \right), \quad (7.10)$$

где:  $U_{пор 1}$ ,  $U_{пор 2}$  – пороговые напряжения первой и второй ступени зарядной характеристики СНЭЭ.

Работа СНЭЭ для решения задачи поддержания уровня напряжения определяется выбором диапазонов порогового напряжения на шинах объекта для различных режимов [189]. В зависимости от изменения напряжения на шинах поста секционирования следует рассматривать следующие режимы работы СНЭЭ:

– «разряд» – включение при снижении напряжения до уровня  $U_{разр \text{ вкл}}$  (3000 В), выключение – при достижении уровня  $U_{разр \text{ выкл}}$  (3200 В);

– «ожидание» – при изменении напряжения на шинах поста секционирования в диапазоне соответствующих значений пороговых напряжений для режима «разряд» и «заряд» (ток СНЭЭ отсутствует: а) при нахождении напряжения в диапазоне от 3200 до 3250 В; б) при понижении напряжения от уровня 3200 до 3000 В);

– «заряд» – режим заряда при повышении уровня напряжения выше заданного.

Выбор зарядной и разрядной характеристик основан на нагрузочной характеристике контактной сети и содержит две основных области. К первой области регулирования относится область, в которой ток заряда (разряда) изменяется в зависимости от напряжения, ко второй – область, в которой ток заряда (разряда) равен номинальному значению тока в режиме заряда (разряда).

Наиболее часто рассматриваемыми видами НЭЭ для построения СНЭЭ на транспорте являются системы, построенные по различной топологии на основе литий-ионных аккумуляторов, и гибридные системы, в которых используются электрохимические и электрические виды НЭЭ. Различие характеристик литий-ионных аккумуляторов и суперконденсаторов позволяет использовать их для компенсации быстрых и медленных изменений напряжения и мощности. Максимальный ток в режимах заряда и разряда аккумуляторной батареи определяется типом аккумуляторов.

Для литий-железо-фосфатных аккумуляторов рекомендуемый изготовителями ток заряда изготовителей не должен превышать 50 % от допустимого тока разряда. Соотношение токов разряда и заряда относительно их номинальной емкости, определяемое как  $2C_n$  и  $1C_n$  соответственно, позволяет оценить необходимую мощность и энергоемкость системы. Так, для номинального тока заряда 500 А токи разряда составляют 1000 А, а мощность системы – 1,5/3,0 МВт соответственно, энергоемкость системы исходя из часового продолжительного режима принимается не менее 1500 кВт·ч.

Расчетная продолжительность эпизодов заряда и разряда существенно меньше одного часа. Обработка данных регистраторов параметров движения ЭПС различных серий и проведенные расчеты показывают, что средняя продолжительность эпизодов заряда в зависимости от участка железной дороги, как правило, не превышает 10 мин, разряда – 30 мин [159, 188]. Указанная продолжительность по эпизодам работы СНЭЭ в режиме заряда меньше, чем в режиме разряда, что является особенностью, присущей системам с электротяговой нагрузкой.

### *7.3.1 Влияние рекуперативного торможения на показатели работы систем накопления электроэнергии*

Проведение расчетов по определению энергетических показателей СТЭ и СНЭЭ выполняется на основе схем замещения, позволяющих реализовать рассмотренные выше режимы работы, как это показано в [188].

Результаты имитационного моделирования для двух межподстанционных зон двухпутного участка – МПЗ1 и МПЗ2 (на примере Свердловской железной дороги), полученные для условий пакетного пропуска поездов по расчетной схеме «Н-с-с-с» (Н – поезд наибольшей массы, с – поезд средней массы), позволяют построить график изменения напряжения на шинах смежных ТП и постов секционирования. Расчетными условиями для первого варианта расчетов является режим отсутствия рекуперативного торможения на рассматриваемых участках.

При расчетах степени заряженности принято, что коэффициент полезного действия СНЭЭ, включающей в себя преобразователи, составляет 0,9. Графики степени заряженности для СНЭЭ и соответствующие им зарядные характеристики, обеспечивающие формирование характеристик с преобладанием заряда, и графики изменения глубины разряда от номинальной энергоемкости в условиях отсутствия рекуперации приведены на рисунке 7.26.

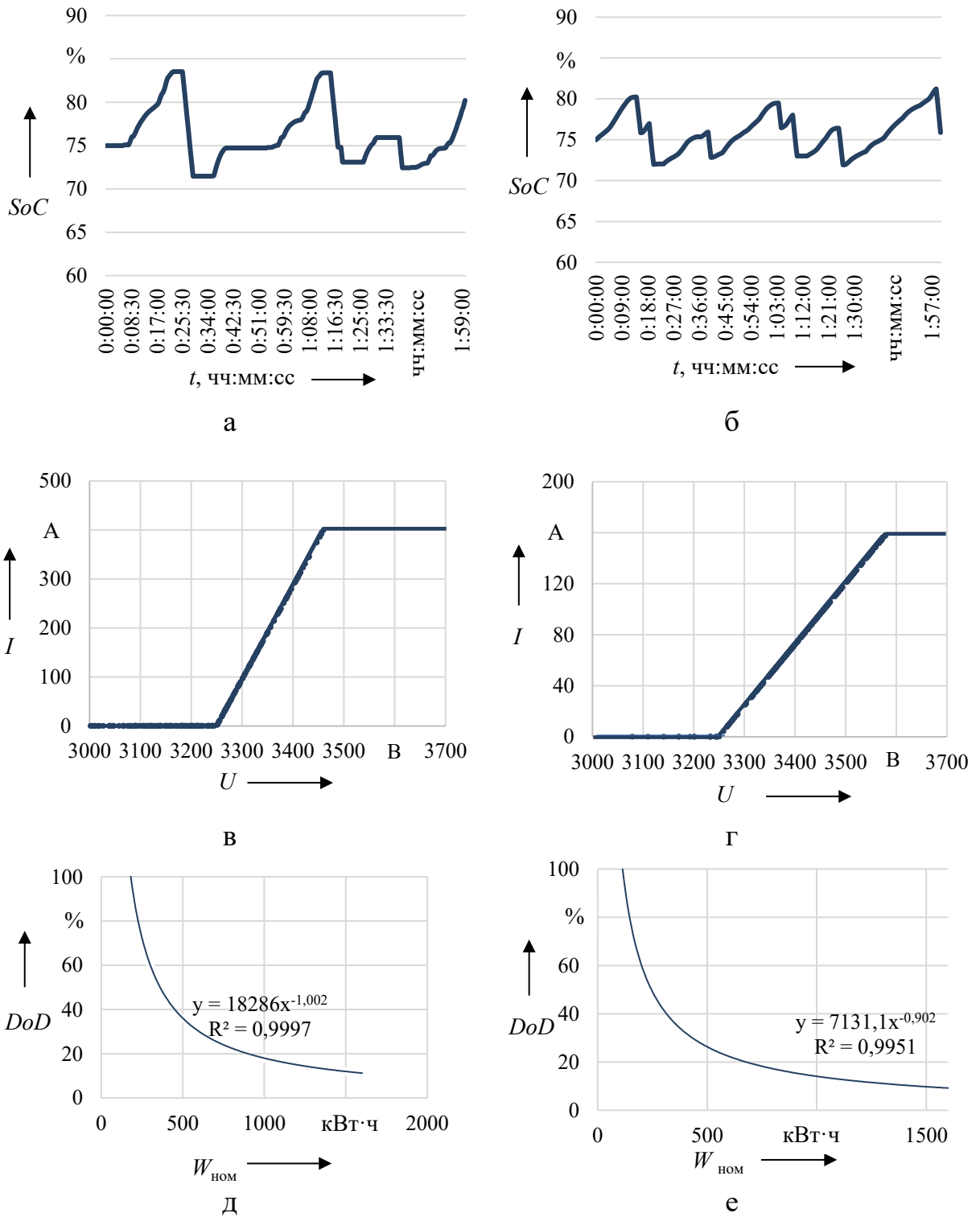


Рисунок 7.26 – Графики степени заряженности (а, б), зарядной характеристики (в, г), глубины разряда (д, е) для условий работы систем накопления электроэнергии на ПС1 и ПС2 соответственно (при отсутствии рекуперации)

Приведенные результаты расчета степени заряженности получены для условий, что начальная степень заряженности равна 75 %, а номинальная энергоемкость СНЭЭ составляет 1500 кВт·ч. Принятые исходные данные

позволяют определить глубину разряда  $DoD$ , которая для мест размещения на постах секционирования составит – для ПС1 – 12 %, для ПС2 – 9 %.

Для СНЭЭ в условиях работы на ПС1 максимальный уровень тока заряда составляет 400 А, для ПС2 – 160 А. Указанные уровни токов обеспечивают преобладание заряда в графике степени заряженности на двухчасовом расчетном интервале, а токи находятся в пределах допустимого тока заряда для аккумуляторной батареи с номинальной мощностью 1500 кВт. Графики изменения нагрузки СНЭЭ на постах секционирования ПС1 и ПС2 приведены на рисунке 7.27.

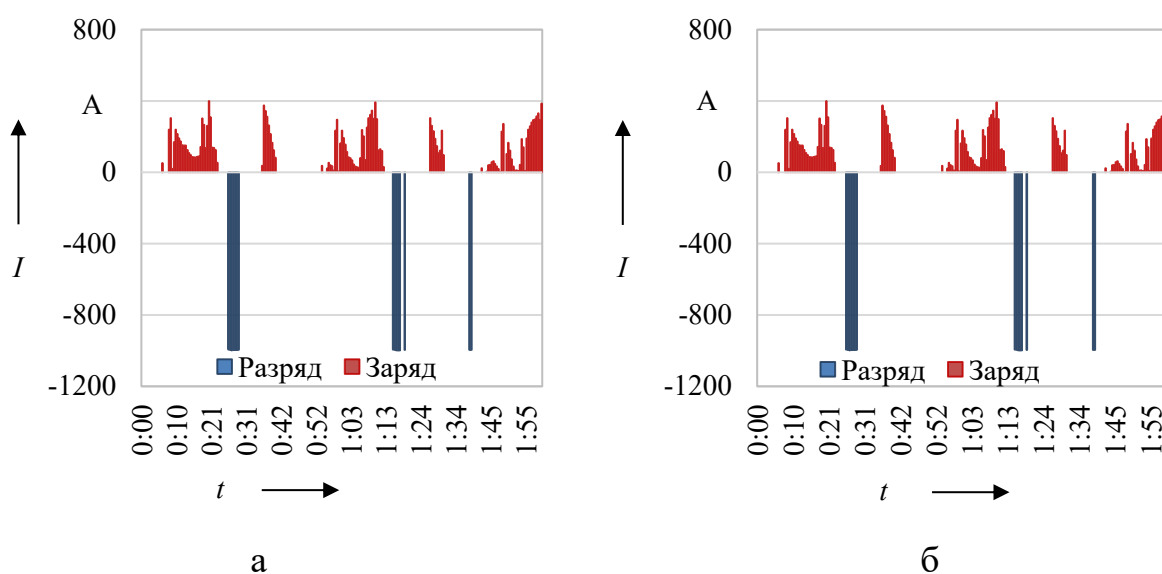


Рисунок 7.27 – График нагрузки систем накопления электроэнергии при работе на ПС1 (а) и ПС2 (б)

Основные статистические показатели для напряжения на шинах и нагрузки СНЭЭ представлены в таблице 7.6.

Применение рекуперативного торможения ЭПС в границах межподстанционных зон существенным образом изменяет условия работы СНЭЭ на постах секционирования. С целью оценки влияния рекуперативного торможения на условия работы СНЭЭ и напряжение в условиях применения или отсутствия рекуперативного торможения расчеты выполнены для соответствующих вариантов (результаты показаны на примере Транссиба на участке Свердловской железной дороги).

Имитационное моделирование взаимодействия СТЭ и ЭПС выполняется для аналогичных условий – при пакетном пропуске поездов по расчетной схеме «Н-с-с-с». Полученные результаты позволяют построить графики изменения степени заряженности и соответствующей зарядной характеристики, глубины разряда для условий работы СНЭЭ на рассматриваемых постах секционирования ПС1 и ПС2.

Таблица 7.6 – Статистические показатели работы СНЭЭ

Значение	Показатель					
	с рекуперацией		без рекуперации		Изменение тока и напряжения	
	$U, В$	$I, А$	$U, В$	$I, А$	$\Delta U, \%$	$\Delta I, \%$
<b>ПС1</b>						
мин	3013,0	0,0	3002,0	0,0	0,4	0,0
макс	3846,0	996,0	3460,0	999,0	10,0	-0,3
среднее	3362,0	16,5	3237,7	62,0	3,7	-275,8
среднеквадратичное отклонение	160,5	127,4	111,7	241,2	30,4	-89,3
<b>ПС2</b>						
мин	3059,0	0,0	3079,0	0,0	-0,7	0,0
макс	3854,0	1004,0	3579,0	1005,0	7,1	-0,1
среднее	3451,5	49,5	3410,2	71,0	1,2	-43,4
среднеквадратичное отклонение	145,0	208,9	98,5	244,3	32,1	-16,9

Сравнение графиков нагрузки СНЭЭ на ПС1 и ПС2 в условиях применения рекуперативного торможения в условиях отсутствия рекуперативного торможения показывает снижение количества эпизодов и продолжительности работы СНЭЭ в рамках расчетного интервала.

В большинстве случаев (свыше 90 %) ток разряда СНЭЭ находится в диапазоне значений 0 до 100 А, в остальных случаях расчета ток разряда принимает значения до 1000 А (см. таблицу 7.6). Применительно к работе системы на ПС1 среднее напряжение на шинах увеличивается (на 3,7 %), средний ток устройства падает более чем в два раза. Аналогичное изменение наблюдается при работе системы на ПС2 – наблюдается увеличение среднего

напряжения на шинах (на 1,2 %) и снижение среднего тока устройства (на 43,4 %).

Расчетные графики изменения степени заряженности, соответствующие им зарядные характеристики, изменение глубины разряда в рамках расчетного периода времени (2 часа) приведены на рисунке 7.28.

Изменение условий работы СНЭЭ на ПС1 заключается в снижении уровня цикличности в рамках расчетного времени и существенном снижении тока заряда при снижении напряжения до уровня напряжения холостого хода. Для ПС2 для СНЭЭ улучшаются условия по поддержанию степени заряженности – в рамках расчетного периода степень заряженности возрастает.

Изменение глубины разряда позволяет определить расчетное значение номинальной энергоемкости СНЭЭ для ПС1 и ПС2 для обеспечения условий устойчивой работы различных НЭЭ электрохимического вида.

Применение рекуперативного торможения приводит к падению уровня номинальной энергоемкости (для расчетных условий максимальный ток разряда принят равным 1000 А, пороговое напряжение разряда принято 3000 В), для ПС1 указанный параметр падает с уровня 1200 до 400 кВт·ч, для ПС2 – с уровня 900 до 700 кВт·ч (рисунок 7.28), т.е. более чем на 20 %. Графики нагрузки СНЭЭ при работе на ПС1 и ПС2 приведены на рисунке 7.29.

Условия заряда СНЭЭ на участках применения рекуперативного торможения изменяются – требуется увеличение уровня тока заряда при повышении напряжения свыше уровня напряжения холостого хода (3600 В).

В эпизодах рекуперативного торможения заряд СНЭЭ выполняется максимальными токами, а при понижении напряжения ниже уровня холостого хода смежных подстанций уровень тока падает и изменяется в соответствии с заданной зарядной характеристикой. Это позволяет снизить потери напряжения в нагрузочном режиме и обеспечить безусловный прием энергии рекуперации при повышении напряжения.

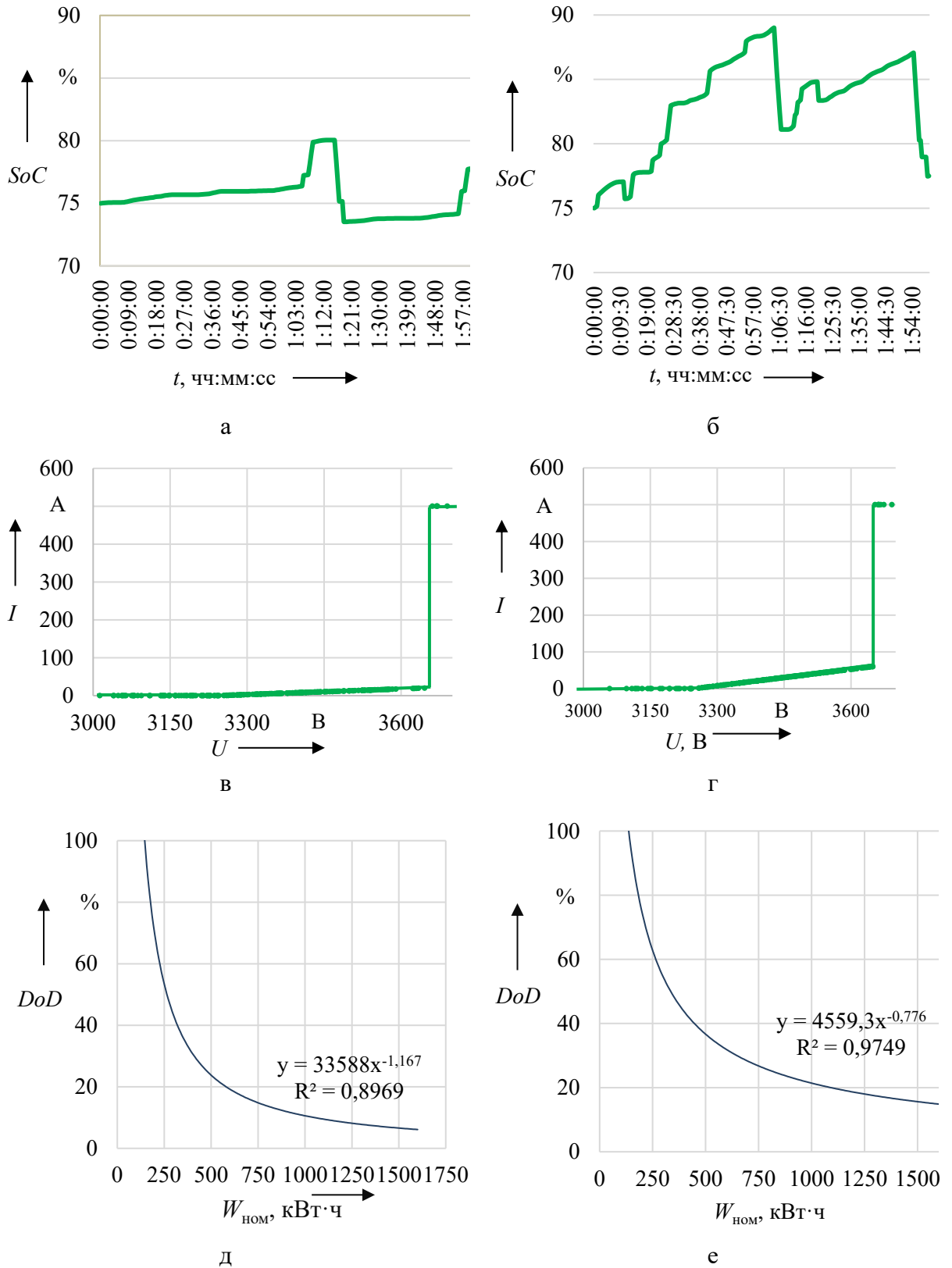


Рисунок 7.28 – График степени заряженности (а, б), зарядной характеристики (в, г), глубины разряда (д, е) для условий работы систем накопления электроэнергии на ПС1 и ПС2 соответственно в условиях рекуперативного торможения

Максимальные токи разряда для СНЭЭ на ПС1 и ПС2 составляют 1000 А, максимальные токи заряда для первой ступени – 20 и 60 А соответственно, второй – 500 А.

Сравнение расчетных графиков электрической нагрузки, степени заряженности и глубины разряда позволяет сделать вывод о том, что в условиях применения рекуперативного торможения на участке облегчаются условия эксплуатации СНЭЭ в части снижения глубины разряда и соответствующего изменения характеристик заряда и разряда, позволяющих увеличить эксплуатационный ресурс работы НЭЭ электрохимического вида.

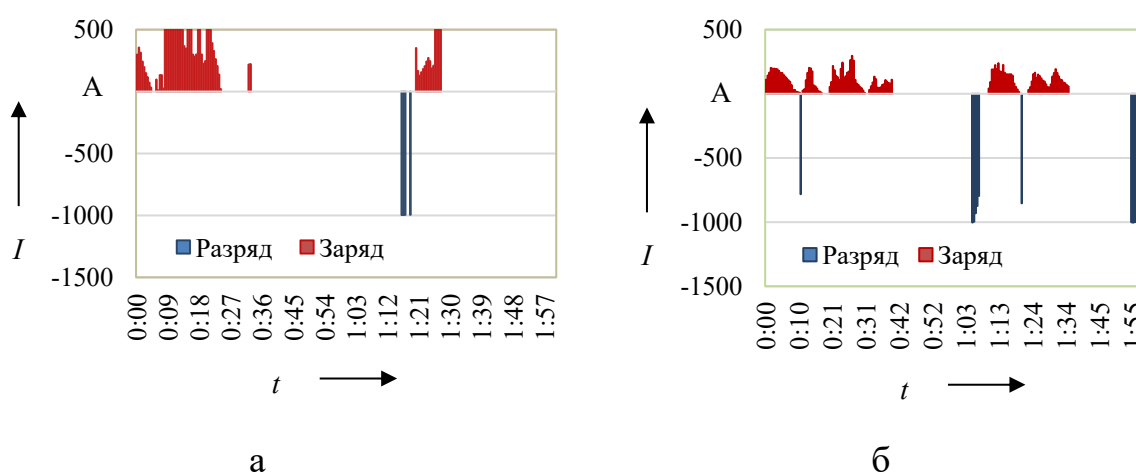


Рисунок 7.29 – График нагрузки систем накопления для условий работы на ПС1 (а) и ПС2 (б) (при применении рекуперативного торможения)

Потери напряжения в контактной сети определяются ее электрическим сопротивлением. В расчетах использована характеристика участка Свердловской железной дороги. В границах рассматриваемых зон МПЗ1 и МПЗ2 применяется контактная подвеска с усиливающим проводом – 2МФ100+М-120+2А-185. Удельное сопротивление подвески для двухпутного участка составляет в данном случае 18,45 мОм. Расположение поста секционирования от подстанции слева до ПС1 составляет – 13,9 км, от подстанции слева до ПС2 – 10,5 км. Соответствующие расстояниям сопротивления секций контактной сети участка составляют – 193,73 мОм и 256,46 мОм.

Напряжение на шинах поста секционирования при реализации заряда от смежных подстанций уменьшается от уровня базового варианта (без СНЭЭ) за

счет возникновения соответствующего падения напряжения и определяется по формуле:

$$U_{\text{ш}} = U_{\text{ш}}^{\text{расч}} - i_3 \cdot r_0 \cdot l, \quad (7.11)$$

где:  $U_{\text{ш}}^{\text{расч}}$  – расчетный уровень напряжения на шинах поста секционирования без учета реализации заряда по зарядной характеристике, В;

$i_3$  – ток заряда, определяемый по зарядной характеристике в зависимости от уровня напряжения на шинах поста секционирования, А;

$r_0$  – удельное сопротивление контактной подвески, Ом/км;

$l$  – протяженность контактной сети от смежной тяговой подстанции до поста секционирования, км.

Поскольку напряжение холостого хода смежных подстанций в расчетах принимается одинаковым, то отношение токов смежных подстанций при заряде обратно пропорционально сопротивлению плеч питания до поста секционирования:

$$\frac{i_1}{i_2} = \frac{r_2}{r_1} \Rightarrow \text{при } i_3 = i_1 + i_2 : i_1 = \frac{r_2}{r_1} \cdot i_2 = \frac{r_2}{r_1} \cdot (i_3 - i_1), \quad (7.12)$$

тогда

$$i_1 = \frac{r_2}{r_1 + r_2} \cdot i_3, \quad (7.13)$$

где:  $r_1$  и  $r_2$  – сопротивления секций контактной сети от ТП слева и справа от поста секционирования соответственно.

С учетом (6.1) напряжение на шинах поста секционирования определяется следующим образом:

$$U_{\text{ПС}} = U_{\text{ПС}}^{\text{расч}} - i_1 \cdot r_1 = U_{\text{ПС}}^{\text{расч}} - \frac{r_1 \cdot r_2}{r_1 + r_2} \cdot i_3. \quad (7.14)$$

где:  $U_{\text{ПС}}^{\text{расч}}$  – расчетное значение напряжения на шинах поста секционирования, определенное без учета тока заряда.

В общем случае распределение тока заряда между смежными подстанциями осуществляется в зависимости от сопротивления тяговой сети и уровня напряжения на шинах. Схема замещения межподстанционной зоны, содержащей СНЭЭ (источник тока), для определения напряжения на шинах поста секционирования приведена на рисунке 7.30.

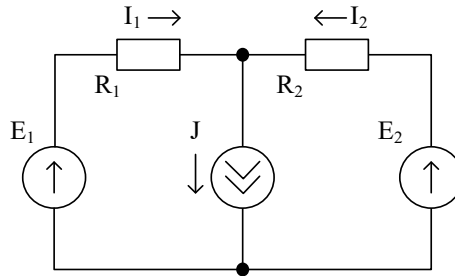


Рисунок 7.30 – Схема замещения межподстанционной зоны

Определение токов подстанций для схемы замещения, приведенной на рисунке 7.30, выполняется на основе решения системы уравнений:

$$\begin{cases} E_1 - E_2 = I_1 R_1 - I_2 R_2 \\ J = I_1 + I_2 \end{cases} \quad (7.15)$$

Решение системы уравнений (6.5) позволяет определить токи в ветвях плеч подстанций и для тока  $I_1$  справедливо выражение:

$$I_1 = \frac{E_1 - E_2}{R_2(k+1)} + \frac{J}{k+1} \quad (7.16)$$

где:  $k$  – соотношение сопротивлений ветвей:

$$k = \frac{R_1}{R_2} \quad (7.17)$$

Напряжение на шинах объекта подключения СНЭЭ (источника тока) определяется путем корректировки напряжения, определенного с учетом токовой нагрузки ЭПС и падения напряжения:

$$U' = U - I_1 R_1 \quad (7.18)$$

Сравнение напряжений для условий заряда СНЭЭ при работе на посту секционирования ПС1 показывает, что частота наблюдения напряжения выше уровня напряжения холостого хода (в диапазоне от 3600 до 4000 В) существенно снижается, для ПС2 – аналогично снижается в диапазоне от 3600 до 4000 В и увеличивается в диапазоне ниже 3600 В, что положительно сказывается на условиях применения рекуперативного торможения.

Режим заряда СНЭЭ на рассмотренных постах секционирования позволяет снизить долю времени, в течение которого напряжение на шинах поста секционирования выше напряжения холостого хода при применении рекуперативного торможения. При отсутствии рекуперативного торможения основной эффект работы проявляется в уменьшении времени, в течение которого напряжение на шинах находится в диапазоне минимальных напряжений. В обоих случаях наблюдается эффект стабилизации напряжения на шинах поста секционирования (рисунок 7.31).

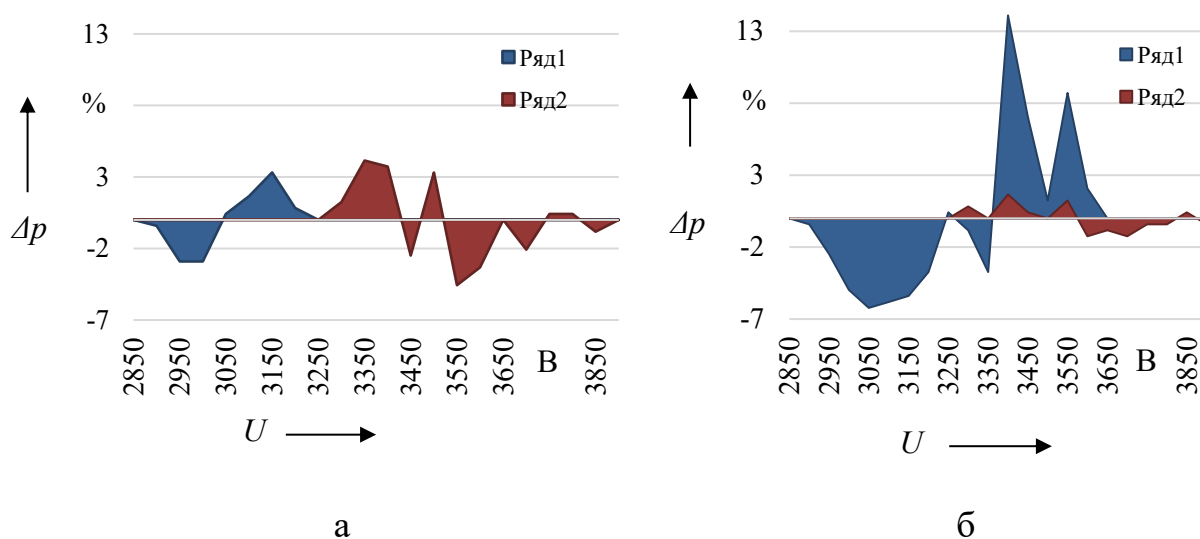


Рисунок 7.31 – Изменение частот наблюдения напряжения для случаев отсутствия (ряд 1) и применения (ряд 2) рекуперативного торможения в условиях работы системы накопления на ПС1 (а) и ПС (б)

Результаты имитационного моделирования в различных условиях на примере размещения СНЭЭ на постах секционирования позволяют выделить следующие эффекты влияния рекуперативного торможения на условия работы СНЭЭ:

- сокращение количества циклов работы СНЭЭ в границах расчетного интервала, за счет повышения уровня напряжения;
- снижение уровня требуемой номинальной энергоемкости СНЭЭ и уровня токов заряда от смежных ТП;
- уменьшение глубины разряда СНЭЭ, оказывающей влияние на ресурс работы накопителей электрохимического вида.

Для условий отсутствия рекуперативного торможения основной эффект от работы СНЭЭ в СТЭ проявляется в повышении напряжения в диапазоне максимальных значений нагрузки, для условий применения рекуперативного торможения – в понижении напряжения на шинах в диапазоне его максимальных значений. Применение рекуперативного торможения оказывает влияние на вид зарядной характеристики, формируемой из условия преобладания заряда в графике степени заряженности на расчетном интервале, позволяет увеличить токи во второй области зарядной характеристики и снизить потери напряжения при реализации заряда на первой ступени от смежных ТП. Снижение интенсивности рекуперации обуславливает необходимость адаптации угла наклона зарядной характеристики первой ступени в область, соответствующую условиям отсутствия рекуперации.

### *7.3.2 Разработка методики оценки влияния систем накопления электроэнергии на показатели работы системы тягового электроснабжения*

#### 1. Постановка задачи, сбор исходных данных.

В зависимости от факторов, лимитирующих пропускную способность, решается задача по повышению пропускной и провозной способности за счет улучшения одного или нескольких показателей нагрузочной способности системы тягового электроснабжения.

## 2. Формирование тяговых расчетов.

Данные о параметрах эксплуатируемых поездов и их следовании по участку позволяют определить тяговую нагрузку с учетом всех режимов работы ЭПС. Расчеты выполняются с учетом типов профилей пути.

## 3. Выполнение электрических расчетов

На основе результатов тяговых расчетов и данных о способах организации движения поездов формируется тяговая нагрузка системы тягового электроснабжения, выполняется расчет энергетических показателей, показателей нагрузочной, пропускной и провозной способности для базового варианта.

## 4. Расчеты для мест размещения СНЭЭ

Изменение имитационной модели СТЭ путем рассмотрения различных вариантов размещения СНЭЭ используется для выполнения расчетов, в которых основные параметры (энергоемкость, мощность, настройки режимов заряда и разряда и т.д.) изменяются в широком диапазоне. Полученные результаты позволяют сформировать базу данных изменения энергетических показателей, показателей нагрузочной, пропускной и провозной способности в зависимости от параметров и характеристик СНЭЭ.

## 5. Формирование зависимости изменения показателей СТЭ

Полученные результаты позволяют на основе регрессионного анализа (множественной регрессии) или аппарата нейронных сетей сформировать аналитические выражения для определения энергетических показателей, показателей нагрузочной, пропускной и провозной способности в зависимости от параметров и характеристик СНЭЭ.

## 6. Оценка технической эффективности вариантов исполнения СНЭЭ

На данном этапе определяются минимальные требования к энергетическим параметрам и характеристикам СНЭЭ для решения поставленных задач.

Основные этапы расчетов по разработанной методике оценки влияния СНЭЭ на показатели работы СТЭ описываются с помощью алгоритма расчетов, приведенного на рисунке 7.32.



Рисунок 7.32 – Алгоритм оценки влияния систем накопления электэнергии на показатели работы системы тягового электроснабжения

#### 7.4 Анализ эффективности устройств накопления электроэнергии в системе тягового электроснабжения и на электроподвижном составе

Существующие исследования отечественных и зарубежных авторов показывают [245, 250, 330, 221], что по критерию экономии электроэнергии вариант размещения СНЭЭ на борту ЭПС является более предпочтительным. Однако, по технико-экономическим оценкам с учетом количества и суммарной энергоемкости требуемых систем данный вариант уступает варианту размещения СНЭЭ в СТЭ [27, 159].

Исследования, выполняемые в области выбора вида НЭЭ, показали их отдельные недостатки и привели к обоснованию гибридных СНЭЭ,

использующих различные виды, например, аккумуляторные батареи и суперконденсаторы, в транспортных системах [261, 323, 353, 354]. В настоящее время существуют различные подходы к определению параметров СНЭЭ, выбору места их размещения, разрабатываемых как зарубежными [243, 252, 253, 259, 370], так и отечественными исследователями [25, 28, 31, 32, 146, 147, 149], основанных на различных моделях источников [232 – 264]. Исследования в области применения СНЭЭ для тяговой энергетики железнодорожного транспорта показывают имеющийся технический результат, заключающийся в повышении энергетической эффективности и повышении пропускной способности на межподстанционных зонах [144, 153, 320, 321, 338].

Необходимость сравнения вариантов размещения СНЭЭ требует выбора критериев, связанных с технико-экономической оценкой. В качестве критериев могут рассматриваться следующие параметры: суммарная номинальная энергоемкость; суммарная установленная мощность; количество устанавливаемых СНЭЭ; повышение энергетических показателей СТЭ (напряжение на токоприемнике, загрузка силового оборудования, температура нагрева элементов и др.); повышение энергетической эффективности работы ЭПС или СТЭ; суммарная стоимость СНЭЭ; дисконтированный срок окупаемости или чистый дисконтированный доход и др.

При рассмотрении вариантов применения СНЭЭ основными являются вопросы повышения пропускной и провозной способности. В качестве косвенного эффекта рассматривается повышение энергетической эффективности работы тягового электроснабжения, резервирование и повышение качества электроэнергии и др. При достижении заданного уровня целевых показателей конкурирующих вариантов сравнение выполняется по затратной части проектов, связанной с суммарной номинальной энергоемкостью СНЭЭ, определяющих бóльшую часть капитальных затрат. В указанном случае выбор предпочтительного варианта размещения осуществляется по критерию минимальной номинальной энергоемкости с

условием обеспечения заданного уровня пропускной способности или достижения необходимого уровня.

Сравнительная оценка эффективности применения СНЭЭ зависит от условий формирования электротяговой нагрузки и может существенно отличаться для условий преобладания пассажирского или грузового движения, интенсивного движения или движения на малодеятельных участках, одно- и двухпутных участках и т.д.

Различия в мощности электропоездов и электровозов и частоте смены режимов их работы обуславливают рассмотрение работы СНЭЭ отдельно для каждого вида ЭПС. Наибольшие различия в мощности и частоте смены режимов наблюдаются в условиях организации пригородного сообщения с частыми остановками и грузового движения без остановок на участках с горным типом профиля пути. В качестве примера можно привести профили нагрузки электропоезда серии ЭС2Г (Ласточка) при движении на МЦК Московской железной дороги и профиль нагрузки грузового поезда с локомотивом серии 2ЭС6 на участке Свердловской железной дороги с IV типом профиля пути, СТЭ постоянного тока участков на Московской и Октябрьской железных дорогах.

Перспективными областями применения СНЭЭ являются участки с преобладанием пассажирского движения (например, МЦК) и грузового движения (большинство участков сети дорог со смешанным движением).

#### *Участки с преобладанием пассажирского движения*

Для определения кумулятивного объема электроэнергии СНЭЭ на ЭПС с учетом рекуперации используются данные измерений напряжения на токоприемнике, токи в режиме рекуперативного торможения и режиме тяги. Ток СНЭЭ в режиме разряда для режима тяги ЭПС определяется по соотношению объемов энергии рекуперации и тягового электропотребления. В этом случае ток СНЭЭ должен удовлетворять неравенству:

$$i_{\text{ТСНЭЭ}} \leq i_{\text{Т}} \cdot \frac{\overline{W}_{\text{рек}}}{\overline{W}_{\text{Т}}}, \quad (7.19)$$

где:  $\overline{W}_{\text{рек}}$  и  $\overline{W}_{\text{Т}}$  – средние значения объемов электроэнергии в режимах рекуперации и тяги для поездов соответственно;

$i_{\text{Т}}$  – ток, регистрируемый в режиме тяги на ЭПС.

Работа СНЭЭ при выравнивании графика нагрузки предусматривает включение в режим разряда при условии превышения уровня тока тягового режима, свыше заданного  $I_{\text{вкл}}$ :

$$i_{\text{Т}} \geq I_{\text{вкл}}. \quad (7.20)$$

Для бортовых СНЭЭ решение задач стабилизации напряжения на токоприемнике при питании от контактной сети представляется нецелесообразным, поскольку связано с режимом работы СТЭ и повлечет за собой значительное увеличение энергоемкости.

Введение условия включения в режим разряда позволяет определить для расчетных режимов степень заряженности  $SoC$  и глубину разряда  $DoD$  НЭЭ. При определении суммарной энергоемкости бортовых систем электропоездов, эксплуатируемых в границах участков оборота, следует исходить из времени следования по маршруту и заданного межпоездного интервала. При допущении о том, что время следования в четном и нечетном направлениях одинаково, суммарная номинальная энергоемкость устройств для эксплуатируемого парка определяется по формуле:

$$W_{\text{сум}} = 2 \cdot \left( \frac{t_{\text{марш}}}{t_{\text{межп}}} + 1 + n_{\text{зап}} \right) \cdot W_{\text{ном СНЭЭ}}, \quad (7.21)$$

где:  $n_{\text{зап}}$  – количество электропоездов запаса, оснащаемых СНЭЭ;

$t_{\text{марш}}$ ,  $t_{\text{межп}}$  – средние продолжительность следования по маршруту и межпоездной интервал соответственно.

При размещении СНЭЭ в СТЭ энергоемкость определяется для варианта, в котором суммарная энергоемкость, отвечающая решению задач по повышению пропускной способности и показателей нагрузочной способности, будет минимальна. При этом решается два вида задач: первая – выбор условий работы для заданной энергоемкости СНЭЭ, определяемой пороговыми напряжениями включения, регулированием токов, степени заряженности и глубины разряда; вторая – выбор энергоемкости для заданных условий и глубины разряда.

Исходными данными для оценки являются данные измерений тока и напряжения электропоезда серии ЭС2Г за период прохождения кольцевого маршрута МЦК полной протяженностью (54 км). Среднее время прохождения одного кольцевого маршрута для электропоездов составляет около 90 мин. График кумулятивного объема энергии для электропоезда серии ЭС2Г при следовании по МЦК приведен на рисунке 7.33, а.

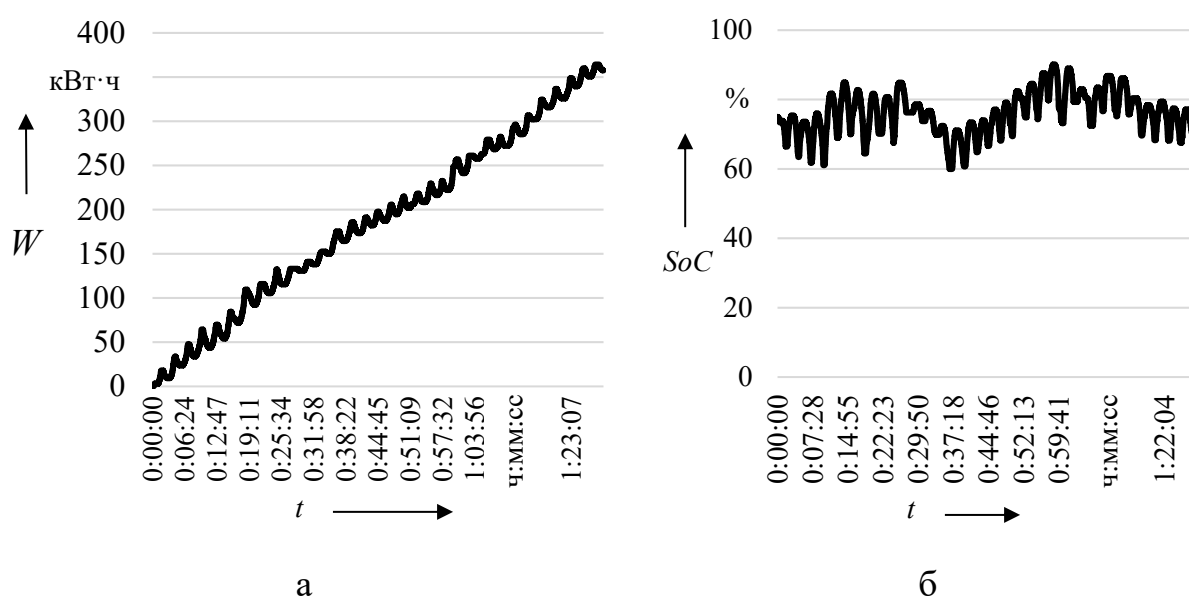


Рисунок 7.33 – Графики изменения объема электроэнергии на тягу накоплением (а) и степени заряженности (б) для электропоезда серии ЭС2Г

Доля энергии рекуперации относительно объема тягового электропотребления достигает 0,49, в графике преобладает разряд. Наблюдающаяся цикличность связана с чередованием режимов по схеме «стоянка-разгон-торможение-остановка». Применительно к рассматриваемому

случаю кумулятивный объем энергии за оборот по кольцу для электропоезда составляет 350 кВт·ч. По результатам моделирования для рассматриваемой поездки получен график степени заряженности, при построении которого принято, что включение СНЭЭ осуществляется при тяговом токе свыше уровня 65 А, а начальный уровень  $SoC$  равен 75 %.

В рассматриваемом случае глубина разряда  $DoD$  не превышает 30 % в случае увеличения номинальной энергоемкости для единицы ЭПС до уровня 100 кВт·ч и выше (таблица 7.7), что положительно сказывается на ресурсе работы НЭЭ электрохимического вида. Применение суперконденсаторов, не имеющих ограничений по глубине разряда, позволяет снизить номинальную энергоемкость до уровня 30 кВт·ч.

Таблица 7.7 – Параметры и условия работы СНЭЭ для условий интенсивного городского движения МЦК

Размещение	$SoC$ , %	$DoD$ , %	$W_{ном}$ , кВт·ч	$P_z$ , МВт	$P_p$ , МВт
ЭПС (ЭС2Г)	78(76)	100 (30)	30 (100)	2,2	1,7
СТЭ (пасс. дв)	47(49)	100 (30)	1100 (4000)	6,7	3,4

Примечание: без скобок указаны результаты расчетов для электрического вида, в скобках для электрохимического вида накопителей электроэнергии

Регулирование режимов работы СНЭЭ на посту секционирования осуществляется по уровню напряжения. Выполненные расчеты при пороговых напряжениях режима заряда и разряда 3600 и 3550 В соответственно по определению номинальной энергоемкости СНЭЭ показывают, что для обеспечения глубины разряда не более 30 % (рисунок 7.34, а) номинальная энергоемкость должна составлять 4000 кВт·ч (см. таблица 7.7). Применение суперконденсаторов позволяет снизить требуемую номинальную энергоемкость до 1100 кВт·ч (рисунок 7.34, б). Для стационарных условий размещения СНЭЭ необходимо ограничивать мощность заряда и разряда или снижать уровень начальной степени заряженности (для рассматриваемого случая – понижение с 75 до 50 %) поскольку увеличение начальной степени заряженности приводит к потере части избыточной энергии рекуперации.

Результаты расчетов позволяют оценить суммарную энергоемкость для условий МЦК. Вариант, предполагающий оснащение электропоездов бортовыми СНЭЭ характеризуется суммарной энергоемкостью на уровне 1560 кВт·ч (для электрического вида НЭЭ):

$$W_{\text{сум.ЭПС}} = 2 \cdot \left( \frac{90}{4} + 1 + 2 \right) \cdot 30 \approx 1560 \text{ кВт}\cdot\text{ч.}$$

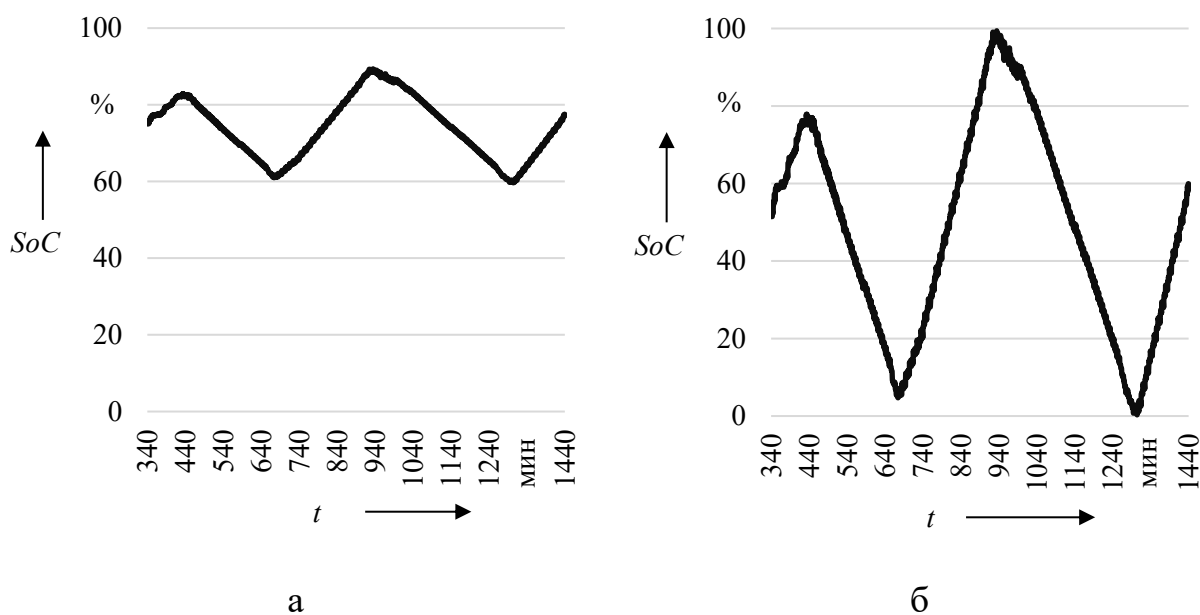


Рисунок 7.34 – Графики степени заряженности системы накопления при работе на посту секционирования: (а) –  $DoD = 30\%$ ; (б) –  $DoD = 100\%$

Оснащение СТЭ устройствами накопления электроэнергии на четырех существующих постах секционирования МЦК является избыточным, но исходя из допущения применения на всех постах суммарная энергоемкость (для электрического вида НЭЭ) составит около 4400 кВт·ч:

$$W_{\text{сум.СТЭ}} \approx 4 \cdot 1100 = 4400 \text{ кВт}\cdot\text{ч.}$$

Соотношение энергоемкости СНЭЭ для первого и второго рассмотренных вариантов составляет  $\frac{1}{3}$ , т. е. по данному критерию применение бортовых систем на МЦК является предпочтительным перед стационарным размещением в СТЭ.

Особенностью рассмотренного участка является малая протяженность (менее 100 км), отсутствие грузового движения и высокая частота графиковых остановок. Изменение отмеченных условий приводит к другим результатам, в частности, при решении данной задачи на полигонах с большой протяженностью и преобладанием грузового движения.

#### *Участки с преобладанием грузового движения*

Ввиду различий в условиях вождения и характеристиках грузового и пассажирского ЭПС энергетические показатели СНЭЭ на борту ЭПС будут отличаться. Показатели работы СНЭЭ для грузового локомотива рассматриваются на примере поездки электровоза серии 2ЭС6 с поездом массой 6000 т по участку Свердловской железной дороги с IV типом профиля пути. Ток включения СНЭЭ на разряд в тяговом режиме принимается равным 100 А.

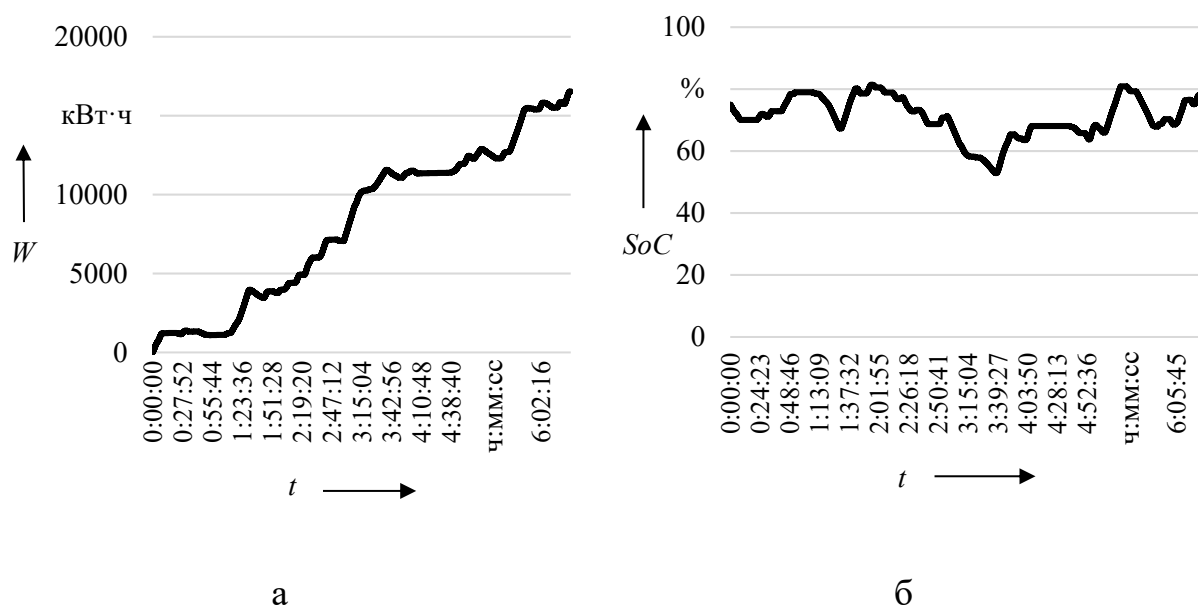


Рисунок 7.35 – Графики объема электроэнергии на тягу накоплением (с учетом рекуперативного торможения) (а) и степени заряженности (б) для локомотива серии 2ЭС6

Доля энергии рекуперации для грузовых локомотивов в среднем не превышает 30 %, в отличие от электропоездов, эксплуатирующихся в пригородном и городском движении, где указанная доля достигает 50 %. Для рассматриваемой поездки доля энергии рекуперации составляет 16 %, а

уровень энергоемкости для обеспечения приема энергии рекуперации в полном объеме, обеспечивающий глубину разряда не более 30 % – 4000 кВт·ч при начальной степени заряженности 75 %.

Графики объема электроэнергии на тягу накоплением для локомотива серии 2ЭС6 и степени заряженности для рассматриваемого случая приведены на рисунке 7.35.

Регулирование тока заряда выполняются в соответствии со следующими условиями:

$$I_z(U_{\text{ш}}) = \begin{cases} 0, U_{\text{ш}} < U_{\text{min}} \\ k_{\text{zx}}(U_{\text{ш}} - U_{\text{min}}), U_{\text{min}} \leq U_{\text{ш}} \leq \frac{I_{\text{max}}}{k_{\text{zx}}}(U_{\text{ш}} - U_{\text{min}}), \\ I_{\text{zmax}}, U_{\text{ш}} > \frac{I_{\text{max}}}{k_{\text{zx}}}(U_{\text{ш}} - U_{\text{min}}) \end{cases} \quad (7.22)$$

где:  $k_{\text{zx}}$  – коэффициент линейной характеристики тока заряда;

$U_{\text{ш}}, U_{\text{min}}$  – напряжение на шинах и минимальное напряжение для перехода в режим заряда;

$I_{\text{max}}$  – максимальный ток заряда.

Коэффициент  $k_{\text{zx}}$  определяется из условия сохранения степени заряженности СНЭЭ. Рост коэффициента  $k_{\text{zx}}$  зарядной характеристики ограничен нагрузочной характеристикой контактной сети и зависит от режима питания межподстанционной зоны.

На примере участка Волховстрой – Бабаево Октябрьской железной дороги получены характеристики СНЭЭ для коэффициента  $k_{\text{zx}} = 1,93$  и максимальной глубины разряда 30 % (таблица 7.8).

Особенностью пригородных и городских перевозок является относительно небольшая протяженность полигонов обращения ЭПС, в то время как для грузового движения она может достигать около 2000 км. На основе усредненных характеристик (протяженность участков оборота локомотивных бригад на уровне 300 км, техническая скорость в четном и

нечетном направлениях – 50 км/ч, средний межпоездной интервал в грузовом движении – 20 мин, количество локомотивов в запасе – 2) оценка суммарной энергоемкости бортовых СНЭЭ для данного участка определяется следующим образом:

$$W_{\text{сум}} = 2 \cdot \left( \frac{360}{20} + 1 + 2 \right) \cdot 1150 \approx 48300 \text{ кВт}\cdot\text{ч.}$$

Таблица 7.8 – Параметры и условия работы СНЭЭ для грузового движения

Размещение	$S_{oC}$ , %	$DoD$ , %	$W_{\text{ном}}$ , кВт·ч	$P_z$ , МВт	$P_p$ , МВт
ЭПС (2ЭС6)	63 (71)	100 (30)	1150 (4000)	1,7	2,5
СТЭ (груз. дв)	56 (48)	100 (30)	225 (750)	1,5	3,0

При допущении о том, что СНЭЭ в СТЭ располагаются в каждой межподстанционной зоне, а средняя протяженность межподстанционной зоны составляет около 15 км можно оценить суммарную энергоемкость СНЭЭ:

$$W_{\text{сум}} \approx \frac{300}{15} \cdot 225 = 4500 \text{ кВт}\cdot\text{ч.}$$

Суммарная энергоемкость СНЭЭ для условий применения на участках с преобладанием грузового движения для первого и второго вариантов соотносится как  $10/1$ , т. е. по данному критерию применение стационарных СНЭЭ является предпочтительным перед бортовыми СНЭЭ на ЭПС.

Сравнение вариантов применения СНЭЭ с целью повышения пропускной способности железных дорог и энергетической эффективности СТЭ по критерию суммарной энергоемкости основано на показателях электротяговой нагрузки и условиях эксплуатации ЭПС, оказывающих влияние на конечную степень заряженности, глубину разряда, необходимый ток заряда и разряда и характеристики, мощность и энергоемкость СНЭЭ. Участки железных дорог с преобладанием пассажирского и грузового движения несущественно отличаются по мощности бортовых и стационарных

систем, а требуемые номинальные энергоемкости СНЭЭ отличаются в три и десять раз соответственно. Применение видов НЭЭ без ограничений к глубине разряда (до 100 %) позволяет существенно сократить требуемую номинальную энергоемкость систем, которая для бортовых СНЭЭ ЭПС близка к целевому диапазону 30 – 1150 кВт·ч (электропоездов – грузовых локомотивов), для стационарных систем – к целевому диапазону 225 – 1100 кВт·ч (участки с преобладанием грузового – пассажирского движения). Регулирование тока заряда и разряда в зависимости от напряжения на шинах позволяет поддерживать уровень степени заряженности и глубину разряда в заданном диапазоне. Применение Li-ion аккумуляторов с ограничением глубины разряда до 30 % требует увеличения номинальной энергоемкости СНЭЭ до целевых диапазонов 100 – 4000 кВт·ч для ЭПС и 750 – 4000 кВт·ч для СТЭ.

#### 7.5 Выводы по седьмой главе

По результатам, полученным при решении задач прогнозирования пропускной и провозной способности на основе разработанных моделей при внедрении СНЭЭ, можно сделать следующие выводы.

Показано влияние СНЭЭ на показатели нагрузочной способности СТЭ, межпоездные интервалы, пропускную и провозную способность на участке (на примере железных дорог).

Выполнена оценка влияния пороговых напряжения режимов заряда и разряда на уровень среднего напряжения на шинах постов секционирования, ток нагрузки СНЭЭ, коэффициенты нагрузки выпрямителей смежных подстанций, максимальную температуру нагрева проводов контактной сети на межподстанционных зонах, минимальное напряжение на токоприемнике в межподстанционных зонах, суммарные объемы энергии.

Показано влияние порогового напряжения разряда СНЭЭ на минимальный межпоездной интервал, пропускную и провозную способность в границах межподстанционных зон

Определены основные параметры СНЭЭ при решении задачи повышения пропускной и провозной способности. Выполнена оценка эффективности работы СНЭЭ при снижении номинальной энергоемкости по критерию снижения эффективности использования энергии рекуперации.

Разработаны модели изменения провозной способности для межподстанционных зон на основе регрессионного анализа и аппарата искусственных нейронных сетей. Основными факторами, оказывающими влияние на пропускную и провозную способность в границах межподстанционной зоны, являются: пороговое напряжение, ток заряда, номинальные энергоемкость и мощность; дополнительными – суточные объемы энергии СНЭЭ, соответствующие режимам заряда и разряда.

Показано, что различие характеристик НЭЭ приводит к изменению номинальных энергоемкости и мощности, степени заряженности и глубине разряда, что обуславливает необходимость учета характеристик видов НЭЭ, накладывающих ограничения по токам и напряжениям в режимах заряда и разряда, глубине разряда и ресурсу работы НЭЭ.

Показаны преимущества стационарных СНЭЭ для СТЭ на участках с интенсивным грузовым движением перед бортовыми системами, приведены результаты оценки целевых диапазонов мощности и энергоемкости для стационарных и бортовых СНЭЭ.

## 8 ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ СИСТЕМ НАКОПЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В СИСТЕМАХ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

В данной главе представлены результаты оценки технического эффекта при применении систем накопления электроэнергии в системах тягового электроснабжения. Результаты расчетов приведены для условий применения литий-ионных аккумуляторов на участках с преобладанием грузового движения на участках полигонов Октябрьской и Свердловской железных дорог. Приведены результаты оценки сравнительной эффективности работы накопителей электроэнергии по видам с учетом ресурса их работы в системах тягового электроснабжения.

### 8.1 Оценка технического эффекта применения систем накопления электроэнергии

В качестве базовой технологии для оценки эффективности работы СНЭЭ принят НЭЭ на основе литий-ионных аккумуляторов, производство которых широко распространено по странам мира, включая Россию. Оценка работы СНЭЭ, выполненных с использованием НЭЭ другого вида, выполняется аналогично с учетом особенностей их эксплуатации, связанной с допустимой глубиной разряда, мощностью, зарядной и разрядной характеристикой, ресурсом и др. Как было показано выше, выбор вида НЭЭ определяется условиями работы СНЭЭ в СТЭ и требованиями экономической эффективности.

К техническому эффекту применения СНЭЭ относится повышение нагрузочных показателей СТЭ, позволяющее получить экономический эффект, основанный на соответствующем повышении пропускной и провозной способности в границах лимитирующих межподстанционных зон.

Основными элементами, входящими в состав СНЭЭ являются: статические преобразователи; система управления; преобразовательный трансформатор; накопитель электроэнергии; фильтры.

Ресурс работы НЭЭ оценивается в циклах работы, что позволяет оценить срок эксплуатации накопителя электроэнергии для заданного графика нагрузки. Производители НЭЭ в технических характеристиках указывают зависимость емкости/энергоемкости от количества циклов, учитывающую деградацию данных показателей в процессе эксплуатации. Нормативная наработка позволяет прогнозировать срок службы устройств для планируемых условий эксплуатации. В связи с тем, что в процессе эксплуатации НЭЭ, как правило, работают циклах разряд/заряд, не подразумевающих полную емкости и последующее ее полное восстановление, для оценки ресурса применяют методы оценки, связанные с определением параметров и показателей работы, например, пропускной способности (количество электричества), позволяющие прогнозировать срок службы. Выше отмечено (см. гл. 1), что ресурс НЭЭ по видам существенно отличается, что обуславливает различие планируемого срока службы различных видов НЭЭ в тяговых сетях.

Полученные результаты по оценке цикличности работы СНЭЭ в СТЭ (в диапазоне 0,2...2 цикла в час для магистральных, 0,1 чикла в час и ниже для малодеятельных участков электрифицированных железных дорог) позволяют выполнить оценку количество циклов работы за сутки (4,8...48 циклов) и за год (1,8...17,5 тыс. циклов). Указанные значения циклируемости являются ориентировочными и зависят от условий формирования тяговой нагрузки и управления режимами работы СНЭЭ.

Рассмотрение основных видов НЭЭ для применения в СНЭЭ, предназначенных для работы в СТЭ показывает следующие результаты.

Свинцово-кислотные аккумуляторы, получившие широкое распространение в качестве источников тока в системах резервирования электропитания, системах оперативного постоянного тока подстанций ввиду

своей низкой стоимости, работают в буферном режиме, необходимость которого возникает при исчезновении напряжения со стороны основного питания. Учитывая относительно низкий уровень повреждаемости в цепях собственных нужд и соответствующее количество работы в буферном режиме фактическая наработка указанных аккумуляторов не определяет их срок службы. При изменении режима работы, например, при эксплуатации аккумуляторов в режиме тяговых батарей, количество циклов заряд/разряд при эксплуатации транспорта будет существенно выше и определит срок службы аккумуляторов. Усредненные характеристики свинцово-кислотных аккумуляторов, как это приведено, например, в [229, 231] и других источниках, для последующего сравнения приняты на уровне: ресурс – около 1000 циклов; срок эксплуатации – 10 лет.

Никель-кадмиевые аккумуляторы получили широкое распространение в качестве бортовых и мобильных источников тока в силу ряда положительных качеств (устойчивость к вибрации, широкий диапазон рабочих температур, устойчивость к глубокому разряду и др.). В частности, указанные аккумуляторы применяются для построения аккумуляторных батарей для тягового подвижного состава, эксплуатируемого на железных дорогах России. Усредненные характеристики аккумуляторов для сравнения их с другими видами приняты на основе характеристик, приведенных в [230, 231] и других источниках: ресурс – около 1000 циклов; срок эксплуатации – 10 лет.

Литий-ионные аккумуляторы в силу ряда преимуществ, связанных с высокой удельной энергоемкостью, широким рабочим температурным диапазоном и лучшими экологическими характеристиками по сравнению со свинцово-кислотными и никель-кадмиевыми аккумуляторами, получили широкое распространение в качестве источников тока. Характеристики аккумуляторов, указанные, например, в [231, 232] и других источниках, позволяют оценить усредненные значения: ресурс – около 3000 циклов; срок эксплуатации – около 10 лет.

Областью применения суперконденсаторов (ионисторов) являются системы постоянного тока, особенностью работы которых является кратковременный режим работы и высокая кратность токов по отношению к номинальной емкости. Несмотря на относительно высокие удельные стоимостные характеристики суперконденсаторы нашли применение в системах оперативного постоянного тока, не содержащих химических источников тока, других электроустановках, для которых не требуется относительно высокая продолжительность времени разряда. Одним из основных преимуществ суперконденсаторов является высокий ресурс работы, исчисляемый сотнями тысяч циклов. Усредненные данные по ресурсу, приведенные в различных источниках, например, [233, 234] и др., следующие: ресурс – около 500 000 циклов; срок эксплуатации – около 10 лет.

Кинетические накопители электроэнергии относятся к вращающемуся резерву и получили распространение благодаря отсутствию эффекта деградации энергоемкости в процессе эксплуатации. Устройства применяются в качестве стационарных в связи с особенностями магнитного подвеса, позволяющего повысить механические характеристики накопителей. По данным изготовителей, например, [182] и других, о ресурсе образцов устройств без учета особенностей подвешивания, усредненные сроки составляют: ресурс – ограничен сроком эксплуатации; срок эксплуатации – около 20 лет.

Гравитационные накопители электроэнергии позволяют за счет увеличения массо-габаритных показателей достичь высокого уровня энергоемкости и мощности устройства. На современном этапе пилотные проекты гравитационных накопителей позволяют достичь энергоемкости нескольких десятков МВт·ч и десятков МВт. Указанные особенности позволяют использовать их в энергообъединениях для выравнивания графиков нагрузки, например, ветряных электростанций, и для резервирования мощности крупных потребителей. В среднем, по данным пилотных проектов, например, в [235], усредненные показатели для

рассматриваемого вида устройств составляют: ресурс – ограничен сроком эксплуатации; срок эксплуатации – около 30 лет.

При оценке срока службы видов накопителей электроэнергии необходимо учитывать срок окупаемости проектов. Степень превышения последнего над первым показателем позволяет оценить эффективность вида накопителя электроэнергии, применяемого в проекте. Оценку можно проводить по отношению указанных сроков с помощью коэффициента срока службы:

$$k_T = \frac{T_{\text{сл}}}{T_{\text{ок}}}, \quad (8.1)$$

где  $T_{\text{сл}}$  и  $T_{\text{ок}}$  – сроки службы для базовых условий и окупаемости проектов, год.

Срок службы  $T_{\text{сл}}$  для ряда НЭЭ зависит от условий работы, в частности, от циклирования и глубины разряда. Тогда с учетом (8.1) для различных условий циклирования работы можно использовать следующий коэффициент для оценки эффективности НЭЭ:

$$k_f = \frac{T_{\text{сл}}}{a \cdot T_{\text{ок}}}, \quad (8.2)$$

где  $a$  – коэффициент циклирования, приведенный к базовым условиям:

$$a = \frac{f}{f_{\text{баз}}}, \quad (8.3)$$

$f$  – частота циклирования для базового варианта, цикл/сутки.

Технико-экономическая оценка проектов по внедрению СНЭЭ для ликвидации лимитирующих межподстанционных зон показывает, что срок окупаемости составляет около 1 года для затрат на проект на уровне 400 млн р. Срок службы, зависящий от циклируемости в соответствии с приведенными усредненными оценками по видам технологии НЭЭ, приведен на рисунке 8.1.

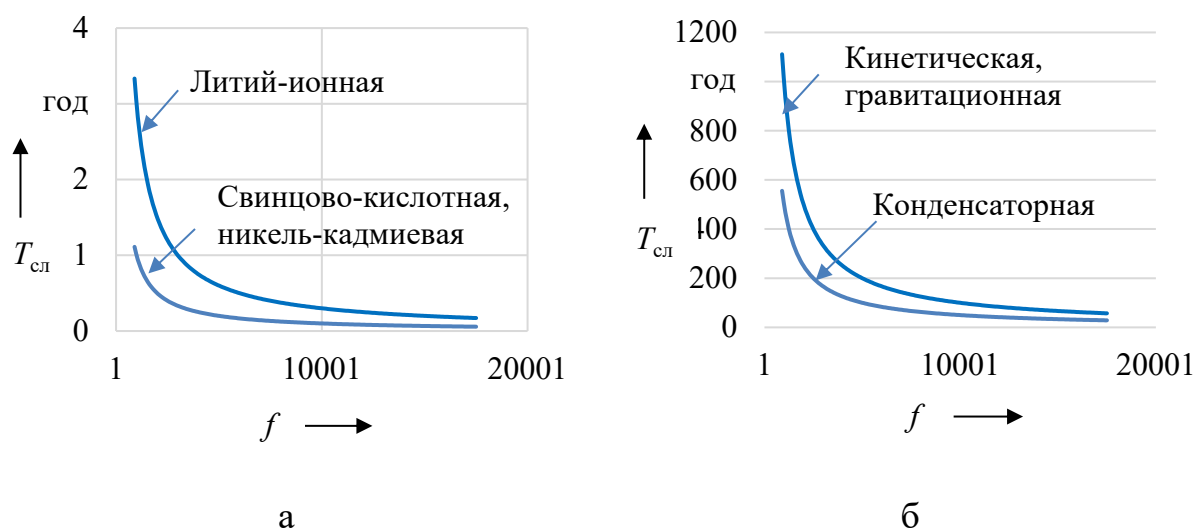


Рисунок 8.1 – Зависимость срока службы от циклируемости

Для принятых исходных данных срок службы рассмотренных накопителей электроэнергии приведен в таблице 8.1, где в качестве базовой принята частота циклирования  $f = 1,8$  тыс. ц/год ( $a = 1$ ).

Таблица 8.1 – Значения коэффициента срока службы по видам

Технология	$a = 0,5$	$a = 1$	$a = 10$
Свинцово-кислотная	0,1	0,1	0,01
Никель-кадмиевая	0,1	0,1	0,01
Литий-ионная	0,3	0,2	0,02
Конденсаторная	55,6	27,8	2,9
Кинетическая	55,6	27,8	2,9
Гравитационная	37,0	18,5	1,9

Для силового и коммутационного оборудования, срок службы которых не зависит от циклируемости, значения срока службы и эксплуатации совпадают. Так как в эксплуатации практикуется продление срока службы оборудования по техническому состоянию, то коэффициент равен или будет превышать единичное значение.

Как видно из данных, приведенных в таблице 8.1, на сегодняшний день технологии, применяемые в химических источниках тока, не позволяют рассматривать их в качестве базовой технологии для НЭЭ, предназначенного

для работы в СТЭ по причине относительно низкого ресурса. По указанному показателю исходя из современного уровня техники в качестве НЭЭ для тяговой нагрузки могут применяться суперконденсаторы, кинетические и гравитационные накопители.

## 8.2 Оценка технического эффекта для условий Октябрьской железной дороги

Проектируемые технические характеристики СНЭЭ для условий Октябрьской железной дороги (на примере участка Волховстрой – Бабаево) приведены в таблице 8.2. Оценка экономического эффекта приведена в ценах 2019 года.

Специфика электротяговой нагрузки позволяет получить эффект от применения СНЭЭ в системах электроснабжения городского транспорта и метрополитена (страны Евросоюза, США и Япония). Первый опыт эксплуатации СНЭЭ в России получен в Московском метрополитене. На сети дорог ОАО «РЖД» в СТЭ накопители не получили распространения ввиду отсутствия технического обоснования применения.

В настоящее время аналогами предлагаемого внедрения СНЭЭ на рассматриваемом полигоне являются следующие технические решения:

- 1) строительство тяговой подстанции;
- 2) устройство активного поста секционирования с питанием от отдельной линии тяговой подстанции (например, пункта преобразования напряжения);
- 3) устройство автономного источника напряжения на базе газовой генерации или других источников энергии.

Основным показателем эффективности применения СНЭЭ является увеличение дохода ОАО «РЖД» за счет повышения пропускной и провозной способности участка железной дороги и увеличение объема грузооборота.

Участок постоянного тока Волховстрой 1 – Бабаево Октябрьской железной дороги – филиала ОАО «РЖД» включает в себя 12 тяговых

подстанций, обслуживаемых Волховской дистанцией электроснабжения (ЭЧ-7). Эксплуатационная длина рассматриваемого участка составляет 234 км.

На участке организовано грузовое, пассажирское и пригородное движение. Грузовые перевозки осуществляются электровозами серий ВЛ10, ВЛ10У, ВЛ15, 2ЭС4К, 3ЭС4К и 2ЭС6. По результатам исследований Института экономики и развития транспорта (АО «ИЭРТ») наличная пропускная способность участка составляет 77 пар поездов в сутки.

Таблица 8.2 – Основные характеристики системы накопления электроэнергии

Характеристика	Единицы измерения	Значение
Род тока	постоянный	
Номинальное напряжение	кВ	3,3
Наибольшее рабочее напряжение	кВ	4,1
Номинальная мощность, не менее	МВт	3,0
Номинальная энергоёмкость, не менее	МВт·ч	1,6
Номинальный ток разряда, не менее	А	1000
Номинальный ток заряда, не менее	А	500
Напряжение перехода в режим заряда	кВ	3100
Напряжение перехода в режим разряда	кВ	3000
Потери и расход электроэнергии на собственные нужды, не более	кВт	40
Габариты (ширина × глубина × высота)		
- модуль преобразования и управления	мм	3150×9700×3910
- аккумуляторный модуль	мм	3150×6000×3910
- силовой трансформатор	мм	3100×3200×3200
Количество аккумуляторных модулей	шт.	2
Масса полная, в том числе:		
- модуля преобразования и управления	кг	по проекту
- силового трансформатора	кг	по проекту
- аккумуляторных модулей	кг	по проекту
Электропитание собственных нужд	380 В для трехфазной сети переменного тока, 220 В для однофазной	
Срок эксплуатации, не менее	лет	25
Климатическое исполнение по ГОСТ 15150-69	УХЛ1 -45 ...+50 °С	

На рассматриваемом участке наблюдается большее количество случаев снижения уровня напряжения на токоприемнике ЭПС ниже допустимого значения, фиксируемых машинистами локомотивов серий ВЛ10, 2ЭС6,

2ЭС4К и 3ЭС4К. В соответствии с данными Октябрьской дирекции тяги в границах рассматриваемого участка за период с января по июль 2019 г. зафиксировано 92 замечания машинистов по низкому уровню напряжения. Большая часть замечаний фиксируется в границах межподстанционных зон Б. Двор – Пикалево – Ефимовская и Тешемля – Бабаево.

Расчет пропускной способности участка по устройствам тягового электроснабжения выполнен для следующих условий:

- унифицированная масса поезда в четном направлении – 4500 т;
- схема пропуска поездов в нечетном направлении – «Н-с-с-с» (где с – средняя масса поезда 6000 т, Н – наибольшая масса поезда 9000 т);
- напряжение на шинах тяговых подстанций – 3500 В.

Результаты расчета пропускной способности, определяемой в соответствии с принятым порядком расчета [16] показывают наличие лимитирующих межподстанционных зон на рассматриваемом участке, определяющими среди которых являются: Пикалево – Ефимовская, Ефимовская – Заборье, Тешемля – Бабаево.

По результатам расчета минимальный межпоездной интервал на межподстанционных зонах составляет 19 мин для условий нормального режима питания, когда в работе находится один преобразовательный агрегат на тяговых подстанциях, и 13 мин для интенсивного режима работы, в котором на ТП в работе находятся два преобразовательных агрегата. Лимитирующими межподстанционными зонами на рассматриваемом участке являются: Пикалево – Ефимовская, Ефимовская – Заборье и Тешемля – Бабаево.

Возможность увеличения пропускной способности на участке рассматривается за счет применения трех СНЭЭ, устанавливаемых на указанных выше лимитирующих межподстанционных зонах на постах секционирования ПС Коли, ПС 291 км и ПС 343 км, имеющих следующие характеристики:

- пороговое напряжение разряда – 3000 В;

- номинальный ток разряда – 1000 А;
- номинальная мощность – 3,6 МВт;
- номинальная энергоемкость – 1800 кВт·ч.

По результатам расчета минимальный межпоездной интервал в границах рассматриваемых межподстанционных зон для варианта с применением СНЭЭ в СТЭ составил 15 мин (против 19 мин) при нормальном режиме работы ТП и 9 мин (против 13 мин) при интенсивном режиме работы.

Для принятых условий применение СНЭЭ мощностью 3,6 МВт на трех постах секционирования участка позволяет сократить межпоездной интервал на участке в среднем на 4 мин в нормальном и интенсивном режимах работы.

Для технико-экономической оценки принимается нормальный режим работы СТЭ как вариант расчетов, соответствующий наихудшему сценарию реализации проекта. Работа СТЭ в интенсивном режиме (введение двух преобразовательных агрегатов и повышение напряжение холостого хода на ТП) в свою очередь позволяет получить более высокий экономический эффект и в данном случае соответствует благоприятному сценарию реализации проекта.

Пропускная способность участка в грузовом движении при параллельном графике на двухпутных участках определяется по выражению [16]);:

$$N_{\text{гр}} = \frac{(1440 - t_{\text{тех}}) \cdot \alpha_{\text{н}}}{J_{\text{доп мин}}}, \quad (8.4)$$

где: 1440 – количество минут в сутках, мин;

$t_{\text{тех}}$  – интервал времени технологического окна (в расчетах принимается равным 150 мин), мин;

$\alpha_{\text{н}}$  – коэффициент надежности для электрифицированных участков (в расчетах принимается равным 0,96), о.е.

В условиях непараллельного графика с учетом поездов в пассажирском и пригородном движении количество пар в грузовом движении определяется по формуле:

$$N_{\text{гр}} = \frac{(1440 - t_{\text{тех}}) \cdot \alpha_n - J_{\text{зад}} \cdot (n_{\text{пс}} \cdot \varepsilon_{\text{пс}} + n_{\text{пр}} \cdot \varepsilon_{\text{пр}})}{J_{\text{доп мин}}}, \quad (8.5)$$

где:  $J_{\text{зад}}$ ,  $J_{\text{доп мин}}$  – заданный интервал в пассажирском движении и минимальный допустимый интервал в грузовом движении соответственно, мин;

$n_{\text{пс}}$ ,  $n_{\text{пр}}$  – количество поездов в пассажирском и пригородном движении соответственно, шт.;

$\varepsilon_{\text{пс}}$ ,  $\varepsilon_{\text{пр}}$  – коэффициенты съема для пассажирского и пригородного движения соответственно, о.е.

Расчетные размеры в пассажирском и пригородном движении характеризуются следующими значениями: количество пассажирских поездов в нечетном/четном направлении – 7/7, коэффициенты съема – 1,56/165; количество поездов в пригородном сообщении – 4/4, коэффициенты съема – 1,54/1,65.

Графики исполненного движения характеризуются различным формированием пакетов и очередности пропуска поездов повышенной и унифицированной массы. При отклонении от расчетных условий пропуска по схеме «Н-с-с-с» необходимо учитывать не только пассажирское и пригородное движения, но изменения в условиях пропуска грузовых поездов.

В связи с этим изменение количества пар поездов в грузовом движении с учетом пассажирского и пригородного движения, формирования пакетов из поездов унифицированной массы для расчетных условий пропуска определяется на основе расчета скорректированных размеров движения.

При определении суммарного количества грузовых поездов учитывается различие минимальных интервалов между поездами повышенной и унифицированной масс и поездами унифицированных масс. Эффект от сокращения интервалов времени относится к поездам повышенной и унифицированной масс. Средний интервал между поездами унифицированной массы по данным нормативного и графика исполненного движения (принимается за период 21.11-22.11.2018) составляет 13 мин.

С учетом указанных выше положений время, связанное с пропуском пакета по схеме «Н-с-с-с», будет формироваться с учетом межпакетного интервала между поездом повышенной и унифицированной массы 19 мин следующим образом:  $t = 19 + 13 + 13 + 19 = 64$  мин, для интервала 15 мин –  $t = 15 + 13 + 13 + 15 = 56$  мин.

Количество пакетов по схеме пропуска «Н-с-с-с» в суточном графике движения поездов определяется по формуле:

$$n_{\text{пак}} = \frac{(1440 - t_{\text{тех}}) \cdot \alpha_{\text{н}} - J_{\text{зад}} \cdot (n_{\text{пс}} \cdot \varepsilon_{\text{пс}} + n_{\text{пр}} \cdot \varepsilon_{\text{пр}})}{t_{\text{Н-с-с-с}}}, \quad (8.6)$$

где:  $t_{\text{Н-с-с-с}}$  – интервал времени проследования поездов в пакете по схеме пропуска «Н-с-с-с», мин.

Результаты расчета объемов перевозок для непараллельного графика приведены в таблице 8.3.

Таблица 8.3 – Изменение объемов грузовых перевозок в зависимости от межпоездных интервалов

Межпоездной интервал, мин.	Количество пар грузовых поездов в сутки	Работа, млн ткм брутто	
		нечетное	четное
19	68	107,4	71,6
18	71	112,1	74,8
17	73	115,3	76,9
16	75	118,5	79,0
15	78	123,2	82,1

Расчет показателей экономической эффективности выполнен в соответствии с Методическими рекомендациями по оценке инвестиционных проектов РЖД 2538р от 25.11.2008 г (в ред. Распоряжения ОАО «РЖД» от 10.11.2009 № 2288р) [222] и Методическими рекомендациями по составу и содержанию обосновывающих материалов по инвестиционным проектам (Распоряжение ОАО «РЖД» от 28.11.2016 № 2396р) [223] для соответствующей квалификационной группы (таблица 8.4).

В качестве основных показателей, используемых для расчетов эффективности инвестиционного проекта, принимаются:

- чистый доход;
- чистый дисконтированный доход;
- совокупная стоимость владения за расчетный период (капитальный и эксплуатационные затраты, налоговые отчисления).

Чистый доход рассчитывается по формуле [228]:

$$\text{ЧД} = \sum_{t=0}^n \Pi_t - \sum_{t=0}^T K_t, \quad (8.7)$$

где:  $\Pi_t$  – приток денежных поступлений в  $t$ -ом году, тыс. руб.;

$K_t$  – инвестиционные расходы в  $t$ -ом году, тыс. руб.;

$n$  – расчетный период отдачи инвестиций (выбирается по сроку эксплуатации оборудования), год;

$T$  – период инвестирования, год.

Таблица 8.4 – Классификация мероприятия по внедрению СНЭЭ

Основной эффект работы	Классификационная группа работы
Использование результатов работ приводит к непосредственному увеличению доходов ОАО «РЖД» за счет увеличения пропускной способности	Работы с коммерческим эффектом

Приток денежных поступлений рассчитывается по формуле:

$$\Pi_t = \Delta P_t^{\text{пр}} - Z_t - \Delta H_t^{\text{им}} - \Delta H_t^{\text{пр}}, \quad (8.8)$$

где:  $\Delta P_t^{\text{пр}}$  – увеличение доходов ОАО «РЖД» в  $t$ -ом году за счет прироста пропускной способности в результате реализации проекта, рассчитывается по формуле, тыс. руб.:

$$\Delta P_t^{\text{ГР}} = N_t^{\text{ГР}} \cdot (\bar{m}_{\text{неч}} + \bar{m}_{\text{чет}}) \cdot L_{\text{уч}} \cdot (d_{\text{ГР}} - c_{\text{ГР}}) \cdot 365 \cdot 10^{-6}, \quad (8.9)$$

$N_t^{\text{ГР}}$  – прирост количества пар грузовых поездов в сутки, достигаемый за счет реализации проекта, шт.;

$\bar{m}_{\text{чет}}$  – средняя масса грузового поезда в четном направлении, принимаемая в расчетах, т ( $\bar{m}_{\text{чет.}} = 4500$  т);

$\bar{m}_{\text{неч}}$  – средняя масса грузового поезда в нечетном направлении, принимаемая в расчетах, т (при схеме пропуска поездов в нечетном направлении «Н-с-с-с»  $\bar{m}_{\text{неч.}} = 6750$  т);

$L_{\text{уч}}$  – эксплуатационная длина рассматриваемого участка, км;

$d_{\text{ГР}}$  – доходная ставка по грузоперевозкам брутто по данным корпоративного информационного хранилища «Грузовые перевозки» в среднем по всем группам грузов, перевезённым в 2019 году, руб./10 т·км брутто;

$c_{\text{ГР}}$  – единичная расходная ставка, рекомендованной Департаментом экономики ОАО «РЖД» при решении экономических задач, руб./10 т·км брутто;

$Z_t$  – планируемые годовые эксплуатационные затраты предлагаемого к внедрению технического средства, связанные с поддержанием работоспособного состояния оборудования, тыс. руб.;

$\Delta H_t^{\text{ИМ}}$  – изменение налога на имущество в связи с осуществлением инвестиций, тыс. руб.:

$$\Delta H_t^{\text{ИМ}} = \varphi \cdot \sum_{t=1}^T \left( \frac{2K_t - AO_t \cdot t_t}{2} \right), \quad (8.10)$$

$\varphi$  – ставка налога на имущество, о.е.;

$AO_t$  – амортизационные отчисления в  $t$ -ом году в результате реализации проекта, тыс. руб.;

$t_i$  – годы расчетного периода (год реализации проекта является базовым (нулевым) годом внедрения  $t = 0$ );

$\Delta H_t^{np}$  – увеличение платежей по налогу на прибыль в связи с притоком денежных средств, тыс. руб.:

$$\Delta H_t^{np} = p \cdot (\Delta P_t^{np} - Z_t), \quad (8.11)$$

$p$  – ставка налога на прибыль, о.е.

Чистый дисконтированный доход рассчитывается по формуле:

$$\text{ЧДД} = \sum_{t=0}^n \frac{\Pi_t}{(1+g)^t} - \sum_{t=0}^T \frac{K_t}{(1+g)^t}, \quad (8.12)$$

где:  $g$  – норма дисконта, о.е.

Горизонт планирования, принятый для финансового плана, составляет 10 лет. Интервал планирования равен одному году. Коэффициент дисконтирования принят равным 0,06 (по уровню ключевой ставке ЦБ России на 03.2020).

Для оценки поступлений денежных средств принимаются прогнозные показатели в соответствии с долгосрочной программой развития ОАО «РЖД» до 2025 года [224] и Прогнозом социально-экономического развития Российской Федерации на период до 2036 года [225]. В соответствии с указанными документами уровень инфляции на рассматриваемый период составляет 2,4 %.

Оценка экономического эффекта выполнена исходя из условий, что действующая доходная ставка по грузоперевозкам (на 2019 г.) составляет 495,759 коп./10 ткм, расходная ставка принята в соответствии с распоряжением ОАО «РЖД» от 7.06.2019 г. № 1137р и составляет 11,42 коп./10 ткм брутто [226].

Результаты расчета увеличения годовых доходов ОАО «РЖД» за счет прироста пропускной способности в результате внедрения в таблице 8.5.

Увеличение размеров в грузовом движении при сокращении межпоездного интервала с 19 до 15 мин для расчетных условий («Н-с-с-с») составляет 10 пар для условий непараллельного графика (изменение размеров движения с 68 до 78 пар).

Результаты расчета технико-экономического эффекта в условиях равномерного прироста количества пар поездов в границах расчетного периода 10 лет (одна пара в год) приведены в таблице 8.6.

Таблица 8.5 – Экономический эффект, достигаемый за счет внедрения проекта на участке Волховстрой 1 – Бабаево Октябрьской железной дороги

Увеличение размеров движения, пар поездов	Увеличение работы, млн ткм брутто		Прирост грузооборота, 10 ткм брутто в сутки	Эффект, млн руб./год
	нечетное направление	четное направление		
1	1,6	1,1	263 250,0	465,4
2	3,2	2,1	526 500,0	930,8
3	4,7	3,2	789 750,0	1 396,1
4	6,3	4,2	1 053 000,0	1 861,5
5	7,9	5,3	1 316 250,0	2 326,9
6	9,5	6,3	1 579 500,0	2 792,3
7	11,1	7,4	1 842 750,0	3 257,7
8	12,6	8,4	2 106 000,0	3 723,1
9	14,2	9,5	2 369 250,0	4 188,4
10	15,8	10,5	2 632 500,0	4 653,8

Совокупная стоимость владения проектом с учетом капитальных и эксплуатационных расходов, а также налоговых отчислений за расчетный период, равный 10 годам, не должна превышать 20,17 млрд. руб.

При анализе рисков не достижения заявленных показателей экономической эффективности работы согласно методическим подходам при оценке эффективности работ плана научно-технического развития ОАО «РЖД» (распоряжение № 2666/р от 26.12.2016 г.) был использован метод определения чувствительности проекта.

Расчет показателей эффективности работы с учетом анализа рисков приведен в таблице 8.7. Совокупная стоимость владения с учетом рисков за расчетный период равный 10 годам не должны превышать 18,15 млрд. руб.

Основным показателем эффективности применения СНЭЭ на участке является увеличение показателей нагрузочной способности СТЭ и, как результат, возможность увеличения пропускной способности и рост грузооборота по устройствам системы тягового электроснабжения, приводящие к увеличению доходов ОАО «РЖД».

### 8.3 Оценка технического эффекта для условий Свердловской железной дороги

Оценка технического эффекта применения СНЭЭ выполняется для условий Свердловской железной дороги с соответствующими параметрами СТЭ и условиями организации движения поездов на рассматриваемом участке. При определении экономического эффекта принят уровень цен 2019 года.

Влияние СНЭЭ на показатели нагрузочной способности тягового электроснабжения аналогично другим мероприятиям и ниже проводится сравнительная оценка по техническому результату для следующих вариантов:

- 1) текущий режим работы СТЭ. СНЭЭ не применяются, на подстанциях в работе один силовой понижающий трансформатор (110/10 кВ) и два выпрямительных преобразователя (базовый вариант);
- 2) применение СНЭЭ на двух межподстанционных зонах участка (вариант 1);
- 3) применение режима параллельной работы силовых понижающих трансформаторов на ограничивающих подстанциях без СНЭЭ (вариант 2);
- 4) применение режима параллельной работы трансформаторов с СНЭЭ (вариант 3);

Таблица 8.6 – Результаты расчет притока денежных средств для участка Октябрьской железной дороги

Показатели экономической эффективности	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Приращение дополнительных пар поездов											
1. Количество пар грузовых поездов	-	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Освоение дополнительных объёмов перевозок (в год)											
2. Прирост грузооборота, тыс. т·км	0	960863	1921725	2882588	3843450	4804313	5765175	6726038	7686900	8647763	9608625
3. Прирост прибыли от освоения дополнительных объёмов перевозок, тыс. руб.	0	465383	930766	1396150	1861533	2326916	2792299	3257682	3723065	4188449	4653832
4. Прирост прибыли с учетом индексации доходов (2,4 %), тыс. руб.	0	476552	975979	1499104	2046777	2619874	3219302	3845992	4500910	5185048	5899433
5. Ставка дисконтирования (r)	0,00	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06
6. Дисконтный множитель $(1+r)^{-t}$	1,00	0,94	0,89	0,84	0,79	0,75	0,70	0,67	0,63	0,59	0,56
7. Прирост прибыли с учетом дисконтирования, тыс. руб.	0	449578	868618	1258677	1621239	1957723	2269481	2557805	2823927	3069022	3294212
8. Дисконтированный доход нарастающим итогом, тыс. руб.	0	449578	1318196	2576873	4198112	6155834	8425315	10983119	13807046	16876068	<b>20 170 280</b>

Таблица 8.7 – Результаты расчет притока денежных средств с учетом анализа рисков Октябрьской железной дороги

Показатели экономической эффективности	Год реализации Проекта										
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1. Прирост прибыли от освоения дополнительных объёмов перевозок, тыс. руб.	0	465383	930766	1396150	1861533	2326916	2792299	3257682	3723065	4188449	4653832
2. Прирост прибыли с учетом индексации доходов (2,4 %), тыс. руб.	0	418845	837690	1256535	1675379	2094224	2513069	2931914	3350759	3769604	4188449
3. Ставка дисконтирования (r)	0,00	428897	878381	1349194	1842099	2357887	2897372	3461393	4050819	4666543	5309489
4. Дисконтный множитель $(1+r)^{-t}$	1,00	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06
5. Прирост прибыли с учетом дисконтирования, тыс. руб.	0	0,94	0,89	0,84	0,79	0,75	0,70	0,67	0,63	0,59	0,56
6. Дисконтированный доход, тыс. руб.	0	404620	781756	1132809	1459115	1761950	2042533	2302024	2541534	2762120	2964791
7. Дисконтированный доход нарастающим итогом, тыс. руб.		404620	1186376	2319185	3778300	5540251	7582783	9884807	12426341	15188461	<b>18 153 252</b>

5) увеличение номинальной мощности понижающих трансформаторов на ограничивающих подстанциях (вариант 4);

6) увеличение номинальной мощности понижающих трансформаторов на ограничивающих подстанциях и применение СНЭЭ (вариант 5);

7) увеличение номинальной мощности понижающих трансформаторов на ограничивающих подстанциях и усиление контактной подвески (вариант 6).

По сравнению с базовым вариантом наибольшее снижение минимального интервала движения достигается при совместной реализации мероприятий по увеличению трансформаторной мощности и применению двух СНЭЭ (варианты 3 и 5, таблица 8.8).

Применение СНЭЭ совместно с увеличением трансформаторной мощности на подстанциях позволяет сократить минимальные расчетные интервалы на рассматриваемом участке железной дороги (Кузино – Пермь-II) с 13 мин до 9 мин.

Рассматриваемый участок постоянного тока (Кузино – Пермь-II) Свердловской железной дороги включает в себя 17 ТП, эксплуатационная протяженность составляет 294 км.

Определение экономического эффекта на участке (Кузино – Пермь-II) выполнено для масс поездов в нечетном и четном направлениях равных 5900 и 3000 т соответственно, принятых путем усреднения и округления в меньшую сторону на основании исходных данных о расчетных схемах пропуска поездов (пакет «Н-с-с-с» и встречный поток поездов «с»), используемых для определения пропускной способности. Весовые нормы приняты в соответствии с усредненными массами поездов, фактически эксплуатируемыми на рассматриваемом участке.

По результатам расчетов получено, что для снятия ограничений в СТЭ на данном участке целесообразным является реализация комплекса мероприятий, предусматривающего установку двух СНЭЭ (мощностью 3,0 МВт и энергоемкостью 1500 кВт·ч на посту секционирования ПС Берлога и

мощностью 1,5 МВт и энергоемкостью 750 кВт·ч на посту секционирования ПС Юг и замену силовых понижающих трансформаторов (для увеличения мощности с 16 МВ·А до 25 МВ·А) на тяговых подстанциях Кузино, Сабик, Ергач и Кишерть.

Таблица 8.8 – Сравнение результатов расчетов пропускной способности

Варианты	Краткое описание варианта	Минимальный интервал, мин
Базовый	Существующий режим работы системы тягового электроснабжения	13
1	Применение СНЭЭ на двух межподстанционных зонах участка	13
2	Применение режима параллельной работы силовых трансформаторов на четырех подстанциях без СНЭЭ	12
3	Режим параллельной работы понижающих трансформаторов с СНЭЭ	9
4	Увеличение номинальной мощности понижающих трансформаторов на четырех подстанциях	12
5	Увеличение номинальной мощности понижающих трансформаторов на четырех подстанциях и применение СНЭЭ	9
6	Увеличение номинальной мощности понижающих трансформаторов на ограничивающих подстанциях и усиление контактной подвески	10

Реализация предложенных мероприятий позволяет сократить межпоездной интервал на рассматриваемом участке для расчетных условий на 4 мин. (с 13 до 9 мин.).

Пропускная способность участка в грузовом движении при параллельном графике на двухпутных участках (без учета поездов в пассажирском и пригородном движении) определяется по формуле (8.4) [16].

В условиях непараллельного графика с учетом поездов в пассажирском и пригородном движении количество поездов в грузовом движении в нечетном и четном направлениях определяется с учетом (8.2) по формуле:

$$\left\{ \begin{array}{l} N_{\text{гр}}^{\text{неч.}} = \frac{(1440 - t_{\text{тех}}) \cdot \alpha_{\text{н}} - J_{\text{зад}} \cdot (n_{\text{пс}}^{\text{неч.}} \cdot \varepsilon_{\text{пс}}^{\text{неч.}} + n_{\text{пр}}^{\text{неч.}} \cdot \varepsilon_{\text{пр}}^{\text{неч.}})}{J_{\text{доп мин}}} \\ N_{\text{гр}}^{\text{чет.}} = \frac{(1440 - t_{\text{тех}}) \cdot \alpha_{\text{н}} - J_{\text{зад}} \cdot (n_{\text{пс}}^{\text{чет.}} \cdot \varepsilon_{\text{пс}}^{\text{чет.}} + n_{\text{пр}}^{\text{чет.}} \cdot \varepsilon_{\text{пр}}^{\text{чет.}})}{J_{\text{доп мин}}} \end{array} \right., \quad (8.13)$$

где:  $J_{\text{зад}}$  – заданный интервал в пассажирском движении (в расчетах принят равный 8 мин [4]), мин;

$n_{\text{пс}}^{\text{неч.}}$ ,  $n_{\text{пс}}^{\text{чет.}}$  – количество поездов в пассажирском движении в нечетном и четном направлениях соответственно, шт.;

$n_{\text{пр}}^{\text{неч.}}$ ,  $n_{\text{пр}}^{\text{чет.}}$  – количество поездов в пригородном движении в нечетном и четном направлениях соответственно, шт.;

$\varepsilon_{\text{пс}}^{\text{неч.}}$ ,  $\varepsilon_{\text{пс}}^{\text{чет.}}$  – коэффициенты съема для пассажирского движения в нечетном и четном направлениях соответственно, шт.;

$\varepsilon_{\text{пр}}^{\text{неч.}}$ ,  $\varepsilon_{\text{пр}}^{\text{чет.}}$  – коэффициенты съема для пригородного движения в нечетном и четном направлениях соответственно, о.е.

Расчетные размеры в пассажирском и пригородном движении характеризуются следующими значениями: количество пассажирских поездов в нечетном/четном направлении – 16/15, коэффициенты съема – 2,13/2,31; количество поездов в пригородном сообщении – 9/9, коэффициенты съема – 2,14/2,07 (в соответствии с паспортом пропускной способности участка Кузино – Пермь-II).

Объем работы, выполненной грузовыми поездами в нечетном и четном направлениях, определяется на основании расчетных данных пропускной способности по формуле:

$$\left\{ \begin{array}{l} A_{\text{гр}}^{\text{неч.}} = N_{\text{гр}}^{\text{неч.}} \times L_{\text{уч}} \times \bar{m}_{\text{гр}}^{\text{неч.}} \times 10^{-6} \\ A_{\text{гр}}^{\text{чет.}} = N_{\text{гр}}^{\text{чет.}} \times L_{\text{уч}} \times \bar{m}_{\text{гр}}^{\text{чет.}} \times 10^{-6} \end{array} \right., \quad \text{млн ткм брутто} \quad (8.14)$$

где:  $L_{\text{уч}}$  – протяженность рассматриваемого участка, км;

$\bar{m}_{\text{неч.}}$  – средняя масса грузового поезда в нечетном направлении, принимаемая в расчетах, т (при схеме пропуска поездов в нечетном направлении Н-с-с-с  $\bar{m}_{\text{неч.}} = 5900$  т);

$\bar{m}_{\text{чет.}}$  – средняя масса грузового поезда в четном направлении, принимаемая в расчетах, т ( $\bar{m}_{\text{чет.}} = 3000$  т).

Результаты расчета определения объемов грузовых перевозок в четном и нечетном направлениях для различных межпоездных интервалов приведены в таблице 8.9.

Таблица 8.9 – Изменение объемов грузовых перевозок в зависимости от межпоездных интервалов

Межпоездной интервал, мин.	Количество грузовых поездов в сутки		Работа по направлению, млн ткм брутто	
	нечетное	четное	нечетное	четное
13	66	66	114,5	58,2
12	71	71	123,2	62,6
11	78	78	135,3	68,8
10	86	86	149,2	75,9
9	95	95	164,8	83,8

Экономические показатели проекта рассчитываются исходя из условия, что в границах рассматриваемого участка реализуется комплекс мероприятий, предусматривающий монтаж двух СНЭЭ на постах секционирования ПС Юг и ПС Берлога и замену восьми понижающих трансформаторов на тяговых подстанциях Кузино, Сабик, Ергач, Кишерть (по два каждой из подстанций). Рассмотренный вариант реализации позволяет достичь максимального увеличения пропускной способности при ограниченном наборе технических мероприятий (увеличение размеров движения на 29 пар поездов в сутки).

При оценке доходной части проекта принимается благоприятный сценарий роста объемов перевозок, который характеризуется поэтапным

равномерным приростом (размеры движения увеличиваются на три пары поездов в год до достижения в перспективе целевого значения – увеличение размеров движения на 29 пар поездов в сутки).

Расчет доходной части при увеличении грузооборота исчисляется на основе среднегодовой доходной ставки (6,1171 руб./10 ткм), учитывающей разные виды перевозимых железной дорогой грузов. Расходная часть проекта помимо капитальных затрат на реализацию проекта определяется на основе утвержденных в ОАО «РЖД» расходных ставок, определяемых на основе зависящих от объемов работы расходов ОАО «РЖД» по перевозочным видам деятельности [226].

Определение экономического эффекта осуществляется с учетом дисконтирования по ставке, принятой в соответствии с Прогнозом социально-экономического развития Российской Федерации на период до 2036 года [225].

Расчет экономического эффекта включает в себя следующие этапы:

- расчет притоков денежных поступлений, получаемых за счет прироста пропускной способности в результате реализации проекта;
- оценка оттоков денежных средств, включающих: капитальные и эксплуатационные затраты, налоговые отчисления;
- оценка совокупной стоимости владения (стоимость проекта с учетом капитальных и эксплуатационных расходов, а также налоговых отчислений);
- оценка движения денежных средств от реализации проекта.

Расчет технико-экономических показателей выполнен с учетом анализа рисков не достижения заявленных показателей экономической эффективности согласно методическим подходам при оценке эффективности работ плана научно-технического развития ОАО «РЖД» (распоряжение № 2666/р от 26.12.2016 г. [227]). При этом был использован метод определения чувствительности проекта (снижение доходности на 15 %).

Расчет показателей экономической эффективности выполнен в соответствии с Методическими рекомендациями по оценке инвестиционных проектов РЖД 2538р от 25.11.2008 г. [222] и Требованиями к составлению

технико-экономического обоснования реализации мероприятия в рамках инвестиционного проекта ОАО «РЖД» «Внедрение ресурсосберегающих технологий на железнодорожном транспорте» [228].

В соответствии с [227] мероприятие по внедрению СНЭЭ классифицируется как работа с коммерческим эффектом.

В качестве основных показателей, используемых для расчетов эффективности инвестиционного проекта, принимаются:

- чистый доход;
- чистый дисконтированный доход;
- совокупная стоимость владения за расчетный период (капитальный и эксплуатационные затраты, налоговые отчисления).

Чистый доход рассчитывается по формуле (8.4) [228].

В случае, если ЧДД за расчетный период (горизонт планирования) принимает положительное значение, проект признается эффективным.

Налоговое окружение проекта:

- 1) ставка налога на имущество – 2,2 %;
- 2) ставка налога на прибыль – 20 %.

Предельный горизонт планирования, принятый для оценки срока окупаемости при формировании финансового плана, составляет 10 лет (357). Интервал планирования равен одному году, (коэффициент дисконтирования принят равным 0,045).

Для оценки поступлений денежных средств принимаются прогнозные показатели в соответствии с Прогнозом социально-экономического развития Российской Федерации на период до 2036 года. Уровень инфляции на рассматриваемый период до 2036 года оценивается в 2,4 %, рост цен на электроэнергию для расчетов принимается на уровне 3,0 % в год.

Расчет экономического эффекта выполнен исходя из условий, что действующая доходная ставка по грузоперевозкам (на 2019 г.) составляет 611,71 коп./10 ткм, расходная ставка принята в соответствии с распоряжением ОАО «РЖД» от 07.06.2019 г. № 1137р и составляет 12,34 коп./10 т·км брутто.

Расчет экономического эффекта выполнен исходя из условий, что средневзвешенный тариф на электроэнергию на тяговые нужды составляет 5,00 руб./кВт·ч.

Для условий непараллельного графика увеличение размеров в грузовом движении при сокращении межпоездного интервала с 13 до 9 мин для расчетных условий («Н-с-с-с») составляет 29 пар. Результаты расчета увеличения годовых доходов ОАО «РЖД» за счет прироста пропускной способности в результате реализации проекта приведены в таблице 8.10.

Таблица 8.10 – Экономический эффект за счет внедрения СНЭЭ на участке (Кузино – Пермь-II)

Увеличение размеров движения, пар поездов	Увеличение работы в сутки, млн ткм брутто		Прирост грузооборота, тыс. ткм брутто в сутки	Эффект, млн руб./год
	нечетное направление	четное направление		
1	1,7	0,9	2616,6	572,4
5	8,7	4,4	13083,0	2862
12	20,8	10,6	31399,2	6869
20	34,7	17,6	52332,0	11449
29	50,3	25,6	75881,4	16601

По предварительным оценкам предприятий-изготовителей СНЭЭ капитальные затраты на реализацию, включающие в себя стоимость предпроектного обследования, оборудования, доставки и пусконаладочных работ, оцениваются на уровне 841,0 млн руб., в том числе:

установка двух СНЭЭ – 447,0 млн руб., в том числе:

стоимость СНЭЭ – 230 млн. руб. (ПС Берлога) и 170 млн. руб. (ПС Юг);

проектные работы – 6,0 млн руб.;

доставка оборудования на место размещения – 0,5 млн. руб. в расчете на СНЭЭ;

монтажные и пусконаладочные работы – 20,0 млн. руб. в расчете на СНЭЭ;

замена восьми силовых понижающих трансформаторов – 394,0 млн руб. (стоимость принята на основе экспертной оценки на основе усредненной стоимости реализации проектов по замене силовых понижающих трансформаторов).

Дополнительные эксплуатационные расходы обусловлены необходимостью выполнения работ по плановому техническому обслуживанию двух СНЭЭ (данные по дополнительным эксплуатационным затратам приведены в ценах 2020 года. За базовый год (год реализации Проекта) принят 2021 год):

заработная плата эксплуатирующего персонала (с учетом всех надбавок и налоговых отчислений): ежемесячно – 300 тыс. руб.;

техническое обслуживание, в том числе: ежеквартальное обслуживание – 200 тыс. руб.; полугодовое обслуживание (включая ежеквартальное) – 400 тыс. руб.;

текущий ремонт (с учетом плановой замены батарей): один раз в 3,5 года – 90,0 млн руб.;

капитальный ремонт (включая средний ремонт): один раз в 10,5 лет – 98 млн руб.

Установленная мощность и затраты электроэнергии на собственные нужды двух СНЭЭ приведены в таблице 8.11 (по данным разработчика Лиотех).

Результаты оценки притоков денежных средств за счет увеличения пропускной способности при реализации проекта выполнены для условий равномерного прироста размеров движения в границах расчетного периода (увеличение на 3 пары поездов ежегодно). Таким образом, совокупная стоимость владения (стоимость Проекта с учетом капитальных и эксплуатационных расходов, а также налоговых отчислений) за расчетный период равный 10 годам не должна превышать 81,6 млрд руб.

При анализе рисков недостижения заявленных показателей экономической эффективности работы согласно методическим подходам при оценке эффективности работ плана научно-технического развития ОАО «РЖД» (распоряжение № 2666/р от 26.12.2016 г. [227]) был использован

метод определения чувствительности проекта (снижение доходности на 15 %). Совокупная стоимость владения с учетом рисков за расчетный период, равный 10 годам, не должна превышать 69,3 млрд. руб.

Таблица 8.11 – Установленная мощность и затраты электроэнергии на собственные нужды

Составляющая затрат	Установленная мощность, кВт		Продолжительность работы в год, ч	Годовой расход электроэнергии, кВт·ч	
	ПС Берлога	ПС Юг		ПС Берлога	ПС Юг
1	2	3	4	5	6
Аккумуляторный модуль, в том числе:					
тепловыделение заряд/разряд	23	11,5	8760	201 480	100 740
кондиционирование	7,6	3,8	744	5 707	2 853
прочее	1,0	1,0	8760	8 760	8 760
Преобразовательный модуль, в том числе:					
потери в преобразователе	5	3,0	8760	43 800	26 280
кондиционирование	1,66	1,0	744	1 243	744
прочее	1,0	1,0	8760	8 760	8 760
Всего	39,3	21,3	Итого	269 750	148 137
Всего				417 887	

Примечание. При оценке денежных потоков затраты электроэнергии на собственные нужды приняты в объеме 420 тыс. кВт·ч.

Суммарный дисконтированный денежный поток за период, равный 10 годам, составит около 54,45 млрд руб. Расчетный срок окупаемости проекта – менее одного года.

Суммарный дисконтированный денежный поток за период, равный 10 годам, составит около 46,1 млрд. руб. Расчетный срок окупаемости – менее одного года. Основным фактором, который может оказать влияние на достижение заявленного эффекта, является не соответствие фактических и принятых в расчете размеров движения грузовых поездов.

По результатам представленных расчетов проект может быть признан устойчивым к влиянию факторов неопределенности и риска.

Основным показателем эффективности применения СНЭЭ является улучшение показателей нагрузочной способности СТЭ и, как следствие, увеличение пропускной способности участка железной дороги и соответствующий рост объема грузооборота, приводящие к увеличению дохода ОАО «РЖД».

#### 8.4 Выводы по восьмой главе

Результаты оценки технического эффекта для реализации проекта внедрения СНЭЭ в тяговом электроснабжении позволяют сделать следующие выводы.

Выполнена оценка сокращения минимальных межпоездных интервалов и повышения пропускной и провозной способности участка за счет регулирования уровня напряжения на токоприемнике ЭПС в границах лимитирующих межподстанционных при применении СНЭЭ.

Показано, что на современном уровне НЭЭ на основе химических источников тока не отвечают условиям работы с электротяговой нагрузкой по причине их низкого срока службы относительно нормативного срока эксплуатации, в отличие от видов НЭЭ, относящихся к электрическим, электромеханическим и гравитационным.

Для расчетных параметров СНЭЭ в условиях пропуска поездов (на примере участков Октябрьской и Свердловской железных дорог) показано, что потенциальный рост объема грузовой работы превысит 2 млн ткм брутто в сутки в обоих направлениях.

С учетом вышеизложенного, на основании технико-экономических расчетов следует, что применение СНЭЭ в СТЭ позволяет повысить показатели нагрузочной способности, а проекты внедрения систем на лимитирующих участках являются эффективными.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненные в рамках диссертации исследования позволили получить новые научно-обоснованные технические, технологические и методологические решения и разработки, применение которых позволяет определять параметры и места размещения систем накопления электроэнергии с целью повышения нагрузочной способности тягового электроснабжения на лимитирующих межподстанционных зонах и энергетической эффективности перевозочного процесса на участках железных дорог. Полученные результаты позволяют применить их на этапе разработки и проектирования систем накопления электроэнергии для систем тягового электроснабжения постоянного и переменного тока.

В диссертационной работе представлены следующие основные научные и практические результаты:

1. По результатам анализа условий формирования электротяговой нагрузки определены ее основные параметры, разработаны способ определения электропотребления и потерь электроэнергии и математические модели, позволяющие в зависимости от изменения параметров профиля пути и предложенных расчетных параметров графика движения поездов определять тяговое электропотребление. Установлено, что изменение условий формирования электротяговой нагрузки на участках с различным профилем пути при преобладании грузового движения приводит к соответствующей вариации тягового электропотребления в диапазонах 3 – 10 % для участков постоянного тока и 3 – 4 % – переменного тока. При этом вариация потерь электроэнергии для участков постоянного тока находится в диапазоне 1 – 1,5 %, для участков переменного тока – в диапазоне 1 – 1,3 %.

2. Усовершенствован способ определения энергетических показателей системы тягового электроснабжения, позволяющий учитывать изменение напряжения на токоприемнике электроподвижного состава в условиях работы

систем накопления электроэнергии и применения рекуперативного торможения.

3. Разработаны математические модели для определения тягового электропотребления и потерь электроэнергии в системе тягового электроснабжения постоянного и переменного тока, отличающийся учетом предложенных показателей графика движения поездов и типом профиля пути.

4. Разработаны математические модели оценки пропускной и провозной способности по устройствам тягового электроснабжения с учетом изменения параметров систем накопления электроэнергии (пороговое напряжения, ток заряда, номинальные энергоемкость и мощности, объемами электропотребления, соответствующими режимам заряда и разряда) на основе регрессионного анализа и аппарата искусственных нейронных сетей.

5. Усовершенствован способ определения параметров систем накопления электроэнергии для систем тягового электроснабжения для повышения пропускной способности и энергетической эффективности на одно- и двухпутных участках железных дорог, отличающийся учетом условий работы систем накопления электроэнергии для расчетных вариантов электротяговой нагрузки, степени заряженности, глубины разряда и коэффициента полезного действия.

6. Усовершенствована методика выбора мест размещения системы накопления электроэнергии и определения ее параметров в системе тягового электроснабжения, отличающаяся от известных учетом условий формирования электротяговой нагрузки и энергии рекуперации.

7. Предложены технические и технологические решения по построению систем накопления электроэнергии на тяговых подстанциях и постах секционирования контактной сети для улучшения эксплуатационных показателей системы тягового электроснабжения и определению характеристик устройств для обеспечения их устойчивой работы.

8. По результатам моделирования работы систем накопления электроэнергии в тяговом электроснабжении определены временные

показатели систем в различных режимах работы. В зависимости от мест размещения систем накопления электроэнергии, получено, что средняя продолжительность эпизодов заряда и разряда на постах секционирования составляет 5 мин, средняя цикличность работы – около 2 циклов/час. Установлена средняя продолжительность эпизодов работы систем накопления электроэнергии на тяговых подстанциях: для собственных нужд тяговых подстанций продолжительность эпизодов разряда составляет около 95 мин; для ограничения перегрузки силового оборудования подстанций продолжительность эпизодов разряда составляет около 5 мин; продолжительность эпизодов заряда – 5 мин. Снижение уровня потерь в тяговой сети межподстанционной зоны при применении систем накопления электроэнергии составляет около 0,5 %.

9. Разработаны математические модели гибридной системы накопления электроэнергии, состоящие из аккумулятора и суперконденсатора, для системы тягового электроснабжения, позволяющие определить энергетические показатели, энергоемкость и мощность при реализации пассивной и активной топологии гибридных устройств.

10. Разработана и реализована физическая модель гибридной системы накопления электроэнергии для моделирования режимов ее работы с электротяговой нагрузкой, на основе которой проведена апробация разработанной математической модели, подтверждающая характер изменения энергетических показателей системы тягового электроснабжения.

11. Определены параметры систем накопления электроэнергии, оказывающие влияние на показатели нагрузочной способности системы тягового электроснабжения. Выполнена оценка эффективности работы систем накопления электроэнергии при снижении номинальной энергоемкости по критерию эффективности использования энергии рекуперации. Получено, что требуемая мощность для систем накопления электроэнергии в системах тягового электроснабжения постоянного тока участков железных дорог в зависимости от решаемых задач составляет – 1,5...9 МВт, энергоемкость –

1,3...3,0 МВт·ч, для систем тягового электроснабжения переменного тока – 15 МВт и 12 МВт·ч соответственно.

12. Выполнена предварительная оценка технического эффекта при применении систем накопления электроэнергии в условиях пропуска поездов на примере участка Октябрьской и Свердловской железных дорог, заключающегося в обеспечении роста ежесуточного объема грузовой работы свыше 2,5 млн ткм брутто.

С учетом вышеизложенного, следует, что применение систем накопления электроэнергии в системах тягового электроснабжения позволяет повысить показатели нагрузочной способности, а проект внедрения систем на участках железных дорог, содержащих лимитирующие межподстанционные зоны, является эффективным, позволяющим обеспечить прирост объема тоннокилометровой работы на рассматриваемых участках свыше 900 млн ткм брутто в год.

В качестве рекомендаций и перспективы дальнейшей разработки темы диссертации предлагаются следующие направления исследований: создание математической модели гибридной системы накопления электроэнергии, отличающейся от известных тем, что ее зарядные и разрядные характеристики адаптируются под изменение показателей электротяговой нагрузки; совершенствование способов определения энергетических показателей системы тягового электроснабжения с учетом работы регулируемых устройств; повышение эффективности работы преобразователей, применяемых для согласования работы систем накопления электроэнергии с системами тягового электроснабжения постоянного и переменного тока; повышение эффективности работы системы тягового электроснабжения переменного тока за счет согласованной работы источников мощности, регулируемых устройств компенсации реактивной мощности и систем накопления электроэнергии; разработка технических решений по применению систем накопления в системах тягового электроснабжения, содержащих возобновляемые источники энергии.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Котельников, А. В. Электрификация железных дорог. Мировые тенденции и перспективы / А. В. Котельников. – Москва : Интекст, 2002. – 104 с. – Текст : непосредственный.
2. ГОСТ 6962-75. Транспорт электрифицированный с питанием от контактной сети. Ряд напряжений (с Изменением № 1). – Москва : ИПК Издательство стандартов, 1996. – 4 с. – Текст : непосредственный.
3. Правила технической эксплуатации железных дорог Российской Федерации : официальное издание : утверждены Минтрансом России от 23.06.2022, № 250. – Транспорт России. – № 31. – 2022. – 371 с. – Текст : непосредственный.
4. ГОСТ Р 57670-2017. Системы тягового электроснабжения железной дороги. Методика выбора основных параметров. – Изд. официальное. – Москва : Стандартинформ, 2017. – 48 с. – Текст : непосредственный.
5. ГОСТ Р 55647-2013. Провода контактные из меди и ее сплавов для электрифицированных железных дорог. Технические условия. – Изд. официальное. – Москва : Стандартинформ, 2014. – 10 с. – Текст : непосредственный.
6. ГОСТ 32697-2014. Тросы контактной сети железной дороги несущие. Технические условия. – Изд. официальное. – Москва : Стандартинформ, 2015. – 6 с. – Текст : непосредственный.
7. ГОСТ 4775-91. Провода неизолированные биметаллические сталемедные. Технические условия. – Изд. официальное. – Москва : Издательство стандартов, 1992. – 13 с. – Текст : непосредственный.
8. ГОСТ 839-80. Провода неизолированные для воздушных линий электропередачи. Технические условия (с Изменениями № 1, 2). – Изд. официальное. – Москва : ИПК Издательство стандартов, 2002. – 22 с. – Текст : непосредственный.

9. СП 224.1326000.2014. Тяговое электроснабжение железной дороги. – Изд. официальное. – Москва : Стандартинформ, 2014. – 79 с. – Текст : непосредственный.

10. ГОСТ 32895-2014. Электрификация и электроснабжение железных дорог. Термины и определения. – Изд. официальное. – Москва : Стандартинформ, 2014. – 39 с. – Текст : непосредственный.

11. Бадёр, М. П. Развитие системы тягового электроснабжения постоянного тока повышением напряжения в тяговой сети до 24 кВ и ее адаптация для высокоскоростных магистралей / М. П. Бадёр. – Текст : непосредственный // Электроника и электрооборудование транспорта. – 2016. – № 6. – С. 2 – 7.

12. Бурков, А. Т. Концептуальная модель системы энергообеспечения интегрированной сети скоростного и высокоскоростного железнодорожного транспорта России / А. Т. Бурков, В. В. Сероносков, А. В. Мизинцев. – Текст : непосредственный // Электротехника. – 2017. – № 10. – С. 8 – 13.

13. Патент № 124980 Российская Федерация, МПК H01J 1/00 (2006.01). Тяговая подстанция системы электроснабжения постоянного тока повышенного напряжения (12-24 кВ) : № 2012121448/07 : заявл. 25.05.2012 : опубл. 20.02.2013 / Калугин И. Г., Пупынин В. Н. ; заявитель МГУПС(МИИТ). – Текст : непосредственный.

14. Аржанников, Б. А. Концептуальный подход к проблеме обоснования экономической эффективности трехфазной системы электрической тяги переменного тока / Б. А. Аржанников, В. А. Кокшаров. – DOI 10.20291/1815-9400-2020-1-74-79. – Текст : непосредственный // Транспорт Урала. – 2020. – № 1(64). – С. 74 – 79.

15. СТО «РЖД» 1.07.002-2010. «Инфраструктура железнодорожного транспорта на участках обращения грузовых поездов повышенного веса и длины. Технические требования» : утверждены ОАО «РЖД» от 25.11.2010 г. № 2412р. – Москва : ОАО «РЖД». – Текст : непосредственный.

16. Инструкция по расчету наличной пропускной способности железных дорог : утверждена ОАО «РЖД» от 10.11.2010 г., № 128 (в ред. от 24.01.2019). – Москва : ОАО «РЖД». – 2019. – Текст : непосредственный.

17. ГОСТ 14209-85. Трансформаторы силовые масляные общего назначения. Допустимые нагрузки. Москва : Стандартиформ, 2009. – 37 с. – Текст : непосредственный.

18. Экономия энергии на рельсовом транспорте Японии. – Текст : непосредственный / Железные дороги мира. – 2013. – № 8. – С. 47 – 53.

19. Аккумуляторы третьего поколения (Лиотех). – Текст : электронный // Лиотех : [сайт]. – URL: <https://www.liotech.ru/products/akkumulyatory/akkumulyatory-tretego-pokoleniya/> (дата обращения: 30.07.2020).

20. Маховичные накопители кинетической энергии НКЭ-3Г для подъёмно-транспортного оборудования : [презентация] : – Текст : электронный // Кинемак : [сайт]: – URL: <http://www.kinemak.ru/wp-content/uploads/2014/07/List2s.pdf> (дата обращения: 31.07.2020).

21. Аккумуляторы литий-ионные. Руководство по эксплуатации. ПБША.563362.006РЭ. Новосибирск : ООО «Лиотех-Инновации». – 2019. – 24 с. – Текст : непосредственный.

22. Бычкова, М. П. Система накопителей электроэнергии для повышения энергоэффективности в метро / М. П. Бычкова // Энергосовет. – 2011. – № 3(16). – С. 74 – 76. – Текст : непосредственный.

23. Концепция развития рынка хранения электроэнергии в Российской Федерации : [презентация]. – Текст : электронный : Министерство энергетики Российской Федерации : официальный сайт. – 2017. – URL: <https://minenergo.gov.ru/view-pdf/9013/74739> (дата обращения: 29.06.2019).

24. Рынок систем накопления электроэнергии в России: потенциал развития : [доклад] : Центр стратегических разработок / под ред. Ю. Удальцова, Д. Холкина. – Текст : электронный // Энерджинет. – Москва. – 2018. – 72 с. – URL: <https://www.csr.ru/upload/iblock/d11/d1165e0f8aa6d8909cf45408b0f188d2.pdf> (дата обращения: 29.06.2019).

25. Шевлюгин, М. В. Опыт пуска электроподвижного состава при помощи «накопительных» тяговых подстанций на Московском метрополитене / М. В. Шевлюгин, Д. В. Ермоленко, А. Н. Стадников – Текст : непосредственный // Электротехника. – 2017. – № 11. – С. 75 – 80.

26. Черемисин, В. Т. Совершенствование системы тягового электроснабжения постоянного тока с накопителями электрической энергии на полигонах обращения тяжеловесных поездов: Научная монография / В. Т. Черемисин, В. Л. Незевак, А. П. Шатохин. – Омск : Омский гос. ун-т путей сообщ., 2018. – 282 с. – Текст : непосредственный.

27. Черемисин, В. Т. Повышение энергоэффективности перевозочного процесса в условиях формирования графика движения поездов: Научная монография / В. Т. Черемисин, В. Л. Незевак, А. П. Шатохин. – Омск : Омский гос. ун-т путей сообщ., 2019. – 251 с. – Текст : непосредственный.

28. Носков, В. Н. Об энергоемкости накопителя электроэнергии для тепловоза / В. Н. Носков, М. Ю. Пустоветов. – Текст : непосредственный // Вестник ВНИИЖТа. – 2008. – № 5. – С. 42 – 44.

29. Носков, В. Н. Сверхпроводниковые индуктивные накопители энергии в энергоустановках железнодорожного транспорта : дис... канд. техн. наук: 05.22.07 / Владимир Николаевич Носков. – Ростов-на-Дону, 2010. – 209 с. – Текст : непосредственный.

30. Носков, В. Н. Об энергоемкости накопителя энергии для размещения на борту маневрового тепловоза / В. Н. Носков, М. Ю. Пустоветов. – Текст : непосредственный // Инновационные технологии и процессы производства в машиностроении : междунар. сб. науч. тр. – Ростов-на-Дону : / Ростовская гос. акад. сельскохоз. машиностроения. – 2008. – С. 83 – 87.

31. Косов, Е. Е. К вопросу выбора мощностных характеристик перспективного автономного тягового подвижного состава / Е. Е. Косов, В. А. Азаренко, М. М. Комарицкий. – Текст : непосредственный // Транспорт Российской Федерации. Спец. выпуск: Наука и транспорт. Железные дороги России. – 2007. – С. 20 – 21.

32. Евстафьев, А. М. Оценка энергоёмкости бортового накопителя энергии для тягового подвижного состава / А. М. Евстафьев. – Текст : электронный // БРНИ. – 2018. – № 2. – С. 7 – 15. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/otsenka-energoemkosti-bortovogo-nakopi-telya-energii-dlya-tyagovogo-podvizhnogo-sostava> (дата обращения: 02.10.2019).

33. Накопители энергии / А. Д. Бут, Б. Л. Алиевский, С. Р. Мизюрин [и др.]. – Москва : Энергоатомиздат, 1991. – 400 с. – Текст : непосредственный.

34. ТЭМ9Н – маневрово-вывозной тепловоз с гибридной силовой установкой – Текст : электронный // Сайт группы Синара. СТМ : [сайт]. – URL: <https://sinaratm.ru/products/teplovozy/tem9h-sinarahybrid/> (дата обращения: 29.12.2018).

35. Маневровый тепловоз ТЭМ35 – Текст : электронный // Брянский машиностроительный завод. ТМХ : [сайт]. – URL: <http://www.ukbmz.ru/production/manevrovye-teplovozy/> (дата обращения: 29.12.2018).

36. Евстафьев, А. М. Повышение энергетической эффективности электрического подвижного состава : дис... докт. техн. наук : 05.09.03 / Андрей Михайлович. – СПб, 2018. – 396 с. – Текст : непосредственный.

37. Бадёр, М. П. Современные технологии для перехода к интеллектуальным системам электроснабжения / М. П. Бадёр. – Текст : непосредственный // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2013. – № 2 (50). – С. 86 – 92.

38. Крюков, А. В. Концепция интеллектуальной системы тягового электроснабжения / А. В. Крюков, В. П. Закарюкин. – Текст : непосредственный // Инновационный транспорт. – 2015. – № 1 (15). – С. 59 – 65.

39. Незевак, В. Л. Основные подходы к использованию накопителей электроэнергии в сетях Smart Grid системы тягового электроснабжения / В. Л. Незевак. – Текст : непосредственный // Транспорт-2015 : труды межд. науч.-практ. конференции. – Ростов-на-Дону : Ростовский гос. ун-т путей сообщ., 2015. – С. 103 – 104.

40. Деньщиков, К. К. Гибридный накопитель электроэнергии мегаваттного диапазона / К. К. Деньщиков, А. З. Жук. – Текст : непосредственный // Возобновляемая энергетика XXI век: Энергетическая и экономическая эффективность : материалы межд. конгресса REENCON-XXI. Под ред. Д. О. Дуникова, О. С. Попеля. – 2016. – С. 129 – 135.

41. ГОСТ 19431-84. Энергетика и электрификация. Термины и определения / Энергетика. Термины и определения – Изд. официальное. – Москва : Стандартинформ, 2005. – 11 с. – Текст : непосредственный.

42. Макоклюев, Б. Электропотребление энергосистем России. Исследование характера колебаний / Б. Макоклюев – Текст : непосредственный // Новости Электротехники. – № 1(109). – 2018. – С. 52 – 53.

43. Михайлов, В. В. Тарифы и режимы электропотребления / В. В. Михайлов. – Москва : Энергоатомиздат, 1986. – 216 с. – Текст : непосредственный.

44. Методика анализа и прогнозирования расхода ТЭР на тягу поездов : утверждена ОАО «РЖД» от 26.12.2014, № 512. Москва : ОАО «РЖД». – 2014. – 96 с. – Текст : непосредственный.

45. Патент № 2573098 Российская Федерация, МПК В60L 3/00 (2006.01) G01R 21/133 (2006.01). Способ определения технологических потерь электроэнергии на тягу на тяговых подстанциях постоянного тока железнодорожного транспорта : № 2014110565/11 : заявл. 19.03.2014 : опубл. 20.01.2016 / Каштанов А. Л., Незевак В. Л., Черемисин В. Т. [и др.] ; заявитель ОмГУПС (ОМИИТ). – 5 с.: ил. – Текст : непосредственный.

46. Патент № 2559408 Российская Федерация, МПК В60L3/00. Способ определения расхода электроэнергии электроподвижным составом в границах произвольной зоны учета : № 2014110567/11 : заявл. 19.03.2014 : опубл. 10.08.2015 / Каштанов А. Л., Незевак В. Л., Никифоров М. М. [и др.] ; заявитель ОмГУПС (ОМИИТ). – 5 с.: ил. – Текст : непосредственный.

47. Патент № 2572797 Российская Федерация, МПК В60L 3/00. Способ определения технологических потерь электроэнергии в тяговой сети железнодорожного транспорта : № 2014110999/11 : заявл. 21.03.2014 :

опубликовано 20.01.2016 / Каштанов А. Л., Незевак В. Л., Никифоров М. М. [и др.] ; заявитель ОмГУПС (ОМИИТ). – 5 с.: ил. – Текст : непосредственный.

48. Марквардт, К. Г. Электроснабжение электрифицированных железных дорог / К. Г. Марквардт. – Москва : Транспорт, 1982. – 528 с. – Текст : непосредственный.

49. Тимофеев, Д. В. Режимы в электрических системах с тяговыми нагрузками / Д. В. Тимофеев. – Москва : Энергия, 1972. – 296 с. – Текст : непосредственный.

50. Никонов, А. В. Оценка энергоэффективности статического генератора реактивной мощности / А. В. Никонов, В. Т. Черемисин. – Текст : непосредственный // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2016. – № 2(62). – С. 128 – 134.

51. Чернорай, В. А. Оценка эффективности применения режимной автоматики резервных преобразовательных агрегатов на основе анализа графиков нагрузки при существующих уставках / В. А. Чернорай. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2016. – № 4 (28). – С. 115 – 124.

52. Комяков А. А., Незевак В. Л., Эрбес В. В. Оценка эффективности параллельной работы выпрямительных преобразователей тяговых подстанций на основе данных измерительных систем / А. А. Комяков, В. Л. Незевак, В. В. Эрбес. – Текст : непосредственный // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2015. – №2 (46). – С. 137 – 143.

53. Черемисин, В. Т. Характеристики профилей пути на электрифицированных участках железных дорог в аспекте классификации типов / В. Л. Незевак, А. Е. Перестенко, В. Т. Черемисин. – Текст : непосредственный // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2017. – № 2. – С. 118 – 128.

54. Преимущества использования программного комплекса «Энергия Альфа». – Текст : электронный // ООО «Инженерный центр «Энергоаудитконтроль» : [сайт]. – URL: <http://www.ackye.ru/activities/ea/> (дата обращения: 29.07.2020).

55. Косарев, А. Б. Основы методологии планирования эксперимента и построения аппроксимационных моделей при внедрении АСКУЭ на электрифицированных железных дорогах ОАО «РЖД» / А. Б. Косарев, А. Н. Лисенков. – Текст : непосредственный // Вестник научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. – 2005. – № 3. – С. 1.

56. Мочалин, Д. С. Оценка и прогнозирование энергопотребления аппарата воздушного охлаждения газа на компрессорной станции / Д. С. Мочалин, В. Г. Титов. – Текст : непосредственный // Вестник Чувашского университета. – 2014. – № 2. – С. 41 – 46.

57. Фаюстов, А. А. Проверка гипотезы о нормальном распределении выборки по критерию согласия Пирсона средствами приложения Excel / А. А. Фаюстов. – Текст : непосредственный // Законодательная и прикладная метрология. – 2016. – № 6 (44). – С. 3 – 9.

58. Павлов, С. В. Оценка расхождения между эмпирическим и теоретическим распределениями кровенаполнения нижних конечностей с помощью критерия Пирсона / С. В. Павлов, С. В. Сандер, Т. И. Козловская. – Текст : непосредственный // Оптико-электронные информационно-энергетические технологии. – 2013. – № 2 (26). – С. 67 – 71.

59. Лемешко, Б. Ю. Критерии проверки отклонения распределения от равномерного закона. Руководство по применению / Б. Ю. Лемешко, П. Ю. Блинов. – Москва : ООО «Научно-издательский центр ИНФРА-М». – 2015. – 182 с. – Текст : непосредственный.

60. Дудоров, А. Е. Частота падения метеоритов / А. Е. Дудоров, О. В. Еретнова. – Текст : непосредственный // Челябинский физико-математический журнал. – 2014. – № 1(330). – Вып. 19. – С. 58 – 67.

61. Кобзарь, А. И. Прикладная математическая статистика. Для инженеров и научных работников. – Москва : ФИЗМАТЛИТ, 2006. – 816 с. – Текст : непосредственный.

62. Корчагин, В. А. Применение негауссовских статистических моделей в задачах технической эксплуатации автомобилей / В. А. Корчагин,

В. И. Игнатенко, Д. К. Сысоев. – Текст : непосредственный // Вестник СибАДИ. – 2017. – № 3 (55). – С. 68 – 74.

63. Лемешко, Б. Ю. Сравнительный анализ мощности критериев согласия при близких конкурирующих гипотезах. I. Проверка простых гипотез / Б. Ю. Лемешко, С. Б. Лемешко, С. Н. Постовалов. – Текст : непосредственный // Сибирский журнал индустриальной математики. – 2008. – Том 11. – № 2. – С. 96 – 111.

64. Баранов, А. М. Развитие пропускной и провозной способности однопутных линий / А. М. Баранов, В. Е. Козлов, Э. Д. Фельдман. – Текст : непосредственный // Труды ВНИИЖТа. – Москва : Транспорт, 1964. – Вып. 280. – 196 с.

65. Теория электрической тяги / В. Е. Розенфельд, И. П. Исаев, Н. Н. Сидоров [и др.]. / под ред. И.П. Исаева. – Москва : Транспорт, 1995. – 294 с. – Текст : непосредственный.

66. Влияние рекуперативного торможения на систему тягового электроснабжения (с сетевой школы) / В. Т. Черемисин, В. Л. Незевак, А. С. Вильгельм [и др.]. – Текст : непосредственный // Локомотив. – 2013. – № 8(680). – С. 7 – 10.

67. Методические указания по определению технико-экономической эффективности новых и усовершенствованных электровозов. – Москва : Транспорт, 1986. – 117 с. – Текст : непосредственный.

68. Вильгельм, А. С. Определение индикатора энергоэффективности электровозов постоянного и переменного тока / А. С. Вильгельм, М. М. Никифоров. – Текст : непосредственный // Инновационные проекты и технологии в образовании, промышленности и на транспорте : материалы науч. конференции. – Омск : Омский гос. ун-т путей сообщ., 2016. – С. 147 – 154.

69. Никифорова, Н. Б. Обобщенные профили железных дорог при тягово-энергетических расчетах / Н. Б. Никифорова, Р. В. Мурзин, Я. Б. Кудрявцев. – Текст : непосредственный // Вестник ВНИИЖТ. – 2011. – № 2. – С. 17 – 21.

70. Вильгельм, А. С. Сравнительная эффективность вариантов использования энергии рекуперации на железных дорогах постоянного тока / А. С. Вильгельм, В. Л. Незевак, А. П. Шатохин. – Текст : непосредственный // Наука и образование транспорту : материалы межд. науч.-практ. конференции. – Самара : Самарский гос. ун-т путей сообщ., 2013. – С. 243 – 246.

71. Закарюкин, В. П. Моделирование режимов систем тягового электроснабжения при движении тяжеловесных поездов / В. П. Закарюкин, А. В. Крюков, А. В. Черепанов. – Текст : непосредственный // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2016. – № 11. – С. 133 – 142.

72. Кондратьев, Ю. В. Основные аспекты сравнения различных систем тягового электроснабжения переменного тока / Ю. В. Кондратьев, В. Л. Незевак. – Текст : непосредственный // Транспортная инфраструктура Сибирского региона : материалы VII межд. науч.-практ. конференции в 2 т. – Т. 1. – Иркутск : Иркутский гос. ун-т путей сообщ., 2016. – С. 656 – 660.

73. Гателюк, О. В. Оптимизация графика движения поездов по критерию расхода электрической энергии на тягу на участках железных дорог в условиях применения рекуперативного торможения / О. В. Гателюк, В. Л. Незевак, А. П. Шатохин. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2015. – № 1. – С. 59 – 69.

74. Черемисин, В. Т. Повышение энергетической эффективности системы тягового электроснабжения в условиях работы постов секционирования с накопителями электрической энергии / В. Т. Черемисин, В. Л. Незевак, А. П. Шатохин. – Текст : непосредственный // Известия Томского политехнического университета. – 2015. – Т. 326. – № 10. – С. 54 – 64.

75. Тер-Оганов, Э. В. Определение трансформаторной мощности тяговых подстанций / Э. В. Тер-Оганов. – Текст : непосредственный // Тр. ВЗИИТ. – 1975. – вып. 74. – С. 24 – 38.

76. Марквардт, Г. Г. Исходные положения по созданию математических моделей процесса работы устройств энергоснабжения электрических

железных дорог / Г. Г. Марквардт. – Текст : непосредственный // Тр. ВЗИИТ. – 1969. – вып. 37. – С. 46 – 52.

77. Марквардт, Г. Г. Алгоритм воспроизведения на ЭЦВМ процесса изменения тяговой нагрузки при расчете системы энергоснабжения / Г. Г. Марквардт, Т. В. Полякова. – Текст : непосредственный // Тр. ВЗИИТ. – 1973. – вып. 65. – С. 95 – 107.

78. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018613909 (РФ). Fazonord-APC : № 2018611216 : заявл. 25.01.201 : опубл. 27.03.2018 / В. П. Закарюкин, А. В. Крюков ; заявитель ИрГУПС. – Текст : непосредственный.

79. Фигурнов, Е. П. Релейная защита. В 2 ч. Ч. 2. / Е. П. Фигурнов. – Москва : УМЦ ЖДТ, 2009. – 604 с. – Текст : непосредственный.

80. Юренко, К. И. Математическое моделирование энергооптимальных режимов ведения поезда с учетом возмущений / К. И. Юренко, А. Н. Савоськин, Е. И. Фандеев. – Текст : непосредственный // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Сер. Технические науки / Южный федеральный университет. Новочеркасск. – 2015. – № 3. – С. 34 – 44.

81. Бурков, А. Т. Режимы движения и особенности тяговых расчетов при определении нагрузок на устройства электроснабжения высокоскоростных линий / А. Т. Бурков, С. А. Бурков, М. А. Шарпилова. – Текст : непосредственный // Eltrans 2011 : материалы 6-го межд. симпозиума. Санкт-Петербург : Петербургский гос. ун-т путей сообщ. – 2013. – С. 337 – 349.

82. Давыдов, А. И. Алгоритм анализа данных об использовании энергоресурсов на тягу поездов на уровне локомотивных депо при проведении энергообследования ОАО «РЖД» / А. И. Давыдов, М. М. Никифоров. – Текст : непосредственный // Транспорт Урала. – 2017. – № 4(55). – С. 10 – 14.

83. Абдуллаев, С. С. Исследование факторов, влияющих на расход электроэнергии и тягу поездов / С. С. Абдуллаев, Е. А. Токбергенов. – Текст : непосредственный // Вестник Казахской академии транспорта и коммуникаций им. М. Тынышпаева. – 2011. – № 3(70). – С. 70 – 74.

84. Сидорова, Е. А. Влияние коэффициента участковой скорости на удельный расход энергии в грузовом движении / Е. А. Сидорова, С. О. Подгорная. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2016. – № 2(26). – С. 112 – 118.

85. Митрофанов, А. Н. Прогнозирование показателей энергообеспеченности перевозочного процесса на базе многофакторных моделей / А. Н. Митрофанов, Г. М. Третьяков, С. В. Копейкин. – Текст : непосредственный // Электротехника. – 2017. – № 3. – С. 12 – 17.

86. Незевак, В. Л. Основные зависимости изменения объема электроэнергии от параметров графика движения поездов на участках постоянного тока с I типом профиля / В. Л. Незевак. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2017. – № 2(30). – С. 87 – 99.

87. Черемисин, В. Т. Математическое моделирование процесса электропотребления на тягу поездов с применением метода опорных векторов / В. Т. Черемисин, А. А. Комяков, В. И. Иванченко. – Текст : непосредственный // Омский научный вестник. – 2016. – № 6(150). – С. 77 – 81.

88. Сидорова, Е. А. Влияние показателей использования локомотивов на расход энергоресурсов в грузовом движении / Е. А. Сидорова, С. О. Подгорная. – Текст : непосредственный // Транспорт Урала. – 2016. – № 1(48). – С. 41 – 45.

89. Молярчук, В. С. Теоретические основы методики нормирования расхода топлива и электроэнергии для тяговых средств транспорта / В. С. Молярчук. Москва : Транспорт, 1966. – 263 с. – Текст : непосредственный.

90. ГОСТ Р 53431-2009. Автоматика и телемеханика железнодорожная. Термины и определения. – Изд. официальное. – Москва : Стандартинформ, 2010. – 36 с. – Текст : непосредственный.

91. Мугинштейн, Л. А. Энергооптимальный тяговый расчет движения поезда / Л. А. Мугинштейн, А. Е. Илютович, И. А. Ябко. – Текст : непосредственный // Вестник ВНИИЖТа. – 2013. – № 6. – С. 3 – 13.

92. Абрамов, А. А. Энергооптимальный график движения грузовых поездов на однопутных участках / А. А. Абрамов, А. Л. Голигузова. – Текст : непосредственный // Железнодорожный транспорт. – 2011. – № 9. – С. 53 – 56.

93. Патент № 2013128152 Российская Федерация, МПК G07C 5/00 (2006.01). Автоматизированная система ведения и анализа графика движения : № 2013128152 : заявл. 19.06.2013 : опубл. 27.12.2014 / Митрофанов А. Н., Гаранин М. А., Добрынин Е. В.; заявитель СамГУПС. – 5 с.: ил. – Текст : непосредственный.

94. Климович, А. В. Обоснование возможности снижения энергозатрат на тягу электропоездов в Омском территориальном управлении Западно-Сибирской железной дороги / А. В. Климович, А. В. Ерошенко. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2016. – № 4(28). – С. 2 – 11.

95. Бадажков, М. А. Энергоэффективность существующего графика движения поездов. Решения по оптимизации / М. А. Бадажков. – Текст : непосредственный // Транспортная инфраструктура Сибирского региона : материалы конференции. – Иркутск : Иркутский гос. ун-т путей сообщ., 2017. – Т. 1. – С. 134 – 138.

96. Патент № 2213669 Российская Федерация, МПК B60L 15/40 (2000.01), B61L 3/20 (2000.01). Система управления движением электропоезда : № 2213669 С1 : заявл. 21.08.2002 : опубл. 10.10.2003 / Рабинович М. Д., Бушненко Ю. В., Буткевич Х. Ю. [и др.] ; заявитель ООО «Желдорконсалтинг». – 5 с.: ил. – Текст : непосредственный.

97. Система СВТС и энергоэффективное управление движением поездов. – Текст : непосредственный // Железные дороги мира. – 2012. – № 3. – С. 57.

98. Бадажков, М. А. Энергоэффективное использование ниток графика в организации движения поездов / М. А. Бадажков. – Текст : непосредственный // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. – 2017. – № 2(34). – С. 111 – 119.

99. Реализация полигонной технологии с использованием АПК «Эльбрус» / В. Ю. Кирякин, О. В. Ляшко, А. Ю. Анфиногенов [и др.]. – Текст : непосредственный // Железнодорожный транспорт. – 2014. – № 6. – С. 18 – 24.

100. Кирякин, В. Ю. Полигонная технология формирования прогнозных вариантных графиков с использованием АПК «Эльбрус» / В. Ю. Кирякин, А. В. Новгородцева. – Текст : непосредственный // Бюллетень объединенного ученого совета ОАО «РЖД». – 2014. – № 1. – С. 16 – 20.

101. Никифоров, М. М. Расчет эффективности использования энергии рекуперации на однопутных и двухпутных участках железных дорог постоянного и переменного тока / М. М. Никифоров, А. С. Вильгельм. – Текст : непосредственный // Вестник транспорта Поволжья. – 2018. – № 2(68). – С. 28 – 37.

102. Баева, И. А. Методика расчета системы тягового электроснабжения постоянного тока 3,0 кВ при введении устройств регулирования напряжения / И. А. Баева. – Текст : непосредственный // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2019. – Т. 16. – № 1. – С. 51 – 58.

103. Незевак, В. Л. Моделирование процессов электропотребления на тягу при изменении параметров графика движения поездов на электрифицированных участках с III и IV типом профиля пути / В. Л. Незевак. – Текст : непосредственный // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2019. – № 1(61). – С. 156 – 166.

104. Черемисин, В. Т. Перспективы применения систем накопления электроэнергии на Московском центральном кольце / В. Т. Черемисин, В. Л. Незевак – Текст : непосредственный // Бюллетень результатов научных исследований. – 2020. – № 2. – С. 33 – 44.

105. Черемисин, В. Т. Оценка регулирования напряжения на стороне высшего напряжения тяговых подстанций в аспекте энергетической эффективности / В. Т. Черемисин, В. Л. Незевак, В. В. Эрбес. – Текст : непосредственный // Транспорт Урала. – 2017. – № 3(54). – С. 75 – 81.

106. Вильгельм, А. С. Совершенствование способа определения энергетических показателей движения поезда и системы тягового электроснабжения / В. Л. Незевак, А. С. Вильгельм. – Текст : непосредственный //

Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. – 2016. – Т. 16. – № 3. – С. 32 – 40.

107. ГОСТ Р 57670 – 2017. Системы тягового электроснабжения железной дороги. – Изд. официальное. – Москва : Стандартинформ, 2017. – 46 с. – Текст : непосредственный.

108. Бессонов, Л. А. Теоретические основы электротехники: Электрические цепи. – Москва : Высш. шк., 1984. – 559 с. – Текст : непосредственный.

109. Гречишников, В. А. Измерительно-аналитическая программно-аппаратная система защиты и диагностики основного оборудования тяговых подстанций постоянного тока : дис... докт. техн. наук : 05.09.03 / Гречишников Виктор Александрович. – Москва, 2013. – 442 с. – Текст : непосредственный.

110. Полигонные технологии движения поездов по графикам на основе автоматизированной системы «Эльбрус» / Л. А. Мугинштейн, С. А. Виноградов, В. Ю. Кирякин [и др.]. – Текст : непосредственный // Железнодорожный транспорт. – 2015. – №3. – С. 13 – 19.

111. Вильгельм, А. С. Пути повышения энергоэффективности на малом кольце Московской железной дороги с использованием инверторов / А. С. Вильгельм, В. Л. Незевак, В. Т. Черемисин. – Текст : непосредственный // Транспорт Урала. – 2014. – № 3 (42). – С. 90 – 94.

112. Черемисин, В. Т. Эффективность применения систем накопления электроэнергии на Московском центральном кольце / В. Т. Черемисин, В. Л. Незевак. – Текст : непосредственный // Мир транспорта. – 2019. – Т. 17. – № 5(84). – С. 58 – 77.

113. Черемисин, В. Т. Организация контроля предельных режимов работы тяговой сети в условиях скоростного и тяжеловесного движения / В. Т. Черемисин, А. Л. Каштанов, В. Л. Незевак. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2017. – № 1(25). – С. 76 – 83.

114. Путевая блокировка и авторегулировка / Н. Ф. Котляренко, А. В. Шишляков, Ю. В. Соболев [и др.]. – Москва : Транспорт, 1983. – 408 с. – Текст : непосредственный.

115. Фихтенгольц, Г. М. Курс дифференциального и интегрального исчисления / Г. М. Фихтенгольц. – Санкт-Петербург : Лань, 2009. – 656 с. – Текст : непосредственный.

116. Амосов, А. А. Вычислительные методы / А. А. Амосов. – Санкт-Петербург : Лань, 2014. – 672 с. – Текст : непосредственный.

117. Дрейпер, Н. Прикладной регрессионный анализ: Пер с англ. / Н. Дрейпер. – Москва : Финансы и статистика, 1987. – Кн. 2. – 351 с. – Текст : непосредственный.

118. Ферстер, Э. Методы корреляционного и регрессионного анализа: Пер. с нем. / Э. Ферстер, Б. М. Ренц. – Москва : Инфра-М, 1998. – 302 с. – Текст : непосредственный.

119. Справочник по электроснабжению железных дорог / Под ред. К. Г. Марквардта. – Москва : Транспорт, 1980. – Т. 1. – 256 с. – Текст : непосредственный.

120. Правила тяговых расчетов для поездной работы : утверждены ОАО «РЖД» от 12.05.2016 № 867р. – Москва : ОАО «РЖД». – 2016. – 514 с. – Текст : непосредственный.

121. Незевак, В. Л. Повышение эффективности перевозочного процесса за счет оптимизации графика движения поездов / В. Л. Незевак, А. П. Шатохин. – Текст : непосредственный // Повышение энергетической эффективности наземных транспортных систем : материалы второй межд. науч.-практ. конференции. – Омск : Омский гос. ун-т путей сообщ., 2016. – С. 153 – 159.

122. Эконометрика / Под ред. Н. Ш. Кремера. – Москва : Юнити-Дана, 2008. – 311 с. – Текст : непосредственный

123. Хайкин, С. Нейронные сети: Полный курс: Пер. с англ. / С. Хайкин. – Москва : Вильямс, 2006. – 1104 с. – Текст : непосредственный.

124. Рутковская, Д. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы / Д. Рутковская, М. Пилиньский, Л. Рутковский. Пер. с польск. И. Д. Рудинского. – Москва : Горячая линия-Телеком, 2013. – 384 с. – Текст : непосредственный.

125. Круглов, В. В. Искусственные нейронные сети. Теория и практика / В. В. Круглов, В. В. Борисов. – Москва : Горячая линия-Телеком, 2002. – 382 с. – Текст : непосредственный.

126. Яхьева, Г. Э. Нечеткие множества и нейронные сети / Г. Э. Яхьева. – Москва : Бином, 2006. – 316 с. – Текст : непосредственный.

127. Теория нейронных сетей / Под ред. А. И. Галушкина. – Москва : ИПРЖР, 2000. – Кн. 1. – 416 с. – Текст : непосредственный.

128. Современные подходы к оценке фактической экономии электроэнергии в системе тягового электроснабжения на основе искусственных нейронных сетей и нечетких нейронных сетей / А. Л. Каштанов, А. А. Комяков, Д. О. Силуянов и [и др.]. – Текст : непосредственный // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2015. – № 2. – С. 63 – 68.

129. Незевак, В. Л. Оценка изменения объема электропотребления на тягу от графика движения поездов на участках с I типом профиля пути на основе регрессионных моделей и нейронных сетей / В. Л. Незевак. – Текст : непосредственный // Транспорт Урала. – 2017. – № 4(55). – С. 65 – 70.

130. Незевак, В. Л. Совершенствование модели влияния параметров графика движения поездов на тяговое электропотребление на участках постоянного и переменного тока с I и II типами профиля пути при помощи регрессионных моделей и нейронных сетей / В. Л. Незевак. – Текст : непосредственный // Вестник транспорта Поволжья. – 2017. – № 6(66). – С. 34 – 44.

131. Фиакко, А. Нелинейное программирование. Методы последовательное безусловной минимизации / А. Фиакко, Г. Мак-Кормик. – Москва : Мир, 1972. – 240 с. – Текст : непосредственный.

132. Нейронные сети. Statistica Neural Networks: Методология и технологии современного анализа данных / Под ред. В. П. Боровикова. – Москва : Горячая линия-Телеком, 2008. – 392 с. – Текст : непосредственный.

133. Халафян, А. А. Математическая статистика с элементами теории вероятностей / А. А. Халафян. – Москва : Бином, 2010. – 496 с. – Текст : непосредственный.

134. Патент № 2591560 Российская Федерация, МПК G06F 17/50 (2006.01), B60L 7/00 (2006.01). Способ имитационного моделирования энергоэффективного графика движения поездов на электрифицированных железных дорогах : № 2015105233/11 : заявл. 16.02.2015 : опубл. 20.07.2016 / Незевак В. Л., Черемисин В. Т., Шатохин А.П. [и др.] ; заявитель ОмГУПС(ОмИИТ). – 6 с.: ил. – Текст : непосредственный.

135. Патент № 2591559 Российская Федерация, МПК B60L 3/00 (2006.01), G01R 21/133 (2006.01). Способ определения потерь электроэнергии электроподвижным составом при неграфиковых остановках с использованием бортовых информационно-измерительных комплексов учета электроэнергии № 2015105231/11 : заявл. 16.02.2015 : опубл. 20.07.2016 / Истомин С. Г., Незевак В. Л., Черемисин В. Т. [и др.] ; заявитель ОмГУПС (ОмИИТ). – 5 с.: ил. – Текст : непосредственный.

136. Митрофанов, А. Н. Идентификационная модель и программный комплекс расчета показателей нагрузочной способности системы тягового электроснабжения / А. Н. Митрофанов. – Текст : непосредственный // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – № 3. – 2005. – С. 107 – 116.

137. Черемисин, В. Т. Программный комплекс расчета системы тягового электроснабжения постоянного тока / В. Т. Черемисин, П. В. Тарута. – Текст : непосредственный // Проблемы и перспективы развития железнодорожного транспорта : материалы науч.-техн. конференции. – Екатеринбург : Уральский гос. ун-т путей сообщ., 2003. – С. 306 – 310.

138. Вильгельм, А. С. Учет фактора изменения напряжения на токоприемнике электроподвижного состава постоянного тока при проведении тяговых расчетов / А. С. Вильгельм, В. Л. Незевак. – Текст : непосредственный // Транспорт Азиатско-Тихоокеанского региона. – 2015. – № 2(4). – С. 21 – 25.

139. Патент № 2641537 Российская Федерация, МПК G01R 21/133 (2006.01), B60L 3/12 (2006.01). Способ определения энергетических

показателей движения поезда и системы тягового электроснабжения : № 2016 119647 : заявл. 20.05.2016 : опубл. 23.11.2017 / Комяков А. А., Незевак В. Л., Черемисин В. Т. [и др.] ; заявитель ОмГУПС (ОМИИТ). – 5 с.: ил. – Текст : непосредственный.

140. Константинова, Ю. А. Имитационное моделирование транзита электроэнергии из системы внешнего электроснабжения по тяговой сети переменного тока / Ю. А. Константинова, В. Н. Ли, А. М. Константинов. – Текст : непосредственный // Вестник Приамурского государственного университета им. Шолом-Алейхема. – 2019. – № 4(37). – С. 70 – 76.

141. Закарюкин, В. П. Моделирование систем тягового электроснабжения 2×25 кВ с коаксиальными кабелями и трансформаторами Вудбриджа / В. П. Закарюкин, А. В. Крюков, И. М. Авдиенко. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2016. – № 2(26). – С. 70 – 78.

142. Бардушко, В. Д. Вопросы обеспечения требуемой точности моделирования тяговой сети / В. Д. Бардушко, А. Г. Туйгунова, П. В. Табанаков. – Текст : непосредственный // Вестник транспорта Поволжья. – 2014. – № 2 (44). – С. 58 – 66.

143. Черемисин, В. Т. Повышение эффективности работы системы тягового электроснабжения с гибридными накопителями электроэнергии: научная монография / В. Т. Черемисин, В. Л. Незевак, А. П. Шатохин. – Омск : Омский гос. ун-т путей сообщ. – 2019. – 222 с. – Текст : непосредственный.

144. Незевак, В. Л. Моделирование режимов нагрузки на шинах постов секционирования при работе в системе тягового электроснабжения накопителей электроэнергии / В. Л. Незевак. – Текст : непосредственный // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2017. – № 4(68). – С. 159 – 170.

145. Патент № 2690126 Российская Федерация, МПК В60М 3/00 (2006.01), В60L 3/12 (2006.01), G01R 21/133 (2006.01). Способ определения энергетических показателей движения поезда и системы тягового электроснабжения : № 2018127043 : заявл. 23.07.2018 : опубл. 30.05.2019 /

Незевак В. Л., Черемисин В. Т., Шатохин А. П. ; заявитель ОмГУПС (ОмИИТ). – 5 с.: ил. – Текст : непосредственный.

146. Карabanов, М. А. Определение места размещения и энергоемкости накопителя энергии в системе тягового электроснабжения постоянного тока двухпутного участка / М. А. Карabanов, Ю. В. Москалев. – Текст : непосредственный // Наука и техника транспорта. – 2015. – № 2. – С. 21 – 28.

147. Метод выбора параметров накопителя энергии при резкопеременной нагрузке / О. И. Горте, В. М. Зырянов, Н. Г. Кирьянова [и др.]. – Текст : непосредственный // Электроэнергетика глазами молодежи : материалы межд. науч.-техн. конференции. – Самара : Самарский гос. техн. ун-т. – 2017. – С. 135 – 138.

148. Методика расчета основных параметров накопителя энергии по экспериментальным нагрузочным диаграммам / Д. Ю. Балусев, В. М. Зырянов, Н. Г. Кирьянова [и др.]. – Текст : непосредственный // Вестник Иркутского государственного технического университета – 2018. – Т. 22. – № 5(136). – С. 105 – 114.

149. Штанг, А. А. Определение основных характеристик комбинированной энергетической установки для городского безрельсового транспорта / А. А. Штанг, М. В. Ярославцев. – Текст : непосредственный // Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации. – 2016. – № 4(33). – С. 111 – 120.

150. Незевак, В. Л. Определение параметров накопителя электрической энергии для участков постоянного тока с тяжеловесным движением / В. Л. Незевак, А. П. Шатохин. – Текст : непосредственный // Инновационные проекты и технологии в образовании, промышленности и на транспорте : материалы науч. конференции. – Омск : Омский гос. ун-т путей сообщ., 2018. – С. 8 – 14.

151. Доманов, К. И. Исследование режимов работы системы тягового электроснабжения в целях установки накопителя электрической энергии / К. И. Доманов, В. Л. Незевак, А. П. Шатохин. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2018. – № 2(34). – С. 65 – 75.

152. Незевак, В. Л. Моделирование режимов работы накопителя электроэнергии на шинах поста секционирования в условиях пропуска тяжеловесных поездов / В. Л. Незевак. – Текст : непосредственный // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2018. – № 3(59). – С. 47 – 57.

153. Черемисин, В. Т. Результаты оценки режимов работы активных и пассивных постов секционирования в системе тягового электроснабжения с целью выбора параметров накопителей электроэнергии / В. Т. Черемисин, В. Л. Незевак, В. В. Эрбес. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2017. – № 3(31). – С. 132 – 143.

154. ГОСТ 58092.3.1 – 2020. Системы накопления электрической энергии (СНЭЭ). Проектирование и оценка рабочих параметров. Общие требования. – Изд. официальное. – Москва : Стандартинформ, 2020. – 38 с. – Текст : непосредственный.

155. Патент № 2787898 Российская Федерация, В60М 3/00 (2006.01), В60L 3/12 (2006.01), G01R 21/133 (2006.01). Способ определения энергетических показателей системы тягового электроснабжения : № 2022114505 : заявл. 27.05.2022 : опубл. 13.01.2023 / Незевак В. Л., Сидоров О.А. – 5 с.: ил. – Текст : непосредственный.

156. Сетевые накопители электроэнергии (СНЭЭ). – Текст : электронный // Лиотех : [сайт]. – URL: <https://www.liotech.ru/products/batarei-i-nakopiteli/setevye-nakopiteli-energii/> (дата обращения: 17.01.2020).

157. Черемисин, В. Т. Оценка влияния пакетной организации движения на объем электроэнергии на тягу на участках постоянного тока с I типом профиля / В. Т. Черемисин, В. Л. Незевак, С. С. Саркенов. – Текст : непосредственный // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2017. – № 3(55). – С. 135 – 144.

158. Незевак, В. Л. Мониторинг выполнения норм удельной рекуперации в границах произвольной зоны мониторинга участка постоянного тока / В. Л. Незевак, А. П. Шатохин. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2015. – № 2 (22). – С. 87 – 96.

159. Незевак, В. Л. Характеристика тяговой нагрузки для определения параметров накопителя электрической энергии / В. Л. Незевак, А. П. Шатохин. – Текст : непосредственный // Мир транспорта. – 2018. – Т. 16. – № 2 (75). – С. 84 – 94.

160. Незевак, В. Л. Определение мощности и энергоемкости систем накопления электроэнергии для улучшения эксплуатационных показателей тягового электроснабжения / В. Л. Незевак. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2020. – № 2 (42). – С. 9 – 25.

161. Незевак, В. Л. Моделирование процессов работы гибридного накопителя электроэнергии в системе тягового электроснабжения на физической модели. Часть 1 / В. Л. Незевак, Ю. В. Плотников, А. П. Шатохин. – Текст : непосредственный // Электроника и электрооборудование транспорта. – 2020. – № 1. – С. 33 – 37.

162. Незевак, В. Л. Моделирование процессов работы гибридного накопителя электроэнергии в системе тягового электроснабжения на физической модели. Часть 2 / В. Л. Незевак, Ю. В. Плотников, А. П. Шатохин. – Текст : непосредственный // Электроника и электрооборудование транспорта. – 2020. – № 2. – С. 26 – 30.

163. Патент № 2785263 С1 Российская Федерация, МПК Н01М 10/44 (2006.01), В60М 3/00 (2006.01). Способ и устройство определения зарядной характеристики системы накопления электроэнергии в системе тягового электроснабжения : № 2021135257 : заявл. 30.11.2021 : опубл. 05.12.2022 / Незевак В. Л., Сидоров О. А. ; заявитель ОмГУПС (ОмИИТ). – 5 с.: ил. – Текст : непосредственный.

164. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022613814 Российская Федерация. Анализ графиков нагрузки и напряжения для определения условий работы устройств накопления электроэнергии : № 2022612024 : заявл. 15.02.2022 : опубл. 15.03.2022 / Незевак В. Л., Плотников Ю. В. ; заявитель ОмГУПС (ОмИИТ). – Текст : непосредственный.

165. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022617521. Обработка данных расчетов нагрузки и напряжения системы тягового электроснабжения постоянного и переменного тока : № 2022616078 : заявл. 06.04.2022 : опубл. 21.04.2022 / Незевак В. Л., Плотников Ю. В. ; заявитель ОмГУПС (ОМИИТ). – Текст : непосредственный.

166. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022660083. Обработка данных профиля пути и определение типа : № 2022619435 : заявл. 06.04.2022 : зарег. 21.04.2022 / Незевак В. Л., Плотников Ю. В. ; заявитель ОмГУПС (ОМИИТ). – Текст : непосредственный.

167. Патент № 147814 Российская Федерация, МПК В60М3/00 (2006.01), Н02J1/00 (2006.01). Пост секционирования постоянного тока с емкостным накопителем энергии : № 2014112916/11 : заявл. 02.04.2014 : опубл. 20.11.2014 / Незевак В. Л., Черемисин В. Т., Шатохин А. П. ; заявитель ОмГУПС (ОМИИТ). – 4 с.: ил. – Текст : непосредственный.

168. Патент № 155368 Российская Федерация, МПК В60М3/00 (2006.01), Н02J1/00 (2006.01). Пост секционирования постоянного тока с емкостным накопителем энергии : № 2015114253/11 : заявл. 16.04.2015 : опубл. 10.10.2015 / Незевак В. Л., Черемисин В. Т., Шатохин А. П.; заявитель ОмГУПС (ОМИИТ). – 4 с.: ил. – Текст : непосредственный.

169. Патент № 156426 Российская Федерация, МПК В60М 3/02 (2006.01), Н02J 3/12 (2006.01). Пост секционирования переменного тока с установкой продольной компенсации : № 2014147717/11 : заявл. 26.11.2014 : опубл. 10.11.2015 / Незевак В. Л., Кондратьев Ю. В. ; заявитель ОмГУПС (ОМИИТ). – 5 с.: ил. – Текст : непосредственный.

170. Патент № 193828 U1 Российская Федерация, МПК В60М 7/00 (2006.01), Н02J 3/18 (2006.01). Устройство измерения напряжения регулируемой установки компенсации реактивной мощности на посту секционирования : № 2019118945 : заявл. 17.06.2019 : опубл. 18.11.2019 / Незевак В. Л., Самолинов С. С., Черемисин В. Т. ; заявитель ОмГУПС (ОМИИТ). – 5 с.: ил. – Текст : непосредственный.

171. Патент № 210055 U1 Российская Федерация, МПК H02J 3/18 (2006.01). Устройство измерения напряжения на активном посту секционирования переменного тока : № 2021129652 : заявл. 11.10.2021 : опубл. 25.03.2022 / Незевак В. Л., Самолинов С. С., Черемисин В. Т.; заявитель ОмГУПС (ОмИИТ). – 5 с.: ил. – Текст : непосредственный.

172. Розенберг, Е. Н. Московское центральное кольцо: инновационные решения / Розенберг Е. Н. – Текст : непосредственный // Вестник Института проблем естественных монополий: Техника железных дорог. – 2016. – № 4(36). – С. 42 – 45.

173. Технологии диспетчерского управления на МЦК / В. Г. Матюхин, А. Б. Шабунин, Г. А. Ефремов [и др.]. – Текст : непосредственный // Железнодорожный транспорт. – 2020. – № 4. – С. 45 – 47.

174. Тони, О. В. Городские электрички – оптимальное решение / О. В. Тони – Текст : непосредственный // Транспорт Российской Федерации. – 2020. – № 1(86). – С. 8 – 10.

175. Веселов, Е. В. О функциональном расширении бортовой системы управления электропоезда ЭС2Г для реализации беспилотного движения на МЦК / Е. В. Веселов. – Текст : непосредственный // Железнодорожный транспорт. – 2020. – № 11. – С. 26 – 28.

176. Язвинская, Н. Н. Моделирование работы щелочных аккумуляторов / Н. Н. Язвинская. – Текст : непосредственный // Научный альманах. – 2016. – № 8-1(22). – С. 314 – 319.

177. Моделирование работы аккумуляторов / Н. Е. Галушкин, Ф. И. Кукоз, Н. Н. Язвинская [и др.]. – Шахты : ЮРГУЭС, 2009. – 199 с. – Текст : непосредственный.

178. Структурное моделирование работы электрохимических аккумуляторов / Н. Е. Галушкин, Н. Н. Язвинская, Ф. И. Кукоз [и др.]. – Шахты : ЮРГУЭС, 2009. – 192 с. – Текст : непосредственный.

179. Техническое описание и проектирование систем инерционных накопителей электроэнергии / НИИЭФа им. Д. В. Ефремова. Научно-технический центр «Синтез». – СПб., 1995. – 32 с. – Текст : непосредственный.

180. Молекулярные накопители энергии. – Текст : электронный // Технокор : [сайт]. – URL: <http://www.texnokor.com/mne.html> (дата обращения: 10.02.2021).

181. Обзор суперконденсаторов BOOSTCAP. – Текст : электронный // ООО «Titan Power Solution» : [сайт]. – Режим доступа: URL: <https://titanps.ru/catalog/maxwell/super-kondensatory/bcap0360-p270-s18/> (дата обращения: 10.02.2021).

182. Маховичные накопители кинетической энергии для городского электротранспорта НКЭ-3Г. – Текст : электронный // ООО «Кинемак» : [сайт]. – URL: <http://www.kinemak.ru/wp-content/uploads/2014/07/List1a.pdf> (дата обращения: 10.02.2021).

183. ИБП на основе накопителя кинетической энергии. – Текст : электронный // ООО «Русский сверхпроводник» : [сайт]. – URL: <http://rhsc.ru/portfolio/ибп-на-основе-накопителя-кинетическо/> (дата обращения: 10.02.2021).

184. Шевлюгин, М. В. Повышение надежности электроснабжения собственных нужд тяговых подстанций метрополитена с помощью накопителей энергии / М. В. Шевлюгин, А. Е. Голицына, М. Н. Белов и [и др.]. – Текст : непосредственный // Электротехника. – 2020. – № 9. – С. 26 – 31.

185. Валинский, О. С. Эффективность процессов энергообмена в тяговых электроприводах с бортовыми емкостными накопителями энергии / О. С. Валинский, А. М. Евстафьев, В. В. Никитин. – Текст : непосредственный // Электротехника. – 2018. – № 10. – С. 10 – 14.

186. Незевак, В. Л. Применение накопителей электроэнергии в системе тягового электроснабжения с целью повышения пропускной способности на лимитирующих участках / В. Л. Незевак, С. С. Самолинов. – Текст : непосредственный // Транспорт Урала. – 2020. – № 1 (64). – С. 104 – 109.

187. Незевак, В. Л. Сравнение вариантов применения накопителей электроэнергии в системе тягового электроснабжения и на электроподвижном составе / В. Л. Незевак. – Текст : непосредственный // Транспорт: наука,

техника, управление. Научный информационный сборник. – 2020. – № 9. – С. 17 – 23.

188. Незевак, В. Л. Имитационная модель системы тягового электроснабжения для определения энергетических показателей в условиях работы систем накопления электроэнергии / В. Л. Незевак. – DOI:10.26731/1813-9108.2020.3(67).70-80. – Текст : непосредственный // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2020. – № 3(67). – С. 70–80.

189. Незевак, В. Л. Влияние пороговых напряжений системы накопления электроэнергии на энергетические показатели тягового электроснабжения / В. Л. Незевак. – Текст : непосредственный // Вестник транспорта Поволжья. – 2020. – № 4(82). – С. 28 – 37.

190. Буйносов, А. П. Перспективы использования накопителей электрической энергии на моторвагонном подвижном составе / А. П. Буйносов, М. Г. Дурандин, О. И. Тутынин. – Текст : непосредственный // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. – 2020. – № 4(48). – С. 35 – 45.

191. Анализ возможности применения сальдированного учета электроэнергии на тягу поездов / В. Т. Черемисин, Ю. В. Кондратьев, С. Я. Привалов [и др.]. – Текст : непосредственный // Известия ПГУПС. – 2008. – № 8. – С. 219 – 232.

192. Незевак, В. Л. Оценка эффективности применения систем накопления электроэнергии для обеспечения собственных нужд тяговых подстанций постоянного тока / В. Л. Незевак, С. С. Самолинов, Е. К. Хусаинов. – Текст : непосредственный // Научно-образовательный форум : материалы IV международной научно-практической конференции. – Омск : Омский гос. ун-т путей сообщ., 2020. – С. 49 – 56.

193. Патент № 205077 U1 Российская Федерация, МПК В60М 3/00 (2021.02). Тяговая подстанция постоянного тока с системой накопления электроэнергии : № 2021102134 : заявл. 29.01.2021 : опубл. 25.06.2021 /

Незевак В. Л., Самолинов С. С. ; заявитель ОмГУПС (ОМИИТ). – 5 с.: ил. – Текст : непосредственный.

194. Патент № 192347 U1 Российская Федерация, МПК В60L 9/30 (2006.01), В60L 50/53 (2019.01), В60L 1/00 (2006.01), В60L 7/14 (2006.01), Н01М 12/00 (2006.01). Энергоустановка электровоза двойного питания с гибридным накопителем энергии : № 2019103728 : заявл. 11.02.2019 : опубл. 13.09.2019 / Незевак В. Л., Доманов К. И., Черемисин В. Т.; заявитель ОмГУПС (ОМИИТ). – 4 с.: ил. – Текст : непосредственный.

195. Патент № 210867 U1 Российская Федерация, МПК Н02Н 9/02 (2022.02). Устройство включения преобразовательного трансформатора : № 2022103961 : заявл. 15.02.2022 : опубл. 12.05.2022 / Незевак В. Л., Дмитриев А. Д., Сидоров О. А.; заявитель ОмГУПС (ОМИИТ). – 4 с.: ил. – Текст : непосредственный.

196. Бакеев, Е. Е. Развитие функциональных возможностей АРМа Энергодиспетчера / Е. Е. Бакеев. – Текст : непосредственный // Вестник ВНИИЖТа. – 2010. – № 3. – С. 25 – 27.

197. Иванов, В. В. Оперативное управление участком энергоснабжения электрифицированных железных дорог / В. В. Иванов, Е. Е. Бакеев. – Москва : Транспорт, 1986. – 132 с. – Текст : непосредственный.

198. Грибачев, О. В. Оперативное управление дистанцией электроснабжения железных дорог / О. В. Грибачев. – Москва : Маршрут, 2006. – 184 с. – Текст : непосредственный.

199. Информационная система оперативного контроля параметров электроэнергии в сети тягового электроснабжения / С. Н. Чижма, А. А. Лаврухин, А. Г. Малютин [и др.]. – Текст : непосредственный // Интеллектуальные технологии на транспорте. – 2015. – № 2. – С. 10 – 19.

200. Гречишников, В. А. АСУЭ как развивающийся инструмент информационно-аналитической системы управления энергетическим хозяйством железных дорог России / В. А. Гречишников, А. А. Бурмистров. – Текст : непосредственный // Наука и техника транспорта. – 2008. – № 2. – С. 47 – 50.

201. Крюков, А. В. Модернизация систем тягового электроснабжения на основе технологий SMART GRID / А. В. Крюков. – Текст : непосредственный // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2011. – № 4 (32). – С. 88 – 95.

202. Незевак, В. Л. Информационное обеспечение оценки энергетической эффективности перевозочного процесса / В. Л. Незевак, А. П. Шатохин. – Текст : непосредственный // Инновационные проекты и технологии в образовании, промышленности и на транспорте : материалы науч. конференции. – Омск : Омский гос. ун-т путей сообщ., 2019. – С. 117 – 125.

203. Big Data: новые возможности для растущего бизнеса. – Текст : электронный // «Инфосистемы Джет» : [сайт]. – URL: <http://www.pcweek.ru/upload/iblock/d05/jet-big-data.pdf> (дата обращения: 05.06.2019).

204. Михайлов, В. С. Теория управления / В. С. Михайлов. – Киев : Выща шк., 1988. – 312 с. – Текст : непосредственный.

205. Егоров, В. Интеллектуальные технологии в распределительном электросетевом комплексе / В. Егоров, С. Кужеков. – Текст : непосредственный // ЭнергоРынок. – 2010. – № 6. – С. 1 – 5.

206. Осика, Л. Smart Grid: мнение экспертов / Осика Л. – Текст : непосредственный // ЭнергоРынок. – 2010. – № 6. – С. 6 – 9.

207. Ефремов, А. Ю. Цифровое управление тяговыми подстанциями / А. Ю. Ефремов. – Текст : непосредственный // Железные дороги мира. – 2013. – № 12. – С. 54 – 58.

208. Цифровая модель тяговой подстанции двух родов тока / М. В. Шевлюгин, А. А. Королев, О. А. Королев [и др.]. – Текст : непосредственный // Электротехника. – 2018. – № 9. – С. 40 – 44.

209. Кондратьев, Ю. В. Концепция развития цифровой тяговой подстанции / Ю. В. Кондратьев, В. Л. Незевак, В. В. Эрбес. – Текст : непосредственный // Разработка и эксплуатация электротехнических комплексов и систем энергетики и наземного транспорта : материалы межд.

науч.-практ. конференции. – Омск : Омский гос. ун-т путей сообщ., 2018. – С. 13 – 20.

210. Андреев, В. В. Воспроизведение движения электропоездов в процессе непрерывного моделирования работы систем электроснабжения переменного тока  $2 \times 25$  кВ в Matlab/Simulink / В. В. Андреев. – Текст : непосредственный // Путь науки. – 2016. – № 7(29). – С. 8 – 13.

211. Гателюк, О. В. Анализ данных измерений в системе тягового электроснабжения постоянного тока с неуправляемыми выпрямителями / О. В. Гателюк, В. Л. Незевак, В. В. Эрбес. – Текст : непосредственный // Электротехника. – 2018. – № 12. – С. 66 – 72.

212. Методика определения пропускной и провозной способностей инфраструктуры железнодорожного транспорта общего пользования : официальное издание : утверждены Минтрансом России от 18.07.2018 г. № 266 / Официальный интернет-портал правовой информации. – № 0001201808090017. – URL: [www.pravo.gov.ru](http://www.pravo.gov.ru) (дата обращения: 09.08.2018).

213. О внесении изменений в Инструкцию по расчету наличной пропускной способности железных дорог: утверждены ОАО «РЖД» от 24.01.2019 г. № 114/р. – Москва : ОАО «РЖД». – 2019. – 39 с. – Текст : непосредственный.

214. Патент № 182831 U1 Российская Федерация, МПК В60М 3/00 (2006.01), Н02J 1/00 (2006.01). Пост секционирования постоянного тока с гибридным накопителем энергии : № 2017144925 : заявл. 20.12.2017 : опубл. 04.09.2018 / Незевак В. Л., Черемисин В.Т., Шатохин А. П. ; заявитель ОмГУПС (ОМИИТ). – 5 с.: ил. – Текст : непосредственный.

215. Патент № 202369 U1 Российская Федерация, МПК В60М 3/00 (2006.01), Н01М 10/44 (2006.01). Гибридный накопитель электроэнергии для системы тягового электроснабжения постоянного тока энергии : № 2020135222 : заявл. 26.10.2020 : опубл. 15.02.2021 / Незевак В. Л., Самолинов С. С., Черемисин В.Т. ; заявитель ОмГУПС (ОМИИТ). – 5 с.: ил. – Текст : непосредственный.

216. Патент № 217285 Российская Федерация, В60М 3/02 (2006.01), Н02J 1/14 (2006.01), Н02J 15/00 (2006.01). Гибридный накопитель электроэнергии для системы тягового электроснабжения постоянного тока : № 2022134005 : заявл. 22.12.2022 : опубл. 24.03.2023 / Незевак В. Л. ; заявитель ОмГУПС. – 5 с.: ил. – Текст : непосредственный.

217. Патент № 203358 U1 Российская Федерация, МПК В60М 3/00 (2021.02). Пост секционирования переменного тока с гибридным накопителем электроэнергии : № 2020143027 : заявл. 24.12.2020 : опубл. 01.04.2021 / Незевак В. Л., Самолинов С. С., Черемисин В. Т. ; заявитель и патентообладатель ОмГУПС (ОМИИТ). – 4 с.: ил. – Текст : непосредственный.

218. Патент № 2735158 Российская Федерация, В60М 3/02 (2006.01), В60М 3/02 (2020.08). Устройство для автоматического регулирования напряжения в системе тягового электроснабжения : № 2020113761 : заявл. 03.04.2020 : опубл. 28.10.2020 / Незевак В. Л., Плотников Ю. П., Черемисин В. Т. ; заявитель ОмГУПС (ОМИИТ). – 5 с.: ил. – Текст : непосредственный.

219. Веников, В. А. Теория подобия и моделирования (применительно к задачам электроэнергетики) / В. А. Веников, Г. В. Веников. – Москва : Высшая школа, 1984. 439 с. – Текст : непосредственный.

220. Веников, В. А. Физическое моделирование электрических систем / В. А. Веников, А. В. Иванов – Смоленский. – Ленинград : Гос. энергетическое изд-во, 1956. 359 с. – Текст : непосредственный.

221. Афанасьев, М. М. Применение накопителей энергии – ионисторов (суперконденсаторов) на электропоездах метрополитена / М. М. Афанасьев, Д. В. Клоков, Ю. М. Иньков. – Текст : непосредственный // Электроника и электрооборудование транспорта. – № 1. – 2020. – С. 30 – 32.

222. Методические рекомендации по расчету экономической эффективности новой техники и технологии, объектов интеллектуальной собственности и рационализаторских предложений : утверждены ОАО «РЖД» от 28.11.2008 г. № 2538р. – Москва : ОАО «РЖД». – 2008. – Текст : непосредственный.

223. Методические рекомендации по составу и содержанию обосновывающих материалов по инвестиционным проектам : утверждены ОАО «РЖД» от 28.11.2016, № 2396р. – Москва : ОАО «РЖД». – 2016. – Текст : непосредственный.

224. Долгосрочная программа развития ОАО «РЖД» до 2025 года. – Текст : электронный // ОАО «РЖД» : [сайт]. – URL: <https://company.rzd.ru/ru/9353/page/105104?id=1359> (дата обращения: 10.06.2021).

225. Прогноз социально-экономического развития Российской Федерации на период до 2036 года. – Текст : электронный // ОАО «РЖД» : [сайт]. – URL: [https://www.economy.gov.ru/material/directions/makroec/prognozy\\_socialno\\_ekonomicheskogo\\_razvitiya/prognoz\\_socialno\\_ekonomicheskogo\\_razvitiya\\_rossiyskoy\\_federacii\\_na\\_period\\_do\\_2036\\_goda.html](https://www.economy.gov.ru/material/directions/makroec/prognozy_socialno_ekonomicheskogo_razvitiya/prognoz_socialno_ekonomicheskogo_razvitiya_rossiyskoy_federacii_na_period_do_2036_goda.html) (дата обращения: 10.06.2021).

226. Расходные ставки, определяемые на основе зависящих от объемов работы расходов ОАО «РЖД» по перевозочным видам деятельности : утверждены ОАО «РЖД» от 07.06.2019 г. № 1137/р. – Москва : ОАО «РЖД». – 2019. – Текст : непосредственный.

227. Методические подходы при оценке эффективности работ плана научно-технического развития ОАО «РЖД» : утверждены ОАО «РЖД» от 26.12.2016 г. №2666/р. – Москва : ОАО «РЖД». – 2016. – Текст : непосредственный.

228. Требования к составлению технико-экономического обоснования реализации мероприятия в рамках инвестиционного проекта ОАО «РЖД» «Внедрение ресурсосберегающих технологий на железнодорожном транспорте» : утверждены ОАО «РЖД» от 06.04.2018 г., № 699/р. – Москва : ОАО «РЖД». – 2018. – Текст : непосредственный.

229. Каталог. Аккумуляторы. – Текст : электронный // Тюменский аккумуляторный завод : [сайт]. – URL: <https://tyumen-battery.ru/catalog/> (дата обращения: 05.09.2023).

230. Аккумуляторы. Щелочные аккумуляторы типа KGL, KL, KM, KN. – Текст : электронный // Завод АИТ : [сайт]. – URL: <http://www.zait.ru/> (дата обращения: 05.09.2023).

231. Аккумуляторы. – Текст : электронный // Энергоэлемент : [сайт]. – URL: [https://www.energo-e.ru/akkumulyatory\\_po\\_tipu/](https://www.energo-e.ru/akkumulyatory_po_tipu/) (дата обращения: 05.09.2023).

232. Каталог продукции. – Текст : электронный // Лиотех : [сайт]. – URL: [https://www.liotech.ru/docs/Katalog\\_Liotech.pdf](https://www.liotech.ru/docs/Katalog_Liotech.pdf) (дата обращения: 05.09.2023).

233. Суперконденсаторная ячейка. Спецификация. – Текст : электронный // Maxwell : [сайт]. – URL: <https://titanps.ru/upload/iblock/c67/ghgayvbh28vxq09purntfw29xl30bxge.pdf> (дата обращения: 05.09.2023).

234. Суперконденсаторы. – Текст : электронный // Феникс : [сайт]. – URL: <https://www.ultracapacitor.ru/catalog/superkondensatory-feniks/superkondensatory/superkondensator-skf-3400-3v0/> (дата обращения: 05.09.2023).

235. Мониторинг событий, оказывающих существенное влияние на функционирование и развитие мировых энергосистем. 09.11.2018 – 15.11.2018. – Текст : электронный // Системный оператор Единой энергетической системы : [сайт]. – URL: [https://www.so-ups.ru/uploads/media/161118foreign\\_tso.pdf](https://www.so-ups.ru/uploads/media/161118foreign_tso.pdf) (дата обращения: 05.09.2023).

236. Dougherty, C. Introduction to Econometrics / C. Dougherty. – Oxford : Oxford University Press, 2007. – P. 194. – Текст : непосредственный.

237. Scheepmaker, G. M. Review of energy-efficient train control and timetabling / G. M. Scheepmaker, R. M. Goverde, L. G. Kroon. – DOI:10.1016/j.ejor.2016.09.044. – Текст : непосредственный // European Journal of Operational Research. – 2016. – P. 1 – 27.

238. Montrone, T. A. MILP Algorithm for the Minimization of Train Delay and Energy Consumption / T. Montrone, P. Pellegrini, P. Nobili. – DOI:10.1007/978-3-319-67308-0\_49. – Текст : непосредственный // Springer Proceedings in Mathematics and Statistics. – 2017. – № 217. – P. 485 – 493.

239. Stationary VRLA batteries for power storage (LL-W). – Текст : электронный // Hitachi : [сайт]. – URL: <https://www.hitachi-chem.co.jp/english/products/sds/ibattery/001.html>. (дата обращения: 29.07.2020).

240. High-capacity Nickel-metal Hydride Battery Gigacell. – Текст : электронный // Kawasaki : [сайт]. – URL: [https://global.kawasaki.com/en/energy/solutions/battery\\_energy/download/pdf/catalog.pdf](https://global.kawasaki.com/en/energy/solutions/battery_energy/download/pdf/catalog.pdf) (дата обращения: 30.07.2020).

241. Maxwell ultracapacitor module. BMOD0004 P240 B02. 240V 3.75F. – Текст : электронный // Maxwell : [сайт]. – URL: [https://www.maxwell.com/images/documents/240V\\_3\\_75F\\_ds\\_3001973\\_datasheet.pdf](https://www.maxwell.com/images/documents/240V_3_75F_ds_3001973_datasheet.pdf) (дата обращения: 30.07.2020).

242. Larminie, J. Electric Vehicle Technology Explained / J. Larminie, J. Lowry – Текст : электронный // Second Ed., Chichester : John Wiley & Sons Ltd. – 2003. – 303 p. – URL: <https://archive.org/details/B-001-026-860-ALL> (дата обращения: 31.07.2020).

243. Ragone, D. V. Review of Battery Systems for Electrically Powered Vehicles / D. V. Ragone // SAE Technical Paper Series. – 1968. – 8 p. – Текст : непосредственный.

244. Dongen van, L. A. M. Theoretical prediction of electric vehicle energy consumption and battery state-of-charge during arbitrary driving cycles / van L. A. M. Dongen, van der R. Graaf, W. H. M. Visscher. – Текст : непосредственный // In L. Andrews (Ed.). EVC symposium VI proceedings. – 1981. – P. 1 – 13.

245. Energy transfer and utilization efficiency of regenerative braking with hybrid energy storage system / Wanzhong Zhao, Gang Wu, Chunyan Wang [et al.]. – DOI:10.1016/j.jpowsour.2019.04.083. – Текст : непосредственный // Journal of Power Sources. – 2019. – № 427. – P. 174 – 183.

246. Analysis of energy storage systems to exploit wind energy curtailment in Crete / G. Caralis, T. Christakopoulos, S. Karellas [et al.]. – DOI:10.1016/j.rser.2018.12.017. – Текст : непосредственный // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2019. – № 103. – P. 122 – 139.

247. Cabelloa J. M. Direct sizing and characterization of Energy Storage Systems in the Energy-Power plane / J. M. Cabelloa, X. Roboamb, S. Juncoa. DOI:10.1016/j.matcom.2018.04.002. – Текст : непосредственный // Mathematics and Computers in Simulation. – 2019. – № 158. – P. 2 – 17.

248. A novel energy storage system incorporating electrically rechargeable liquid fuels as the storage medium / Haoran Jiang, Lei Wei, XinZhuang Fan [et al.]. DOI:10.1016/j.scib.2019.01.014. – Текст : непосредственный // Science Bulletin. – 2019. – № 64. – P. 270 – 280.

249. Reliability evaluation of power systems in the presence of energy storage system as demand management resource / Hejun Yang, Yeyu Zhang, Yinghao Ma [et al.]. – DOI:10.1016/j.ijepes.2019.02.042. – Текст : электронный // International Journal of Electrical Power & Energy Systems. – 2019. – № 110. – P. 1 – 10.

250. Radu, P. V. Analysis of wayside energy storage devices for DC heavy rail transport / P. V. Radu, Z. Drazek. – DOI:10.1051/mateconf/201818004001. – Текст : непосредственный // MATEC Web of Conferences. – 2018. – № 180(7). P. 1 – 6.

251. Tesla Powerpack. «Osaka Powerpack». – Текст : электронный // Tesla : [сайт]. – URL: <https://twitter.com/Tesla/status/1110712884286226432> (дата обращения: 29.06.2019).

252. Kodoma, H. Electrical energy storage devices & systems / H. Kodoma. – Текст : непосредственный // Hitachi Chemical Technical Report. – 2015. – № 57. – Pp. 6 – 15.

253. Sawato, M. Credit Suisse, Asia Pacific / M. Sawato. – Текст : непосредственный // Japan, Equity Research, Specialty Chemicals. – 2015. – 11 p.

254. Yoshida, M. Lithium Ion Battery / M. Yoshida, T. Hirasawa, K. Sumiya. – Текст : непосредственный // Hitachi Chemical Technical Report. – 2013. – № 55. – P. 5 – 8.

255. 125 V heavy transportation module. – Текст : электронный // Maxwell : [сайт]. – URL: [http://www.maxwell.com/images/documents/125vmodule\\_ds\\_1014696-7.pdf](http://www.maxwell.com/images/documents/125vmodule_ds_1014696-7.pdf) (дата обращения: 11.12.2018).

256. The Proven Flywheel Energy Storage System for transport. – Текст : электронный // Vyconenergy : [сайт]. – URL: <https://vyconenergy.com/wp->

content/uploads/2018/06/vycon-regen-kinetic-brochure\_4\_page\_new\_web-single-pagesnewbrand.pdf (дата обращения: 11.12.2018).

257. Larminie, J. *Electric Vehicle Technology Explained* / J. Larminie, J. Lowry. – Текст : непосредственный // Second Ed., Chichester : John Wiley & Sons Ltd. – 2003. – 303 p.

258. Ragone, D. V. *Review of Battery Systems for Electrically Powered Vehicles* / D. V. Ragone – Текст : непосредственный // SAE Technical Paper Series. – 1968. – 8 p.

259. Dongen, van L. A. M. *Theoretical prediction of electric vehicle energy consumption and battery state-of-charge during arbitrary driving cycles* / van L. A. M. Dongen, van der R. Graaf, W. H. M. Visscher. – Текст : непосредственный // In L. Andrews (Ed.), *EVC symposium VI proceedings*. – 1981. – P. 1 – 13.

260. Destraz, B. *Supercapacitive energy storage for diesel-electric locomotives* / B. Destraz, P. Barrade, A. Rufer. – Текст : электронный // *Speedam 2004: Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation & Motion, Capri, IT*. – 2004. – P. 1 – 6. – URL: <https://www.tib.eu/en/search/id/tema%3ATEMA20050700831/Supercapacitive-energy-storage-for-diesel-electric/> (дата обращения: 29.06.2019).

261. Liu, W. *Hybrid electric vehicle system modelling and control* / W. Liu // Wiley : John Wiley & Sons Limited. – 2017. – 584 p. – Текст : непосредственный.

262. Shepherd, C. M. *Design of primary and secondary cell* / C. M. Shepherd // *J. Electrochem : SOC*, 1965. – № 112. – 657 p. – Текст : непосредственный.

263. Williamson, S. *Electrical Modeling of Renewable Energy Sources and Energy Storage Devices* / S. Williamson, C. Rimmalapudi, A. Emadi – Текст : непосредственный // *Jounal of Power Electronics*. – 2004. – № 4. – P. 117 – 121.

264. He, H. *Evaluation of Lithium-ion Battery Equivalent Circuit Models for State of Charge Estimation by an Experimental Approach* / H. He, R. Xiong, J. Fan – Текст : непосредственный // *Energies*. – 2011. – № 4(4). – P. 582 – 598.

265. Smart grid and energy storage: Policy recommendations / K. Z. Kenneth, A. Christopher, T. BrehmAlex [et al.]. – DOI:10.1016/j.rser.2017.07.011. – Текст : непосредственный // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2018. – № 82. – P. 1646 – 1654.

266. Walter, C. J. High-value energy storage for the grid: a multi-dimensional look / C. J. Walter. – DOI:10.1016/j.tej.2010.11.002. – Текст : непосредственный // Electr. J. – 2010. – № 23(10). – P. 59 – 71.

267. Pröls, M. Stabilitätskriterien für Wechselwirkungen mit Umrichteranlagen in Bahnsystemen / M. Pröls, B. Strobl. – Текст : непосредственный // Elektrische Bahnen. – 2006. – № 104(11). – P. 542 – 552.

268. Joubert, S. Modélisation et simulations du réseau ferroviaire: Etude des perturbations électriques sur la ligne Marseille/Vintimille / S. Joubert, J. Fabre, R. Darmony. – Текст : непосредственный // Mémoire de fin d'étude à l'INPT. – 2009. – P. 81 – 89.

269. Frugier, D. Voltage Disturbances on 25kV-50Hz Railway Lines – Modelling Method and Analysis / D. Frugier, P. Ladoux. – DOI:10.1109/speedam.2010.5544858. – Текст : электронный // IEEE International SPEEDAM. – 2010. – P. 1080 – 1085. – URL: [https://www.researchgate.net/publication/224165829\\_Voltage\\_disturbances\\_on\\_25kV-50\\_Hz\\_railway\\_lines\\_-\\_Modelling\\_method\\_and\\_analysis](https://www.researchgate.net/publication/224165829_Voltage_disturbances_on_25kV-50_Hz_railway_lines_-_Modelling_method_and_analysis) (дата обращения: 29.12.2018).

270. Tzeng, Y. S. Electric network solutions of DC transit systems with inverting substations / Yii Shen Tzeng, Ruay-Nan Wu, Nanming Chen. – DOI:10.1109/25.728537. – Текст : электронный // IEEE Transactions on Vehicular Technology. – 1998. – Vol. 47. – № 4. – P. 1405 – 1412. – URL: [https://www.researchgate.net/publication/283438474\\_Multi-train\\_modeling\\_and\\_simulation\\_integrated\\_with\\_traction\\_power\\_supply\\_solver\\_using\\_simplified\\_Newton-Raphson\\_method](https://www.researchgate.net/publication/283438474_Multi-train_modeling_and_simulation_integrated_with_traction_power_supply_solver_using_simplified_Newton-Raphson_method) (дата обращения: 29.12.2018).

271. Marhadi, K. Using Johnson Distribution for Automatic Threshold Setting in Wind Turbine Condition Monitoring System / K. Marhadi, G. Skrimpas. – Текст : электронный // Proceedings of the 2014 Annual Conference of the Prognostics and Health Management Society. – 2014. – P. 1 – 13. – URL:

[https://www.researchgate.net/publication/289773457\\_Using\\_Johnson\\_distribution\\_for\\_automatic\\_threshold\\_setting\\_in\\_wind\\_turbine\\_condition\\_monitoring\\_system](https://www.researchgate.net/publication/289773457_Using_Johnson_distribution_for_automatic_threshold_setting_in_wind_turbine_condition_monitoring_system) (дата обращения: 31.07.2020).

272. Istomin, S. Analyse des Betriebs der Lokomotive 2ES10 auf der Gleichstromstrecke der Swerdlowsker Eisenbahn / S. Istomin, V. Nesewak – Текст : непосредственный // *Elektrische Bahnen*. – 2015. – № 4. – P. 186 – 189.

273. A Review of Railway Feeding Infrastructures: Mathematical Models for Planning and Operation / P. Arboleya, C. Mayet, B. Mohamed [et al.]. – DOI:10.1016/j.etrans.2020.100063. – Текст : электронный // *eTransportation*, – 2020. – № 5. – 100063. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2590116820300205?via%3Dihub> (дата обращения: 29.07.2020).

274. Kulworawanichpong, T. Multi-train modeling and simulation integrated with traction power supply solver using simplified Newton–Raphson method / T. Kulworawanichpong. – doi:10.1007/s40534-015-0086-y. – Текст : непосредственный // *Journal of Modern Transportation*. – 2015. – № 23(4). – P. 241 – 251.

275. Mellitt, B. Simulator for studying operational and power-supply conditions in rapid-transit railways / B. Mellitt, C. J. Goodman, R. I. M. Arthurton. – DOI:10.1049/piee.1978.0075. – Текст : непосредственный // *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers*. – 1978. – № 125 (4). – P. 298 – 303.

276. BFS Algorithm for Voltage-Constrained Meshed DC Traction Networks With Nonsmooth Voltage-Dependent Loads and Generators / P. Arboleya, B. Mohamed, C. Gonzalez-Moran [et al.]. – DOI:10.1109/tpwrs.2015.2420574. – Текст : электронный // *IEEE Transactions on Power Systems*. – 2016. – 31(2). – P. 1526 – 1536. – URL: [https://www.researchgate.net/publication/275646283\\_BFS\\_Algorithm\\_for\\_Voltage-Constrained\\_Meshed\\_DC\\_Traction\\_Networks\\_With\\_Nonsmooth\\_Voltage-Dependent\\_Loads\\_and\\_Generators](https://www.researchgate.net/publication/275646283_BFS_Algorithm_for_Voltage-Constrained_Meshed_DC_Traction_Networks_With_Nonsmooth_Voltage-Dependent_Loads_and_Generators) (дата обращения: 17.01.2020).

277. Tian, Z. Energy evaluation of the power network of a DC railway system with regenerating trains / Tian, Z., Chen, M., Weston, P. [et al.]. – DOI:10.1049/iet-

est.2015.0025. – Текст : непосредственный // IET Electrical Systems in Transportation. – 2015. – 6(2). – P. 41 – 49.

278. Cai, Y. Iterative techniques for the solution of complex DC-rail-traction systems including regenerative braking / Cai, Y. – DOI:10.1049/ip-gtd:19952098. – Текст : непосредственный // IEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution. – 1995. – № 142(5). – P. 445 – 452.

279. Inverter Operating Characteristics Optimization for DC Traction Power Supply Systems / Zhang, G., Tian, Z., Tricoli, P [et al.]. – DOI:10.1109/tvt.2019.2899165. – Текст : электронный // IEEE Transactions on Vehicular Technology. – 2019. – P. 1 – 11. – URL: [https://www.researchgate.net/publication/331083760\\_Inverter\\_Operating\\_Characteristics\\_Optimization\\_for\\_DC\\_Traction\\_Power\\_Supply\\_Systems](https://www.researchgate.net/publication/331083760_Inverter_Operating_Characteristics_Optimization_for_DC_Traction_Power_Supply_Systems) (дата обращения: 17.01.2020).

280. Arboleya, P. DC railway simulation including controllable power electronic and energy storage devices / P. Arboleya, B. Mohamed, I. El-Sayed. – DOI:10.1109/tpwrs.2018.2801023. – Текст : электронный // IEEE Transactions on Power Systems. – 2018. – № 1 – 1. – P. 1 – 10. – URL: [https://www.researchgate.net/publication/322872146\\_DC\\_Railway\\_Simulation\\_Including\\_Controllable\\_Power\\_Electronic\\_and\\_Energy\\_Storage\\_Devices](https://www.researchgate.net/publication/322872146_DC_Railway_Simulation_Including_Controllable_Power_Electronic_and_Energy_Storage_Devices) (дата обращения: 17.01.2020).

281. Optimal Voltage Regulation and Power Sharing in Traction Power Systems with Reversible Converters / F. Hao, G. Zhang, J. Chen [et al.]. – DOI:10.1109/tpwrs.2020.2968108. – Текст : электронный // IEEE Transactions on Power Systems. – 2020. P. 1 – 11. – URL: [https://www.researchgate.net/publication/338759587\\_Optimal\\_Voltage\\_Regulation\\_and\\_Power\\_Sharing\\_in\\_Traction\\_Power\\_Systems\\_With\\_Reversible\\_Converters](https://www.researchgate.net/publication/338759587_Optimal_Voltage_Regulation_and_Power_Sharing_in_Traction_Power_Systems_With_Reversible_Converters) (дата обращения: 17.01.2020).

282. Alfieri, L. Impact on railway infrastructure of wayside energy storage systems for regenerative braking management: a case study on a real Italian railway infrastructure / L. Alfieri, L. Battistelli, M. Pagano. – DOI:10.1049/iet-est.2019.0005. – Текст : непосредственный // IET Electrical Systems in Transportation. – 2019. – № 9. – Iss. 3. – P. 140 – 149.

283. Modeling and Simulation of DC Electric Rail Transit Systems with Wayside Energy Storage / M. Khodaparastan, O. Dutta, M. Saleh [et al.]. –

DOI:10.1109/tvt.2019.2895026. – Текст : электронный // IEEE Transactions on Vehicular Technology. – 2019. – P. 1 – 11. – URL: [https://www.researchgate.net/publication/330640996\\_Modeling\\_and\\_Simulation\\_of\\_DC\\_Electric\\_Rail\\_Transit\\_Systems\\_With\\_Wayside\\_Energy\\_Storage](https://www.researchgate.net/publication/330640996_Modeling_and_Simulation_of_DC_Electric_Rail_Transit_Systems_With_Wayside_Energy_Storage) (дата обращения: 29.07.2020).

284. Sidorova, E. Improvement of Traction Rolling Stock Energy Efficiency Analysis System / E. Sidorova, S. Podgornaya. – DOI:10.1007/978-3-319-70987-1\_5. – Текст : непосредственный // Advances in Intelligent Systems and Computing. – 2018. – № 692. – P. 48 – 58.

285. Montrone, T. A MILP Algorithm for the Minimization of Train Delay and Energy Consumption / T. Montrone, P. Pellegrini, P. Nobili. – DOI:10.1007/978-3-319-67308-0\_49. – Текст : непосредственный // Springer Proceedings in Mathematics and Statistics. – 2017. – № 217. – P. 485 – 493.

286. Verification of a train traction power simulator for DC feeding system by a commercial operation measurement / T. Ogawa, Y. Takeuchi, H. Morimoto [et al.]. – DOI:10.1109/ESARS-ITEC.2016.7841373. – Текст : непосредственный // International Conference on Electrical Systems for Aircraft, Railway, Ship Propulsion and Road Vehicles and International Transportation Electrification Conference, ESARS-ITEC. – 2016. – P. 1 – 6.

287. Xu, G. Train movement simulation by element increment method / G. Xu, F. Li, J. Long [et al.]. – DOI:10.1002/atr.1445. – Текст : непосредственный // Journal of Advanced Transportation. – 2016. – № 50(8). – P. 2060 – 2076.

288. Improvement of basic requirements for the system and devices of traction DC power supply / B. A. Arzhannikov, M. P. Bader, A. T. Burkov [et al.]. – DOI:10.3103/S1068371216090029. – Текст : непосредственный // Russian Electrical Engineering. – 2016. – № 87(9). – P. 525 – 531.

289. Modeling and simulation of DC rail traction systems for energy saving / Z. Tian, S. Hillmansen, C. Roberts [et al.]. – DOI:10.1109/ITSC.2014.6958067. – Текст : Электронный // 17th IEEE International Conference on Intelligent Transportation Systems, ITSC. – 2014. – № 6958067. – P. 2354 – 2359. – URL:

[https://www.researchgate.net/publication/286704577\\_Modeling\\_and\\_simulation\\_of\\_DC\\_rail\\_traction\\_systems\\_for\\_energy\\_saving](https://www.researchgate.net/publication/286704577_Modeling_and_simulation_of_DC_rail_traction_systems_for_energy_saving) (дата обращения: 29.07.2020).

290. Performance and safety assessment of ATO systems in urban rail transit systems in China / X. Zhu, R. Zhang, W. Dai. – DOI:10.1061/(ASCE)TE.1943-5436.0000550. – Текст : непосредственный // Journal of Transportation Engineering. – 2013. – № 139(7). – P. 728 – 737.

291. Train Energy-saving Scheme with Evaluation in Urban Mass Transit Systems / H. Liu, B. Mao, Y. Ding [et al.]. – DOI:10.1016/S1570-6672(07)60040-3. – Текст : непосредственный // Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology. – 2007. – № 7(5). – P. 68 – 73.

292. Load flow in electrified railway / Т. К. Но, Y. L. Chi, J. Wang [et al.]. – DOI:10.1049/cp:20040338. – Текст : электронный // IEEE Conference Publication. – 2004. – № 2. – P. 498 – 503. – URL: [https://www.researchgate.net/publication/4100304\\_Load\\_flow\\_in\\_electrified\\_railway](https://www.researchgate.net/publication/4100304_Load_flow_in_electrified_railway) (дата обращения: 29.07.2020).

293. Karaev, R. I. Finding energy losses in traction networks of electrified railways / R. I. Karaev, A. B. Popkov. – Текст : непосредственный // Elektrichestvo. – 1991. – № 3. – P. 66 – 70.

294. Toletti, A. What about Train Length and Energy Efficiency of Freight Trains in Rescheduling Models? / A. Toletti, V. Martinis, U. Weidmann. – DOI:10.1016/j.trpro.2015.09.012. – Текст : непосредственный // Transportation Research Procedia. – 2015. – № 10. – P. 584 – 594.

295. Albrecht, A. Energy-efficient train control: the two-train separation problem on level track / A. Albrecht, P. Howlett, P. Pudney. – DOI:10.1016/j.jrtpm.2015.10.002. – Текст : непосредственный // Proceedings 6th International Conference on Railway Operations Modelling and Analysis (RailTokyo2015). Narashino. Japan. – 2015. – P. 23 – 26.

296. Aradi, S. A predictive optimization method for energy-optimal speed profile generation for trains / S. Aradi, T. Becsi, P. Gaspar. – DOI:10.1109/CINTI.2013.6705179. – Текст : непосредственный // Computational

Intelligence and Informatics (CINTI), IEEE 14th International Symposium on. – 2013. – P. 135 – 139.

297. Bai, Y. Energy efficient driving strategy for freight trains based on power consumption analysis / Y. Bai, B. Mao, F. Zhou [et al.]. – DOI:10.1016/S1570-6672(08)60062-8. – Текст : непосредственный // Journal of Transportation system engineering and information technology. – 2009. – № 9. – P. 43 – 50.

298. Brünger, O. Running time estimation / E. Dahlhaus, I. A. Hansen, J. Pachl. – Текст : непосредственный // Railway Timetabling and Operations. 2 ed. Eurail press, Hamburg, Germany. – 2014. – P. 65 – 89.

299. An overview of recovery models and algorithms for real-time railway rescheduling / V. Cacchiani, D. Huisman, M. Kidd. [et al.]. – DOI:10.1016/j.trb.2014.01.009. – Текст : непосредственный // Transportation Research Part B: Methodological. – 2014. – № 63. – P. 15 – 37.

300. Evaluation of green wave policy in real-time railway traffic management / F. Corman, A. D’Ariano, D. Pacciarelli [et al.]. – DOI:10.1016/j.trc.2009.04.001. – Текст : непосредственный // Transportation Research Part C: Emerging Technologies. – 2009. – № 17. – P. 607 – 616.

301. D’Ariano, A. Running time re-optimization during real-time timetable perturbations / A. D’Ariano, T. Albrecht. – DOI:10.2495/CR060531. – Текст : непосредственный // WIT Transactions on the Built Environment. – 2006. – № 88. – P. 531 – 540.

302. De Martinis, V. Towards a simulation-based framework for evaluating energy-efficient solutions in train operation / V. De Martinis, U. Weidmann, M. Gallo. – DOI:10.2495/CR140601. – Текст : непосредственный // 14th International Conference on Railway Engineering Design and Optimization, COMPRAIL 2014. Rome. Italy. – 2014. – № 135. – P. 721 – 732.

303. Franke, R. An algorithm for the optimal control of the driving of trains / R. Franke, P. Terwiesch, M. Meyer. – DOI:org/10.1109/cdc.2000.914108. – Текст : непосредственный // Decision and Control. Proceedings of the 39th IEEE Conference on. – 2000. – № 3. – P. 2123 – 2128.

304. A three-level framework for performance-based railway timetabling / R. Goverde, N. Besinovic, A. Binder [et al.]. – DOI:10.1016/j.trc.2016.02.004. – Текст : непосредственный // Proceedings 6th International Conference on Railway Operations Modelling and Analysis (RailTokyo2015). Narashino. Japan. – 2015. – P. 1 – 17.
305. Howlett, P. The optimal control of a train / P. Howlett. – DOI:10.1023/A:1019235819716. – Текст : непосредственный // Annals of Operations Research. – 2000. – № 98. – P. 65 – 87.
306. Khmelnitsky, E. On an optimal control problem of train operation / E. Khmelnitsky. – DOI:10.1109/9.867018. – Текст : электронный // IEEE Transactions on Automatic Control. – 2000. – № 45. – P. 1257 – 1266. – URL: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/867018> (дата обращения: 29.07.2020).
307. Liu, R. Energy-efficient operation of rail vehicles / R. Liu, I. M. Golovicher. – DOI:10.1016/j.tra.2003.07.001. – Текст : непосредственный // Transportation Research Part A. – 2003. – № 37. – P. 917 – 931.
308. Lukaszewicz, P. Energy saving driving methods for freight trains / P. Lukaszewicz. – Текст : непосредственный // Advances in Transport. – 2004. – № 15. – P. 901 – 909.
309. Kampeerawat, W. A strategy for utilization of regenerative energy in urban railway system by application of smart train scheduling and wayside energy storage system / W. Kampeerawat, T. Koseki. – DOI:10.1016/j.egypro.2017.10.070. – Текст : непосредственный // Energy Procedia. – 2017. – № 138. – P. 795 – 800.
310. Wang, J. Electric train energy consumption modeling / J. Wang, H. A. Rakha. – DOI:10.1016/j.trpro.2016.12.008. – Текст : непосредственный // Applied Energy. – 2017. – №. 193. – P. 346 – 355.
311. Watanabe, S. Energy-saving train scheduling diagram for automatically operated electric railway / S. Watanabe, T. Koseki. – DOI:10.1016/j.jrtpm.2015.10.004. – Текст : непосредственный // J Rail Transp Plann Manage. – 2015. – № 5(3). – P. 183 – 193.

312. González – Gil, A. Sustainable urban rail systems: strategies and technologies for optimal management of regenerative braking energy / A. González – Gil, R. Palacin, P. Batty. – DOI:10.1016/j.enconman.2013.06.039. – Текст : непосредственный // Energy Convers Manage. – 2013. – № 75. – P. 374 – 388.

313. Feng, X. Optimization of target speeds of high-speed railway trains for traction energy saving and transport efficiency improvement / X. Feng. – DOI:10.1016/j.enpol.2011.08.051. – Текст : непосредственный // Energy Policy. – 2011. – № 39(12). – P. 7658 – 7665.

314. Jong, J. C. Models for estimating energy consumption of electric trains / J. C. Jong, E. F. Chang. – DOI:10.11175/easts.6.278. – Текст : непосредственный // J East Asia Soc Transport Stud. – 2005. – № 6. – P. 278 – 291.

315. Energetic optimization of regenerative braking for high speed railway systems / A. Frilli, E. Meli, D. Nocciolini [et al.]. – DOI:10.1016/j.enconman.2016.10.011. – Текст : непосредственный // Energy Convers Manage. – 2016. – № 129. – P. 200 – 215.

316. Korn, G. Mathematical handbook [for scientists and engineers] / G. Korn, T. Korn. – New York : McGraw-Hill Book Company, 1968. – 832 p. – Текст : непосредственный.

317. Gatelyuk, O. V. Analysis of measurement data in a direct current traction power-supply system with uncontrolled rectifiers / O. V. Gatelyuk, V. L. Nesevac, V. V. Erbes. – Текст : непосредственный. // Russian Electrical Engineering. – 2019. – Т. 90. – № 2. – P. 180 – 186.

318. Radu, P. V. On-Board and Wayside Energy Storage Devices Applications in Urban Transport Systems – Case Study Analysis for Power Applications / P. V. Radu, M. Lewandowski, A. Szlag. – DOI:10.3390/en13082013. – Текст : непосредственный // Energies. – 2020. – № 13(8):2013. – P. 1 – 29.

319. Pan, D. Energy efficiency emergence of high-speed train operation and systematic solutions for energy efficiency improvement / D. Pan, Z. Chen, M. Mei. – DOI:10.1007/s42452-020-2692-5. – Текст : непосредственный // SN Applied Sciences. – 2020. – № 2(5). – P. 1 – 13.

320. Nezevak, V. Interaction's Simulation Modeling of Electric Rolling Stock and Electric Traction System / V. Nezevak, A. Shatokhin. – DOI:10.1109/uralcon.2019.8877672. – Текст : непосредственный // 2019 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon). – 2019. – P. 410 – 416.

321. Nezevak, V. Electric Energy Storage Units Applicability Assessment of Different Kinds in the Conditions of Moscow Central / V. Nezevak, V. Cheremisin, A. Shatokhin. – DOI:org/10.1007/978-3-030-37916-2\_5. – Текст : непосредственный // VIII International Scientific Siberian Transport Forum «TransSiberia 2019». Advances in Intelligent Systems and Computing. Springer, Cham. – 2020. – № 1115. – P. 42 – 51.

322. Nezevak, V. Operating modes of electric energy storage systems on the Moscow Central Ring / V. Nezevak, V. Cheremisin, A. Shatokhin. – DOI:10.1051/e3sconf/201913501063. – Текст : непосредственный // E3S Web of Conferences. – 2019. – № 135. – 01063. – P. 1 – 13.

323. Calculation of hybrid bus power demands by standard driving cycles / A. A. Shtang, M. Yaroslavtsev, W. Xiaogang [et al.]. – DOI:10.1109/EDM.2018.8435023. – Текст : электронный // 19th International Conference of Young Specialists on Micro. Nanotechnologies and Electron Devices. IEEE Computer Society. – 2019. – P. 469 – 472. – URL: [https://www.researchgate.net/publication/327092623\\_Calculation\\_of\\_Hybrid\\_Bus\\_Power\\_Demands\\_by\\_Standard\\_Driving\\_Cycles](https://www.researchgate.net/publication/327092623_Calculation_of_Hybrid_Bus_Power_Demands_by_Standard_Driving_Cycles). (дата обращения: 29.07.2020).

324. Nezevak, V. L. Electric energy storage units applicability assessment of different kinds in the conditions of Moscow central ring / V. L. Nezevak, V. T. Cheremisin, A. P. Shatokhin. – DOI:10.1007/978-3-030-37916-2\_5. – Текст : непосредственный // Advances in Intelligent Systems and Computing. – 2020. – T. 1115. – P. 42 – 51.

325. On the Challenge of Large Energy Storage by Electrochemical Devices / S. Maddukuri, D. Malka, M. S. Chae [et al.]. – DOI:10.1016/j.electacta.2020.136771. – Текст : непосредственный // Electrochimica Acta. – 2020. – № 354. – 136771. – P. 1 – 22.

326. Membrane and electrode engineering of high-performance lithium-sulfur batteries modified by stereotaxically-constructed graphene / X. Chen, S. Hu, Y. Liu [et al.]. – DOI:10.1016/j.jallcom.2020.155096. – Текст : непосредственный // Journal of Alloys and Compounds. – 2020. – №834. – 155096. – P. 1 – 9.

327. Study of spherical  $\text{Li}_{1.2-x}\text{Na}_x\text{Mn}_{0.534}\text{Ni}_{0.133}\text{Co}_{0.133}\text{O}_2$  cathode based on dual  $\text{Li}^+/\text{Na}^+$  transport system for Li-ion batteries / Y. Zhou, W. Shan, X. Hou [et al.]. – DOI:10.1016/j.ssi.2020.115326. – Текст : непосредственный // Solid State Ionics. – 2020. – № 350. – 115326. – P. 1 – 7.

328. Battery Energy Storage Systems in Microgrids: Modeling and Design Criteria. / M. Moncecchi, C. Brivio, S. Mandelli [et al.]. – DOI:10.3390/en13082006. – Текст : непосредственный // Energies. – 2020. – № 13(8). – 2006. – P. 1 – 18.

329. Nanoengineering to achieve high efficiency practical lithium-sulfur batteries / E. Cha, M. Patel, S. Bhoyate [et al.]. – DOI:10.1039/c9nh00730j. – Текст : непосредственный // Nanoscale Horizons. – 2020. – P. 1 – 43.

330. Barrero, R. Stationary or onboard energy storage systems for energy consumption reduction in a metro network / R. Barrero, X. Tackoen, J. van Mierlo. DOI:10.1243/09544097JRRT322. – Текст : непосредственный // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit. – 2010. – № 224(3). – P. 207 – 225.

331. Techno-economic evaluation of transportable battery energy storage in robust day-ahead scheduling of integrated power and railway transportation networks / R. Ebadi, A. Sadeghi Yazdankhah, R. Kazemzadeh [et al.]. – DOI:10.1016/j.ijepes.2020.106606. – Текст : непосредственный // International Journal of Electrical Power & Energy Systems. – 2021. – № 126. – 106606. – P. 1 – 19.

332. Determining the optimum installation of energy storage systems in railway electrical infrastructures by means of swarm and evolutionary optimization algorithms / D. Roch-Dupré, T. Gonsalves, A. P. Cucala [et al.]. – DOI:10.1016/j.ijepes.2020.106295. – Текст : непосредственный // International Journal of Electrical Power & Energy Systems. – 2021. – № 124. – 106295. – P. 1 – 15.

333. Tomaszewska, A. Lithium-Ion Battery Fast Charging: A Review / A. Tomaszewska, Z. Chu, X. Feng [et al.]. – DOI:10.1016/j.etrans.2019.100011. – Текст : непосредственный // eTransportation. – 2019. – № 100011. – P. 1 – 28.

334. Brandão, A. F. A model for substation reliability analysis including overload effects / A. F. Brandão. – DOI:10.1016/0142-0615(87)90001-9. – Текст : непосредственный // International Journal of Electrical Power & Energy Systems. 1987. – № 9(4). P. 194 – 205.

335. Smart electric vehicle charging scheduler for overloading prevention of an industry client power distribution transformer / R. Godina, E. M. G. Rodrigues, J. C. O. Matias [et al.]. – DOI:10.1016/j.apenergy.2016.06.019. – Текст : непосредственный // Applied Energy. – 2016. – № 178. – P. 29 – 42.

336. A coherent strategy for peak load shaving using energy storage systems / S. M. S. Danish, M. Ahmadi, M. S. S. Danish [et al.]. – DOI:10.1016/j.est.2020.101823. – Текст : непосредственный // Journal of Energy Storage. – 2020. – № 32. – 101823. – P. 1 – 11.

337. Mishra, S. Efficient power flow management and peak shaving in a microgrid-PV system / S. Mishra, P. Palanisamy. DOI: 10.1109/ecce.2018.8558312. – Текст : непосредственный // 2018 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). – 2018. – P. 3792 – 3798.

338. Nezevak, V. Assessment of energy intensity of the drive for traction power supply system / V. Nezevak, V. Cheremisin, A. Shatokhin. – DOI:10.1007/978-3-030-19756-8\_50. – Текст : непосредственный // Advances in Intelligent Systems and Computing. – 2020. – № 982. – P. 524 – 538.

339. Rahman, F. Overview of energy storage systems for storing electricity from renewable energy sources in Saudi Arabia / F. Rahman, S. Rehman, M. A. Abdul-Majeed. – DOI:10.1016/j.rser.2011.07.153. – Текст : непосредственный // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2012. – № 16(1). – P. 274 – 283.

340. Energy storage for mitigating the variability of renewable electricity sources: An updated review / M. Beaudin, H. Zareipour, A. Schellenberglabe [et

al.]. – DOI:10.1016/j.esd.2010.09.007. – Текст : непосредственный // Energy for Sustainable Development. – 2010. – № 14(4). – P. 302 – 314.

341. A demand-response method to balance electric power-grids via HVAC systems using active energy-storage: Simulation and on-site experiment / M. Qinglong, L. Yang, R. Xiaoxiao [et al.]. – DOI.org/10.1016/j.egy.2021.01.083. – Текст : непосредственный // Energy Reports. – 2021. – № 7. – P. 762 – 777.

342. Jiang, S. IFQP-EPS: Analyzing effects of queuing and storage issues on electric power systems under dual uncertainties. /S. Jiang, Y. P. Li, C. Suo. – DOI:10.1016/j.resconrec.2019.02.023. – Текст : непосредственный // Resources, Conservation and Recycling. – 2019. – № 145. – P. 241 – 260.

343. Oldenbroek, V. Fuel cell electric vehicle as a power plant: Fully renewable integrated transport and energy system design and analysis for smart city areas / V. Oldenbroek, L. A. Verhoef, A. J. M. van Wijk. – doi:10.1016/j.ijhydene.2017.01.155. – Текст : непосредственный // International Journal of Hydrogen Energy. – 2017. – № 42(12). – P. 8166 – 8196.

344. A novel paradigm for a sustainable mobility based on electric vehicles, photovoltaic panels and electric energy storage systems: Case studies for Naples and Salerno (Italy) / F. Calise, F. L. Cappiello, A. Carteni [et al.] – DOI:10.1016/j.rser.2019.05.022. – Текст : непосредственный // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2019. – № 111. – P. 97 – 114.

345. Fletcher, D. I. TransEnergy – a tool for energy storage optimization, peak power and energy consumption reduction in DC electric railway systems/ D. I. Fletcher, R. F. Harrison, S. Nallaperuma. – DOI:10.1016/j.est.2020.101425. – Текст : непосредственный // Journal of Energy Storage. – 2020. – № 30. – № 101425. – P. 1–10.

346. Coordinated power and train transportation system with transportable battery-based energy storage and demand response: A multi-objective stochastic approach / R. Ebadi, A. S. Yazdankhah, B. Mohammadi-Ivatloo. [et al.] – DOI:10.1016/j.jclepro.2020.123923. – Текст : непосредственный // Journal of Cleaner Production. – 2020. – № 123923. – P. 1–16.

347. Electric power accumulators in system of supplying railways with traction energy by direct current / I. Rebrov, A. Kotelnikov, M. Shevlyugin [et al.]. – DOI:10.1051/mateconf/201823901057. – Текст : непосредственный // TS 2018. MATEC Web of Conferences. – 2018. – № 239(17):01057. – P. 1 – 9.

348. Nezevak, V. Determination of electric energy storage units parameters of direct current traction power supply in conditions of goods traffic dominance / V. Nezevak, V. Cheremisin. – DOI: 10.1109/FarEastCon50210.2020.9271611. – Текст : непосредственный // FarEastCon. – 2020. – 9271611. – Category number CFP20M35-ART. – Code 165655.

349. Janssen, M. C. The Smart Grid Drivers / M. C. Janssen // PAC, 2010. – 77 p. – Текст : непосредственный.

350. Amin, S. M. Toward a Smart Grid / S. M. Amin, B. F. Wollenberg // IEEE P&E Magazine, 2005. – P. 112 – 115. – Текст : непосредственный.

351. Wei, Z. A multi-timescale estimator for battery state of charge and capacity dual estimation based on an online identified model / Z. Wei, J. Zhao, D. Ji [et al.]. – DOI:10.1016/j.apenergy.2017.02.016. – Текст : непосредственный // Appl. Energy. – 2017. – № 204. – P. 1264 – 1274.

352. Wei, Z. Enhanced online model identification and state of charge estimation for lithium-ion battery with a FBCRLS based observer / Z. Wei, S. Meng, B. Xiong [et al.]. – DOI:10.1016/j.apenergy.2016.08.103. – Текст : непосредственный // Appl. Energy. – 2016. – № 181. – P. 332 – 341.

353. Manandhar, U. Validation of Faster Joint Control Strategy for Battery- and Supercapacitor-Based Energy Storage System / U. Manandhar, N. R. Tummuru, S. K. Kollimalla. DOI:10.1109/TIE.2017.2750622. – Текст : электронный // IEEE Trans. Ind. Electron. – 2018. – № 65. – P. 3286 – 3295. – URL: [https://www.researchgate.net/publication/319442753\\_Validation\\_of\\_Faster\\_Joint\\_Control\\_Strategy\\_for\\_Battery\\_and\\_Supercapacitor\\_Based\\_Energy\\_Storage\\_System](https://www.researchgate.net/publication/319442753_Validation_of_Faster_Joint_Control_Strategy_for_Battery_and_Supercapacitor_Based_Energy_Storage_System) (дата обращения: 29.07.2020).

354. Kollimalla, S. K. Design and Analysis of Novel Control Strategy for Battery and Supercapacitor Storage System / S. K. Kollimalla, M. K. Mishra, N. L. Narasamma. – DOI:10.1109/TSTE.2014.2336896. – Текст : электронный //

IEEE Trans. Sustain. Energy. – 2014. – № 5. – P. 1137 – 1144. – URL: [https://www.researchgate.net/publication/265789303\\_Design\\_and\\_Analysis\\_of\\_Novel\\_Control\\_Strategy\\_for\\_Battery\\_and\\_Supercapacitor\\_Storage\\_System](https://www.researchgate.net/publication/265789303_Design_and_Analysis_of_Novel_Control_Strategy_for_Battery_and_Supercapacitor_Storage_System) (дата обращения: 29.07.2020).

355. Abbey, C. An Online Control Algorithm for Application of a Hybrid ESS to a Wind–Diesel System / C. Abbey, W. Li, G. Joos. – DOI:10.1109/TIE.2010.2051392. – Текст : электронный // IEEE Trans. Ind. Electron. – 2010. – № 57. – P. 3896 – 3904. – URL: [https://www.researchgate.net/publication/224169945\\_An\\_Online\\_Control\\_Algorithm\\_for\\_Application\\_of\\_a\\_Hybrid\\_ESS\\_to\\_a\\_Wind-Diesel\\_System](https://www.researchgate.net/publication/224169945_An_Online_Control_Algorithm_for_Application_of_a_Hybrid_ESS_to_a_Wind-Diesel_System) (дата обращения: 29.07.2020).

356. Mendis, N. Management of Battery-Supercapacitor Hybrid Energy Storage and Synchronous Condenser for Isolated Operation of PMSG Based Variable-Speed Wind Turbine Generating Systems / N. Mendis, K. M. Muttaqi, S. Perera. – DOI:10.1109/TSG.2013.2287874. – Текст : электронный // IEEE Tran. Smart Grid. – 2014. – № 5. – P. 944 – 953. – URL: [https://www.researchgate.net/publication/260523212\\_Management\\_of\\_Battery-Supercapacitor\\_Hybrid\\_Energy\\_Storage\\_and\\_Synchronous\\_Condenser\\_for\\_Isolated\\_Operation\\_of\\_PMSG\\_Based\\_Variable-Speed\\_Wind\\_Turbine\\_Generating\\_Systems](https://www.researchgate.net/publication/260523212_Management_of_Battery-Supercapacitor_Hybrid_Energy_Storage_and_Synchronous_Condenser_for_Isolated_Operation_of_PMSG_Based_Variable-Speed_Wind_Turbine_Generating_Systems) (дата обращения: 29.07.2020).

357. Tummuru, N. R. Dynamic Energy Management of Renewable Grid Integrated Hybrid Energy Storage System / N. R. Tummuru, M. K. Mishra, S. Srinivas. – DOI:10.1109/TIE.2015.2455063. – Текст : электронный // IEEE Trans. Ind. Electron. – 2015. – № 62. – P. 7728 – 7737. – URL: [https://www.researchgate.net/publication/281546255\\_Dynamic\\_Energy\\_Management\\_of\\_Renewable\\_Grid\\_Integrated\\_Hybrid\\_Energy\\_Storage\\_System](https://www.researchgate.net/publication/281546255_Dynamic_Energy_Management_of_Renewable_Grid_Integrated_Hybrid_Energy_Storage_System) (дата обращения: 29.07.2020).

358. Hredzak, B. A Model Predictive Control System for a Hybrid Battery-Ultracapacitor Power Source / B. Hredzak, V. G. Agelidis, M. Jang. – DOI:10.1109/TPEL.2013.2262003. – Текст : электронный // IEEE Trans. Power Electron. – 2014. – № 29. – P. 1469 – 1479. – URL: [https://www.researchgate.net/publication/260509919\\_A\\_Model\\_Predictive\\_Control\\_System\\_for\\_a\\_Hybrid\\_Battery-Ultracapacitor\\_Power\\_Source](https://www.researchgate.net/publication/260509919_A_Model_Predictive_Control_System_for_a_Hybrid_Battery-Ultracapacitor_Power_Source)

l\_System\_for\_a\_Hybrid\_Battery-Ultracapacitor\_Power\_Source (дата обращения: 29.07.2020).

359. Shen, J. A Supervisory Energy Management Control Strategy in a Battery / Ultracapacitor Hybrid Energy Storage System / J. Shen, A. Khaligh. – DOI:10.1109/TTE.2015.2464690. – Текст : электронный // IEEE Trans. Transp. Electrification. – 2015. – № 1. – P. 223 – 231. – URL: [https://www.researchgate.net/publication/282548238\\_A\\_Supervisory\\_Energy\\_Management\\_Control\\_Strategy\\_in\\_a\\_BatteryUltracapacitor\\_Hybrid\\_Energy\\_Storage\\_System](https://www.researchgate.net/publication/282548238_A_Supervisory_Energy_Management_Control_Strategy_in_a_BatteryUltracapacitor_Hybrid_Energy_Storage_System) (дата обращения: 29.07.2020).

360. Chedid, R. Unit sizing and control of hybrid wind-solar power systems / R. Chedid, S. Rahman. – DOI:10.1109/60.658207. – Текст : электронный // IEEE Trans. Energy Convers. – 1997. – № 12. – P. 79 – 85. – URL: [https://www.researchgate.net/publication/3269650\\_A\\_Decision\\_Support\\_Technique\\_for\\_the\\_Design\\_of\\_Hybrid\\_Solar-Wind\\_Power\\_Systems](https://www.researchgate.net/publication/3269650_A_Decision_Support_Technique_for_the_Design_of_Hybrid_Solar-Wind_Power_Systems) (дата обращения: 29.07.2020).

361. Dalbon, W. Hybrid photovoltaic system control for enhancing sustainable energy / W. Dalbon, M. Roscia, D. Zaninelli. – DOI:10.1109/PESS.2002.1043198. – Текст : электронный // In Proceedings of the IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, Chicago, IL, USA. – 2002. – № 1. – P. 134 – 139. – URL: [https://www.researchgate.net/publication/3973180\\_Hybrid\\_photovoltaic\\_system\\_control\\_for\\_enhancing\\_sustainable\\_energy](https://www.researchgate.net/publication/3973180_Hybrid_photovoltaic_system_control_for_enhancing_sustainable_energy) (дата обращения: 29.07.2020).

362. Kakigano, H. Distribution voltage control for DC microgrid with fuzzy control and gain-scheduling control / H. Kakigano, A. Nishino, T. Ise. – DOI:10.1109/ICPE.2011.5944599. – Текст : непосредственный // In Proceedings of the 8th International Conference on Power Electronics – ECCE Asia, Jeju, Korea. – 2011. – № 28(5). – P. 256 – 263.

363. Gu, Y. Frequency-Coordinating Virtual Impedance for Autonomous Power Management of DC Microgrid / Y. Gu, W. Li, X. He. – DOI:10.1109/PEDG.2016.7527044. – Текст : электронный // IEEE Trans. Power Electron. – 2015. – № 30. – P. 2328 – 2337. – URL: [https://www.researchgate.net/publication/305782897\\_Energy\\_management\\_strategy\\_of\\_multiple\\_supercapacito](https://www.researchgate.net/publication/305782897_Energy_management_strategy_of_multiple_supercapacito)

rs\_in\_an\_autonomous\_DC\_microgrid\_using\_adaptive\_virtual\_impedance (дата обращения: 29.07.2020).

364. Review of system topologies for hybrid electrical energy storage systems / T. Zimmermann, P. Keil, M. H. Hofmann [et al.]. – DOI:10.1016/j.est.2016.09.006. – Текст : непосредственный // J. EnergyStorage. – 2016. – № 8. – P. 78 – 90.

365. Shepherd, C. M. J. Electrochem / C. M. Shepherd. – Текст : непосредственный // Soc. – 1965. – № 112. – P. 657.

366. Tremblay, O. A generic battery model for the dynamic simulation of hybrid electric vehicles / O. Tremblay, Louis-A. Dessaint, Abdel-Ilhah Dekkiche. – DOI:10.1109/VPPC.2007.4544139. – Текст : непосредственный // Electrical Engineering Department, Ecole de Technologie Superieure. – 2007. – P. 284 – 289.

367. State of charge estimation for electric vehicle batteries using unscented kalman filtering / W. He, N. Williard, C. Chen [et al.]. – DOI:10.1016/j.microrel.2012.11.010. – Текст : непосредственный // Microelectronics Reliability. – 2013. – № 53(6). – P. 840 – 847.

368. The state of charge estimation of lithium-ion batteries based on a proportional integral observer / Z. Chen, J. Xu, B. Cao [et al.]. – DOI:10.1109/TVT.2013.2287375. – Текст : электронный // IEEE Transactions on Vehicular Technology. – 2013. – № 62. – P. 840 – 847. – URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6648470> (дата обращения: 29.07.2020).

369. Domenico, D. Lithium-ion battery state of charge estimation with a kalman filter based on a electrochemical model / D. Domenico, F. Giovanni, A. Stefanopoulou. DOI:10.1109/CCA.2008.4629639. – Текст : электронный // IEEE International Conference on Control Applications. San Antonio, TX, USA. – 2008. – P. 702 – 707. – URL: [https://www.researchgate.net/publication/4374350\\_Lithium-Ion\\_Battery\\_State\\_of\\_Charge\\_Estimation\\_with\\_a\\_Kalman\\_Filter\\_Based\\_on\\_an\\_Electrochemical\\_Model](https://www.researchgate.net/publication/4374350_Lithium-Ion_Battery_State_of_Charge_Estimation_with_a_Kalman_Filter_Based_on_an_Electrochemical_Model) (дата обращения: 29.07.2020).

370. Ling, A. W. Review on the optimal placement, sizing and control of an energy storage system in the distribution network / A. W. Ling, K. R. Vigna. – DOI:10.1016/j.est.2018.12.015. – Текст : непосредственный // Journal of Energy Storage. – 2019. – № 21. – P. 489 – 504.

## Общество с ограниченной ответственностью «РУСЭНЕРГОСБЫТ»

## АКТ

от «15» сентября 2020 г.

г. Москва

Об использовании  
результатов научных  
исследований и разработок  
в производстве

«УТВЕРЖДАЮ»

Первый заместитель генерального  
директора ООО «РУСЭНЕРГОСБЫТ»



Луцио Джузеппе

15 сентября 2020 г.

Основание: Разработки Омского государственного университета путей сообщения (ОмГУПС), выполненные под руководством директора Научно-исследовательского института энергосбережения на железнодорожном транспорте (НИИЭ), д. т. н. Черемисина В. Т., начальника научно-производственной лаборатории «Энергосберегающие технологии и электромагнитная совместимость», к. т. н. Никифорова М. М. при личном участии старшего научного сотрудника Научно-исследовательской части, к. т. н. Незевак В. Л.

Предложена методика определения параметров литий-ионного накопителя электроэнергии для работы в системе тягового электроснабжения железнодорожного транспорта.

Разработки были выполнены в соответствии с планом НТР ОАО «РЖД» согласно договору № Р-31/07-2019-1 от 31 июля 2019 г.

Составлен комиссией в составе:

Представители ООО «РУСЭНЕРГОСБЫТ»:

технический директор Трояновский А. И.

Представители ОмГУПС:

директор НИИЭ Черемисин В. Т.

начальник научно-производственной лаборатории «Энергосберегающие технологии и электромагнитная совместимость» Никифоров М. М.

старший научный сотрудник Незевак В. Л.

1. Разработки ОмГУПС, характеризуемые основными особенностями (признаками):

Предложенная методика позволяет определить параметры литий-ионного накопителя электроэнергии для работы в системе тягового электроснабжения постоянного тока на основе анализа результатов тяговых расчетов, определения графиков нагрузки и напряжения и пропускной способности участка железной дороги. Исходными данными для расчетов являются параметры системы тягового электроснабжения, данные о профиле пути, сериях

электроподвижного состава, массы составов и скорости движения поездов, параметры графика движения поездов на участке.

## 2. Техничко-экономическая эффективность:

Разработанная при личном участии старшего научного сотрудника Незевака В. Л. методика может быть применена для определения параметров литий-ионного и другого вида накопителей электроэнергии для работы в системе тягового электроснабжения. Применение накопителей электроэнергии с расчетными параметрами позволяет повысить пропускную способность на лимитирующих участках железных дорог.

## 3. Предложения о дальнейшем использовании и другие замечания:

Рекомендуется широкое использование указанных в акте разработок ОмГУПСа при выборе параметров накопителей электроэнергии для работы в системах тягового электроснабжения железнодорожного транспорта.


Составлен в трех экземплярах:

1-й экземпляр – ОмГУПС, НИЧ;



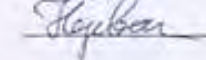
2-й экземпляр – ООО «РУСЭНЕРГОСБЫТ»;

3-й экземпляр – ОмГУПС, разработчику.

Председатель комиссии:

 А. И. Трояновский

Члены комиссии:

 В. Т. Черемисин  
 М. М. Никифоров  
 В. Л. Незевак

от «05» *сентября* 2021 г.

г. Москва

Об использовании результатов  
научных исследований и разработок  
в производстве

«УТВЕРЖДАЮ»  
Первый заместитель генерального  
директора ООО «РУСЭНЕРГОСБЫТ»



**АКТ**  
**внедрения научно-технической продукции**

Основание: Разработки Омского государственного университета путей сообщения (ОмГУПС), подготовленные при личном участии доцента кафедры «Электроснабжение железнодорожного транспорта», к. т. н. Незевака В. Л. в рамках проведения работ по договору № 464/20 от 17 июня 2020 г.

Мы, нижеподписавшиеся, руководитель работ, зам. директора НИИ Энергосбережения на железнодорожном транспорте Никифоров М.М., с одной стороны, и первый вице-президент ООО «РУСЭНЕРГОСБЫТ» Чупов Д. А., с другой стороны, составили настоящий акт о том, что способ определения зарядной характеристики системы накопления электроэнергии в системе тягового электроснабжения, разработанный сотрудниками ОмГУПС, применялся при выполнении работ по выбору мест расположения и определению параметров накопителя электроэнергии для системы тягового электроснабжения Свердловской железной дороги (договор № 464/20 от 17 июня 2020 г.).


Краткое описание научно-технической продукции: способ определения зарядной характеристики системы накопления электроэнергии в системе тягового электроснабжения, отличающийся построением характеристики в зависимости от потерь напряжения в контактной сети и степени заряженности при различных вариантах формирования электротяговой нагрузки.

Технико-экономическая эффективность научно-технической продукции: эффект от использования разработанного способа достигается за счет снижения потерь электроэнергии в контактной сети при работе системы накопления электроэнергии в режиме заряда на посту секционирования.



Составлен в трех экземплярах:

- 1-й экземпляр – ОмГУПС, НИЧ;
- 2-й экземпляр – ООО «РУСЭНЕРГОСБЫТ»;
- 3-й экземпляр – ОмГУПС, разработчику.

Председатель комиссии:

 Д. А. Чупов

Члены комиссии:

 М. М. Никифоров  
 В. Л. Незевак

от «05» *сентября* 2021 г.

г. Москва

Об использовании результатов  
научных исследований и разработок  
в производстве

«УТВЕРЖДАЮ»

Первый заместитель генерального  
директора ООО «РУСЭНЕРГОСБЫТ»



Луцино Джузеппе

2021 г.

## АКТ

## внедрения научно-технической продукции

Основание: Разработки Омского государственного университета путей сообщения (ОмГУПС), подготовленные при личном участии доцента кафедры «Электроснабжение железнодорожного транспорта», к. т. н. Незевака В. Л. в рамках проведения работ по договору № 472/21 от 09 февраля 2021 г.

Мы, нижеподписавшиеся, руководитель работ, зам. директора НИИ Энергосбережения на железнодорожном транспорте Никифоров М.М., с одной стороны, и первый вице-президент ООО «РУСЭНЕРГОСБЫТ» Чулов Д. А., с другой стороны, составили настоящий акт о том, что методика определения энергетических показателей движения поезда и системы тягового электроснабжения, разработанная сотрудниками ОмГУПСа, применялась при выполнении работ по выбору мест расположения и определению параметров накопителя электроэнергии для системы тягового электроснабжения Свердловской железной дороги (договор 472/21 от 09 февраля 2021 года).

Краткое описание научно-технической продукции: методика определения энергетических показателей системы тягового электроснабжения, отличающаяся учетом ограничивающих параметров накопителей электроэнергии и изменения их энергетических показателей.

Технико-экономическая эффективность научно-технической продукции: эффект от использования разработанной методики достигается за счет учета изменения степени заряженности накопителя электроэнергии в различных условиях формирования электротяговой нагрузки.


Составлен в трех экземплярах:

1-й экземпляр – ОмГУПС, НИЧ;



2-й экземпляр – ООО «РУСЭНЕРГОСБЫТ»;

3-й экземпляр – ОмГУПС, разработчику.

Председатель комиссии:

  
Д. А. Чулов

Члены комиссии:

  
М. М. Никифоров  
  
В. Л. Незевак

«УТВЕРЖДАЮ»

Главный инженер Западно-Сибирской  
дирекции по энергообеспечению

Трансэнерго – филиала ОАО «РЖД»

Смолягин И.О.

М.П.

« 31 » мая 2022 г.

**АКТ****внедрения научно-технической продукции**

Основание: Разработки Омского государственного университета путей сообщения (ОмГУПС).

Мы, нижеподписавшиеся, доцент кафедры «Электроснабжение железнодорожного транспорта» Незевак В. Л. и начальник дорожной электротехнической лаборатории (ДЭЛ) Западно-Сибирской дирекции по энергообеспечению Трансэнерго – филиала ОАО «РЖД» Тарута П. В. составили настоящий акт о том, что способ определения энергетических показателей системы тягового электроснабжения железной дороги, разработанный сотрудниками ОмГУПС (Незевак В. Л., Черемисин В. Т., Шатохин А. П.), применялся при выполнении расчетов для оценки мощности и энергоемкости систем накопления электроэнергии на участке Омск – Иртышское Западно-Сибирской железной дороги – филиала ОАО «РЖД», результаты которых приняты для оценки внедрения перспективных устройств усиления системы тягового электроснабжения постоянного тока.

Краткое описание научно-технической продукции: способ определения энергетических показателей системы тягового электроснабжения железной дороги, отличающийся учетом процессов работы в ней системы накопления электроэнергии, позволяющий рассчитать ее энергетические параметры и показатели работы при размещении на тяговых подстанциях и линейных устройствах тягового электроснабжения.

Технико-экономическая эффективность научно-технической продукции: эффект от использования способа заключается в определении энергетических параметров устройств накопления и выбора оптимального варианта их размещения в системе тягового электроснабжения для повышения пропускной способности участка железной дороги.

От ОмГУПС:

От Западно-Сибирской дирекции  
энергообеспечения Трансэнерго:

Незевак В. Л.

Начальник ДЭЛ

Тарута П. В.

«УТВЕРЖДАЮ»

Главный инженер Свердловской  
дирекции по энергообеспечению  
Трансэнерго – филиала ОАО «РЖД»

М.В. Григорьев



М.П.

«25» августа 2022 г.

АКТ

### внедрения научно-технической продукции

Основание: Разработки Омского государственного университета путей сообщения (ОмГУПС).

Мы, нижеподписавшиеся, директор «НИИ энергосбережения на железнодорожном транспорте» Никифоров М.М., доцент кафедры «Электроснабжение железнодорожного транспорта» Незевак В. Л. и начальник дорожной электротехнической лаборатории (ДЭЛ) Свердловской дирекции по энергообеспечению Трансэнерго – филиала ОАО «РЖД» Пятацкий И. А. составили настоящий акт о том, что способ определения зарядной характеристики системы накопления электроэнергии в системе тягового электроснабжения разработанный сотрудниками ОмГУПС (Незевак В. Л., Сидоров О. А.), использован при выполнении расчетов для оценки мощности и энергоемкости систем накопления электроэнергии на участке Гороблагодатское – 136 км – Серов-сортировочный Свердловской железной дороги – филиала ОАО «РЖД» при выполнении работ по теме «Определение параметров литий-ионного накопителя электроэнергии для работы в системе тягового электроснабжения» в рамках выполнения работ по договору № 472/21 от 09.02.2021 г.

Краткое описание научно-технической продукции: способ определения зарядной характеристики устройства накопления электроэнергии в системе тягового электроснабжения, отличающийся тем, что расчет выполняется по условию устойчивой работы устройства с учетом нагрузочной характеристики контактной сети, позволяющий определить условия заряда устройств накопления на тяговых подстанциях и линейных устройствах.

Технико-экономическая эффективность научно-технической продукции: эффект от использования способа определения зарядной характеристики систем накопления электроэнергии заключается в повышении эффективности их работы и определения оптимальных условий работы в системе тягового электроснабжения для повышения пропускной способности участка железной дороги.

От ОмГУПС:

Никифоров М. М.

Незевак В. Л.

От Свердловской дирекции

энергообеспечения Трансэнерго:

Начальник ДЭЛ

Пятацкий И. А.

«УТВЕРЖДАЮ»

Главный инженер Свердловской  
дирекции по энергообеспечению  
Трансэнерго – филиала ОАО «РЖД»



М.В. Григорьев

АКТ

## внедрения научно-технической продукции

Основание: Разработки Омского государственного университета путей сообщения (ОмГУПС).

Мы, нижеподписавшиеся, директор «НИИ энергосбережения на железнодорожном транспорте» Никифоров М.М., доцент кафедры «Электроснабжение железнодорожного транспорта» Незевак В. Л. и начальник дорожной электротехнической лаборатории (ДЭЛ) Свердловской дирекции по энергообеспечению Трансэнерго – филиала ОАО «РЖД» Пятецкий И. А. составили настоящий акт о том, что способ определения энергетических показателей системы тягового электроснабжения железной дороги, разработанный сотрудниками ОмГУПС (Незевак В. Л., Черемисин В. Т., Шатохин А. П.), использован при выполнении расчетов для оценки мощности и энергоемкости систем накопления электроэнергии на участке Кузино – Пермь-П Свердловской железной дороги – филиала ОАО «РЖД» при выполнении работ по теме «Определение параметров накопителя электроэнергии и разработка технико-экономического обоснования» в рамках выполнения работ по договору № 464/20 от 17.06.2020 г.

Краткое описание научно-технической продукции: способ определения энергетических показателей системы тягового электроснабжения железной дороги, отличающийся учетом процессов работы в ней системы накопления электроэнергии, позволяющий рассчитать ее энергетические параметры и показатели работы при размещении на тяговых подстанциях и линейных устройствах тягового электроснабжения.

Технико-экономическая эффективность научно-технической продукции: эффект от использования способа заключается в определении энергетических параметров устройств накопления и выбора оптимального варианта их размещения в системе тягового электроснабжения для повышения пропускной способности участка железной дороги.

От ОмГУПС:

Никифоров М. М.

Незевак В. Л.


От Свердловской дирекции  
энергообеспечения Трансэнерго:

Начальник ДЭЛ

Пятецкий И. А.

УТВЕРЖДАЮ

Заместитель начальника Красноярской  
 дирекции по энергообеспечению – СП  
 Трансэнерго – филиала ОАО «РЖД»



М.П. \_\_\_\_\_ Д.А.Трегуб  
 «04» \_\_\_\_\_ 2022 г.

АКТ

### внедрения научно-технической продукции

Основание: Разработки Омского государственного университета путей сообщения (ОмГУПС).

Мы, нижеподписавшиеся, доцент кафедры «Электроснабжение железнодорожного транспорта» Незевак В. Л. и начальник дорожной электротехнической лаборатории (ДЭЛ) Красноярской дирекции по энергообеспечению СП Трансэнерго филиала ОАО «РЖД» Здусов С. А. составили настоящий акт о том, что Красноярская дирекция по энергообеспечению СП Трансэнерго – филиала ОАО «РЖД» в своей производственной деятельности использует отдельные результаты, содержащиеся в следующих технических решениях:

1) способ определения энергетических показателей системы тягового электроснабжения железной дороги, разработанный с участием Незевака В. Л. (сотрудниками ОмГУПСа: Незевак В. Л., Черемисин В. Т., Шатохин А. П.);

2) устройство для автоматического регулирования системы тягового электроснабжения, разработанный с участием Незевака В. Л. (сотрудниками ОмГУПСа Черемисин В. Т., Незевак В. Л., Плотников Ю. В.);

3) пост секционирования переменного тока с гибридным накопителем энергии, разработанный с участием Незевака В. Л. (сотрудниками ОмГУПСа Черемисин В. Т., Незевак В. Л., Самолинов С. С.)

Краткое описание научно-технической продукции:


1) способ определения энергетических показателей системы тягового электроснабжения железной дороги, отличающийся учетом процессов работы в ней системы накопления электроэнергии, позволяющий рассчитать энергетические параметры и показатели работы систем накопления электроэнергии при их размещении на тяговых подстанциях и линейных устройствах тягового электроснабжения;

2) устройство автоматического регулирования системы тягового электроснабжения позволяет регулировать мощность тяговых подстанций и уровня напряжения в системе тягового электроснабжения в автоматическом режиме в зависимости от уровня нагрузки тяговых подстанций и уровня напряжения в контактной сети за счет регулирования количества работающих трансформаторов подстанций и режимов работы регулируемых устройств, в т.ч. систем накопления электроэнергии;

3) пост секционирования переменного тока с гибридной системой накопления электроэнергии, позволяющий обеспечить повышение пропускной способности за счет стабилизации напряжения на шинах поста секционирования и энергетической эффективности путем приема энергии рекуперации электроподвижного состава.

Технико-экономическая эффективность научно-технической продукции: эффект от использования способа и рассмотренных устройств заключается в определении энергетических параметров систем накопления и выбора оптимального варианта их размещения в системе тягового электроснабжения для повышения пропускной способности участков железных дорог и энергетической эффективности системы тягового электроснабжения.

От ОмГУПС:

  
Незвук В. Л.

От Красноярской дирекции по  
энергообеспечению – СП Трансэнерго:

Начальник ДЭЛ  
  
С.А. Злусов



ЦЕНТР ПЕРСПЕКТИВНЫХ  
ТЕХНОЛОГИЙ

ООО «Центр Перспективных Технологий TMX»

Россия, 121205, Москва, ул. Нобеля, д. 7  
+7 (495) 744-70-93, e-mail: alc@tmholding.ru

От 15.09.2023 г. № 520-2023инт

Проректору по научной работе  
ОмГУПС  
А. Н. Смердину

О подтверждении использования разработок

В рамках Договора на выполнение научно-исследовательских работ от 22 марта 2022 года № ЦПТ-ТМХ-17/21-482/21 между Обществом с ограниченной ответственностью «Центр Перспективных Технологий TMX» (ООО «Центр Перспективных Технологий TMX») и Федеральным государственным бюджетным образовательным учреждением высшего образования «Омский государственный университет путей сообщения» (ОмГУПС (ОмНИТ)) (далее - Договор) по теме: «Ресурс критических узлов. Аккумуляторные батареи для электровоза и тепловоза» была разработана методика определения остаточного ресурса аккумуляторных батарей (далее – АКБ) электровоза типа ЭС5К и тепловоза типа 2ТЭ25КМ.

1. Разработка ОмГУПС характеризуется основными особенностями (признаками): Разработанные методики определения остаточного ресурса аккумуляторных батарей учитывают основные факторы, влияющие на ресурс АКБ.

Методики позволяют определять остаточный ресурс, в А·ч, процентах, количестве циклов на основании истории работы АКБ, учитывать историю работы АКБ на подвижном составе.

2. Технический эффект от применения разработки заключается в повышении надежности АКБ за счет прогнозирования ремонтов, замен АКБ на основании остаточного ресурса, рассчитываемого.

3. Предложения о дальнейшем использовании и другие замечания:

Предложенная методика проходит процесс апробации в ООО «ЦПТ TMX» с целью проверки модели на адекватность и произведения доработки при необходимости. При успешном прохождении апробации модель будет внедрена

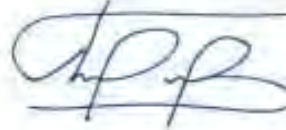
4. В основе предложенных методик использованы отдельные положения ранее разработанной Пезевак В.Л. «Методики определения параметров накопителей электрической энергии, проектируемых для систем тягового электроснабжения», содержащей описание способа определения энергетических показателей системы тягового электроснабжения железной дороги.

Указанная методика определения параметров накопителей электрической энергии, проектируемых для систем тягового электроснабжения, отличающаяся от известных учетом условий формирования электротяговой нагрузки, позволяет определять энергетические параметры и показатели работы устройств накопления электрической энергии при их размещении на тяговых подстанциях, постах секционирования контактной сети и других линейных устройствах систем тягового электроснабжения.

Правообладателем научных исследований и разработок (Методики) по пп. 1–3, которые получены в рамках Договора, в полном объеме является ООО «Центр Перспективных Технологий ТМХ».

Научные исследования и разработки (Методики) созданы под руководством и при личном участии доцента, к.т.н. Незевака В.Л.

Генеральный директор  
ООО «Центр Перспективных Технологий ТМХ»



Д.А. Карасёв

УТВЕРЖДАЮ

Об использовании  
результатов научных  
исследований и разработок  
в производстве



Генеральный директор  
ООО «ЭНЕРГЕТИК»

Окунев В. М.

2022 г.

## АКТ

## внедрения научно-технической продукции

Основание: Разработки Омского государственного университета путей сообщения (ОмГУПС).

Мы, нижеподписавшиеся, доцент кафедры «Электроснабжение железнодорожного транспорта» ОмГУПС Незевак В. Л., с одной стороны, и главный инженер ООО «Энергетик» Лагодина С.С., с другой стороны, составили настоящий акт о том, что ООО «ЭНЕРГЕТИК» в своей производственной деятельности использует отдельные результаты, содержащиеся в следующих технических решениях:

1) способ определения энергетических показателей системы тягового электроснабжения железной дороги, разработанный с участием Незевака В. Л. (сотрудниками ОмГУПС: Незевак В. Л., Черемисин В. Т., Шагокин А. П.);

2) способ определения зарядной характеристики системы накопления электроэнергии в системе тягового электроснабжения, разработанный с участием Незевака В. Л. (сотрудниками ОмГУПС: Незевак В. Л., Сидоров О. А.)


Краткое описание научно-технической продукции:

1) способ определения энергетических показателей системы тягового электроснабжения железной дороги, отличающийся учетом процессов работы в ней системы накопления электроэнергии, позволяющий рассчитать ее энергетические параметры и показатели работы при размещении на тяговых подстанциях и линейных устройствах тягового электроснабжения;

2) способ определения зарядной характеристики устройства накопления электроэнергии в системе тягового электроснабжения, отличающийся тем, что расчет выполняется по условию устойчивой работы устройства с учетом нагрузочной характеристики контактной сети, позволяющий определить условия заряда устройств накопления на тяговых подстанциях и линейных устройствах.

Технико-экономическая эффективность научно-технической продукции: эффект от использования способа определения энергетических показателей и зарядной характеристики систем накопления электроэнергии заключается в повышении эффективности работы систем электроснабжения.

От ОмГУПС:  
к.т.н., доцент

 Незвак В. Л.

От ООО «ЭНЕРГЕТИК»:  
Главный инженер

 Лагодина С.С.