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

На правах рукописи

Голицына Анастасия Евгеньевна

### «НАКОПИТЕЛЬ ЭНЕРГИИ В СИСТЕМЕ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ СОБСТВЕННЫХ НУЖД СОВМЕЩЕННОЙ ТЯГОВОЙ ПОДСТАНЦИИ МЕТРОПОЛИТЕНА»

Специальность 2.4.2. – Электротехнические комплексы и системы

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель доктор технических наук, доцент Шевлюгин Максим Валерьевич

Москва – 2023

### оглавление

BBE	ЦЕНИЕ4	
1 ПРИІ МЕТ	КРИТЕРИИ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТЬ МЕНЕНИЯ НЭ В СИСТЕМЕ СОБСТВЕННЫХ НУЖД СТП РОПОЛИТЕНА	
1.1	Оценка электротехнических ущербов в системе электроснабжения	
собственных нужд СТП метрополитена10		
1.1.1	Неравномерность тяговой нагрузки11	
1.1.2	Провалы напряжения на стороне первичного электроснабжения 13	
1.1.3	Несимметрия напряжения	
1.1.4	Влияние несоответствия качества электрической энергии на работу	
ответ	ственных потребителей собственных нужд СТП 16	
1.2	Экспериментальные исследования качества электроэнергии в сетях	
собственных нужд СТП		
1.2.1	Экспериментальные замеры показателей работы собственных нужд с	
мощностью 630 кВА		
1.2.2	Экспериментальные замеры показателей работы собственных нужд с	
мощностью 1250 кВА		
1.3	Анализ устройств НЭ для электроэнергетических систем метрополитена	
1.3.1	Накопители энергии на тяговых подстанциях метрополитена	
1.3.2	Накопители энергии для систем электроснабжения транспорта общего и	
пром	ышленного назначения	
2	СХЕМА И КОНСТРУКЦИЯ ЗВЕНА ПОСТОЯННОГО ТОКА С НЭ 39	
2.1	Аккумулирующий элемент41	
2.2	Преобразовательные агрегаты	
3 MET	МОДЕЛЬ СТП С НЭ В СИСТЕМЕ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ РОПОЛИТЕНА	
3.1	Модель СТЭ линии Московского метрополитена 44	
3.2	Модель СТП метрополитена с системой электроснабжения собственных	
нужд		

3.2.1 Описание схемы исследуемой СТП		
3.2.2 Выбор метода расчёта моделируемой электрической сет	и56	
3.2.3 Разработка имитационной модели СТП метрополитена		
3.2.4 Разработка имитационной модели СТП со звеном постоя	нного тока и НЭ	
в СЭСН		
4 ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ ( СИСТЕМЕ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ СОБСТВЕННЫХ НУЖД	СТП С НЭ В Ц94	
4.1 Результаты моделирования штатной работы СТП метроп	юлитена 94	
4.2 Результаты моделирования работы СТП метрополитена	по новой схеме	
СЭСН со ЗПТ		
4.2.1 Оценка показателей качества энергии при питании собс	гвенных нужд с	
учетом влияния тяговой нагрузки по новой схеме СЭСН со ЗП	T98	
4.2.2 Оценка показателей качества энергии при питании собст	гвенных нужд в	
аварийном режиме		
4.3 Сравнительная оценка результатов моделирования		
5 ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ИСПОЛЬЗО НЭ В СИСТЕМЕ СОБСТВЕННЫХ НУЖД СТП МЕТРОПОЛИ	ВАНИЯ ЗПТ С ИТЕНА 109	
5.1 Оценка стоимости капитальных затрат на модерниз	ацию системы	
электроснабжения собственных нужд (СЭСН) СТП 109		
5.2 Оценка дополнительных затрат от использования ЗПТ		
5.3 Оценка технико-экономического эффекта от повыц	иения качества	
электрической энергии в СЭСН		
ЗАКЛЮЧЕНИЕ		
СПИСОК УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ	117	
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ		

### введение

#### Актуальность темы исследования.

Московский метрополитен – самый значимый, системообразующий объект транспортной инфраструктуры огромного города, который за сутки перевозит свыше 9 млн. пассажиров. В подавляющей своей части Московский метрополитен находится под землей, что делает его особым стратегическим объектом и определяет дополнительные требования по безопасности и надёжности функционирования всех подсистем и объектов, особенно системы электроснабжения, объекты которой являются потребителями электроэнергии высшей первой категории.

Рост протяженности линий метро (за последние восемь лет прирост составляет около 136,6 км), увеличение пассажиропотока, увеличение протяженности электроэнергетических сетей метрополитена определяет необходимость повышать уровень надёжности и энергоэффективности функционирования систем электроснабжения.

Помимо системы тягового электроснабжения и второстепенных, с точки зрения безопасности, потребителей электроэнергии (системы освещения служебных помещений, вестибюлей станции, тоннелей, И пр.), В системе электроэнергетической метрополитенов более имеются ответственные потребители электроэнергии, которые обеспечивают питание эскалаторов, вентиляции, дренажных насосов для откачки грунтовых вод, светофоров, автоблокировки, маршрутно-линейной централизации и пр., т.е. выполняют жизненно необходимые функции для движения поездов, безопасности пассажиров и обслуживающего персонала, а, следовательно, системы электроснабжения таких потребителей постоянно нуждаются в совершенствовании.

Одним из современных и хорошо зарекомендовавших себя способов повышения качества электроэнергии, надёжности и бесперебойности энергоснабжения является введение на различных уровнях

электроэнергетических систем звеньев постоянного тока (ЗПТ) с локальной буферизацией энергии. Поэтому внедрение технологий по повышению надёжности и энергоэффективности электроснабжения ответственных потребителей собственных нужд метрополитена с помощью ЗПТ и накопителей энергии (НЭ) является крайне актуальной и жизненно важной задачей.

#### Степень разработанности темы исследования

Проблемам надежности электроснабжения метрополитена, в том числе и устройств собственных нужд, всегда уделялось особое внимание, так как это напрямую связано с безопасностью людей. Однако, как показывают обследования действующих СТП, в следствии развития электрифицированной инфраструктуры транспорта, повышения электропотребления и усложнения режимов работы электротехнических систем, усиливается негативное влияние на качество электроснабжения ответственных потребителей метрополитена. В то же время, за счет научного прогресса, в том числе в области силовых полупроводников и накопителей энергии (НЭ), появляются новые, более эффективные компоненты и технические решения, способные вывести надежность электроэнергетической системы метрополитена на новый уровень.

Данными направлениями занимались многие отраслевые научные школы страны: ВНИИЖТ, МИИТ, ПГУПС, РГУПС, СамГУПС, ОИВТ РАН, и др. Результаты исследований в данной области изложены в трудах: М.П. Бадера, Л.А. Баранова, А.Т. Буркова, А.Л. Быкадорова, В.А. Гречишникова, К.К. Деньщикова, Ю.И. Жаркова, В.П. Закарюкина, Ю.М. Инькова, А.Б. Косарева, Б.И. Косарева, А.В. Котельникова, В.А. Кучумова, В.В. Литовченко, А.Н. Марикина, В.Н. Пупынина, Г.Г. Рябцева, А.Н. Савоськина, В.П. Феоктистова и других ученых.

Цель и задачи исследования. Целью диссертационной работы является исследование эффективности использования НЭ в системе электроснабжения собственных нужд СТП, разработка устройства НЭ и подходов для его практической реализации и применения на действующих СТП.

Для достижения поставленной цели в работе решены следующие задачи:

- на основе показателей качества электроснабжения потребителей собственных нужд метрополитена сформированы основополагающие критерии, которые позволят оценить эффективность использования НЭ в составе звена постоянного тока (ЗПТ) для питания различных ответственных потребителей метрополитена;

- разработана обобщённая имитационная модель систем электроснабжения собственных нужд СТП в СТЭ метрополитена;

- разработана структурная схема ЗПТ с НЭ для использования на СТП метрополитена;

- произведена технико-электротехническая оценка эффекта от применения ЗПТ с НЭ на СТП метрополитена при питании ответственных потребителей в современных условиях эксплуатации и режимах работы энергосистем различных уровней.

Объектом исследования является совмещенная тяговая подстанция метрополитена, в которую входят блоки тягового электроснабжения в виде тяговых агрегатов уровня напряжения 825В постоянного тока, блоки электроснабжения собственных нужд 220-380В переменного тока промышленной частоты с промежуточным звеном постоянного тока (ПЗПТ) и НЭ.

Предмет исследования: методы, модели и критерии оценки показателей работы системы электроснабжения собственных нужд СТП со ЗПТ и НЭ, с учетом влияния тяговой нагрузки 825В и влияний системы первичного электроснабжения (СПЭ) 10(20)кВ.

Научная новизна результатов, полученных в диссертационном исследовании:

1. Разработаны теоретические положения по обеспечению более высокого качества электроэнергии для питания ответственных потребителей метрополитенов, отличающиеся от существующих теоретических решений использованием моделей ЗПТ с НЭ, учётом влияния СТЭ и смежных потребителей.

2. Созданы имитационные модели, позволяющие оценить эффективность использования НЭ в звене постоянного тока электроснабжения собственных нужд СТП.

3. Разработаны методики оценки эффективности использования предложенных ЗПТ с НЭ на СТП.

4. Качественно и количественно показано, что использование НЭ в составе звена постоянного тока СТП повышает качество электроэнергии по уровню напряжения, несимметрии, а также повышает общую надежность системы электроснабжения собственных нужд метрополитена.

5. Впервые предложен комплексный подход к оценке качества электроснабжения собственных нужд СТП, реализованный в единой цифровой среде и учитывающий максимальный спектр влияющих факторов, а именно: влияние ЭПС в тяговой сети (TC) через тяговые агрегаты 825В СТП, влияние системы первичного электроснабжения 10(20) кВ, а также влияние других потребителей собственных нужд.

Теоретическая и практическая значимость работы. Предложены критерии, определяющие качество электроснабжения собственных нужд метрополитена. Разработаны технические решения для повышения качества электроснабжения, энергоэффективности и надежности ответственных потребителей собственных нужд СТП метрополитена.

На базе проведенных исследований разработана комплексная имитационная модель, включающая в себя все уровни потребителей и питающих центров электроэнергетической системы метрополитена, вплоть до конечного потребителя собственных нужд СТП уровня напряжения 220 (380)В.

Предложены методы оценки технико-экономического эффекта от внедрения НЭ в составе ЗПТ на СТП с учетом уже существующего оборудования.

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

7

- методы поиска аномалий при анализе генеральной совокупности результатов измерений параметров эксплуатации основного оборудования электроснабжения собственных нужд СТП;

- методы математического анализа и математической статистики;

- методы построения математических моделей и построения алгоритмов;

- метод Hardware In the Loop (HIL, железо в цикле) для повышения точности моделей схемотехнических решений на основе уменьшения Евклидовой нормы между теоретическими и экспериментальными данными.

#### Положения, выносимые на защиту:

- Основные критерии, позволяющие оценить эффективность использования НЭ в составе звена постоянного тока СТП для питания собственных нужд метрополитена.

- Принципиальная схема ЗПТ с НЭ для использования в СТП метрополитена с целью повышения качества электроснабжения.

- Комплексная имитационная модель работы СТП в СТЭ метрополитена, позволяющая воспроизводить все процессы энергообмена между исследуемыми объектами СТЭ, электротехническими устройствами СТП различного уровня напряжения, с учетом возможных возмущений со стороны системы первичного электроснабжения.

- Основные показатели качества электроснабжения ответственных потребителей метрополитена, которые были определены на основании результатов экспериментальных замеров и имитационного моделирования.

- Электротехнический эффект от внедрения НЭ в составе ЗПТ и оценка технико-экономических показателей.

Степень достоверности результатов проведенных исследований. Достоверность результатов исследований подтверждается на основе полученных корреляционного анализа данных, при имитационном моделировании работы устройств электроснабжения собственных нужд СТП, данными экспериментальных замеров на нескольких действующих с

8

подстанциях Московского метрополитена, а также равенством первого и второго моментов функций распределения вероятностей, построенных по экспериментальным и измеренным данным. Результаты теоретических исследований подтверждаются результатами обработки экспериментальных системных измерений электротехнических показателей работы оборудования системы тягового электроснабжения и систем питания ответственных потребителей собственных нужд на нескольких действующих СТП Московского метрополитена.

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

- на XVI, XVII, XVIII и XIX - Научно-практических конференциях «Безопасность движения поездов», М., МИИТ, 2015, 2016, 2017, 2018 г.;

- на I, II, III и IV Международной выставках-конференциях «ИНТЕРМЕТРО», «Перспективы развития метрополитенов в условиях интенсивного внедрения новых технологий: инфраструктура и подвижной состав». МИИТ, 2015, 2017, 2019, 2021 г.;

- на 10 Международном симпозиуме ElTrans, «Электрификация и развитие ж.д. транспорта России. Традиции, современность, перспективы», С-Петербург, 2019г;

- на V Всероссийской научно-технической конференции с международным участием, «Приборы и методы измерений, контроля качества и диагностики в промышленности и на транспорте», Омск, 2022 г.

### 1 КРИТЕРИИ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ НЭ В СИСТЕМЕ СОБСТВЕННЫХ НУЖД СТП МЕТРОПОЛИТЕНА

# 1.1 Оценка электротехнических ущербов в системе электроснабжения собственных нужд СТП метрополитена

Система тягового электроснабжения (СТП) электрифицированного транспорта различных родов тока, с одной стороны является потребителем первой категории и нуждается в высоком качестве электроэнергии, а с другой стороны сама же является источником возмущений, которые снижают показатели качества энергии для сторонних нетяговых потребителей [47, 48]. Для повышения качества энергии в зоне влияния СТЭ разрабатывается масса технических и технологических решений [49, 50, 52, 54, 72, 74, 79, 93, 100, 113, 149, 152-157, 159, 170-172, 178, 182, 184, 186, 190, 195, 197, 209, 212], однако, далеко не всегда эти решения позволяют улучшить условия электроснабжения для собственных нужд тяговых подстанций [194]. Тяговая подстанция, в составе системы тягового электроснабжения, является объектом для электроснабжения электрифицированных [17]. железных дорог метрополитенов и наземного городского транспорта. Совмещенная тяговая подстанция (CTII) наиболее распространенный вид подстанций метрополитена и именно СТП является основным типом подстанций при сооружении новых линий метрополитена в РФ. На рисунке 1.1 представлена принципиальная однолинейная схема, действующих на данный момент СТП. Особенностью СТП, как и тяговых подстанций рельсового транспорта высокой пропускной способности [22, 24] является то, что с одной стороны, от шин 10 кВ питается мощная (до 12-15000 кВА) резко переменная тяговая нагрузка, в виде трансформаторов и КВ-агрегатов, с другой стороны от тех же шин 10 кВ питаются потребители собственных нужд уже сравнительно невысокой (порядка 1500 кВА), достаточно постоянной мощности вторичным напряжением 380 и 220/127 В, в виде: трансформатора освещения (ТО – освещение станции, тоннеля, служебных помещений, вестибюлей и пр.);

моторного трансформатора (ТМ – моторные приводы [27, 56, 64, 66, 112] эскалаторов, вентиляционных шахт, дренажных систем); трансформатора СЦБ (Тсцб – светофоры, автоблокировка, маршрутно-линейная централизация и пр.). ТМ и Тсцб обеспечивают жизненно необходимые функции для движения поездов, безопасности людей, а следовательно, нуждаются в 100% резервировании и особой защите от перепадов и провалов напряжения на стороне шин 10кВ СТП и повышения качества электроэнергии в общем. Следует так же отметить, что источником снижения качества энергии по уровню напряжения и по несимметрии могут выступать, как система первичного электроснабжения 10(20)кВ, так и собственные потребители СТП тягового характера и собственных нужд [10, 11, 26, 151].



Рисунок 1.1 – Упрощенная схема действующей совмещенной тяговопонизительной подстанции

#### 1.1.1 Неравномерность тяговой нагрузки

Наиболее полно оценить процессы в электроэнергетических сетях и в системе электроснабжения метрополитена, в частности, позволили длительные экспериментальные замеры показателей работы тяговых

подстанций [9, 13, 14, 88, 114, 163, 177, 193]. На рисунке 1.2 представлены осциллограммы токов фидеров, тока СТП и напряжения на шинах 825В подстанции Мосметро в течение 15 минут. Из осциллограммы хорошо видно, что тяговый ток подстанции крайне неравномерен – его значение может меняться от 0 до свыше 14000А за единицы секунд, при этом напряжение на шинах подстанции так же резко может проседать на 12-17% от номинального значения, а максимальный диапазон колебания напряжения на шинах 825В составляет в пределах 20%. Подобная неравномерная нагрузка тяговой сети негативно влияет и на тяговые трансформаторы [4], и, через общие шины 10 кВ, так же негативно влияет на электроснабжение, жизненно необходимые потребители собственных ΤM И Тсцб. Более нужд подробно 0 неравномерности и падении напряжения на стороне переменного тока будет описано в п. 1.2.

Стабилизировать напряжение на шинах собственных нужд от влияния тяговой нагрузки можно осуществить с помощью накопителя энергии, параллельно подключенного к цепи питания в звене постоянного тока (п.2, рисунок 2.1). В этом случаи НЭ работает в буферном режиме и постоянно, малыми токами, по звену постоянного тока, подпитывает нагрузку собственных нужд СТП, параллельно с основным источником от шин 10(20) кВ. Оценку потребления энергии от НЭ для компенсации колебания напряжения, в течение суток ( $A_{Просадки}^{Сутки}$ ), можно оценить по следующей формуле:

$$A_{\Pi pocad\kappa u}^{Cym\kappa u} = \sum_{n=1}^{m} A_n = \sum_{n=1}^{m} \int_{T_n}^{T_n + \Delta T_n} I_{CH}(t) \Delta U_{CH}(t) dt$$
(1.1)

где  $A_n$  – энергия НЭ при компенсации одной просадки напряжения;  $I_{CH}$  – значение мгновенного тока потребления собственных нужд;  $\Delta U_{CH}$  – значение падения мгновенного напряжения на шинах питания собственных нужд;

12

*Tn* – время n-ной просадки напряжения;

 $\Delta Tn$  – продолжительность n-ной просадки напряжения (5-20 с.).



Рисунок 1.2 – Фрагмент осциллограмм токов и напряжения на шинах 825В СТП Московского метрополитена

#### 1.1.2 Провалы напряжения на стороне первичного электроснабжения

Помимо нестабильности уровня напряжения на шинах 10кВ в сетях метрополитена случаются также провалы напряжения, виновниками которых могут выступать аварийные режимы [33, 35, 38, 46, 55, 58, 68, 71, 73, 104, 110, 116, 119, 125, 211], как в системе тягового электроснабжения (СПП), так и системе первичного электроснабжения (СПЭ) 10кВ. В этом случае происходит сначала мгновенный спад тока потребителей, а потом такой же мгновенный его скачек. На рисунке 1.3 показан фрагмент осциллограммы, на котором

виден провал напряжения (замеры проводились на T-14 Арбатско-Покровской линии Московского метрополитена). Длительность провала составляет около 1,5 секунды. Провал произошел в момент незначительной нагрузки (ток фидера составлял 1850А, а ток ТП – 2700А). Однако, данный провал напряжения повлек за собой резкий спад тока фидера более, чем в 2 раза и тока ТП более, чем в 10 раз. Очевидно, что причиной данного провала в тяговой сети является просадка или даже кратковременная пропажа напряжения в системе первичного электроснабжения города. Подобный спад и скачек тока ощутили на себе и все системы собственных нужд подстанции и тоннельных потребителей, что, безусловно, сказалось на них негативным образом.

Компенсацию провалов напряжения также можно осуществить с помощью внутренней буферизации энергии. Следует отметить, что подобные случаи вмешательства НЭ в процесс электроснабжения носят единичный характер. При этом оценку единичного потребления энергии НЭ для компенсации провала (*А<sup>провала</sup>*) можно оценить следующим образом:

$$A^{npobana} = \int_0^t {}^{npobana} P_{CH}(t)dt = \int_0^t {}^{npobana} I_{CH}(t)U_{CH}(t)dt, \qquad (1.2)$$

где *P*<sub>CH</sub> – значение мгновенной мощности потребления собственных нужд;

 $I_{CH}$  – значение мгновенного тока потребления собственных нужд;

*U*<sub>CH</sub> – значение мгновенного напряжения на шинах питания;

собственных нужд;

*t*<sub>провала</sub> – время провала напряжения (0-5с.).

Учитывая опыт экспериментальных замеров в тяговой сети, можно заключить, что для полной компенсации подобного провала напряжения на стороне собственных нужд, с максимальной мощностью в 1200 кВА, от НЭ понадобится энергия величиной порядка 3,6 МДж.



Рисунок 1.3 – Минутный интервал осциллограмм токов и напряжения с иллюстрацией аномального провала напряжения (Т-14 АПЛ Московского метрополитена)

#### 1.1.3 Несимметрия напряжения

Принимая во внимание, что большинство ответственных потребителей собственных нужд являются моторными приводами 3-х фазной системы несимментрия напряжения в данном случае может быть причиной быстрого выхода из строя важных объектов инфраструктуры [5, 6]. Так при значительной несимметрии КПД двигателя резко снижается, одни обмотки двигателя становятся недогружены, другие же перегружены, что может привести к перегреву и последующему сгоранию обмоток двигателей.

Сама же несимметрия может появиться на шинах 0,4 кВ со стороны системы первичного электроснабжения, а также за счет собственной, достаточно мощной однофазной нагрузки. На рисунке 1.4 представлен фрагмент осциллограммы 3-х фазного напряжения на шинах 0,4 кВ одной из СТП Московского метрополитена. Здесь отчетливо видна разница фазных

15

напряжений – Ua, UB и Uc. Так разница между Ua и Uc составляет порядка 16%, что не соответствует допустимым нормам. Более подробно о несимметрии напряжения будет описано в п. 1.2.



Рисунок 1.4 – Фазные напряжения на шинах собственных нужд СТП при экспериментальных замерах

# 1.1.4 Влияние несоответствия качества электрической энергии на работу ответственных потребителей собственных нужд СТП

В Московском метрополитене 75% электроэнергии идет на тягу поездов и обеспечение перевозочного процесса и, соответственно, 25% – на системы организации движения, безопасности и поддержания необходимых условий для пассажиров в подземной части метрополитена, последние включают в себя:

- освещение станций, тоннеля, служебных помещений, вестибюлей и прочие осветительные приборы;

моторные приводы эскалаторов, вентиляционных шахт, дренажных систем;

- светофоры, автоблокировка, маршрутно-линейная централизация и прочие системы обеспечения движения поездов.

Данные системы собственных нужд нетягового характера запитываются от шин 10кВ СТП и подвержены негативному влиянию как со стороны системы первичного электроснабжения (10кВ), так и со стороны системы тягового электроснабжения постоянного тока (825В), а именно:

- перепады и провалы напряжения на стороне шин 10кВ системы первичного электроснабжения;

- несимметрия напряжения в трехфазной питающей сети;

- крайне неравномерная тяговая нагрузка, питающаяся от общих шин 10кВ СТП (значение тяговых токов может меняться от 0 до свыше 14000А за единицы секунд, при этом максимальный диапазон колебания напряжения на шинах 825В составляет в пределах 20% от номинального значения).

Описанные выше негативные влияния приводит к рискам для потребителей собственных нужд СТП, в частности, потребителей моторных приводов [7, 8] и систем СЦБ, что в конечном итоге может привести к травмам людей на эскалаторах, затоплению тоннелей, выходу из строя вентиляции, оборудования для управления движением поездами, сигнализации, связи и прочих жизненно необходимых систем.

Особенно чувствительны к качеству электрической энергии моторные привода. При рассмотрении факторов, которые негативно влияют на работу двигателей, можно выделить следующие:

1. Несимметрия напряжений в трехфазных сетях является причиной сверхтоков в одной или нескольких фазах, которые вызывают перегрев, повреждение изоляции и выход из строя двигателя [18, 57, 76, 78, 80, 82, 90]. Данный параметр является наиболее чувствительным и приводит к наибольшим рискам [95, 96, 97, 98, 106, 107, 111, 117, 179].

Так зависимость температуры сердечника статора электродвигателя от коэффициента несимметрии напряжения по обратной последовательности (*т*) можно представить по следующей формуле [102]:

$$\tau = \tau_{o\kappa p} + \frac{Q}{A} \left( 1 - exp^{\frac{t}{\Theta}} \right) (1 + b \cdot K_{2U}) \quad [^{\circ}C], \tag{1.3}$$

где  $\tau$  – температура сердечника, [°C];

 $\tau_{\text{окр}}$  – температура окружающей среды, [°C];

t – время нагрева, [°C];

*Q* – мощность тепловыделения в машине, [Вт];

А – мощность теплоотдачи с поверхности корпуса машины, [Вт];

*O* – отношение теплоемкости электродвигателя к мощности теплоотдачи
c его поверхности, [c];

$$\Theta = \frac{c}{A} [c], \qquad (1.4)$$

где *С* – количество теплоты, необходимое для повышения температуры электродвигателя на 1 °C, [Дж];

*b* – коэффициент, зависящий от конструктивных параметров двигателя.

Для асинхронного электродвигателя АИР80А6 значение коэффициента b составляет 0,345;

*К*<sub>2*U*</sub> – коэффициент несимметрии напряжения по обратной последовательности.

Значение температуры дополнительного перегрева от тока обратной последовательности (Δθ<sub>2</sub>) [121] можно оценить по следующей формуле:

$$\Delta \vartheta_2 = C_{2\nu} K_{2u}^2; \tag{1.5}$$

где  $C_{2\nu}$  – коэффициент передачи, который зависит от класса изоляции (например, для асинхронного двигателя 4A3M-3150/10000 с классом изоляции F,  $C_{2\nu} = 0.833$ , °C/%<sup>2</sup>;

*K*<sub>2*u*</sub>- коэффициент несимметрии напряжения по обратной последовательности.

В результате влияния токов обратной последовательности, из-за несимметрии, и повышения температуры, снижается общий срок службы двигателя, а кратность снижения срока службы ( $\gamma_{z2}$ ) можно определить по следующей формуле:

$$\gamma_{z2} = e^{b\Delta\vartheta_2},\tag{1.6}$$

где b – параметр изоляции, характеризующий тепловые свойства (для асинхронного двигателя с классом изоляции F значение  $b = 0,408^{\circ}C^{-1}$ ).

По предварительным данным [121], при условии постоянного коэффициента несимметрии по обратной последовательности  $K_{2u} = 2\%$  срок службы снизится на 14,56 %, а при коэффициенте 4 % срок службы снизится на 72,3%.

Однако, в реальных условиях несимметрия является величиной переменной и считать температуру двигателя повышенной в течение всего срока эксплуатации будет некорректно. В условиях неравномерной несимметрии во времени фактический срок службы двигателя ( $T^{Cлуж}_{\phi akt}$ ) можно оценить по следующему выражению:

$$T_{\Phi_{aKT}}^{C,nyk} = \sum_{i=1}^{n} \left( \Delta T_i * \frac{1}{\gamma_{Z2}} \right) = \sum_{i=1}^{n} \left( \Delta T_i * \frac{1}{e^{bC_{2v} \left( \frac{U_2(t) \cdot 100}{U_1(t)} \right)^2}} \right)$$
(1.7)

где Δ*Ti* – шаг временной дискретизации (в идеале приближен к мгновенным значениям);

 $U_1(t)$  и  $U_2(t)$  – мгновенные значения напряжений прямой и обратной последовательности (могут быть использованы данные экспериментальных замеров или результаты имитационного моделирования);

n – количество интервалов времени работы двигателя с определенным коэффициентом несимметрии  $K_{2u}$  ( $n = T_{Hom}^{C_{ЛУЖ}}/\Delta T$ ).

Помимо перегрева двигателя, несимметрия приводит к возникновению токов обратной последовательности в обмотках статора, которые, в свою очередь, негативно влияют на общее магнитное поле внутри двигателя [87, 121]. Таким образом, на ротор двигателя действует результирующий электромагнитный вращающий момент (*M*):

$$M = M_{np} + M_{o\delta p}. \tag{1.8}$$

В свою очередь момент прямой (*M<sub>np</sub>* последовательности определяется следующей формулой:

$$M_{np} = \frac{2M_{\kappa np}}{\left(\frac{S}{S_K} + \frac{S_K}{S}\right)},\tag{1.9}$$

где  $M_{\kappa np}$  – критический момент прямой последовательности, Н·м;

S – скольжение, о.е;

 $S_K$  – критическое скольжение, о.е.

Критический момент прямой последовательности (*M<sub>кпp</sub>*) может быть определен в соответствии с выражением:

$$M_{\kappa np} = M_K \left(\frac{U_{np}}{U_H}\right)^2,\tag{1.10}$$

где  $M_K$  – момент критический, Н·м;

*U<sub>np</sub>* – фазное напряжение прямой последовательности, В;

 $U_H$  – номинальное фазное напряжение.

Момент обратной последовательности (*M*<sub>обр</sub>) может быть определен по выражению:

$$M_{o\delta p} = \frac{2M_{\kappa o\delta p}}{\left(\frac{2-S}{S_{K}} + \frac{S_{K}}{2-S}\right)},$$
(1.11)

где  $M_{\kappa o \delta p}$  – момент критический обратной последовательности, Н·м;

$$M_{\kappa o \delta p} = M_K \left(\frac{U_{o \delta p}}{U_H}\right)^2, \tag{1.12}$$

где  $U_{o \delta p}$  – фазное напряжение обратной последовательности, В.

Учитывая все выше сказанное, можно сделать вывод, что токи обратной последовательности, вызванные несимметрией, приводят к существенному снижению нормативных характеристик двигателя и рискам преждевременного выхода из строя [94, 166, 167, 175, 180, 181, 187-189, 191, 207, 208, 213]. А именно:

- снижение рабочего момента двигателя;

- повышение электрических и механических потерь и дополнительный нагрев двигателя;

- снижение КПД;

- затруднение процесса пуска двигателя;

- появление радиальной вибрации, которая, в свою очередь, приводит к физическому разрушению механических узлов двигателя и, особенно, подшипников [118].

2. Перенапряжения, которые могут возникать при переходных процессах и коммутационной деятельности с произвольной амплитудой и частотой могут разрушать или повреждать изоляцию обмоток электродвигателей.

3. Гармонические искажения в виде дополнительных высокочастотных колебаний напряжения или тока [123, 135], поступающие на обмотки электродвигателя, не обеспечивают полезной энергией для вращения вала электродвигателя, а циркулирует в обмотках и, в конечном итоге, приводит к потере внутренней энергии. Эти потери рассеиваются в виде тепла и снижают эффективность электродвигателя, что приводит к дополнительным расходам и увеличению рабочей температуры.

4. Резкие перепады напряжения в сети 10кВ (речь идет о систематических перепадах за счет крайне неравномерной тяговой нагрузки СТП), а именно, уменьшение напряжения ниже 95% от номинального и рост напряжения выше 110% от номинального ведет к росту тока в обмотках двигателя, что увеличивает его нагрев [102]. Помимо нагрева перепады напряжения приводят к динамической нестабильности работы механической двигателей, которые части co временем приводят К следующим неисправностям:

- нарушение центрирования;

- дисбаланс вала;

- расшатанность вала;

- износ подшипников.

Все это способствует ускоренному износу вращающихся компонентов, вызывающему механические преждевременные неисправности и выход из строя всей системы.

Описанные выше отклонения показателей качества электроэнергии от номинальных значений, приводят к рискам для потребителей собственных нужд СТП, в частности, потребителей ТМ и Тсцб, что в конечном итоге может привести к травмам людей на эскалаторах, затоплению тоннелей, выходу из строя вентиляции, систем управления движением поездами, сигнализации, связи и прочих жизненно необходимых систем [59].

Существуют технические решения, позволяющие частично избежать описанных выше проблем [83, 84, 85, 86], однако, значительно повысить надежность электроснабжения и энергоэффективность ответственных потребителей собственных нужд СТП в комплексе можно с помощью накопителей энергии (НЭ) в составе звена постоянного тока. Под НЭ в данном случае понимается аккумулирующий элемент в виде аккумуляторной батареи (АБ) или батареи суперконденсаторов (ионисторов) [29, 31, 41, 44, 62, 69, 70, 92, 103], подключенные с одной стороны через выпрямитель к шинам питающего напряжения, а с другой, через инвертор, – к шинам ответственных потребителей собственных нужд СТП [31, 32, 124, 137, 138, 145, 183, 204].

# 1.2 Экспериментальные исследования качества электроэнергии в сетях собственных нужд СТП

Для оценки реальных показателей качества электроэнергии в сетях 0,4 кВ были проведены массовые замеры на СТП с различными установленными мощностями собственных нужд подстанций. Измерения проводились на СТП с мощностью моторного трансформатора ТМ – 630 кВА и 1250 кВА.

# 1.2.1 Экспериментальные замеры показателей работы собственных нужд с мощностью 630 кВА

Замеры проводились на шинах 0,4 кВ собственных нужд СТП (рисунок 1.5). Замерялись фазные и линейные напряжения, а также токи в подводящих кабелях от «моторного» трансформатора ТСЗ-630/10 к шинам 0,4 кВ. Экспериментальные замеры проводились в течение 24 часов с частотой временной дискретизации в 1 секунду [136, 203].

На рисунке 1.6 представлены результаты экспериментальных замеров в течение суток. На рисунке представлены осциллограммы фазных напряжений Ua, Ub и Uc (в верхней части графика), а также токов Ia, Ib и Ic (в нижней части графика). Были также замерены и линейные напряжения Uab, Ubc и Uca. Следует отметить, что замер токов производился только с одной жилы из четырех подводящего кабеля (рисунок 1.5, а). В связи с этим показатели замеров тока необходимо умножать на коэффициент 4.





Рисунок 1.5 – Замеры на шинах собственных нужд 0,4 кВ; подключение к токоведущим частям (*a*); измерительный прибор (б)



Рисунок 1.6 – Результаты замеров на шинах собственных нужд 0,4 кВ

Потребление электроэнергии устройствами собственных нужд, как видно из осциллограмм, носит периодический крайне неравномерный характер, а так же, по фазным напряжениям, видны явные признаки несимметрии. Расчет коэффициента несимметрии по экспериментальным данным показал следующее:

Определение симметричных составляющих

$$\dot{U}_{1} = \frac{1}{3} \left( \dot{U}_{A} + a \dot{U}_{B} + a^{2} \dot{U}_{C} \right)$$
(1.13)

$$\dot{U}_{2} = \frac{1}{3} \left( \dot{U}_{A} + a^{2} \dot{U}_{B} + a \dot{U}_{C} \right)$$
(1.14)

$$\dot{U}_{0} = \frac{1}{3} \left( \dot{U}_{A} + \dot{U}_{B} + \dot{U}_{C} \right)$$
(1.15)

$$\dot{U}_{2} = \frac{1}{3} \left( U_{A} \cos \varphi_{A} + U_{B} \cos \left( \varphi_{B} + \frac{2\pi}{3} \right) + U_{C} \cos \left( \varphi_{C} - \frac{2\pi}{3} \right) \right) + i \frac{1}{3} \left( U_{A} \sin \varphi_{A} + U_{B} \sin \left( \varphi_{B} + \frac{2\pi}{3} \right) + U_{C} \sin \left( \varphi_{C} - \frac{2\pi}{3} \right) \right)$$
(1.16)

$$\dot{U}_{2} = \frac{1}{3} \left( U_{A} \cos \varphi_{A} + U_{B} \cos \left( \varphi_{B} - \frac{2\pi}{3} \right) + U_{C} \cos \left( \varphi_{C} + \frac{2\pi}{3} \right) \right) + \frac{1}{3} \left( U_{A} \sin \varphi_{A} + U_{B} \sin \left( \varphi_{B} - \frac{2\pi}{3} \right) + U_{C} \sin \left( \varphi_{C} + \frac{2\pi}{3} \right) \right)$$
(1.17)

$$\dot{U}_{0} = \frac{1}{3} (U_{A} \cos \varphi_{A} + U_{B} \cos \varphi_{B} + U_{C} \cos \varphi_{C}) + \frac{1}{3} (U_{A} \sin \varphi_{A} + U_{B} \sin \varphi_{B} + U_{C} \sin \varphi_{C})$$
(1.18)

Определяем  $\varphi_A$ ,  $\varphi_B$ ,  $\varphi_C$  через треугольник напряжений (рисунок 1.7.). При этом принимаем, что  $\varphi_A = 0$ ,  $\varphi_B = -\alpha_1$ ,  $\varphi_C = \alpha_2$ .



Рисунок 1.7 – Треугольник напряжений для определения несимметрии

Тогда:

$$\alpha_1 = \arccos\left(\frac{-U_{12}^2 + U_1^2 + U_2^2}{2U_2 U_3}\right)$$
(1.19)

$$\alpha_2 = \arccos\left(\frac{-U_{31}^2 + U_1^2 + U_3^2}{2U_1 U_3}\right)$$
(1.20)

$$\alpha_2 = \arccos\left(\frac{-U_{23}^2 + U_2^2 + U_3^2}{2U_2U_3}\right) \tag{1.21}$$

Результаты расчета (рисунок 1.8а,б) показали, что максимальный коэффициент несимметрии по обратной последовательности в пике превышает 11%, что значительно превышает норму в 4%, а течение продолжительного времени превышает уровень в 2%, что так же не

соответствует норме. При этом коэффициент несиметрии по нулевой последовательности составляет свыше 23% в пике и свыше 5% практически постоянно соответственно.



#### по экспериментальным данным

функции времени

функции времени

## 1.2.2 Экспериментальные замеры показателей работы собственных нужд с мощностью 1250 кВА

При аналогичных замерах показателей качества электроэнергии на шинах 0,4 кВ собственных нужд СТП была выбрана подстанция с более мощными нетяговыми потребителями (рисунок 1.9). Замерялись так же фазные и линейные напряжения и токи в подводящих линиях от «моторного» трансформатора TC3-1250/10 к шинам 0,4 кВ. Экспериментальные замеры проводились в течение суток, также с частотой временной дискретизации в 1 секунду, но уже независимо двумя измерительными приборами одновременно.

На рисунках 1.10-1.13 представлены аналогичные предыдущим результаты экспериментальных замеров в течение суток. Следует отметить, что замер токов также производился только с одной жилы из пяти подводящего кабеля (рисунок 1.5, *a*). В связи с этим показатели замеров тока необходимо умножать на коэффициент 5.



Рисунок 1.9 – Замеры на шинах собственных нужд 0,4 кВ; подключение к токоведущим частям(*a*); измерительные приборы (б)



Рисунок 1.10 – Результаты замеров на шинах собственных нужд 0,4 кВ (фазные напряжения и токи)

27



Рисунок 1.11 – Результаты замеров на шинах собственных нужд 0,4 кВ (частота)



Рисунок 1.12 – Результаты замеров на шинах собственных нужд 0,4 кВ (искажение общего гармонического состава по фазным напряжениям)



Рисунок 1.13 – Результаты замеров на шинах собственных нужд 0,4 кВ (искажение общего гармонического состава по току)

Обработка данных экспериментальных замеров показала, что, как и в предыдущем случае, показатели качества электроэнергии не соответствует нормативным показателям: максимальный коэффициент несимметрии по обратной последовательности превышает 13% в пике, и 2,2% за длительный срок, что так же выше нормы. Искажение общего гармонического состава по напряжению и току составляют свыше 9,75% и 18% соответственно, что также значительно превышает нормированные показатели.

### 1.3 Анализ устройств НЭ для электроэнергетических систем метрополитена

Накопители энергии, в различном качестве [122, 131, 133, 201], управляемого [34, 176] и неуправляемого [36] типов, либо уже используются, либо находятся в активной разработке для нужд электроподвижного состава [115, 126, 199], в тяговой сети [91, 139, 140, 192] и на тяговых подстанциях [164, 169, 205] метрополитена и наземного городского транспорта [60, 61]. Подобные системы можно разделить на три функциональные категории – буферизация энергии в системе тягового электроснабжения постоянного тока, в системах собственных нужд (не тягового характера) оперативного постоянного тока СТП и в системах переменного тока различного промышленного назначения.

#### 1.3.1 Накопители энергии на тяговых подстанциях метрополитена

На тяговых подстанциях метрополитена до сегодняшнего времени использовались накопители энергии в системе тягового электроснабжения, в основном для принятия избыточной энергии рекуперации при торможении ЭПС, и в системе собственных нужд СТП в цепях оперативного постоянного тока для повышения надежности электроснабжения систем коммутации и управления.

# 1.3.1.1 Накопители энергии на СТП метрополитена в системе тягового электроснабжения

Единственный в России опыт использования НЭ для нужд тягового электроснабжения был получен на подстанциях Т-23 и Т-24 «Филевской» линии Московского метрополитена [15, 23, 30, 37, 63, 200].

На рисунке 1.14 представлена принципиальная схема НЭ, на рисунках 1.15 и 1.16 представлены внешний вид шкафов НЭ [130, 132] и внутреннее устройство шкафов коммутационной аппаратуры и модулей с суперконденсаторами.

Функции данного накопителя – это принятие избыточной энергии рекуперации [142, 147], снижение установленной мощности [143, 148], выравнивание секундного графика электропотребления [144] и аварийный вывод ЭПС [133, 141] из тоннеля метро при полной пропаже напряжения в системе первичного электроснабжения [134].

Аккумулирующим элементом данного НЭ являются суперконденсаторы, уровень рабочего напряжения составляет 950В постоянного тока, емкость 187Ф, площадь накопительной системы составляет



порядка 36 м<sup>2</sup>, с системой электроснабжения собственных нужд СТП НЭ никак не связан.

Рисунок 1.14 – Принципиальная схема НЭ неуправляемого типа на основе накопительных модулей «Элтон», расположенного на тяговой подстанции Т-23 Московского метрополитена



Рисунок 1.15 – Внешний вид шкафов НЭ на Т-23



Рисунок 1.16 – Шкафы НЭ на Т-23; шкаф коммутационной аппаратуры (*a*), шкаф с модулями суперконденсаторов (б)

## 1.3.1.2 Накопитель энергии на СТП метрополитена в системе оперативного постоянного тока (СОПТ)

На случай полной пропажи напряжения на вводах 10(20) кВ на подстанции имеются аккумуляторные батареи: рисунки 1.17. Они позволяют запитать аварийное освещение станции и служебных помещений, а также цепи телеуправления и коммутационной аппаратуры В течение времени, необходимого для оперативного устранения неисправностей (порядка 2-х 109]. Аккумуляторные батареи постоянно часов) [39, 40. 81. 99. диагностируются [21] и подзаряжаются [42, 43, 89] с помощью устройств зарядно-подзарядных агрегатов (УЗП) (рисунок 1.18).

В случае пропажи напряжения питание критичных нагрузок автоматически переключится на секцию резервирования, а при пропаже напряжения и с секции резервирования будет переведено на аварийную секцию шин. Таким образом, даже в случае полной пропажи напряжения на вводах от подстанции Мосэнерго и на соседних СТП в электроэнергетической системе оперативного постоянного тока остается запас энергии ДЛЯ управления, переключений и аварийного освещения, что позволит произвести необходимую аварийную коммутацию и выполнить эвакуацию пассажиров.



Рисунок 1.17 – Свинцово-кислотная аккумуляторная батарея; нового типа 60PzS 600 LA номинальной емкостью 600 А\*ч (*a*); старого типа СК-12 с номинальной емкостью 432 А\*час (*б*)

Аккумуляторная батарея состоит из основной и дополнительной («хвостовой») частей. Основная часть в аккумуляторной батарее используется для аварийного питания нагрузок в цепях управления, сигнализации и защиты, а необходимость в дополнительной обусловлена наличием на подстанциях выключателей с электромагнитными приводами, имеющими большие пусковые токи. Последовательно включенные основная и дополнительная части АБ используются для аварийного питания нагрузок, требующих для работы повышенного напряжения питания (в первую очередь, аварийного освещение тоннелей).

Основная часть АБ включена параллельно с двумя зарядноподзарядными выпрямителями (рисунок 1.18), дополнительная часть батареи включена параллельно с выпрямительным устройством типа ВСА. Щит постоянного тока (ЩПТ) состоит из двух секций, объединенных секционными рубильниками: 1-ой и 2-ой рабочих секций и секции АБ. К первой секции подключены:

- аккумуляторная батарея;

- питающие линии устройств автоматики, управления и сигнализации;
- питающие линии аварийного освещения;
- выпрямитель типа ВСА.

Ко второй секции подключены:

- зарядно-подзарядные устройства (ВАЗП);
- линии питания устройств управления и сигнализации;
- устройство контроля изоляции.



Рисунок 1.18 – Устройство заряда-подзаряда (ВАЗП-380/260)

# 1.3.2 Накопители энергии для систем электроснабжения транспорта общего и промышленного назначения

Наиболее близкой, к предлагаемой в настоящей работе, системой можно считать гибридный накопитель энергии [173, 185, 196, 206] с аккумуляторами и суперконденсаторами [29, 41, 44, 62, 69, 70, 92, 103, 150, 165], предназначенный для использования в промышленных сетях 0,4 кВ переменного тока с частотой 50 Гц. Подобные системы выполняют целый ряд важных функций:

 Обеспечение динамической устойчивости электрической сети при сбросе/набросе нагрузки;

- Регулирование параметров электрической сети (частота);

 Улучшение параметров напряжения электрической сети (коэффициент гармонических искажений) и мощности (компенсация реактивной составляющей) в электрической сети;

 Диспетчеризация мощности - выравнивание графиков нагрузки в сети (накопление электрической энергии в периоды избыточной электроэнергии и выдача в сеть в периоды дефицита);  Сокращение нерегулярных колебаний в межсистемных линиях электропередачи, повышение вследствие этого пропускной способности линий электропередачи;

 Обеспечение бесперебойного питания как собственно подстанций и электрических сетей (собственные нужды), так и особо ответственных потребителей;

 Обеспечение стабильной и устойчивой работы децентрализованных и нетрадиционных источников, работающих как автономно, так и в составе единой энергосистемы;

 За счет конденсаторов обеспечивается наиболее благоприятные условия для питания двигательной нагрузки [160].

Одним из наиболее перспективных решений поставленных задач являются использование гибридных накопителей энергии (ГНЭ), включающих аккумуляторных батарей большой накопители энергии основе на энергоемкости (АББЭ) и батарей суперконденсаторов (СК). При этом АБ обладают достаточно длительным действием, достигающим нескольких часов, а СК обладают достаточно высоким быстродействием, которое позволяет их использовать для коррекции кратковременных (до десятков секунд) возмущений в электрической сети.

В состав ГНЭ должны водить:

аккумуляторные батареи большой энергоемкости;

– батареи суперконденсаторов требуемой емкости;

устройства сопряжения АББЭ и СК с сетью (силовые преобразователи);

система управления ГНЭ;

– распределительное устройство.

Конструктивно оборудование ГНЭ может быть представлено либо в шкафном, либо в контейнерном исполнении. Подобная система, для использования на СТП в электроснабжении собственных нужд, была разработана ОИВТ РАН [45] (рисунок 1.19).


Рисунок 1.19 – Внешний вид ГНЭ-100 разработки ОИВТ РАН



Рисунок 1.20 – Батарея литий-ионных аккумуляторов «Либ-100» ГНЭ-100 (всего 168 штук, электротехническая система LiFePO4/C)



Рисунок 1.21 – Батарея суперконденсаторов ГНЭ-100 (20 суперконденсаторов МНЭ-0,93/360Б, напряжение 360 В, емкость 0,93 Ф, Масса 38 кг)



Рисунок 1.22 – Система сопряжения АБ, БК и внешний сети ГНЭ-100

# 2 СХЕМА И КОНСТРУКЦИЯ ЗВЕНА ПОСТОЯННОГО ТОКА С НЭ

Смысл предлагаемой схемы со звеном постоянного тока и НЭ заключается в том, что ответственные потребители (в данном случае потребители ТМ и Тсцб) питаются теперь не на прямую от общих шин 10(20) кВ, а через инверторы от промежуточного звена постоянного тока (рисунок 2.1). В нормальном режиме потребители через так называемое «звено постоянного тока» и соответствующие трансформаторы ТМ и Тсцб питается от шин 10(20)кВ. В случае возникновения значительных колебаний, провалов, или даже полной пропажи питающего напряжения 10(20)кВ, дефицит мощности будет компенсироваться за счет НЭ, параллельно подключенного к тем же шинам звена постоянного тока. Расчет мощности как трансформаторов, так и преобразовательных агрегатов следует вести с учетом возможного заряда-подзаряда НЭ.

Следует отметить, что значительная часть предлагаемой системы – аккумулирующий элемент НЭ, уже присутствует на СТП. На каждой тяговой подстанции существует резервная система оперативного постоянного тока (СОПТ), основой которой служит АБ достаточно высокой энергоемкости (рисунок 2.2.). На СТП так же используется устройство заряда-подзаряда (УЗП) АБ. Следует так же отметить, что для работы НЭ с ТМ и Тсцб его подключение через обратимый инвертор на прямую к общим шинам 10 кВ не целесообразно. В противном случае вся мощность и энергоемкость АБ будет израсходована на нужды СТЭ через значительно более мощный блок тяговых агрегатов СТП. Однако, известны случаи использования накопителей энергии неуправляемого типа для решения подобных проблем и в системе тягового электроснабжения Московского метрополитена. Подобные мощные и энергоемкие системы могут быть использованы не только для приема избыточной энергии рекуперации, но и комплексно решать проблемы с качеством энергии, как в СТЭ, так и в энергосистеме собственных нужд СТП.



Рисунок 2.1 – Схема питания потребителей собственных нужд блока 380В совмещенной тягово-понизительной подстанции со звеном постоянного тока и НЭ

Расчеты показывают, что для компенсации кратковременного провала питающего напряжения 10(20)кВ (в случае п. 1.1.2, рисунок 1.3) понадобилось бы кратковременное (1,5 с) энергетическое вмешательство НЭ, при полной мощности ответственных потребителей, порядка 2250 кДж, что для типовой аккумуляторной батареи СК-12 составляет менее 1 % от ее общей емкости. В запас энергии АБ был бы быстро пополнен за счет последствии выпрямительных агрегатов (УЗП). Для компенсации нестабильности напряжения питающих шин 10(20)кВ в пределах 10% от номинала и в течение 20 секунд вмешательство ГНЭ осуществлялось бы мощностью около 150 кВА с энергообменом в 3000 кДж.

Следует отметить, что установка НЭ в сетях собственных нужд совмещенной тяговой подстанции позволит не только значительно повысить качество электроэнергии по уровню напряжения, но и практически полностью убрать несимметрию напряжения и гармонические помехи, которые так же негативно влияют на работу жизненно необходимых потребителей собственных нужд СТП.

#### 2.1 Аккумулирующий элемент

Как уже упоминалось, в качестве аккумулирующего элемента могут быть использованы уже существующие на СТП батареи для питания оперативных цепей постоянного тока. На рисунке 2.2 представлена АБ одной из СТП Московского метрополитена, которая обладает огромной емкостью и может обеспечить автономное питание не только оперативных цепей, но и потребности ответственных потребителей собственных нужд моторного класса. Единственное, следует добавить последовательных элементов для использования 6-пульсовых схем выпрямления.



Рисунок 2.2 – Аккумуляторная батарея на 1000 А\*ч СТП Московского метрополитена

## 2.2 Преобразовательные агрегаты

В качестве преобразовательных агрегатов выступают выпрямители (для выпрямления переменного тока с «моторных» трансформаторов Тм на звено постоянного тока, от которого идет подзарядка НЭ) и инверторы (для инвертирования напряжения промышленной частоты 50 Гц на шины 0,4 кВ для потребителей собственных нужд).

Подобные схемы уже производятся НИИФА-ЭНЕРГО и применяются на тяговых подстанциях метрополитенов и железных дорог постоянного тока 3,3 кВ (примеры на рисунках 2.3. и 2.4) [101]. Аналогичные системы можно произвести и для уровня 0,4 кВ. При этом мощность преобразовательных агрегатов должна соответствовать мощностям «моторных» трансформаторов Тм.



Рисунок 2.3 – Выпрямительный агрегат производства НИИЭФА-ЭНЕРГО на 3,3 кВ



Рисунок 2.4 – Инверторный агрегат производства НИИЭФА-ЭНЕРГО на 3,3 кВ

# **3** МОДЕЛЬ СТП С НЭ В СИСТЕМЕ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ МЕТРОПОЛИТЕНА

Для оценки влияния качество электроэнергии у на конечных потребителей собственных СТП была нужд создана комплексная имитационная модель всей электроэнергетической системы линии первичного метрополитена, включающая систему электроснабжения 10(20)кВ, тяговую сеть с курсирующими ЭПС, совмещенные тяговые подстанции с блоками системы тягового электроснабжения (СТЭ) и блоком системы электроснабжения собственных нужд СТП. Предложенный подход позволит учесть множественные взаимодействия и перетоки мощности между различными системами [1, 20, 28, 75, 77, 108, 120, 161, 162, 168].

#### 3.1 Модель СТЭ линии Московского метрополитена

Модель системы тягового электроснабжения Серпуховско-Тимирязевской линии Московского метрополитена представляет собой совокупность тяговых подстанций, соединенных между собой тяговой сетью [2, 3, 19]. Представленная модель СТЭ (еще ее называют цифровой моделью), была синтезирована в среде программного комплекса ЕТАР, позволяющего совместить в одной модели разные уровни электроэнергетической системы метрополитена, учитывая аварийные режимы [65, 146, 198, 202, 210].

На рисунке 3.1 представленная исследуемая схема СТЭ с учетом системы первичного электроснабжения в виде цифровой модели линии метрополитена, которая состоит из 23 тяговых подстанций.

Данная модель учитывает сеть 10 кВ, включая кабельные перемычки между подстанциями, тяговые подстанции с трансформаторами и преобразовательными агрегатами, тяговую сеть и перемещающийся ЭПС. Фрагмент одной из тяговых подстанций показан на рисунке 3.2.

В качестве исходных данных для моделирования в ЕТАР инженерурасчетчику необходимо задать следующие основные параметры:

Продольный профиль;

- Структуру тяговой сети;
- Точки подключения тяговых подстанций;
- Структуру тяговых подстанций;
- Систему внешнего электроснабжения (или эквивалентные источники);
- Систему собственных нужд (при необходимости;
- Характеристики ЭПС;
- Графики движения поездов.

В качестве ЭПС была рассмотрена новейшая модель 81-765/81-766/81-

767 («Москва») со своими механическими и электротехническими характеристиками. Расчётная масса была принята равной 59,84 т.



электроснабжения



Рисунок 3.2 – Фрагмент одной из подстанций цифровой модели

# 3.2 Модель СТП метрополитена с системой электроснабжения собственных нужд

Как уже упоминалось, на совмещенной тягово-понизительной подстанции метрополитена (СТП) осуществляется питание таких устройств собственных нужд, к которым относятся потребители, обеспечивающие работу моторных приводов эскалаторов, вентиляционных шахт, дренажных систем, светофоров, автоблокировки, маршрутно-линейной централизации, а также освещения станций, тоннелей, служебных помещений, вестибюлей и пр. Питание всех этих потребителей собственных нужд осуществляется от общих шин СТП 10(20) кВ, от которых так же питается мощная и крайне неравномерная тяговая нагрузка, обеспечивающая движение поездов, и негативно влияющая на соседние нетяговые потребители. Разрабатываемая модель СТП, помимо тяговой нагрузки, должна учитывать максимальное количество потребителей собственных нужд, особенно моторную нагрузку.

## 3.2.1 Описание схемы исследуемой СТП

#### 3.2.1.1 Однолинейная схема исследуемой СТП

При синтезе цифровой модели СТП было необходимо учесть максимальное количество потребителей электроэнергии. На рисунке 3.3 представлена однолинейная схема исследуемой СТП.

Представленную схему СТП можно разделить на несколько основных частей. Первая – это вводы системы первичного электроснабжения 10кВ и межподстанционные кабельные перемычки (КП) того же уровня напряжения.

Вторая зона – это система тягового электроснабжения СТП, в которую входят часть шин 10кВ, два тяговых агрегата, шины постоянного тока 825В и питающие линии тяговой сети 825В.

Третья зона – это система электроснабжения собственных нужд 380В, в которую входят часть шин 10кВ, понижающие трансформаторы TC3-100/10, а также шины 380В.

Четвертая зона – это также система электроснабжения собственных нужд СТП, в которую входят часть шин 10кВ, понижающие трансформаторы TC3-400/10, а также шины 220/127В.

В последующем все описанные выше секции СТП были смоделированы в едином цифровой модели СТП.



Рисунок 3.3 – Однолинейная схема исследуемой СТП

#### 3.2.1.2 Схемы систем электроснабжения собственных нужд СТП

Как уже упоминалось ранее, система собственных нужд СТП делится на зону «моторных потребителей» и потребителей СЦБ с трансформаторами Тм и Тсцб уровнем напряжения 380В, а также зону потребителей освещения То с уровнем напряжения 220/127В.

На рисунке 3.4 – 3.6 представлены схемы щитов ~380 В, ~220/127 В и щита постоянного тока 115 В собственных нужд исследуемой СТП. Щит ~380 В питает следующие ответственные потребители:

- устройства заряда-подзаряда АБ;

- системы вентиляции помещений и устройств СТП;

- вентиляционные шахты тоннельного расположения;

- системы электроснабжения водоотливных станций и артскважины;

- системы электроснабжения многочисленных эскалаторов;

- системы электроснабжения устройств СЦБ и множество других вспомогательных систем.

Щит ~220/127 В питает следующие потребители:

- системы электроснабжения связи;

- системы электроснабжения управляющих органов;

- освещения помещений СТП, тоннелей, вестибюлей и пр.;
- системы электроснабжения защитных систем;

- системы электроснабжения АСКУЭ;

- отопления и прочих вспомогательных систем.

Щит постоянного тока 115 В питает следующие потребители:

- шины управления;

- линии соленоидов коммутационной аппаратуры;

- аварийное освещение;

- аккумуляторную батарею;

- шины сигнализации и прочие потребители постоянного тока.

В последующем большинство перечисленных потребителей были включены в комплексную модель СТП.



Рисунок 3.4 – Схема щита ~380В исследуемой СТП



Рисунок 3.5 – Схема щита ~220В исследуемой СТП



Рисунок 3.6 – Схема щита постоянного тока 115В исследуемой СТП

Понизительная часть СТП выполняет функции питания силовых, осветительных нагрузок и устройств АТДП (автоматики, телемеханики движения поездов). Все эти устройства питаются от напряжения 380, 220/127 и 115 В. Для создания такого напряжения используются различные понижающие трансформаторы.

К силовым нагрузкам метрополитена относятся эскалаторы, вентиляционные агрегаты (вентиляционные шахты, вентиляционные камеры), дренажные установки, санузлы. Все эти нагрузки питаются от напряжения 380 В. Для их питания СТП содержит два трансформатора ТМ (трансформатор моторный): ТМ-1 и ТМ-2. ТМ-1 подключен к первой секции шин 10 кВ, а ТМ-2 – ко второй. На исследуемой СТП в качестве трансформаторов ТМ используются трансформаторы модели ТСЗ-1000/10 мощностью 1000 кВА каждый (рисунок 3.7).



Рисунок 3.7 Моторные трансформаторы ТСЗ-1000/10 исследуемой СТП

Вторичные обмотки этих трансформаторов через вакуумный выключатель и 16 разъединитель подключены к щиту силовых нагрузок (ЩСН) 380 В, имеющему две секции. Между двумя секциями ЩСН имеется секционный рубильник, который при нормальном состоянии схемы выключен. Все силовые нагрузки подключаются так, чтобы обеспечить максимальное использование обоих трансформаторов, но при необходимости все силовые нагрузки могут быть запитаны и от одного трансформатора.

К осветительным нагрузкам относятся всевозможные устройства освещения: освещение станции и вестибюля, освещение служебных помещений, освещение тоннелей. От сети осветительных нагрузок питаются также кондиционеры, устройства сети, бытовые приборы (электрочайники, микроволновые печи). Для питания осветительных нагрузок используются трансформаторы ТО (трансформатор освещения): ТО-1 и ТО-2. Так же, как и силовые трансформаторы, ТО-1 подключен к первой секции шин 10 кВ, а ТО-2 – ко второй. На исследуемой СТП для питания осветительных нагрузок используются трансформаторы модели ТСЗ-400/10 представлены на рисунке 3.8. Напряжение на вторичных обмотках трансформаторов ТО составляет 220 В.



Рисунок 3.8 – Трансформаторы освещения ТСЗ-400/10 исследуемой СТП

Вторичные обмотки TO-1 и TO-2 через вводной автомат и вводной рубильник подключены к первой и второй секциям щита осветительных нагрузок (ЩОН) 220 В. К ЩОН подключены осветительные нагрузки. ЩОН имеет три секции. Первая секция запитывается от TO-1, вторая – от TO-2, а третья является резервной и запитывается от одной из секций. Четвертая секция является аварийной и питается от резервной секции.

#### 3.2.2 Выбор метода расчёта моделируемой электрической сети

При решении любой задачи моделирования процессов В электроэнергетических системах выбор метода определяется целями исследования и требуемой точностью [12, 16, 25, 67]. Фактически, любую электрическую сеть или внутреннюю схему электроустановки можно описать при помощи модели электрической цепи на основе уравнений относительно токов и напряжений в мгновенных значениях [51, 53]. В этом случае задача будет сведена к системе дифференциальных уравнений (в общем случае – нелинейных). Её решение в общем случае может быть получено только численно с использованием малого шага времени (порядка 10<sup>-6</sup> с). Такой подход необходим в следующих случаях:

 Исследование влияния атмосферных перенапряжений на электрооборудование электрических станций, подстанций и других энергообъектов;

• Исследование электромагнитных переходных процессов при коммутации выключателей (анализ восстанавливающегося напряжения);

• Исследование электромагнитных переходных процессов в электрических машинах;

• Исследование электромагнитных переходных процессов при проектировании оборудования с электронными компонентами (диоды, тиристоры, транзисторы).

Если требуется проанализировать работу электрической сети на предмет величин потерь, потребления энергии, оценить влияние работы накопителей

электрической энергии на электропотребление, то моделирование в мгновенных значениях становится излишним по причине высоких вычислительных затрат (при расчёте, например, суточного графика с шагом 10<sup>-6</sup> с) и усложнения моделей некоторых устройств. Например, для сетей с более чем 100 узлами моделирование суточного графика с шагом 10<sup>-6</sup> с становится весьма трудоёмкой задачей.

Задачи такого класса обычно решают при помощи методов расчёта квазиустановившихся режимов. При этом, электромагнитные переходные процессы не учитываются и моделирование ведётся с шагом времени, который существенно превышает величину периода колебаний напряжения в сети (50 Гц). Примером является шаг 1 с. Каждый расчёт выполняется с помощью методов, которые относятся к методам расчёта установившегося режима. Под установившимся режимом понимают состояние сети, при котором мощности нагрузки и генерации считаются независящими от времени. Это позволяет выполнить такой расчёт при помощи символического метода в комплексных числах. При этом, при моделировании хотя бы суточного графика работы сети к выбору метода расчёта установившегося режима следует подходить с точки обеспечения максимальной производительности. Если зрения расчёт установившегося режима выполняется однократно, то зачастую к нему предъявляются достаточно мягкие требования к производительности, но если он выполняется много тысяч раз, а потом весь расчётный цикл повторяется для другого набора данных, то производительность расчётного ядра для определения параметров режима в каждый конкретный момент времени становится узким местом алгоритма.

Произведём сравнительный анализ методов, которые можно взять за основу при построении алгоритма решения задачи данной работы.

Существует большое количество разных методов, позволяющих выполнить расчет установившихся режимов в различных электрических цепях. Существенная их часть являются следствием применения метода

узловых потенциалов. Рассмотрим два самых распространённых метода: Ньютона-Рафсона и метод Z-матрицы (метод матрицы импедансов.

## 3.2.2.1 Метод Ньютона – Рафсона

Данный метод основан на методе Ньютона для решения систем нелинейных алгебраических уравнений, который еще называется «Методом касательной».

Данный метод является одним из самых часто применяемых при расчёте установившихся режимов в электрических сетях различного типа. Одна из причин его высокой распространённости – использование моделей нагрузки в виде фиксированного отбора мощности как самой часто распространённой модели нагрузки в промышленных сетях.

Рассмотрим вывод его уравнений для симметричной трёхфазной сети. Суть метода заключается в решении системы уравнений по методу узловых потенциалов в форме баланса мощностей

$$\underline{Y}\dot{U} = -\dot{I}_{\rm H} \cdot \sqrt{3}, \qquad (3.1)$$

где У – матрица собственных и взаимных проводимостей;

*U* – вектор линейных напряжений трёхфазных узлов сети;

*Ін* – вектор токов нагрузки (при отсутствии токов источников генерации).

Если представить каждый элемент  $\dot{I}_{\rm H}$  как  $\dot{I}_{\rm H_K} = \frac{S^*_{\ k}}{\sqrt{3}U^*_{\ k}}$ , то уравнение примет вид

$$\left(\sum_{n} (g_{kn} + jb_{kn})\dot{U}_{n}\right)U^{*}{}_{k} = -\underline{S}^{*}{}_{k}$$
(3.2)

Полученное уравнение является балансом мощностей в k-ом узле.

$$U_{k}^{*}\sum_{n}\left((g_{kn}+jb_{kn})\dot{U}_{n}\right)+\underline{S}_{k}^{*}=0$$
(3.3)

Перепишем данное выражение.

$$U_k e^{-j\theta_k} \sum_n \left( (g_{kn} + jb_{kn}) U_n e^{j\theta_k} \right) - \underline{S}^*_{\ k} = 0$$
(3.4)

$$\sum_{n} \left( U_k U_n e^{j(\theta_n - \theta_k)} (g_{kn} + jb_{kn}) \right) - \underline{S}^*_{\ k} = 0 \tag{3.5}$$

$$\sum_{n} (U_k U_n (\cos(\theta_n - \theta_k) + j \sin(\theta_n - \theta_k)) (g_{kn} + j b_{kn})) - \underline{S}_k^* = 0$$
(3.6)

Если раскроем скобки, то получим:

$$\sum_{n} \left( U_k U_n \left( (g_{kn} \cos(\theta_n - \theta_k) - b_{kn} \sin(\theta_n - \theta_k)) \right) + j \sum_{n} \left( U_k U_n (g_{kn} \sin(\theta_n - \theta_k) + b_{kn} \cos(\theta_n - \theta_k)) \right) - \underline{S}_k^* = 0$$
(3.7)

Разбиваем выражение для действительной мнимой составляющей:

$$\begin{cases} \sum_{n} \left( U_k U_n \left( (g_{kn} \cos(\theta_n - \theta_k) - b_{kn} \sin(\theta_n - \theta_k)) \right) - \underline{P}_k = 0 \\ \sum_{n} \left( U_k U_n (g_{kn} \sin(\theta_n - \theta_k) + b_{kn} \cos(\theta_n - \theta_k)) \right) + Q_k = 0 \end{cases}$$
(3.8)

Вводим обозначения:

$$\begin{cases} F_{P_k}(0, U) = 0\\ F_{Q_k}(0, U) = 0 \end{cases}$$
(3.9)

где  $F_{P_k}(0, U)$  – функция небаланса (невязки) активной мощности в k-м узле. Аргументы – векторы фазовых узлов напряжений  $\theta$  и модулей напряжений U.

 $F_{Q_k}(0, U)$  – функция небаланса (невязки) реактивной мощности в k-м узле. Аргументы – векторы фазовых узлов напряжений  $\theta$  и модулей напряжений U.

В схеме с k узлами с неизвестными напряжениями. Задача сводится к решению системы из 2k нелинейных алгебраических уравнений.

Рассмотрим применение метода Ньютона-Рафсона.

Для одного уравнения вида

$$f(x) = 0 \tag{3.10}$$

Решение представляет собой итерационный процесс. f(x) представляется в виде ряда Тейлора с отбрасыванием выше 1-го порядка.

$$f(x_n) + \frac{df(x_n)}{dx} \Delta x_n = 0$$
(3.11)

$$\Delta x_n = -\left(\frac{df(x_n)}{dx}\right)^{-1} f(x_n)$$
(3.12)

$$x_{n+1} = x_n + \Delta x_n \tag{3.13}$$

Для нашей задачи система имеет вид

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial F_p}{\partial \theta} & \frac{\partial F_p}{\partial U} \\ \frac{\partial F_Q}{\partial \theta} & \frac{\partial F_Q}{\partial U} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta U \end{bmatrix} = -\begin{bmatrix} F_p \\ F_Q \end{bmatrix}$$
(3.14)

Это СЛАУ, которая решается много раз для уточнения  $\theta$  и U.

Это блочная форма записи.

Матрица частных производных в левой части называется матрицей Якоби и обозначается J.

Рассмотрим алгоритм определения J на примере системы с 3-мя неизвестными узлами.

$$F_{p_1} = U_1 U_1 q_{11} + U_1 U_2 q_{12} \cos(\theta_2 - \theta_1) - U_1 U_2 b_{12} \sin(\theta_2 - \theta_1) + U_1 U_3 q_{13} \cos(\theta_3 - \theta_1) - U_1 U_3 b_{13} \sin(\theta_3 - \theta_1)$$
(3.15)

При определении производных их значение для *θ* с индексами, совпадающими и отличающиеся от индекса уравнения, будут разными.

$$\frac{\partial F_p}{\partial \theta} = U_1 U_2 q_{12} \sin(\theta_2 - \theta_1) + U_1 U_2 \cos(\theta_2 - \theta_1) b_{12} + U_1 U_3 q_{13} \sin(\theta_3 - \theta_1) + U_1 U_3 b_{13} \cos(\theta_3 - \theta_1) , \qquad (3.16)$$

ИЛИ

$$\frac{\partial F_{p_k}}{\partial \theta_k} = \sum_{n,n \neq k} (U_k U_n (q_{kn} \sin(\theta_n - \theta_k) + b_{kn} \cos(\theta_n - \theta_k))$$
(3.17)

Если n=k, то для n=2 и k=1

$$\frac{\partial F_{p_1}}{\partial \theta_2} = -U_1 U_2 q_{12} \sin(\theta_2 - \theta_1) - U_1 U_2 b_{13} \cos(\theta_2 - \theta_1)$$
(3.18)

Суммирования нет из-за того, что  $\theta_2$  есть только в двух слагаемых.

$$\frac{\partial F_{p_k}}{\partial \theta_n} = -U_k U_n (q_{kn} \sin(\theta_n - \theta_k) + b_{kn} \cos(\theta_n - \theta_k), n \neq k$$
(3.19)

Теперь рассмотрим производную по U

$$\frac{\partial F_{p_1}}{\partial \theta_1} = 2U_1 q_{11} + U_2 q_{12} \cos(\theta_2 - \theta_1) - U_2 b_{12} \sin(\theta_2 - \theta_1) + U_3 q_{13} \cos(\theta_3 - \theta_1) - U_3 b_{13} \sin(\theta_3 - \theta_1)$$
(3.20)

В общем виде:

$$\frac{\partial F_{p_k}}{\partial \theta_n} = 2U_k q_{kk} + \sum_{n,n \neq k} (U_n (q_{kn} \cos(\theta_n - \theta_k) - b_{kn} \sin(\theta_n - \theta_k))).$$

$$(3.21)$$

Для  $n \neq k$  при n=2, k=1

$$\frac{\partial F_{p_1}}{\partial \theta_1} = U_1(q_{12}\cos(\theta_2 - \theta_1) - b_{12}\sin(\theta_2 - \theta_1))$$
(3.22)

$$\frac{\partial F_{p_k}}{\partial \theta_n} = U_k(q_{kn}\cos(\theta_n - \theta_k) - b_{kn}\sin(\theta_n - \theta_k), n \neq k$$
(3.23)

Теперь рассмотрим  $F_Q$ 

$$F_{Q_1} = U_1 U_1 b_{11} + U_1 U_2 q_{12} \sin(\theta_2 - \theta_1) + U_1 U_2 b_{12} \cos(\theta_2 - \theta_1) + U_1 U_3 q_{13} \sin(\theta_3 - \theta_1) + U_1 U_3 b_{13} \cos(\theta_3 - \theta_1), \qquad (3.24)$$

$$\frac{\partial F_{Q_1}}{\partial \theta_1} = -U_1 U_2 q_{12} \cos(\theta_2 - \theta_1) + U_1 U_2 b_{12} \sin(\theta_2 - \theta_1) - (3.25) -U_1 U_3 q_{13} \cos(\theta_3 - \theta_1) + U_1 U_3 b_{13} \sin(\theta_3 - \theta_1) , \frac{\partial F_{Q_k}}{\partial \theta_k} = \sum_{\substack{n,n \neq k \\ + U_k U_n d_{kn}} \cos(\theta_n - \theta_k) + (3.26) (3.26)$$

$$\frac{\partial F_{Q_1}}{\partial \theta_2} = U_1 U_2 q_{12} \cos(\theta_2 - \theta_1) - U_1 U_2 b_{12} \sin(\theta_n - \theta_k)$$
(3.27)

$$\frac{\partial F_{Q_1}}{\partial U_1} = 2U_1 b_{11} + U_2 q_{12} \sin(\theta_2 - \theta_1) + U_2 b_{12} \cos(\theta_2 - \theta_1) + U_3 q_{13} \sin(\theta_3 - \theta_1) + U_3 b_{12} \cos(\theta_3 - \theta_1)$$
(3.28)

В общем виде:

$$\frac{\partial F_{Q_1}}{\partial U_1} = 2U_k b_{kk} + \sum_{n,n \neq k} (U_n (q_{kn} \sin(\theta_n - \theta_k) + b_{kn} \cos(\theta_n - \theta_k)))$$
(3.29)

$$\frac{\partial F_{Q_1}}{\partial U_2} = U_1 q_{12} \sin(\theta_2 - \theta_1) + U_1 b_{12} \cos(\theta_2 - \theta_1)$$
(3.30)

В общем виде:

$$\frac{\partial F_{Q_k}}{\partial U_n} = U_k (q_{kn} \sin(\theta_n - \theta_k) + b_{kn} \cos(\theta_n - \theta_k)), \qquad (3.31)$$

при  $n \neq k$ .

Особенностью данного метода является высокая скорость сходимости, если вектор приближения находится близко к решению.

Однако, при начальном приближении, которое сильно отличается от решения, время сходимости увеличивается или вовсе метод может разойтись.

Следует отметить ещё одну интересную особенность метода. На каждой итерации требуется полный пересчёт матрицы Якоби, что требует значительного объёма вычислений, так как матрица Якоби является плотной и для задачи с N узлами требуется N<sup>2</sup> операций для её вычисления.

## 3.2.2.2 Метод Z-Матрицы

В классическом пособии по расчёту установившихся режимов [174] описан другой метод, который обладает достаточно интересными характеристиками. Рассмотрим полный вывод его уравнений с учётом возможности работы с нагрузками, которые заданы в виде источников тока.

На рисунке 3.9 изображена электрическая цепь с синусоидальными источниками ЭДС.



Рисунок 3.9 – Цепь с синусоидальными источниками ЭДС

Для начала присвоим номера всем узлам и ветвям. Номера узлов находятся рядом с ними, а номера ветвей размещены в индексах комплексных сопротивлений.

Как известно, для схем с х узлами можно записать х-1 уравнений по первому закону Кирхгофа. Уравнения для первых трех узлов буду выглядеть таким образом:

$$\begin{cases} \frac{\dot{\phi}_{1} - \dot{\phi}_{4} - \dot{E}_{1}}{\underline{Z}_{1}} + \frac{\dot{\phi}_{1} - \dot{\phi}_{4}}{\underline{Z}_{3}} + \frac{\dot{\phi}_{1} - \dot{\phi}_{2}}{\underline{Z}_{5}} = 0\\ \frac{\dot{\phi}_{2} - \dot{\phi}_{1}}{\underline{Z}_{5}} + \frac{\dot{\phi}_{2} - \dot{\phi}_{3}}{\underline{Z}_{4}} + \frac{\dot{\phi}_{2} - \dot{\phi}_{3} - \dot{E}_{2}}{\underline{Z}_{2}} + \dot{f}_{4} = 0\\ \frac{\dot{\phi}_{3} - \dot{\phi}_{4}}{\underline{Z}_{6}} - \dot{f}_{4} + \frac{\dot{\phi}_{3} - \dot{\phi}_{2}}{\underline{Z}_{4}} + \frac{\dot{\phi}_{3} + \dot{E}_{2} - \dot{\phi}_{2}}{\underline{Z}_{2}} = 0 \end{cases}$$
(3.32)

Здесь при записи уравнений в качестве положительного принято направление тока от узла.

Так как величины напряжений всегда принимаются равными относительно некоторого узла, потенциал которого будет фиксированным (либо равняться нулю), то в качестве полного узла выберем узел 4 и зададим  $\dot{\phi}_4 = 0$ .

После проделанных преобразований система уравнений примет следующий вид:

$$\begin{cases} \dot{\phi}_{1}\left(\frac{1}{\underline{z_{1}}}+\frac{1}{\underline{z_{3}}}+\frac{1}{\underline{z_{5}}}\right)+\dot{\phi}_{2}\left(-\frac{1}{\underline{z_{5}}}\right)+\dot{\phi}_{3}\cdot0=\frac{\dot{E}_{1}}{\underline{z_{1}}}\\ \dot{\phi}_{1}\left(-\frac{1}{\underline{z_{5}}}\right)+\dot{\phi}_{2}\left(\frac{1}{\underline{z_{2}}}+\frac{1}{\underline{z_{4}}}+\frac{1}{\underline{z_{5}}}\right)+\dot{\phi}_{3}\cdot\left(-\frac{1}{\underline{z_{4}}}-\frac{1}{\underline{z_{2}}}\right)=\frac{\dot{E}_{2}}{\underline{z_{2}}}\\ \dot{\phi}_{1}\cdot0+\dot{\phi}_{2}\left(-\frac{1}{\underline{z_{2}}}-\frac{1}{\underline{z_{4}}}\right)+\dot{\phi}_{3}\left(\frac{1}{\underline{z_{2}}}+\frac{1}{\underline{z_{4}}}+\frac{1}{\underline{z_{6}}}\right)=-\frac{\dot{E}_{2}}{\underline{z_{2}}}+\dot{J} \end{cases}$$
(3.33)

Покажем в матричной форме:

$$\begin{bmatrix} \frac{1}{\underline{z_1}} + \frac{1}{\underline{z_3}} + \frac{1}{\underline{z_5}}; & -\frac{1}{\underline{z_5}}; & 0\\ -\frac{1}{\underline{z_5}}; & \frac{1}{\underline{z_2}} + \frac{1}{\underline{z_4}} + \frac{1}{\underline{z_5}}; & -\frac{1}{\underline{z_4}} - \frac{1}{\underline{z_2}}\\ 0; & -\frac{1}{\underline{z_2}} - \frac{1}{\underline{z_4}}; & \frac{1}{\underline{z_2}} + \frac{1}{\underline{z_4}} + \frac{1}{\underline{z_6}} \end{bmatrix} \times$$

$$\times \begin{bmatrix} \dot{\varphi}_1 \\ \dot{\varphi}_2 \\ \dot{\varphi}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\underline{\dot{E}_1}}{\underline{z_1}} \\ \frac{\underline{\dot{E}_2}}{\underline{z_2}} - \underline{\dot{f}_4} \\ -\frac{\underline{\dot{E}_2}}{\underline{z_2}} + \underline{\dot{f}_4} \end{bmatrix}.$$

$$(3.34)$$

Представленная выше система уравнений выполнена ручным способом. Автоматизированный расчет различных сетей, размерность которых может достигать нескольких тысяч узлов может быть необходим при решении задач как в области эксплуатации, так и в области проектирования. Это означает, что составление систем уравнений и их последующее решение с помощью вычислительных машин необходимо автоматизировать.

Для этого выполняют следующие действия.

Рассматриваемую цепь представляют в виде направленного графа (рисунок 3.10):



Рисунок 3.10 – Цепь в виде направленного графа

Места, в которых стыкуются ветви и узлы представляют как матрицу инциденций A<sub>0</sub>.

Для данной цепи:

$$A_{0} = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & -1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & -1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & -1 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}$$
(3.35)

Здесь столбцы соответствуют ветвям, а строки в свою очередь узлам. Значение отображают следующие:

0 – ветвь не имеет электрического соединения с узлом;

1 – ветвь подходит к узлу;

-1 – ветвь отходит от узла.

Исключим узел «4», т.е. 4 строку.

Результатом будет матрица:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & -1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & -1 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$
(3.36)

Представим каждую ветвь как обобщенную (рисунок 3.11).



Рисунок 3.11 – Обобщенная ветвь графа

Между узлами k и m будет падение напряжения равное:

$$\dot{U}_{km} = \dot{I}_{km} \cdot \underline{z_{km}} - \dot{E}_{km} \tag{3.37}$$

Введем обозначение:

$$U_{km} = I_{km} \cdot \underline{z_{km}} = \dot{I}_{km} \cdot \frac{1}{\underline{Y_{km}}}$$
(3.38)

$$\widetilde{U}_{km} = \dot{U}_{km} - \dot{E}_{km} \tag{3.39}$$

Тогда в матричном виде:

$$\widetilde{U} = \dot{U} - \dot{E} \tag{3.40}$$

примерному току ветви дадим значение  $\tilde{I}_{km}$ 

Тогда

$$\tilde{I}_{km} = \dot{I}_{km} + \dot{J}_{km} \tag{3.41}$$

В матричной форме:

$$\tilde{l} = \dot{l} + \dot{j} \tag{3.42}$$

 $\widetilde{U}$  можно выразить через вектор потенциалов  $\dot{\phi}$  как:

$$\widetilde{U} = \mathbf{A}^T \dot{\boldsymbol{\varphi}} \tag{3.43}$$

Перепишем  $\tilde{I} = \dot{I} + \dot{J}$  умножив уравнение на А:

$$A\tilde{I} = A\dot{I} + A \cdot \dot{J} \tag{3.44}$$

По I закону Кирхгофа А $\tilde{I} = 0$ , значит:

$$A\dot{I} = -A\dot{J} \tag{3.45}$$

Используя выражение  $\dot{I} = Y_b \dot{U}$ , получим:

$$A\underline{Y_b}\dot{U} = -A\dot{J} \tag{3.46}$$

Подставим  $\dot{U} = \tilde{U} + \dot{E}$ 

$$A\underline{Y}_{\underline{B}}\widetilde{U} + A\underline{Y}_{\underline{B}}\dot{E} = -A\dot{J}$$
(3.47)

Подставим  $\widetilde{U} = A^T \dot{\phi}$ , перепишем уравнение и получим:

$$\underline{Y}_{\mathrm{B}}A^{T}\dot{\varphi} = -A\left(\dot{J} + \underline{Y}_{\mathrm{B}}\cdot\dot{E}\right)$$
(3.48)

Данное уравнение является матричной формулой записи метода узловых потенциалов.

67

<u> $Y = AY_{\rm B}A^{T}$  – матрица собственных и взаимных проводимостей.</u>

Для схемы с q узлами:

$$\underline{Y} = A \underline{Y}_{\mathrm{B}} A^{T} = \begin{bmatrix} \underline{Y}_{11} & \underline{Y}_{12} & \underline{Y}_{13} & \cdots & \underline{Y}_{1_{q-1}} \\ \vdots & \ddots & & \vdots \\ \vdots & & \ddots & & \vdots \\ \vdots & & \ddots & & \vdots \\ \underline{Y}_{q-1_{1}} & \cdots & \cdots & \underline{Y}_{q-1_{q-1}} \end{bmatrix}$$
(3.49)

<u>*Y*</u><sub>*kk*</sub> – собственная проводимость k-го узла сумма всех проводимостей где ветвей, которые подходят к k-му узлу;

<u>*Y*</u><sub>*km*</sub> – взаимное проводимость между k-му и m-м узлами.

Сумма проводимость ветвей, которые непосредственно соединяют узлы kиm.

<u>Y</u><sub>в</sub> – диагональная матрица проводимостей ветвей

\_ \_

$$\underline{Y}_{\rm B} = \begin{bmatrix} \underline{Y}_1 & 0 & \cdots & \cdots & 0\\ 0 & \underline{Y}_2 & \cdots & \cdots & 0\\ \vdots & & \ddots & & \\ \vdots & & & \ddots & \\ 0 & \cdots & \cdots & \cdots & \underline{Y}_p \end{bmatrix}$$
(3.50)

для схемы с р ветвями.

Рассмотрим составление системы уравнений для описанного примера:

$$A = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & -1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & -1 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$
(3.51)  
$$\underline{Y}_{B} = \begin{bmatrix} \frac{Y_{1}}{0} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{Y_{2}}{0} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{Y_{3}}{0} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{Y_{4}}{0} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{Y_{5}}{0} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{Y_{5}}{0} \end{bmatrix}$$
(3.52)  
$$\dot{E} = \begin{bmatrix} \dot{E}_{1} \\ -\dot{E}_{2} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$
(3.53)

$$\dot{J} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ J_4 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$
(3.54)

$$A^{T} = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ 1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$
(3.55)

$$\begin{split} A\underline{Y}_{B}A^{T} &= \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & -1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \\ & \times \begin{bmatrix} \underline{Y}_{1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \underline{Y}_{2} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \underline{Y}_{4} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \underline{Y}_{5} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \underline{Y}_{6} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ 1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \\ &= \begin{bmatrix} -\underline{Y}_{1} & 0 & \underline{Y}_{3} & 0 & \underline{Y}_{5} & 0 \\ 0 & \underline{Y}_{2} & 0 & \underline{Y}_{4} & -\underline{Y}_{5} & 0 \\ 0 & -\underline{Y}_{2} & 0 & -\underline{Y}_{4} & 0 & \underline{Y}_{6} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \\ &= \begin{bmatrix} \underline{Y}_{1} + \underline{Y}_{3} + \underline{Y}_{5} & -\underline{Y}_{5} & 0 \\ -\underline{Y}_{5} & \underline{Y}_{2} + \underline{Y}_{4} + \underline{Y}_{5} & -\underline{Y}_{2} - \underline{Y}_{4} \\ 0 & -\underline{Y}_{2} - \underline{Y}_{4} & \underline{Y}_{2} + \underline{Y}_{4} + \underline{Y}_{6} \end{bmatrix} \end{split}$$
(3.56)

Полеченная матрица полностью идентична той, которую составили вручную.

Определим вектор правой части:

$$A(\dot{j} + \underline{Y}_{B} * \dot{E}) = -\begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & -1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \\ \times \left( \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ J_{4} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \dot{E}_{1} \underline{Y}_{1} \\ -\dot{E}_{2} \underline{Y}_{2} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \right) = -\begin{bmatrix} -\dot{E}_{1} \underline{Y}_{1} \\ -\dot{E}_{2} \underline{Y}_{2} + \dot{f}_{4} \\ \dot{E}_{2} \underline{Y}_{2} - \dot{f}_{4} \end{bmatrix} =$$
(3.57)
$$= \begin{bmatrix} \dot{E}_{1} \underline{Y}_{1} \\ \dot{E}_{2} \underline{Y}_{2} - \dot{f}_{4} \\ -\dot{E}_{2} \underline{Y}_{2} + \dot{f}_{4} \end{bmatrix}$$

Вектор также аналогичен составленному вручную.

При расчетах квазиустановившихся режимов в 3-х фазных сетях необходимо учитывать некоторые особенности и допущения, которые являются общепринятыми:

69

• Нагрузки показываются оттекающими от узлов нагрузки токами. Величины токов определяются статическими характеристиками (функции зависимости мощности от напряжения).

• Трансформаторы моделируются импедансом первичной обмотки и идеальной трансформацией в виде комплексного коэффициента трансформации.

• Источники ЭДС в ветвях не используются. Вместо них используется модель балансирующего узла. Это узел, который связывает исследуемую сеть с энергосистемой очень большой мощности. При этом, считается, что нагрузки и генерация исследуемой сети не могут повлиять на напряжение данного узла.

• Расчет симметричного режима делается для одной фазы.

• Трансформаторы моделируются импедансом первичной обмотки и идеальной трансформацией в виде комплексного коэффициента трансформации.

• В схеме замещения нет контуров через землю.

Далее представлен пример расчета сети с напряжением 10кВ.



 $\frac{\dot{U}_2}{\dot{U}_3} = \dot{k} \tag{3.58}$ 

Рисунок 3.12 – Расчетная схема замещения на одну фазу

Здесь в узле 1, данная сеть связана с большой распределительной сетью.

Потенциал в узле 1 остается одинаковым при различных изменениях нагрузки в исследуемой сети.

$$\dot{U}_1 = const \tag{3.59}$$

Первый узел именуется «балансирующим».

В теории, в расчетной схеме допускается несколько балансирующих узлов. С каждым новым балансирующим узлом количество неизвестных уменьшается на единицу.

Нагрузка располагается в четвертом узле. При расчете симметричного режима её схемой соединения обмоток можно пренебречь. Имеет значение только величина трехфазной мощности.

Ток нагрузки, который оттекает от четвертого определяется как:

$$\dot{I}_4 = \frac{P - jQ}{\sqrt{3}U_4^*} \tag{3.60}$$

Данное выражение получается в ходе следующих преобразований:

$$\underline{S} = \sqrt{3} \dot{U} I^* \tag{3.61}$$

$$I^* = \frac{\underline{S}}{\sqrt{3}\dot{U}} \tag{3.62}$$

$$\dot{I} = \frac{\underline{S^*}}{\sqrt{3}U^*} \tag{3.63}$$

Для того чтобы представить ток в алгебраической форме можно выполнить преобразования:

$$\dot{I} = \frac{p - jQ}{\sqrt{3}(U_{Re} - jU_{Im})} = \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{(p - jQ)(U_{Re} + jU_{Im})}{U^2} =$$
  
=  $\frac{1}{\sqrt{3}U^2} (PU_{Re} + QU_{Im}) + j\frac{1}{\sqrt{3}U^2} (-QU_{Re} + PU_{Im}) =$   
=  $I_{Re} + jI_{Im}$  (3.64)

От величины напряжения в узле нагрузки будет зависеть величина тока.

Далее представлены три вида основных статических характеристик, т. е. зависимостей мощности S от U.



Рисунок 3.13 – Зависимости мощностей от напряжения

Далее будет рассмотрена только первая модель S = const.

Рассмотрим некоторые особенности составления уравнений методом узловых потенциалов для примера сети с трансформаторами:

$$\dot{k} = \frac{{U'}_2}{\dot{U}_3} \tag{3.65}$$

Здесь используется достаточно часто применяемая при расчётах установившихся режимов модель трансформатора в виде последовательного соединения импеданса первичной и вторичной обмотки, приведённого к напряжению первичной обмотки и идеальной трансформации, которая задаётся в виде комплексного числа для учёта поворота вектора напряжения группы соединения обмоток.

Рассмотрим 1-е уравнение (узел 2):

$$\frac{\dot{U}_2 - \dot{U}_1}{\sqrt{3}Z_1} + \frac{\dot{U}_2 - \dot{U'}_3}{\sqrt{3}Z_2} = 0$$
(3.65)

Здесь 3'- промежуточный узел для учёта идеальной трансформации.

$$\dot{U'}_3 = \dot{k}\dot{U}_3$$
 (3.66)
$$\frac{\dot{U}_2 - \dot{U}_1}{\sqrt{3}\underline{Z_1}} + \frac{\dot{U}_2 - \dot{k}\dot{U}_3}{\sqrt{3}\underline{Z_2}} = 0$$
(3.67)

$$\dot{U}_{2}\left(\frac{1}{\underline{Z}_{1}} + \frac{1}{Z_{2}}\right) + \dot{U}_{3}\left(-\dot{k}\frac{1}{\underline{Z}_{2}}\right) = \dot{U}_{1}\frac{1}{Z_{1}}$$
(3.68)

Из уравнения видно, что в нем учтено влияние коэффициента трансформации и напряжение балансирующего узла.

Для третьего узла уравнение примет более сложный вид

$$\dot{k}\frac{\dot{U'}_3 - \dot{U}_2}{\sqrt{3}\underline{Z_2}} + \frac{\dot{U}_3 - \dot{U}_4}{\sqrt{3}\underline{Z_3}} = 0$$
(3.69)

$$\dot{k}\frac{\dot{k}\dot{U}_3 - \dot{U}_2}{\underline{Z}_2} + \frac{\dot{U}_3 - \dot{U}_4}{\underline{Z}_3} = 0$$
(3.70)

$$\dot{U}_{3}\left(\dot{k}^{2}\frac{1}{Z_{2}}+\frac{1}{Z_{3}}\right)+\dot{U}_{2}\left(-\dot{k}\frac{1}{\underline{Z}_{2}}\right)+\dot{U}_{4}\left(-\frac{1}{Z_{3}}\right)=0$$
(3.71)

В данном уравнении комплексный коэффициент трансформации учтен 2 раза.

Уравнение для четвертого узла идентично рассмотренному ранее и лишено особенностей.

$$\frac{\dot{U}_4 - \dot{U}_3}{\sqrt{3}Z_3} + \dot{I}_{\rm H} = 0$$
, где  $\dot{I}_{\rm H} = \frac{P - jQ}{\sqrt{3}U_4^*}$  (3.72)

Следовательно, в матричной форме система имеет вид:

$$\begin{bmatrix} \frac{1}{Z_{1}} + \frac{1}{Z_{2}} & -\dot{k}\frac{1}{Z_{2}} & 0\\ -\dot{k}\frac{1}{Z_{2}} & -\dot{k}\frac{1}{Z_{2}} + \frac{1}{Z_{3}} & -\frac{1}{Z_{3}}\\ 0 & -\frac{1}{Z_{3}} & \frac{1}{Z_{3}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{U}_{2}\\ \dot{U}_{3}\\ \dot{U}_{4} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{U}_{1}\frac{1}{Z_{3}}\\ 0\\ -\sqrt{3}\dot{I}_{H} \end{bmatrix}$$
(3.73)

Все напряжения линейные.

Для начала стоит разобрать получение матрицы собственных и взаимных проводимостей, где учтен коэффициент трансформации. После этого рассмотрим способы решения данной системы.

График сети примет следующий вид



Рисунок 3.14 – Граф расчетной сети

Если убрать узел 1 как балансирующий, то в результате получим:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -1 & 1 & 0\\ 0 & -1 & 1\\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}$$
(3.74)

Определим матрицу собственных и взаимных проводимостей исходя из этого:

$$A\underline{Y}_{B}A^{T} = \begin{bmatrix} -1 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 1 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \underline{Y}_{1} & 0 & 0 \\ 0 & \underline{Y}_{2} & 0 \\ 0 & 0 & \underline{Y}_{3} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} -1 & 1 & 0 \\ 1 & -1 & 1 \\ 0 & 1 & -1 \end{bmatrix} = \\ = \begin{bmatrix} \underline{Y}_{1} & \underline{Y}_{2} & 0 \\ 0 & -\underline{Y}_{2} & \underline{Y}_{3} \\ 0 & 0 & -\underline{Y}_{3} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \end{bmatrix} =$$
(3.75)
$$= \begin{bmatrix} \underline{Y}_{1} + \underline{Y}_{2} & -\underline{Y}_{2} & 0 \\ -\underline{Y}_{2} & \underline{Y}_{2} + \underline{Y}_{3} & -\underline{Y}_{3} \\ 0 & -\underline{Y}_{3} & \underline{Y}_{3} \end{bmatrix}$$

Видим, что не сходится только лишь учет коэффициентов трансформации.

Вносим правки в матрицу А, чтобы это устранить.

Для этого заменим -1 на  $-\dot{k}$ , для ветвей с трансформациями.

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -1 & 1 & 0\\ 0 & -\dot{k} & 1\\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}$$
(3.76)

Выполним проверку:

$$A\underline{Y}_{B}A^{T} = \begin{bmatrix} -1 & 1 & 0 \\ 0 & -\dot{k} & 1 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \underline{Y}_{1} & 0 & 0 \\ 0 & \underline{Y}_{2} & 0 \\ 0 & 0 & \underline{Y}_{3} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 1 & -\dot{k} & 0 \\ 0 & 1 & -1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\underline{Y}_{1} & \underline{Y}_{2} & 0 \\ 0 & -\dot{k}\underline{Y}_{2} & \underline{Y}_{3} \\ 0 & 0 & -\underline{Y}_{3} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 1 & -\dot{k} & 0 \\ 0 & 1 & -1 \end{bmatrix} =$$
(3.77)
$$= \begin{bmatrix} \underline{Y}_{1} + \underline{Y}_{2} & -\dot{k}\underline{Y}_{2} & 0 \\ -\dot{k}\underline{Y}_{2} & \dot{k}^{2}\underline{Y}_{2} + \underline{Y}_{3} & -\underline{Y}_{3} \\ 0 & -\underline{Y}_{3} & \underline{Y}_{3} \end{bmatrix}$$

Из ответа видно, что все получается корректно.

Теперь необходимо рассмотреть автоматизированное построение вектора правой части.

Для этого возвращаемся к идее об удалении балансирующих узлов из матрицы инциденций. Матрица инциденций для данной схемы будет иметь вид:

$$A_{0} = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ -1 & 1 & 0 \\ 0 & -\dot{k} & 1 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}$$
(3.78)

Это достаточно известный способ учёта идеальных трансформаций в матрице собственных и взаимных проводимостей.

Если мы знаем номера строк (узлов), которые соответствуют балансирующим узлам то *А* можно получить из *A*<sub>0</sub> помощью приема:

Посмотрим матрицу А' вида:

$$A' = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$
(3.79)

Получили единичную матрицу с исключенными строками, номера которых соответствуют балансирующим узлам. Далее получим *A* из *A*<sub>0</sub> при помощи выражения:

$$A = A' A_0 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \\ 0 & -\dot{k} & 1 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} = (3.80)$$
$$= \begin{bmatrix} -1 & 1 & 0 \\ 0 & -\dot{k} & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}$$

После потребуется полная матрица собственных и взаимных проводимостей.

$$A_{0}\underline{Y}_{B}A_{0}^{T} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ -1 & 1 & 0 \\ 0 & -\dot{k} & 1 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \underline{Y}_{1} & 0 & 0 \\ 0 & \underline{Y}_{2} & 0 \\ 0 & 0 & \underline{Y}_{3} \end{bmatrix} \times \\ \times \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -\dot{k} & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 \end{bmatrix} = \\ = \begin{bmatrix} \underline{Y}_{1} & 0 & 0 \\ -\underline{Y}_{1} & \underline{Y}_{2} & 0 \\ 0 & -\dot{k}\underline{Y}_{2} & \underline{Y}_{3} \\ 0 & 0 & -\underline{Y}_{3} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -\dot{k} & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 \end{bmatrix} = \\ = \begin{bmatrix} \underline{Y}_{1} & -\underline{Y}_{1} & 0 & 0 \\ -\underline{Y}_{1} & \underline{Y}_{1} + \underline{Y}_{2} & -\dot{k}\underline{Y}_{2} & 0 \\ 0 & -\dot{k}\underline{Y}_{2} & \dot{k}^{2}\underline{Y}_{2} + \underline{Y}_{3} & -\underline{Y}_{3} \\ 0 & 0 & -\underline{Y}_{3} & \underline{Y}_{3} \end{bmatrix} = \underline{Y}_{0}$$

$$(3.81)$$

Чтобы получить вектор подпиток от балансирующих узлов, нужно составить выражение:

$$A' \underbrace{A_0 \underline{Y}_{\mathsf{B}} A_0^{\mathsf{T}}}_{\underline{\underline{Y}}} \dot{U}_{6.y.}, \qquad (3.82)$$

где

$$\dot{U}_{6.y.} = \begin{bmatrix} \dot{U}_1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$
(3.82)

Тогда

$$A' \underbrace{A_{0} \underbrace{Y_{B}} A_{0}^{T}}_{\underline{Y}} \dot{U}_{6.y.} = \\ = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \underbrace{Y_{1}}_{1} & -\underbrace{Y_{2}}_{2} & 0 & 0 \\ -\underbrace{Y_{1}}_{1} & \underbrace{Y_{1}}_{1} + \underbrace{Y_{2}}_{2} & -\dot{k}\underbrace{Y_{2}}_{2} & 0 \\ 0 & -\dot{k}\underbrace{Y_{2}}_{2} & \dot{k}^{2}\underbrace{Y_{2}}_{2} + \underbrace{Y_{3}}_{3} & -\underbrace{Y_{3}}_{3} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{U}_{1} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \\ = \begin{bmatrix} -\underbrace{Y_{1}}_{0} & \underbrace{Y_{1}}_{1} + \underbrace{Y_{2}}_{2} & -\dot{k}\underbrace{Y_{2}}_{2} & 0 \\ 0 & -\dot{k}\underbrace{Y_{2}}_{2} & \dot{k}^{2}\underbrace{Y_{2}}_{2} + \underbrace{Y_{3}}_{3} & -\underbrace{Y_{3}}_{3} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{U}_{1} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\underbrace{Y_{2}}_{0} \dot{U}_{1} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \\ \begin{bmatrix} -\underbrace{Y_{2}}_{0} \dot{U}_{1} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \\ \begin{bmatrix} -\underbrace{Y_{2}}_{0} \dot{U}_{1} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \\ \begin{bmatrix} -\underbrace{Y_{2}}_{0} \dot{U}_{1} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \\ \begin{bmatrix} -\underbrace{Y_{2}}_{0} \dot{U}_{1} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \\ \begin{bmatrix} -\underbrace{Y_{2}}_{0} \dot{U}_{1} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \\ \begin{bmatrix} -\underbrace{Y_{2}}_{0} \dot{U}_{1} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \\ \begin{bmatrix} -\underbrace{Y_{2}}_{0} \dot{U}_{1} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \\ \begin{bmatrix} -\underbrace{Y_{2}}_{0} \dot{U}_{1} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \\ \begin{bmatrix} -\underbrace{Y_{2}}_{0} \dot{U}_{1} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \\ \begin{bmatrix} -\underbrace{Y_{2}}_{0} \dot{U}_{1} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \\ \begin{bmatrix} -\underbrace{Y_{2}}_{0} \dot{U}_{1} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \\ \begin{bmatrix} -\underbrace{Y_{2}}_{0} \dot{U}_{1} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \\ \begin{bmatrix} -\underbrace{Y_{2}}_{0} \dot{U}_{1} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \\ \begin{bmatrix} -\underbrace{Y_{2}}_{0} \dot{U}_{1} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \\ \begin{bmatrix} -\underbrace{Y_{2}}_{0} \dot{U}_{1} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \\ \begin{bmatrix} -\underbrace{Y_{2}}_{0} \dot{U}_{1} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \\ \begin{bmatrix} -\underbrace{Y_{2}}_{0} \dot{U}_{1} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \\ \begin{bmatrix} -\underbrace{Y_{2}}_{0} \dot{U}_{1} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \\ \begin{bmatrix} -\underbrace{Y_{2}}_{0} \dot{U}_{1} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \\ \begin{bmatrix} -\underbrace{Y_{2}}_{0} \dot{U}_{1} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \\ \begin{bmatrix} -\underbrace{Y_{2}}_{0} \dot{U}_{1} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \\ \begin{bmatrix} -\underbrace{Y_{2}}_{0} \dot{U}_{1} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \\ \begin{bmatrix} -\underbrace{Y_{2}}_{0} \dot{U}_{1} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \\ \begin{bmatrix} -\underbrace{Y_{2}}_{0} \dot{U}_{1} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \\ \begin{bmatrix} -\underbrace{Y_{2}}_{0} \dot{U}_{1} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \\ \begin{bmatrix} -\underbrace{Y_{2}}_{0} \dot{U}_{1} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \\ \begin{bmatrix} -\underbrace{Y_{2}}_{0} \dot{U}_{1} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \\ \begin{bmatrix} -\underbrace{Y_{2}}_{0} \dot{U}_{1} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \\ \begin{bmatrix} -\underbrace{Y_{2}}_{0} \dot{U}_{1} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \\ \begin{bmatrix} -\underbrace{Y_{2}}_{0} \dot{U}_{1} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \\ \begin{bmatrix} -\underbrace{Y_{2}}_{0} \dot{U}_{1} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \\ \begin{bmatrix} -\underbrace{Y_{2}}_{0} \dot{U}_{1} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \\ \begin{bmatrix} -\underbrace{Y_{2}}_{0} \dot{U}_{1} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \\ \begin{bmatrix} -\underbrace{Y_{2}}_{0} \dot{U}_{1} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \\ \begin{bmatrix} -\underbrace{Y_{2}}_{0} \dot{U}_{1} \\$$

77

Аналогично, получаем вектор токов нагрузки:

$$\sqrt{3} \cdot \mathbf{A}' \dot{I}_{\mathrm{H}} \tag{3.85}$$

Если записать систему уравнений для линейных напряжений, то она будет иметь вид:

$$A\underline{Y}_{B}A_{0}^{T}\dot{U} = -A'A_{0}\underline{Y}_{B}A_{0}^{T}\dot{U}_{6.y.} - A'\sqrt{3}\dot{I}_{H}$$
(3.86)

В упрощенном виде это будет представлено следующим образом:

$$\underline{Y}\dot{U} = -A'(\underline{Y}_{0}\dot{U}_{6.y.} - \sqrt{3}\dot{I}_{H})$$
(3.87)

Решением уравнения является

$$\dot{U} = -\underline{Y}^{-1}(\underline{Y}_{0}\dot{U}_{6.y.} - \sqrt{3}\dot{I}_{H})$$
(3.88)

Система будет представлять из себя СЛАУ, если вектор  $\dot{I}_{\rm H}$  содержит лишь постоянные значения

Когда нагрузки заданы как S=const, то решение может быть найдено при помощи итерационного процесса.

Необходимо задать потенциалы узлов, посчитать токи, найти решение системы уравнений и выполнять процесс уточнения токов до момента нахождения необходимых условий сходимости.

Если топология схемы не меняется, то можно 1 раз определить  $\underline{Y}^{-1} = \underline{Z}$ и проводить итерационный процесс просто за счет умножения  $\underline{Z}$  на вектор токов.

Именно поэтому метод называется методом <u>Z</u> – матрицы.

Теперь рассмотрим решение системы линейных алгебраических уравнений, заданной в комплексных числах.

Для быстрого и эффективного решения СЛАУ при помощи вычислительной техники применяется следующий прием.

СЛАУ имеет вид:

$$Y\dot{U} = -\dot{I} \tag{3.89}$$

Если рассмотреть процесс умножения проводимости на напряжение, то мы получим

$$\underline{Y}_{km}\dot{U}_{m} = (G_{km} + jB_{km})(U_{m_{Re}} + jU_{m_{Im}}) = G_{km}U_{m_{Re}} - B_{km}U_{m_{Im}} + j(G_{km}U_{m_{Im}} + B_{km}U_{m_{Re}}).$$
(3.90)

В этом выражении можно увидеть закономерность и переписать СЛАУ в блочном виде:

$$\begin{bmatrix} G & -B \\ B & G \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} U_{Re} \\ U_{Im} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -I_{Re} \\ -I_{Im} \end{bmatrix},$$
(3.91)

где *G* – блочная матрица активных собственных и взаимных проводимостей;

В – блочная матрица реактивных собственных и взаимных;

*U<sub>Re</sub>* – блочный вектор мнимых составляющих напряжений;

*U<sub>Im</sub>* – блочный вектор мнимых составляющих напряжений;

*I<sub>Re</sub>* – блочный вектор действительных составляющих токов в узлах;

 $I_{Im}$  – блочный вектор мнимых составляющих токов в узлах.

Данный подход также описан в [174] и применяется для упрощения расчётов. Он позволяет применить стандартные алгоритмы решения СЛАУ в действительных числах без необходимости написания специальных функций по работе с комплексными числами, которые несут за собой дополнительные расходы вычислительных ресурсов.

Рассмотрим ряд особенностей метода:

1. Он позволяет эффективно работать с нагрузками, которые заданы как в виде постоянных импедансов, так и источников тока, так и фиксированных мощностей. В последнем случае расчёт становится

итерационным в связи с необходимостью пересчёта токов нагрузок. При этом алгоритм может выглядеть следующим образом:

• В начале расчёта задаём номинальные напряжения в узлах нагрузки с нулевым фазовым углом;

• Вычисляем токи нагрузок по мощностям и напряжениям в узлах;

• Выполняем расчёт;

• Пересчитываем токи нагрузок по новым напряжениям и повторяем расчёт до достижения критерия сходимости.

В качестве критерия сходимости имеет смысл использовать ток небаланса в узле. При снижении квадратичной нормы небаланса токов в узлах ниже предельного значения можно остановить расчёт. Предельное значение следует выбирать в зависимости от порядка значений мощностей нагрузок и генерации, которые присутствуют в модели.

2. Возможность ускорения расчёта за счёт однократного вычисления матрицы импедансов Z и пересчёта токов. Данное свойство является ключевым при расчёте квазиустановившихся режимов. При сохранении топологии сети в течение длительного времени расчёт матрицы Z требуется только один раз, после чего расчёт режима для очередного момента времени производится за счёт итерационного уточнения матрицы задающих токов узлов и умножения матрицы Z на эту матрицу.

### 3.2.2.3 Принцип построения модели СТП со звеном постоянного тока в СЭСН

При построении модели СТП со звеном постоянного тока с НЭ в СЭСН был принят итерационный подход на основе расчета по методу Z-матрицы. Данный выбор характеризуется тем, что метод Z-матрицы имеет преимущества при расчетах квазиустановившихся режимов (серии режимов) для сетей с постоянной или мало изменяющейся топологией в процессе времени моделирования в гибридных сетях переменного–постоянного тока. В данном случае предлагается производить расчет от конечного потребителя в обратном направлении к питающему центру. При этом используется принцип «диакоптики», который подразумевает расчет сложных электротехнических цепей по частям. Данный метод также являются частью подхода, который называется «Иерархические модели» [105].

В данной задаче можно применить базовую часть данного метода. Сеть разрывается в определённом узле. В вышестоящей части сети связь с другой частью осуществляется за счёт подключения нагрузки, а в нижестоящей узел становится балансирующим.

Аналогичный подход нужно применить к узлам, где осуществляется связь между сетями переменного и постоянного тока. Это ввод выпрямителя на стороне переменного тока и ввод инвертора на стороне постоянного тока. Данные фрагменты программно соединяются через уравнения связи.

На примере выпрямителя уравнениями связи обычно называют приближённые соотношения, которые описывают связь между:

- Действующим значением напряжения на вводе выпрямителя и средним значением выпрямленного напряжения на выводе выпрямителя;
- Действующим значением тока на вводе выпрямителя и средним значением выпрямленного тока на выводе выпрямителя.

Все сети, которые получены в результате применения диакоптического метода построения иерархических моделей рассчитываются независимо и параллельно. После каждого расчёта происходит уточнения граничных значений напряжения, ток и мощности.

Например, для сети с каскадом сеть переменного тока/выпрямитель/сеть постоянного тока с накопителем энергии/инвертор/сеть переменного тока собственных нужд расчёт будет происходить следующим образом:

При ходе от конечного потребителя, первоначально оцениваются токи потребителя и уровень напряжения на шинах 0,4 кВ (рисунок  $3.15a, \delta$ ). Далее оцениваются токи на стороне постоянного тока (от шин постоянного тока до

инвертора) и уровень напряжения на шинах постоянного тока. В следующем каскаде оцениваются токи на стороне переменного тока между выпрямителем и трансформатором, а также соответствующий уровень напряжения. И так далее до источника питания. В результате описанного расчета появляется первое приближение уровня напряжения на шинах 10(20) кВ. Далее производится обратный (традиционный) расчет от источника к потребителю, через все те же уравнения связи, с определением токов потребителя с уже известным уровнем напряжения на источнике в первом приближении. Затем процесс повторяется до достижения критерия сходимости режима. В качестве такого критерия можно взять квадратичную норму небаланса по току.



Рисунок 3.15 – Структурная схема расчетной цепи (а) и схема итерационного расчета (б)

#### 3.2.3 Разработка имитационной модели СТП метрополитена

Для изучения электротехнических процессов и взаимных влияний друг на друга потребителей тягового и нетягового характера в программном комплексе ЕТАР была создана имитационная модель СТП [127, 128]. Особенностью данной модели является то, что она в едином комплексе учитывает тяговую нагрузку с участком тяговой сети постоянного тока 825В, по которому курсируют поезда, систему внешнего электроснабжения 10 кВ (раздел 3.1), а также потребители собственных нужд 0,4 кВ, влияние на которые оказывают первые две системы.

На рисунке 3.16 представлена мнемосхема исследуемой СТП из среды разработчика программного комплекса, на которой отражены все электроэнергетические системы обеспечения движения поездов И безопасности пассажиров в обобщенном виде. Все потребители собственных нужд, описанные выше, питаются от трех трансформаторов, на схеме, (см. освещения рисунок 3.16) это: трансформатор (TCH-1), моторный трансформатор (ТМ-1) и трансформатор СЦБ (СЦБ-1).

На рисунках 3.17 – 3.22 представлена модель исследуемой СТП в детализованном виде.



Рисунок 3.16 – Укрупненная модель СТП с собственными нуждами, участком СТЭ и укрупненной системой внешнего электроснабжения

Наиболее ответственные и уязвлённые, по качеству электроэнергии, потребители – это потребители «моторные» (эскалаторы, вентиляция, дренаж, водозапорные ворота). Именно в отношении этих потребителей в первую очередь проводились исследования.

В общей сложности в модель, в качестве потребителей собственных нужд было заложено свыше 60 элементов. Основные ответственные потребители моторного характера сведены в таблицу 3.1.

N⁰			Тип	Мощность, Частота		Электро-	
п/п	Наименование	Тип агрегата	электродвигателя	кВА Гц		уснановка	
1	Насос	ΦΓ 51/58	AO2-1-2	22	3000	СУ-857	
2	Вентилятор	Ц4-70№4105ДМ	A41-04-2	1,1	1500	СУ-857	
3	Насос	СД 80/32	AO2-71-2	15	1450	СУ-856	
4	Hacoc	СД 80/32	AO2-71-2	15	1450	СУ-856	
5	Вентилятор	Щ4-70№3	АОЛ2-21-4	1,1	2850	СУ-856	
6	Насос	ΦΓ 51/58	AO2-71-2	2,2	3000	СУ-855	
7	Насос	ΦΓ 51/58	AO2-71-2	2,2	3000	СУ-855	
8	Hacoc	ΦΓ 51/58	AO2-71-2	22	3000	СУ-854	
9	Вентилятор	Ц4-70-4	A41-05-2	1,1	1500	СУ-854	
10	Насос	Д200-90	A250S2У3№10	75	3000	ОДП-886	
11	Hacoc	5MB-4x2	A250S2У3№12	55	1500	ОДП-886	
12	Вентилятор	Щ4-70№3				ОДП-886	
13	Hacoc	Д200-90	A250S2Y3	75	3000	ОДП-886	
14	Насос	Д200-90	A250S2У3№10	55	1500	ОДП-882	
15	Hacoc	Д200-90	A250S2У3№12	75	3000	ОДП-882	
16	Hacoc	Д200-90	A250S2У3№12	75	3000	ОДП-882	
17	Вентилятор			0,27		ОДП-882	
18	Hacoc	ΦΓ 57.5/9.5	4A100L-4	4	1500	МДП-885	
19	Насос	514B4x2 55прб	AO2-51-4	7,5	1500	МДП-885	
20	Вентилятор	Щ4-70 №3				МДП-885	
21	Hacoc	ΦΓ 57.5/9.5	4A100L-4	4	1500	МДП-883	
22	Hacoc	ФВ 81/18б	AO2-51-4	7,5	1500	МДП-883	
23	Вентилятор	ВОМД-24А		75	585	ВШ-847	
24	Вентилятор	ВОМД-24АЭ		75	585	ВШ-847	
25	Вентилятор	ВОМД-24А	АОП2-98-8	55	730	ВШ-846	
26	Вентилятор	ВОМД-24	АОП2-98-8	5	730	ВШ-846	
27	Вентилятор	ВЦ14-46№6.3	АИР160М8У3	11	730	Вестибюль	
28	Вентилятор	BP80-75-5	АИР90L4У2	2,2	1380	Вестибюль	
29	Вентилятор	BP80-75-5	АИР90L4У2	2,2	1380	Вестибюль	
30	Вентилятор	Щ4-70№4	4A71A4	0,55	1370	Вестибюль	
31	Вентилятор	Щ4-70№2.5	4AA56A4	0,12	1400	Вестибюль	
						выт. Из	
32	Вентилятор	Щ4-70№2.5	АОЛ2-21-2	0,4	2800	ГСМ	
33	Вентилятор	Ц14-46№4	AO2-41-4	4	1430	Вестибюль	
34	Вентилятор	Bp86-77-3.15	АДМ80А2У3	1,5	2850	Вестибюль	
35	Вентилятор	Ц4-70№4	4A71B4	0,75	1370	Вестибюль	
36	Вентилятор	Ц4-70№2.5	4АЛ56А4 0,12		1400	Вестибюль	
37	Вентилятор	Ц14-46№8	AO2-81-8	30	730	Вестибюль	
38	Вентилятор	Ц14-46№6.3	AO2-52-8	5,5	725	BT3-2	
39	Вентилятор	Ц4-70№2.5	4AA56A4	0,12	1400	Вестибюль	
40	Вентилятор	Щ4-70№3.15	4AA63A4	0,27 140		Вестибюль	
41	Эскалатор		Аинкем355А10 уз	110	582	Э1	
42	Эскалатор		Аинкем355А10 уз	110	582	Э2	

Таблица 3.1 – Основные моторные потребители в модели СТП



Рисунок 3.17 – Модель тяговой части СТП и участком тяговой сети



Рисунок 3.18 – Детальная модель системы электроснабжения собственных нужд СТП



Рисунок 3.19 – Детальная модель системы электроснабжения собственных нужд СТП (продолжение)



Рисунок 3.20 – Детальная модель системы электроснабжения собственных нужд СТП (продолжение)



Рисунок 3.21 – Детальная модель системы электроснабжения собственных нужд СТП (продолжение)



Рисунок 3.22 – Детальная модель системы электроснабжения собственных нужд СТП (продолжение)

Для разработки цифровой модели использовалась программа ЕТАР версии 18.1.1. С помощью данного программного комплекса, как уже упоминалось, были синтезированы в одной мнемосхеме цепи всех уровней электроснабжения, а именно: разветвленная система первичного электроснабжения 10 кВ, система тягового электроснабжения постоянного тока 825В и, более детально, схемы щитов электроснабжения ~380В и ~220В собственных нужд исследуемой СТП вплоть до конечного моторного потребителя. Каждому элементу, трансформатору, или кабелю были заданы свои параметры, соответствующие реальным схемам и спецификациям.

Для созданной модели можно создавать неограниченное количество наборов расчётных условий. Это повышает вариативность расчётов. Результаты расчёта записываются в выходной отчёт. Их также может быть множество.

Модель позволяет переключаться между различными состояниями схемы, что приводит к изменению некоторых данных элементов цепи, например нагрузок, для учёта всех режимов работы цепи изначально задаются ряд дополнительных параметров.

Результаты имитационного моделирования электроснабжения устройств собственных нужд СТП, в существующих эксплуатационных условиях Московского метрополитена, представлены в разделе 4 – Имитационное моделирование работы СТП с НЭ.

## 3.2.4 Разработка имитационной модели СТП со звеном постоянного тока и НЭ в СЭСН

Следующим этапом исследований было создание аналогичной комплексной модели, но уже с предлагаемым звеном постоянного тока (ЗПТ) СТП [129]. Следует отметить, что новая исследуемая схема отличается от предыдущей только врезкой ЗПТ между трансформаторами ТМ и трехфазной шиной 380В (рисунок 3.23). На представленной мнемосхеме для каждого

трансформатора добавлены выпрямители, общая шина постоянного тока с АБ и инверторы, подключенные к шинам трехфазного напряжения 380В.



Рисунок 3.23 – Детальная модель системы электроснабжения собственных нужд СТП со ЗПТ (исходный прототип на рис. 3.18)

Как уже отмечалось, результаты имитационного моделирования собственных нужд СТП, в существующих эксплуатационных условиях, приведены в 4 разделе.

### 4 ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ СТП С НЭ В СИСТЕМЕ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ СОБСТВЕННЫХ НУЖД

При имитационном моделировании исследовались два варианта – первый при штатной работе СТП и второй – при тех же условиях работы поездов и потребителей собственных нужд, но уже со ЗПТ и НЭ в составе СТП.

#### 4.1 Результаты моделирования штатной работы СТП метрополитена

Имитационное моделирование всего комплекса СТП в штатной работе показало, что тяговая нагрузка может просаживать напряжение на шинах 10(20) кВ более, чем на 10%. На рисунке 4.1 - 4.2 показаны осциллограммы линейных напряжений на клеммах двигателя в течение 10 минут. Другие потребители нетяговые И возмущения В системе первичного электроснабжения вызывают явную асимметрию напряжения, что так же видно на рисунке 4.2. Данные имитационного моделирования показывают влияние тяговой нагрузки на собственные нужды СТП и хорошо коррелируются, как с данными экспериментальных замеров в СТЭ на стороне постоянного тока 825В, так и с данными замеров на шинах 380В собственных нужд СТП.

На рисунке 4.3 и рисунке 4.4 представлены осциллограммы фазных токов на клеммах двигателя Э1 соответственно в течение 10 минут. При оценке электротехнических процессов и качества электрической энергии у самых крайних потребителей – у двигателей, характер снижения уровня напряжения только усилился. Подобное отклонение качества электрической энергии негативно сказывается на оборудовании ответственных потребителей собственных нужд метрополитена и может привести к выходу из строя.



Рисунок 4.1 – Осциллограммы фазных напряжений на клеммах двигателя в течение 10 минут



Рисунок 4.2 – Осциллограммы фазных напряжений на клеммах двигателя в течение 10 минут (увеличенный фрагмент)



Рисунок 4.3 – Фазные токи двигателя



Рисунок 4.4 – Фазные токи двигателя (увеличенный фрагмент)

96

В таблицу 4.1 сведены показатели качества электроэнергии по напряжению на «моторном» приводе. В данном случае, как средние, так и мгновенные значения отклонения уровня напряжения от номинального превышает допустимые нормы.

Таблица 4.1 – Показатели качества электрической энергии по напряжению у потребителей СТП

Фаза	А	В	С
Среднее напряжение, кВ	0,1812	0,1746	0,1779
Минимальное напряжение, кВ	0,1754	0,1688	0,1725
Отклонение среднего напряжения от номинала, %	21,2	24,1	22,7
Отклонение минимального напряжения от номинала, %	23,7	26,6	25

Помимо оценки качества электроэнергии по напряжению проводилась оценка несимметрии. На рисунке 4.5 представлен график изменения коэффициента несимметрии по обратной последовательности  $K_{2U}$  в функции времени во временном периоде осциллограмм рисунок 4.1 – 4.2. Из рисунка 4.5 видно, что коэффициент несимметрии имеет минимальное значение 2,1% а максимальное значение в 2,4%, что выше допустимых норм.

Результаты компьютерных экспериментов показали необходимость внедрения технических решений по повышению качества электроэнергии и надежности электроснабжения особо ответственных потребителей собственных нужд СТП.



Рисунок 4.5 – коэффициента несимметрии по обратной последовательности К<sub>2U</sub> в функции времени и в период осциллограмм рисунок 4.1 – 4.2

# 4.2 Результаты моделирования работы СТП метрополитена по новой схеме СЭСН со ЗПТ

### 4.2.1 Оценка показателей качества энергии при питании собственных нужд с учетом влияния тяговой нагрузки по новой схеме СЭСН со ЗПТ

Для корректного сравнения результатов имитационного моделирования по старой и новой схеме были выбраны идентичные условия в один и тот же интервал времени. На рисунке 4.6 – 4.7 показаны осциллограммы линейных напряжений на клеммах двигателя в течение тех же 10 минут (как в случае рис. 4.1-4.2), но при питании по новой схеме со звеном постоянного тока и НЭ. Полученные данные имитационного моделирования показывают значительное выравнивание по уровню напряжения и снижение влияния тяговой нагрузки на собственные нужды СТП.

На рисунке 4.8 и рисунке 4.9 представлены соответствующие осциллограммы фазных токов двигателя Э1.

98

Результаты по расчету показателей качества электроэнергии по напряжению на «моторном» приводе сведены в таблицу 4.2. В данном случае, как средние, так и мгновенные значения отклонения уровня напряжения от номинального не превышают допустимые нормы.



Рисунок 4.6 – Осциллограммы фазных напряжений на клеммах двигателя при использовании ЗПТ в течение 10 минут



Рисунок 4.7 – Осциллограммы фазных напряжений на клеммах двигателя при использовании ЗПТ в течение 10 минут (увеличенный фрагмент)



Рисунок 4.8 – Фазные токи двигателя при использовании ЗПТ

100



Рисунок 4.9 – Фазные токи двигателя при использовании ЗПТ

(увеличенный фрагмент)

Таблица 4.2 – Показатели качества электрической энергии по напряжению у потребителей СТП при использовании ЗПТ с НЭ

Фаза	А	В	С
Среднее напряжение, кВ	0,2232	0,2242	0,2223
Минимальное напряжение, кВ	0,2173	0,2182	0,2163
Отклонение среднего напряжения от номинала, %	3,0	2,5	3,4
Отклонение минимального напряжения от номинала, %	4,9	4,5	5,4

Так же, как и в предыдущем компьютерном эксперименте (при штатной схеме питания СН), была произведена оценка коэффициента несимметрии по обратной последовательности  $K_{2U}$  (рисунок 4.10). При использовании ЗПТ с НЭ несимметрия значительно снизилась практически на порядок и минимальное значение составило 0,17%, а максимальное значение составило 0,26%, что значительно ниже нормируемых показателей.

101



Рисунок 4.10 – коэффициента несимметрии по обратной последовательности *К*<sub>2U</sub> в функции времени при использовании ЗПТ и в период осциллограмм рисунок 4.6 – 4.7

# 4.2.2 Оценка показателей качества энергии при питании собственных нужд в аварийном режиме

Под аварийным режимом в данном случае подразумевается кратковременная полная пропажа напряжения на стороне системы первичного электроснабжения 10кВ (имитация реального аварийного случая рис. 1.3 раздел 1.1.2). По более жестким условиям эксперимента (в реальном аварийном случае напряжение пропадало на 2с.), напряжение на шинах СТП 10 кВ пропадает три раза, в течение 2,5 минут по 10 с, 20 с и 30 с соответственно. При этом полностью пропадает и напряжение питания собственных нужд (рисунок 4.11).



Рисунок 4.11 – Напряжение фазы А на клеммах двигателя в аварийном режиме при пропаже напряжения на шинах 10 кВ

Моделирование аварийного режима при использовании ЗПТ с НЭ показал, что пропажа напряжения на шинах 10 кВ СТП не влечет за собой полное отсутствие или сильные провал напряжения на шинах 0,4кВ, так как его поддерживает АБ. При этом питание всех потребителей собственных нужд осуществляется так же от АБ. На рисунке 4.12 и 4.13 представлено напряжение на клеммах двигателя при аварийных режимах с использованием ЗПТ и НЭ. Здесь видно, что даже в случае пропажи напряжения 10кВ на 30с АБ емкостью порядка 600 А\*ч способна держать напряжение на потребителях собственных нужд всего на 1,5-2% ниже номинала. На рисунках 4.14 и 4.15 представлены ток и уровень заряда АБ соответственно.



Рисунок 4.12 – Напряжение фазы А на клеммах двигателя в аварийном режиме при пропаже напряжения на шинах 10 кВ при использовании в схеме питания ЗПТ и НЭ



Рисунок 4.13 – Напряжение фазы А на клеммах двигателя в аварийном режиме при пропаже напряжения на шинах 10 кВ при использовании в схеме питания ЗПТ и НЭ (увеличенный фрагмент)



Рисунок 4.14 – Ток АБ в аварийном режиме при пропаже напряжения на шинах 10 кВ



Рисунок 4.15 – Уровень заряда АБ в функции времени при работе в аварийных режимах при пропаже напряжения на шинах 10 кВ

105

### 4.3 Сравнительная оценка результатов моделирования

Сравнительная оценка результатов моделирования заключается в определении показателей качества электроэнергии при имитационном моделировании без использования ЗПТ с НЭ и с ним. Следует отметить, что в обоих случаях схемы и условия компьютерных экспериментов идентичны.

Оценивались следующие показатели:

- Среднее напряжение;

- Минимальное напряжение;

- Отклонение среднего напряжения от номинала;

- Отклонение минимального напряжения от номинала;

- Улучшение отклонения средних напряжения от номинала;

- Улучшение отклонений минимальных напряжения от номинала;

- Коэффициент несимметрии по обратной последовательности минимальный;

- Коэффициент несимметрии по обратной последовательности максимальный;

- Коэффициент несимметрии по обратной последовательности средний;

- Улучшение коэффициента несимметрии.

Сравнительные обобщенные данные по показателям качества электроэнергии сведены в таблицы 4.3 и 4.4.

Таблица 4.3 – Разница показателей качества электрической энергии по напряжению у потребителей СН СТП с учетом тяговой нагрузки при использовании ЗПТ с НЭ

Фаза	без ЗПТ с НЭ		со ЗПТ и НЭ				Эффект		
Ψubu	А	В	C	A	В	С	А	В	C
Среднее напряжение, кВ	0,1812	0,1746	0,1779	0,2232	0,2242	0,2223			
Минимальное напряжение, кВ	0,1754	0,1688	0,1725	0,2173	0,2182	0,2163			
Отклонение среднего напряжения от	21,2 24,1	24.1	22.7	3.0	2.5	34			
номинала, %		,,	5,0	-,0	5,1				
Отклонение минимального напряжения	23.7	26.6	25	4.9	4.5	5.4			
от номинала, %	,	_0,0		. , , ,	.,e				
Улучшение отклонения средних							85.9	90.0	85.0
напряжения от номинала, %							,	, ,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,	,.
Улучшение отклонений минимальных							79.3	83.1	78.4
напряжения от номинала, %							, , , , 0	,1	, 3, 1

Таблица 4.4 – Разница показателей качества электрической энергии по несимметрии у потребителей СН СТП с учетом тяговой нагрузки при использовании ЗПТ с НЭ

Покаралани	без ЗПТ	со ЗПТ	Эффект	
Показатель	с НЭ	и НЭ	(улучшение)	
Коэффициент несимметрии по обратной		o 1 <b>-</b>	92	
последовательности минимальный, %	2,1	0,17		
Коэффициент несимметрии по обратной	2.1	0.00	89	
последовательности максимальный, %	2,4	0,26		
Коэффициент несимметрии по обратной	0 1 5 1	0.01	0.0	
последовательности средний, %	2,151	0,21	90	
## 5 ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЗПТ С НЭ В СИСТЕМЕ СОБСТВЕННЫХ НУЖД СТП МЕТРОПОЛИТЕНА

При оценке технико-экономического эффекта от использования ЗПТ с HЭ на СТП метрополитена учитывались стоимостные показатели дополнительного оборудования, влияние дополнительной нагрузки на срок AБ, службы существующей показатели дополнительных потерь электроэнергии, а так же факторы повышения надежности и безопасности работы ответственных потребителей собственных нужд подстанции.

### 5.1 Оценка стоимости капитальных затрат на модернизацию системы электроснабжения собственных нужд (СЭСН) СТП

Основным дополнительным оборудованием СЭСН со ЗПТ считаем два выпрямителя, дополнительные элементы к существующей АБ СТП в количестве 120 штук и два инвертора. Произвести оценку капитальных затрат на основное оборудование ( $3_{\kappa an}^{snm}$ ) можно по следующему выражению:

$$3^{3nm}_{\kappa an} = 3^B_{\kappa an} \cdot 2 + 3^M_{\kappa an} \cdot 2 + 3^{AE}_{\kappa an} \cdot \left(\frac{\Delta U}{U_{A\mathcal{P}}}\right) - 3^{mp.mM}_{\kappa an}, \qquad (5.1)$$

где  $3^{B}_{\kappa an}$  – капитальные затраты на выпрямительный агрегат;

*З*<sup>*U*</sup><sub>*кап*</sub> – капитальные затраты на инверторный агрегат;

 $3^{AB}_{\kappa an}$  – капитальные затраты на необходимую часть АБ (рассчитывается из отношения дополнительного уровня напряжения АБ ( $\Delta U$ ) к общему уровню напряжения аккумулирующего элемента ( $U_{AO}$ );

З<sup>*mp.mм*</sup><sub>*кап*</sub> – капитальные затраты на резервный моторный трансформатор.

Обзор стоимости дополнительного оборудования в доступных источниках [158] позволил оценить капитальные затраты на модернизацию (таблица 5.1). Общая стоимость основного дополнительного оборудования ЗПТ с НЭ будет составлять порядка 17441,4 тыс. рублей.

№ п/п	Наименование	Количество (шт.)	Стоимость (рубл./шт.)	Общая стоимость (рубл.)
1	Выпрямительный агрегат	3	2375000	7125000
2	АБ	120	14720	1766400
3	Инверторный агрегат	3	2850000	8550000
	17441400			

Таблица 5.1 – Капитальные затраты на модернизацию СТП

#### 5.2 Оценка дополнительных затрат от использования ЗПТ

К дополнительным затратам можно отнести эксплуатационные затраты на новое оборудование, потери электроэнергии в промежуточных устройствах (в сравнении с традиционной схемой СЭСН), а также затраты от влияния на существующую АБ в новых условиях эксплуатации.

Эксплуатационные затраты нового оборудования грубо можно оценить следующим образом:

- затраты на выпрямительные и инверторные агрегаты – 0,5% в год от капитальных затрат, что составляет прядка 78,4 тыс. рублей в год;

- затраты на дополнительные элементы АБ – 2% в год от капитальных затрат, что составляет прядка 35,33 тыс. рублей в год.

Дополнительные затраты на потери энергии в промежуточных устройствах, по сравнению с традиционной схемой СЭСН можно оценить следующим образом:

1. Затраты на потери электроэнергии в выпрямительных и инверторных агрегатах (*З*<sub>*BU*</sub>):

$$3_{BH} = \Delta A_{BH} * C_{\mathcal{F}} = A_{BH} * (1 - \eta_{BH}) * C_{\mathcal{F}}, \qquad (5.2)$$

где  $\Delta A_{BH}$  – потери электроэнергии в выпрямительных и инверторных агрегатах;

Сэ – стоимость электроэнергии;

*А*<sub>ВИ</sub> – энергия, проходящая через выпрямительные и инверторные агрегаты;

*η*<sub>ВИ</sub> – КПД выпрямительных и инверторных агрегатов соответственно.

Величина энергии, затрачиваемая на собственные нужды СТП можно оценить из имитационного моделирования и экспериментальных замеров. Для случая мощной СЭСН СТП при учете графика работы, согласно экспериментальным замерам в течении 21 часа, искомая величина составила порядка 2300000 кВ\*ч в год.

Современные силовые полупроводниковые приборы имеют КПД порядка 0,99.

Стоимость электроэнергии в метро на 2022 год составила 5,32 рублей за кВт\*ч.

2. Затраты на потери электроэнергии в АБ при зарядно-разрядном цикле (*З*<sub>*AБ*</sub>):

$$\mathcal{B}_{AB} = \Delta A_{AB} * C \mathfrak{I} = A_{AB} * (1 - \eta_{AB}) * C \mathfrak{I}, \tag{5.3}$$

где  $\Delta A_{AB}$  – потери электроэнергии в АБ;

 $A_{AB}$  – энергия, проходящая через АБ;

 $\eta_{AB}$  – КПД АБ.

Следует отметить, что энергия, обращаемая через НЭ, разделяется два типа – при штатном и аварийном режимах. При аварийном режиме (кратковременной пропадании или сильном аварийном провале напряжения) АБ отдает энергию с большей мощностью, но в пределах 2-5 секунд (см. пункт 1.1.2). При этом аварийные режимы случаются редко. В рабочем режиме энергия, для сглаживания провалов напряжения от тяговой нагрузки, через АБ проходит постоянно, но с малой мощностью (см. пункт 1.1.1). Величину искомых величин энергии, проходящей через НЭ, можно также определить по результатам имитационного моделирования и экспериментальных замеров. Оценку КПД работы АБ следует производить для каждого режима в отдельности, т.к. КПД АБ зависит от мощности зарядно-разрядного цикла, а также глубины разряда. В данном случае КПД АБ в рабочем режиме, в виду невысокой мощности и крайне малой степени разряда можно принять порядка 0,995, а при аварийном режиме 0,988.

Таким образом, общие эксплуатационные затраты на дополнительное оборудование (З<sup>Год</sup><sub>экспл</sub>) можно оценить по следующему выражению:

$$3_{\mathfrak{s}\kappa cn\pi}^{\Gamma o\partial} = 3_{\mathfrak{s}\kappa cn\pi}^{B,H,A} + 3_{\Delta A}^{B,H,A} = \left(3_{\kappa an}^{B,H} \cdot K_{\mathfrak{s}\kappa cn\pi}^{B,H} + 3_{\kappa an}^{A} \cdot K_{\mathfrak{s}\kappa cn\pi}^{A}\right) + \left(A_{B,H}^{\Gamma o\partial} \cdot \left(1 - \eta_{B,H}\right) + A_{A}^{\Gamma o\partial} \cdot \left(1 - \eta_{A}\right)\right) \cdot C_{\mathfrak{I}}$$

$$(5.4)$$

где  $3^{B,U,A}_{_{3\kappa cn\pi}}$  – эксплуатационные затраты на обслуживание выпрямителя, инвертора и АБ;

*З*<sup>*B,И,А*</sup><sub>*DA*</sub> – эксплуатационные затраты, связанные с потерями энергии в выпрямителях, инверторах и АБ;

*З*<sup>*B,U*</sup><sub>экспл</sub> – эксплуатационные затраты на обслуживание выпрямителя и инвертора;

*К*<sup>*B,И*</sup><sub>*экспл*</sub> – коэффициент эксплуатационных затрат на обслуживание выпрямителя и инвертора, привязанный к капитальным затратам данного оборудования (грубо принимается равным 0,5%);

 $3^{A}_{_{3\kappa cnn}}$  – эксплуатационные затраты на обслуживание АБ;

*К*<sup>*A*</sup><sub>экспл</sub> – коэффициент эксплуатационных затрат на обслуживание АБ, привязанный к капитальным затратам данного оборудования (грубо принимается равным 5%);

З<sup>B,U</sup><sub>ДA</sub> – эксплуатационные затраты, связанные с потерями энергии в
 выпрямителях и инверторах;

 $3^{A}_{\Delta A}$  – эксплуатационные затраты, связанные с потерями энергии в АБ;  $3^{B,M}_{\kappa an}$  – капитальные затраты на выпрямитель и инвертор;  $3^{A}_{\kappa an}$  – капитальные затраты на АБ; *А*<sup>Год</sup><sub>*B,И*</sub> – энергия, пройденная через выпрямитель и инвертор в течение года;

 $\eta_{B, U} - K\Pi Д$  выпрямителя и инвертора;

 $A_{A}^{\Gamma o o}$  – энергия, пройденная через АБ в течение года;

 $\eta_A$  – КПД АБ;

*С*<sub>Э</sub> – стоимость электроэнергии.

Результаты оценки общих эксплуатационных затрат дополнительного оборудования при модернизации СТП представлены в таблице 5.2.

No	Наименование	АБ	Выпрямители	Общая
л <u>-</u>	затрат		и инверторы,	стоимость,
11/11	Salpai	рубли в год	рубли в год	рубли в год
1	Эксплуатационные	35330	78400	113 730
	заграты			
2	Затраты на потери	34163	122360	156523
	электроэнергии			
			ИТОГО:	270 253

Таблица 5.2 – Эксплуатационные затраты при модернизации СТП

# 5.3 Оценка технико-экономического эффекта от повышения качества электрической энергии в СЭСН

Оценить стоимость затрат на ликвидацию возможного ущерба от несоответствия качества электрической энергии в системе электроснабжения собственных нужд СТП, при отсутствии данных статистики по отказам в общем доступе, крайне сложно.

На исследуемой СТП были учтены свыше 40 единиц моторной нагрузки различного назначения, включающие в себя моторные приводы эскалаторов, вентиляционных шахт, дренажных систем и прочие. В разделе 1.1 детально представлены возможные электротехнические ущербы для потребителей системы электроснабжения собственных нужд СТП от несоответствия

качества электроэнергии, которые в конечном итоге приводят к снижению срока службы, повышению электромеханических потерь и снижению надежности оборудования.

С учетом проведенных замеров для конкретной исследуемой подстанции метрополитена и оценки времени работы потребителей СН СТП с реальным («плавающим») коэффициентом несимметрии эффект от внедрения новой системы можно оценить следующим образом:

- повышение КПД двигателей – 6%;

- снижение потерь энергии в СЭСН СТП – 7%;

- повышение срока службы оборудования моторных приводов – 16,7%.

Помимо материального ущерба, несоответствие качества энергии может являться причиной травм людей на эскалаторах, затоплению тоннелей, выходу из строя вентиляции, оборудования для управления движением поездов, сигнализации, связи и прочих жизненно необходимых систем, стоимость которых при нарушении их надежного функционала, трудно переоценить.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1) Определены основные показатели качества электроснабжения потребителей собственных нужд метрополитена.

 Определены основные критерии, позволяющие оценить эффективность использования НЭ в составе звена постоянного тока СТП для питания собственных нужд метрополитена.

3) Выполнено синтезирование работы обобщенной имитационной модели систем электроснабжения собственных нужд СТП в СТЭ метрополитена, что позволит воспроизводить все процессы энергообмена между исследуемыми объектами СТЭ, электротехническими устройствами СТП различного уровня напряжения, с учетом возможных возмущений со стороны системы первичного электроснабжения.

 Разработана принципиальная схема ЗПТ с НЭ для использования в СТП метрополитена с целью повышения качества электроснабжения собственных нужд.

5) Показан электротехнический эффект от использования НЭ в составе
 3ПТ, а именно:

 улучшение значения отклонения среднего значения напряжения на клеммах конечного потребителя от номинала (повышение среднего напряжения) с учетом тяговой нагрузки свыше 85% (стало в пределах нормы);

- улучшение значения отклонения минимального значения напряжения на клеммах конечного потребителя от номинала (повышение минимального напряжения) с учетом тяговой нагрузки свыше 78% (стало в пределах нормы);

улучшился на 90% коэффициента несимметрии по обратной последовательности (до величины в 0,26%);

- повышение КПД двигателей СН СТП (составило 6%);

- снижение потерь энергии в СЭСН СТП (составило 7%);

- повышение срока службы оборудования моторных приводов (составило 16,7%).

6) Рекомендуется внедрение НЭ в составе ЗПТ при питании собственных нужд совмещенных тяговых подстанции метрополитенов, что выведет на качественно новый уровень повышение надежности и безопасности работы ответственных потребителей, от которых зависит жизнь и здоровье пассажиров.

7) Перспективой дальнейшей разработки является создание гибридной силовой установки автономного питания, способной объединить в себе функции электроснабжения, как систем собственных нужд СТП, так и системы тягового электроснабжения, что позволит повысить энергобезопасность, энергоэффективность и энергоэкономичность всей электроэнергетической системы метрополитена в целом.

## СПИСОК УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

В диссертации применяется следующий перечень условных обозначений и сокращений:

АБ – Аккумуляторная батарея.

АББЭ – Аккумуляторная батарея большой энергоемкости.

АТДП – Устройство автоматики, телемеханики движения поездов.

АЭ – Аккумулирующий элемент.

БУ – Блок управления.

ВАЗП – Зарядно-подзарядное устройство

ГНЭ – Гибридный накопитель энергии.

ЗПТ – Звено постоянного тока.

ЗУ – Зарядное устройство.

КПД – Коэффициент полезного действия.

НЭ – Накопитель энергии.

ПЗПТ – Промежуточное звено постоянного тока.

СК – Батарея суперконденсаторов.

СОПТ – Система оперативного постоянного тока.

СПЭ – Система первичного электроснабжения.

СТП – Совмещенная тяговая подстанция.

СТЭ – Система тягового электроснабжения.

ТМ – Моторный трансформатор.

ТО – Трансформатор освещения.

ТП – Тяговая подстанция.

ТС – Тяговая сеть.

Тсцб – Трансформатор СЦБ.

УЗП – Устройство зарядно-подзарядных агрегатов.

ЩПТ – Щит постоянного тока.

ЭПС – Электроподвижной состав.

ЭЭС – Электроэнергетическая система.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аксаева, Е.С. Разработка методического подхода для оценивания допустимых перетоков активной мощности в контролируемых линиях электроэнергетических систем в реальном времени [Текст]: диссертация кандидата технических наук: 05.14.02 / Аксаева Елена Сергеевна, 2018.

 Андреев, В.В., Развитие методологии расчета систем тягового электроснабжения [Текст] / В.В. Андреев, В.А. Гречишников, Ю.Н. Король, М.В. Шевлюгин // Железнодорожный транспорт. – 2014. – №8 – С.32–34.

Андреев, В.В. Расчёт интегральных показателей работы разветвленных систем тягового электроснабжения [Текст] / В.В. Андреев, М.В. Шевлюгин, В.А. Гречишников // Электротехника. – 2012. – № 12. – С. 32-36.

4. Андреев, В.В. Расчёт относительной реализуемой мощности трансформатора тяговой подстанции по старению изоляции [Текст] / В.В. Андреев, В.А. Гречишников, Н.Н. Привезенцев, М.В. Шевлюгин // Электротехника. – 2011. – № 8. – С. 46–49.

5. Анохин, Б.А. Анализ уровней несимметрии и отклонений напряжения при питании тяговой нагрузки [Текст] / Б.А. Анохин // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока, 2012. – № 1. – С. 404–407.

6. Анохин, Б.А. Исследование несимметрии и управление параметрами симметрирующих устройств в протяженных электрических сетях с тяговой нагрузкой [Текст]: диссертация ... кандидата технических наук: 05.14.02 / Анохин Борис Анатольевич, 2018

Астахов, Н. В. Вибрации и шум электрических машин [Текст].
 Учебное пособие по курсу Электрические машины. / Н. В. Астахов, В. С. Малышев, В.Т. Медведев, В. Ф. Полухин. – М.: МЭИ, 1984. –84 с.

Астахов, Н. В. Расчёт магнитных вибраций асинхронных двигателей
 [Текст]. Учебное пособие по курсу Электрические машины. / Н. В. Астахов,
 В. С. Малышев, В.Т. Медведев, В.Ф. Полухин. – М.: МЭИ, 1985. – 96 с.

9. Бадёр, М.П., Анализ показателей работы силового оборудования системы тягового оборудования электроснабжения ОАО «РЖД» на основе мониторинга тяговых подстанций в режиме реального времени [Текст] / М.П. Бадёр, В.А. Гречишников, М.В. Шевлюгин, Ю.Н. Король // Электроника и электрооборудование транспорта. – 2011. – № 5–6. – С. 5–8.

10. Бадёр, М.П., Оценка гармонических составляющих тягового тока в системе электроснабжения метрополитена при работе 12–пульсовых выпрямительных агрегатов [Текст] / М.П. Бадёр, В.А. Гречишников, М.В. Шевлюгин, В.Ф. Данг // Электроника и электрооборудование транспорта. – 2016. – № 1. – С. 17–21.

11. Бадёр, М.П. Повышение качества электрической энергии в системе тягового электроснабжения метрополитена с использованием 12–пульсовых преобразовательных агрегатов [Текст] / М.П. Бадёр, П.Ф. Бестемьянов, В.А. Гречишников, М.В. Шевлюгин, В.Ф. Данг // Практическая силовая электроника. – 2016. – № 2 (62). – С. 38–43.

12. Банных, П.Ю. Развитие потоковой модели установившихся режимов электрических сетей в трехфазном и однолинейном представлении [Текст] : диссертация ... кандидата технических наук : 05.14.02 / Банных Павел Юрьевич, 2020.

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

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

15. Баранов, Л.А. Показатели работы стационарного накопителя энергии на тяговых подстанциях Московского метрополитена [Текст] / Л.А. Баранов, В.А. Гречишников, А.В. Ершов, М.Д. Родионов, М.В. Шевлюгин // Электротехника. – 2014. – № 8. – С. 18–21.

16. Бардушко, В.Д. Моделирование новых систем тягового электроснабжения [Текст] / В.Д. Бардушко, В.П. Закарюкин, А.В. Крюков // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2006. – № 6 (10). – С. 56–62.

17. Бей, Ю.М. Тяговые подстанции [Текст]. Учебник для вузов ж.–д. транспорта. / Ю.М. Бей, Р.Р. Мамошин, В.П. Пупынин, М.Г. Шалимов. – М.: Транспорт, 1986. – 319 с.

18. Бергер, Л.Я. Асинхронный двигатель в анормальных режимах / Л. Я. Бергер, Л. Н. Грузов, А. С. Коган, Е. Д. Несковорова. – Л.: ВЭТА, 1938. – 247 с.

19. Бессонов, В.А. Расчет несимметричных режимов работы системы тягового электроснабжения вероятностными методами [Текст]. Учебное пособие / В. А. Бессонов. – Хабаровск : ХабИИЖТ, 1988. – 98 с.

20. Бессонов, Л.А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи [Текст]. – 9–е изд., перераб. и доп. / Л.А. Бессонов. – Москва: Высшая школа, 1996. – 638 с.

21. Борисов, Р.К. Системы оперативного постоянного тока. Необходимость диагностики [Текст] / Р.К. Борисов, С.С. Жуликов, Ю.П. Гусев, А.В. Майоров // Новости электротехники. – 2008. – №4 (52).

22. Бородулин, Б.М. Симметрирование токов и напряжений на действующих тяговых подстанциях переменного тока / Б.М. Бородулин // Вестник ВНИИЖТ, 2003. – № 2 – С. 14–17.

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

24. Бумцэнд, У. Развитие и оптимизация режимов электроэнергетической системы при электрификации железнодорожной магистрали [Текст]: диссертация ... кандидата технических наук: 05.14.02 / Бумцэнд Уянгасайхан, 2018.

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

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

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

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

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

30. Гаев, Д. Внедрение энергосберегающих технологий [Текст] / Д. Гаев,
А. Ершов, Л. Баранов, В. Гречишников, М. Шевлюгин // Мир транспорта. –
2010. – Т. 8. – № 3 (31). – С. 3–8.

31. Голицына, А.Е. Возможности использования суперконденсаторов в электроэнергетических сетях собственных нужд на тяговых подстанциях метрополитена / А.Е. Голицына // Труды Всероссийской научно– практической конференции «Неделя науки – 2017». – 2017. – С. III – 20.

32. Голицына, А.Е. Эффективность использования накопителей энергии в электроэнергетических сетях собственных нужд метрополитена / А.Е.

Голицына, Е.Д. Болотина, А.С. Соловьева // Труды Всероссийской научно– практической конференции «Неделя науки – 2019». – 2019. – С. IX – 29.

33. Гречишников, В.А. Ложные срабатывания защиты кабеля питающих линий в системе тягового электроснабжения метрополитенов [Текст] / В.А. Гречишников, Н.Д. Куров, А.Е Голицына // Электроника и электрооборудование транспорта. – 2018. – № 6. – С. 32–34.

34. Гречишников, В.А. Преобразовательный агрегат ёмкостного накопителя энергии для системы тягового электроснабжения метрополитена [Текст] / В.А. Гречишников, А.И. Подаруев, М.В. Шевлюгин // Электротехника. – 2011. – № 5. – С. 17–22.

35. Гречишников, В.А. Расширение функций разграничения рабочих и аварийных режимов метрополитенов в системе тягового электроснабжения постоянного тока /В.А. Гречишников, Н.Д. Куров, А.Е. Голицына // Труды XIX Всероссийской научно–практической конференции «Безопасность движения поездов». – 2018. – С. III – 4 – III – 6.

36. Гречишников, В.А. Теоретическое обоснование эффективности использования накопителей энергии неуправляемого типа в системе тягового электроснабжения метрополитена [Текст] / В.А. Гречишников, М.В. Шевлюгин // Электроника и электрооборудование транспорта. – 2013. – № 5. – С. 17–19.

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

38. Гуревич, В.И. Защита оборудования подстанций от электромагнитного импульса [Текст]. – Инфра–Инженерия, 2016 г.

39. Гуревич, В.И. Проблемы повышения надежности систем оперативного питания РЗА на постоянном токе [Текст] / В. И. Гуревич // Электроэнергия. Передача и распределение. – 2012. – №2 (11). – С. 70–73.

40. Гусев, Ю.П. Выбор стационарных свинцово-кислотных аккумуляторных батарей для систем оперативного постоянного тока [Текст] /

Ю.П. Гусев, Г.Ч. Чо, Ю.В. Монаков // Энергоэксперт. – №3.– 2015. – С. 48 – 52.

41. Гусев, Ю.П. Обеспечение работоспособности электромагнитных приводов включения выключателей с помощью ионисторов [Текст] / Ю.П. Гусев, Ю.В Монаков., Н.Н. Смотров, Г.Ч. Чо // Энергоэксперт. – 2017. – № 4 – С. 30–32.

42. Гусев, Ю.П. Оценка пульсаций тока в режиме поддерживающего заряда аккумуляторных батарей [Текст] / Ю.П. Гусев, А.Д. Купчинов // Электричество. – 2018. – №7. – С.26–30.

43. Гусев, Ю.П. Оценка технического состояния аккумуляторных батарей электростанций и подстанций в процессе эксплуатации [Текст] / Ю.П. Гусев, Н.М. Дороватовский, А.М. Поляков // Электро. – 2002. – № 5. – С. 34 – 38.

44. Гусев, Ю.П. Применение ионисторов в системах оперативного постоянного тока для сглаживания провалов напряжения [Текст] / Ю.П. Гусев, Н.Н. Смотров, Г.Ч. Чо // Электротехника. – 2017. – № 10 – С. 65–69.

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

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

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

48. Епифанцев, С.Н. Качество электроэнергии: современные требования и их обеспечение в электрических сетях железных дорог [Текст] / С.Н.

Епифанцев, И.В. Жежеленко, В.А. Овсейчук, Г.Г. Трофимов, С.В. Шимко; под ред. Г. П. Кутового. – М.: Эко–Пресс, 2014.

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

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

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

52. Закарюкин, В.П. Качество электроэнергии в линиях электропередачи
«Два провода – рельс» [Текст] / В.П. Закарюкин, А.В. Крюков //
Электрификация транспорта. –2014. – №14. – С.84–90.

53. Закарюкин, В.П. Моделирование систем тягового электроснабжения, оснащенных симметрирующими устройствами [Текст] / В.П. Закарюкин, А.В. Крюков, И.М. Авдиенко // Информационные и математические технологии в науке и управлении. – 2016. – № 4–2. – С. 70–79.

54. Закарюкин, В.П. Сложнонесимметричные режимы электрических систем [Текст] / В.П. Закарюкин, А.В.– Иркутск: Изд–во Иркут. ун–та., 2005. – 273 с.

55. Закарюкин, В.П. Устранение несимметрии в электрических сетях, питающих тяговые подстанции железных дорог [Текст] / В.П. Закарюкин, А.В. Крюков, И.М. Авдиенко // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2016 – № 1 (49) – С. 189–195.

56. Иванов–Смоленский, А.В. Электрические машины [Текст]. В 2–х т. Учебник для вузов. Том 1. – 3–е изд. / А. В. Иванов–Смоленский.– М.: Издательский дом МЭИ, 2006. – 652 с. 57. Каминский, М.Д. Характеристики асинхронных двигателей при асимметрии напряжений [Текст] /М.Д. Каминский, С.Д. Лебедев // Электричество, 1936. – С. 15–16.

58. Карабанов, М.А. Снижение влияния системы тягового электроснабжения на электропитание нетяговых потребителей в моменты подключения преобразовательных агрегатов [Текст] / М.А. Карабанов // Известия Транссиба. – 2011. – №3 (7). – С.58–66.

59. Карташев, И. И. Управление качеством электроэнергии [Текст]. 2–е изд., переработанное и дополненное / И.И. Карташев, В.Н. Тульский, Р.Г. Шамонов, Ю.В. Шаров, В.Ю. Воробьев; под ред. Ю. В. Шарова. – Москва: Издательский дом МЭИ, 2008.

60. Кацай, A.B. Активная загрузка полезная И утилизация рекуперативной энергии бортовых И стационарных накопителей В горэлектротранспорте [Текст] / А.В. Кацай, М.В. Шевлюгин // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. –2022. – № 7. - C. 476–487.

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

62. Кашкаров, А. Ионистор в автономной электрической цепи [Текст] /
 А. Кашкаров // Современная электроника. – 2014. – № 1– С. 38–40.

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

64. Копылов, И.П. Электрические машины [Текст]. Учебник для вузов 4-е изд., испр / И.П. Копылов. – Москва: Высшая школа, 2004. – 607 с.

65. Королев, А.А. Анализ программного обеспечения для моделирования электрификации железных дорог [Текст] / А.А. Королев, Д.С.

Плетнев, М.Н. Белов, Е.В. Голицын, М.А. Воронкова // Наукосфера. – 2022. – № 1–1. – С. 175–181.

66. Костенко, М. П. Электрические машины [Текст]. В 2–х ч. Учебник для студентов высших техн. учеб. заведений. Часть 2. – 3–е изд., перераб. / М.П. Костенко, Л.М. Пиотровский. – Л.: Энергия, 1973. – 648 с.

67. Крюков, А.В. Моделирование режимов трехфазных систем тягового электроснабжения [Текст] / А.В. Крюков, В.П. Закарюкин // В сборнике: Повышение эффективности производства и использования энергии в условиях Сибири. Материалы Всероссийской научно–практической конференции с международным участием. – 2021. – С. 136–142.

68. Кузнецов, В.Г. Электромагнитная совместимость. Несимметрия и несинусоидальность напряжения [Текст] / В.Г. Кузнецов, Э.Г. Куренный, А.П. Лютый; – Донецк: Изд–во «Донбасс», 2005. – 247с.

69. Кузнецов, В.П. Конденсаторы с двойным электрическим слоем (ионисторы): разработка и производство [Текст] /В.П. Кузнецов и др. // Комопоненты и технологии. – 2005. – №6.

70. Кузнецов, В.П. Конденсаторы с двойным электрическим слоем (ионисторы): новые разработки [Текст] /В.П. Кузнецов и др. // Электрическое питание. – 2006. – №2.

71. Куров, Н.Д. Выявления коротких замыканий в контактной сети метрополитена 825 В / Н.Д. Куров, А.Е. Голицына, Е.Д. Болотина // Труды Всероссийской научно–практической конференции «Неделя науки – 2018». – 2018. – С. Ш – 60.

72. Лосев, Ф.А. Повышение устойчивости электротехнических систем объектов нефтяных месторождений с высоковольтными асинхронными двигателями. [Текст]: диссертация ... кандидата технических наук : 05.09.03 / Лосев Федор Алексеевич, 2021.

73. Мамошин, Р.Р. Повышение качества энергии на тяговых подстанциях дорог переменного тока [Текст] / Р.Р. Мамошин. – М.: Транспорт, 1973. – 224 с.

74. Мамошин, Р.Р. Трансформаторы тяговых подстанций с повышенным симметрирующим эффектом / Р.Р. Мамошин, Б.М. Бородулин, А.Я. Зельвянский, А.Ф. Титов // Вестник ВНИИЖТ, 1989. – № 1 – С. 22–24.

75. Мамошин, Р.Р. Электроснабжение электрифицированных железных дорог [Текст]. Учебник для техникумов ж.–д. трансп. / Р.Р. Мамошин, А.Н. Зимаков. – М.: Транспорт, 1980. – 296 с.

76. Манюков, М. Ф. Разработка метода расчёта и исследование магнитных вибраций асинхронного двигателя в динамических режимах работы [Текст]: Дисс. ... канд. техн. наук: 05.09.01 / Манюков Михаил Федорович. – Москва, 1986. – 236 с.

77. Марквардт, К. Г. Электроснабжение электрифицированных железных дорог [Текст]. Учебник для вузов ж.-д. транспорта. / К.Г. Марквардт. – М.: Транспорт, 1982. – 528 с.

78. Машины электрические вращающиеся. Влияние несбалансированных напряжений на рабочие характеристики трехфазных асинхронных двигателей [Текст]: ГОСТ IEC 60034–26–2015.

79. Машкин, А.Г. О повышении качества электрической энергии в точках общего присоединения тяговых подстанций [Текст] / Машкин, А.Г. Федотов Д. Е. // Промышленная энергетика, 2009. – № 9. – С. 42–45.

80. Медведев, В.Т. Влияние несинусоидального и несимметричного напряжения питания на виброакустические характеристики трёхфазных асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором [Текст]: Дисс. ... канд. техн. наук: 05.09.01 / Медведев В.Т. – Москва, 1976. – 162 с.

81. Методика выбора емкости источников электроэнергии для систем постоянного оперативного тока тяговых и трансформаторных подстанций [Текст]: СТО ОАО «РЖД».

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

92. Рентюк, В. Зависимость времени наработки на отказ электролитических конденсаторов от реальных условий их эксплуатации[Текст] / В. Рентюк // «Вестник Электроники». – 2014. – №3

93. Рогов, Г. В. Несимметрия в системах электроснабжения железных дорог // Электроэнергетика глазами молодёжи: науч. тр. IV междунар. науч. – техн. конф., Т.2. – Новочеркасск, 2013. – С. 361–364.

94. Силаев, М.А. Влияние быстрых изменений несимметрии напряжений на вибрационных характеристики асинхронных двигателей [Текст] / М.А. Силаев, В.Н. Тульский, И.И. Карташев //Электротехника. – 2014. – № 6. – С. 43–45.

95. Силаев, М.А. Новые требования к оценке несимметрии напряжения [Текст] / М.А. Силаев, В.Н. Тульский // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: Двадцатая междунар. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов: Тез. докл. В 4 томах. Т. 4. – М.: Издательский дом МЭИ, 2014. – С. 296.

96. Силаев, М.А. Перемежающаяся несимметрия напряжений: влияние на электродвигатели и способы измерения [Текст] / М.А. Силаев, В.Н. Тульский, Д.В. Дворкин // Электроэнергия. Передача и распределение. – 2019 – №3(54). – С. 36–40.

97. Силаев, М.А. Исследование перемежающейся несимметрии напряжений в электрических сетях и ее влияние на режимы работы

двигательной нагрузки [Текст] : диссертация ... кандидата технических наук: 05.14.02 / Силаев Максим Андреевич, 2008.

98. Силаев, М.А., Исследование перемежающейся несимметрии напряжения и разработка способа её измерения [Текст] / М.А. Силаев, В.Н. Тульский // Управление качеством электрической энергии: Сборник трудов международной научно–практической конференции. – М.: Издательство Радуга, 2014. – С. 305–312.

99. Системы оперативного постоянного тока подстанций, технические требования [Текст]: СТО ОАО «ФСК ЕЭС» 56947007–29.120.40.041–2010.

100. Скоморохов, П.И. Повышение эффективности функционирования систем электроснабжения с резкопеременным характером негативных сетевых возмущений [Текст] : диссертация ... кандидата технических наук: 05.09.03 / Скоморохов Павел Игоревич, 2020.

101. Статические выпрямительные преобразователи для системы железнодорожного тягового электроснабжения и функциональные блоки, модули тягового выпрямителя / Каталог – 89 – 2020-00. НИИЭФА-ЭНЕРГО.

102. Стрижиченко, А.В. Оценка влияния коэффициента несимметрии напряжений на нагрев асинхронного двигателя [Текст] / А.В. Стрижиченко, М.Д. Губин // Управление качеством электрической энергии. Сборник трудов Международной научно–практической конференции. М.: 2018. – С. 167–171.

103. Стюхин, В.В. Графеновый суперконденсатор /В.В. Стюхин, Э.В. Лапшин // Труды международного симпозиума «Надежность и качество». – 2011.

104. Субханвердиев, К.С. Использование эффекта каскадного отключения в решении задачи повышения быстродействия защиты тяговых сетей переменного тока [Текст] / К.С. Субханвердиев, К.В. Кулагин, А.Е. Голицына, В.А. Зимаков // Актуальные вопросы развития железнодорожного транспорта : материалы всероссийской научно–практической конференции к

75–летию аспирантуры научно–исследовательского института железнодорожного транспорта. – 2019. – Часть 2. – С. 135 – 140.

105. Суханов, О.А. Иерархические модели в анализе и управлении режимами электроэнергетических систем [Текст] / О.А. Суханов, Ю.В. Шаров – Москва: Издательский дом МЭИ, 2007. – 312 с

106. Тамазов, А.И. Несимметрия токов и напряжений, вызываемая тяговыми нагрузками [Текст] / А.И. Тамазов. – Москва: Транспорт, 1965. – 227с.

107. Тамазов, А.И. Несимметрия токов и напряжений, вызываемая однофазными тяговыми нагрузками [Текст] / А.И. Тамазов. – М.: Транспорт, 1965.–235 с.

108. Тер–Оганов, Э.В. Электроснабжение железных дорог [Текст]. Учеб. для студентов университета (УрГУПС) / Э.В. Тер–Оганов, А.А. Пышкин. – Екатеринбург: Изд–во УрГУПС, 2014. – 432 с.

109. Технико–экономические исследования по построению систем постоянного оперативного тока тяговых подстанций с накопителями электроэнергии: Отчет о НИР (1 этап) / кафедра «Электрические станции»; Руководитель: Ю.П. Гусев, Н.Н. Смотров и др. – № 2066140. – М., 2014. – 71 с.

110. Тимонин, И.А. Разработка рекомендаций по защите систем оперативного постоянного тока от перенапряжений [Текст]: автореф. к. т. н., Нац. исслед. ун–т "МЭИ" / Тимонин И.А. – М., 2013. – 14 с.

111. Тимофеев, Д. В. Исследование несимметричных и несинусоидальных режимов электрических систем при тяговых нагрузках. Дисс. ... канд. техн. Наук / Тимофеев Дмитрий Васильевич. – Москва, 1961. – 168 с.

112. Токарев, Б. Ф. Электрические машины [Текст]. Учеб. пособие для вузов. / Б.Ф. Токарев. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 624 с.

113. Тульский, В.Н. Оценка качества электроэнергии в распределительных электрических сетях [Текст] / В.Н. Тульский, Т.В.

Радилов, В.М. Королев, М.А. Силаев, Е.А. Суворова // Электроэнергия. Передача и распределение. – 2019. – №6(57). – С.118–123.

114. Универсальный измеритель для тяговых подстанций и электроподвижного состава метрополитенов [Текст]: патент на полезную модель RU 43977 U1 / Абрамсон В.М., Минц А.М., Андреев В.В., Гречишников В.А., Клинов В.Ю., Пупынин В.Н., Розанцева С.В., Шевлюгин М.В., Комиссаров Н.Н.; заявитель и патентообладатель Абрамсон В.М., Минц А.М., Андреев В.В., Гречишников В.А., Клинов В.Ю., Пупынин В.Н., 2004131295/22; заявл. 27.10.2004; опубл. 10.02.2005.

115. Устройство накопления электроэнергии для аварийного питания электроподвижного состава [Текст]: патент на полезную модель RU 56736 U1
/ Шевлюгин М.В., Желтов К.С.; заявитель и патентообладатель Шевлюгин М.В., Желтов К.С. – № 2006116186/22; заявл. 12.05.2006; опубл. 10.09.2006.

116. Федоров, Ю. К. Исследование коммутационных перенапряжений и их воздействия на полупроводниковые диоды в цепях оперативного постоянного тока электрических странций и подстанций [Текст]: диссертация ... кандидата технических наук: 05.14.02 / Федоров Юрий Константинович. – М., 1984. – 174 с.

117. Церазов, А.Л. Исследование влияния несимметрии и несинусоидальности напряжения на работу трёхфазных асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором [Текст]: Дисс. ... канд. техн. наук: 05.00.00 / Церазов Александр Леонидович. – Москва, 1963. – 182 с.

118. Чебышева, О. В. Разработка методики расчёта и исследование магнитных вибраций асинхронного двигателя при несинусоидальном напряжении питания [Текст]: Дисс. ... канд. техн. наук: 05.09.01 / Чебышева Ольга Владимировна. – Москва, 1985. – 196 с.

119. Черемисин, В.Т. Снижение провалов напряжения при коммутациях преобразовательных агрегатов на тяговых подстанциях // Транспорт Российской Федерации. – 2011. №3 (34). – С.46–49.

120. Чернов, Ю.А. Электроснабжение электрических железных дорог.Ч.2.: Учебное пособие / Ю.А. Чернов. – М.: МИИТ, 2009. – 166с.

121. Шакиров, В.А. Исследование влияния несимметрии напряжений на работу асинхронных двигателей [Текст] / В.А. Шакиров, А.М. Сыровешкин, О.А. Буянина // Труды Братского государственного университета. Серия: естественные и инженерные науки – развитию регионов Сибири. Братский государственный университет. – 2011. – Том 2. – С. 8–11.

122. Шевлюгин, М.В. Аварийный вывод ЭПС на Московском метрополитене при отсутствии первичного электроснабжения [Текст] / М.В. Шевлюгин, А.Н. Стадников, А.Е. Голицына, И.В. Зеленская // Труды XVIII Всероссийской научно–практической конференции. «Безопасность движения поездов». МИИТ, 2017 – С.VI–15 – VI–16.

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

124. Шевлюгин, М.В. Гибридная система накопления энергии для оперативных сетей постоянного тока тяговых подстанций метрополитена» [Текст] / М.В. Шевлюгин, А.Е. Голицына, С.В. Акимов, В.С. Логинов // Труды XIX Всероссийской научно–практической конференции «Безопасность движения поездов». МИИТ, 2018 – С. III–12.

125. Шевлюгин, М.В. Защита тягового электроснабжения Московского метрополитена от провалов напряжения [Текст] / М.В. Шевлюгин, А.Н. Стадников, А.Е. Голицына // Труды XVII Всероссийской научно– практической конференции «Безопасность движения поездов». МИИТ, 2016 – С. III–22.

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

127. Шевлюгин, М.В. Имитационная модель совмещенной тяговопонизительной подстанции метрополитена [Текст] / М.В. Шевлюгин, Е.Д. Болотина, А.Е. Голицына, Т.З. Сиукаев // В сборнике: Перспективы развития метрополитенов в условиях интенсивного внедрения новых технологий. Инфраструктура и подвижной состав метрополитена. Сборник трудов Международной выставки–конференции. Под общей редакцией Т.В. Шепитько, А.А. Сидракова. – Москва, 2019. – С. 47–52.

128. Шевлюгин, М.В. Интеллектуальные электроэнергетические системы на тяговых подстанциях метрополитена [Текст] / М.В. Шевлюгин, А.Е. Голицына, М.Н. Белов, Д.С. Плетнев // Труды XIX Всероссийской научно–практической конференции «Безопасность движения поездов». МИИТ, 2018 – С. III–13

129. Шевлюгин, М.В. Модель работы звена постоянного тока с накопителем энергии для повышения качества электрической энергии в сетях промышленного назначения [Текст] / М.В. Шевлюгин, А.Е. Голицына // Энергобезопасность и энергосбережение. – 2022. – № 5. – С. 42–48.

130. Шевлюгин, М.В. Модернизация стационарного накопителя энергии на Московском метрополитене [Текст] / М.В. Шевлюгин, А.Н. Стадников, А.Е. Голицына // «Перспективы развития метрополитенов в условиях интенсивного внедрения новых технологий: инфраструктура и подвижной состав». Труды II Международной выставки–конференции «ИНТЕРМЕТРО». МИИТ, 2017– С.87–89.

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

132. Шевлюгин, М.В. Опыт внедрения стационарного накопителя энергии на Московском метрополитене [Текст] / М.В. Шевлюгин, А.Н. Стадников, А.Е. Голицына // «Перспективы развития метрополитенов в условиях интенсивного внедрения новых технологий: инфраструктура и подвижной состав метрополитенов». Труды I международной конференции «Интерметро». – МИИТ, 2015 – С. 125–126.

133. Шевлюгин, М.В. Опыт пуска электроподвижного состава при помощи «накопительных» тяговых подстанций на Московском

метрополитене [Текст] / М.В. Шевлюгин, Д.В. Ермоленко, А.Н. Стадников, А.Е. Голицына // Электротехника. – 2017. – № 11. – С. 75–80.

134. Шевлюгин, М.В. Опытная эксплуатация накопителей энергии неуправляемого типа на тяговых подстанциях московского метрополитена.
[Текст] / М.В. Шевлюгин, А.Е. Голицына, А.Н. Стадников // Электропитание. – 2019. – № 4. – С. 51–60.

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

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

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

138. Шевлюгин, М.В. Повышение надежности оперативных сетей постоянного тока тяговых подстанций метрополитена с помощью гибридных систем накопления энергии [Текст] / М.В. Шевлюгин, А.Е. Голицына, М.Н. Белов // Т.Д. Десятого международного симпозиума «Eltrans 10.0. – С–Петербург, 2019. – С. 96–97.

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

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

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

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

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

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

145. Шевлюгин, М.В. Совершенствование схем электроснабжения собственных нужд совмещенной тяговой подстанции метрополитена [Текст] / М.В. Шевлюгин, Е.Д. Болотина А.Е. Голицына, Т.З. Сиукаев // Перспективы развития метрополитенов в условиях интенсивного внедрения новых, в том числе цифровых технологий. Сборник трудов Международной выставки–конференции «Интерметро–2021». – Москва, 2021. – С. 61–69.

146. Шевлюгин, М.В. Согласование устройств релейной защиты для собственных нужд ТП в программном комплексе ЕТАР / М.В. Шевлюгин, А.Е. Голицына, А.Г. Бутусов // Труды XVI Всероссийской научно–практической

конференции «Безопасность движения поездов». – 2015. – С. II – 138 – II – 139.

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

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

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

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

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

152. Щегловитова, Е.В. Некоторые способы корректировки несимметрии напряжений в сети при влиянии тяговой нагрузки электрифицированных железных дорог переменного тока [Текст] / Е.В.

Щегловитова // Вопросы устойчивого развития общества. Махачкала: Институт развития образования и консалтинга. – 2022. – №1. – С. 189 – 191.

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

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

155. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения [Текст]: ГОСТ 32144–2013 – М.: Стандартинформ, 2014.

156. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Методы измерений показателей качества электрической энергии (Издание с Поправкой) [Текст]: ГОСТ 30804.4.30–2013 (IEC 61000–4–30:2008) – М.: Стандартинформ, 2014. – 57 с.

157. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения [Текст]: ГОСТ 13109–97. – Введ.1999.01.01. – Минск: ИПК Издательство стандартов, 1998. – 35 с.

158. Электронныйресурс[https://zvezda-el.ru/vypryamiteli?\_openstat=ZGlyZWN0LnlhbmRleC5ydTsyOTQ1MzY2OzMxMTQxNTU4Mjk7eWFuZGV4LnJ1OnByZW1pdW0&yclid=12818501186689957887] Дата обращения: 22 ноября 2022 года.

159. Ярошевич, В.В. Проблемы локализации источников искажений электроэнергии и определение вклада подключенных потребителей в искажение или нормализацию качества электроэнергии [Текст] / В.В. Ярошевич, Ю.М. Невретдинов, Г.П. Фастий, А.С. Карпов // Труды Кольского научного центра РАН. – 2010. – №1 (1). – С. 126–138.

160. AC motor capacitors - Part 1: General - Performance, testing and rating- Safety requirements - Guidance for installation and operation IEC 60252-1(2013).

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

162. Andreev, V.V. Integral characteristics of branched tractional powersupply systems / V.V. Andreev, M.V. Shevlyugin, V.A. Grechishnikov // Russian Electrical Engineering. – 2012. – 83(12). – P. 672–675.

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

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

165. Becker, H.I.: Low voltage electrolytic capacitor, U.S.-Patent 280061633./ H.I. Becker, R.A. Rightmire // «Electrical energy storage apparatus», U.S.Patent 3288641.

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

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

168. Bhargava., B. Railway electrification systems and configurations / B
Bhargava // IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, 1999. – Vol. 1. – P.
445—450.

169. Brodskii, Yu.A. Stationary system based on capacitive energy storage units to accumulate energy recuperation of metro electric rolling stock
/ Yu.A. Brodskii, A.I. Podaruev, V.N. Pupynin, M.V. Shevlyugin // Russian Electrical Engineering. – 2008.– 79(7). – P. 385–388.

170. Burchi, G. Estimation of voltage unbalancein power systems supplying high speed Railway / G. Burchi, C. Lazaroiu, N. Golovanov, M. Roscia // Electrical Power Quality and Utilisation, 2005. – Vol. XI. – N2. - P. 113 - 119.

171. Chen, S.L. Traction system unbalance problem. Analysis methodologies / S.L. Chen, R.J. Li, P.H. His // IEEE Trans. on Power Delivery, 2004. –Vol. 19. – №4. – pp. 1877 — 1883.

172. Chen, T.H. Network modeling of traction substations transformers for studying unbalance effects / T.H. Chen, H.Y. Kuo // IEEE Proceedings, generation, transmission and distribution, 1995. – Vol. 142. –  $N_{2}$  2. – P. 103—108.

173. Dougal, R.A. Power and life extension of battery- ultracapacitor hybrids (2002) / R.A. Dougal, S. Liu, R.E. White // IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies, 2002. - 25 (1). – P. 120-131.

174. Federico Milano Power System Modelling and Scripting / Springer-Verlag Berlin, 2010, Pages – 558.

175. Gafford, B.N. Heating of induction motors on unbalanced voltages / B.N. Gafford, W.C. Duesterhoeft Jr., C.C. Mosher. // AIEE Trans. Power Apparat. Syst., 1959. – Vol. 78. – P. 282–297.

176. Grechishnikov, V.A. Converting unit of capacitor reserves for metro power-supply system / V.A. Grechishnikov, A.I. Podaruev, M.V. Shevlyugin // Russian Electrical Engineering. – 2011. – 82(5). – P. 248–252.

177. Grechishnikov, V.A. Determination of Electrical Parameters of a Traction Current Circuit Using Measured Data in the Traction Power Supply System of an 825 V Subway / V.A. Grechishnikov, N.D. Kurov, A.E. Golitsyna // Russian Electrical Engineering. – 2019. – 90 (9). – P. 638–640.

178. Honrubia-Escribano, A. Influence of voltage dips on industrial equipment: Analysis and assessment / A. Honrubia-Escribano, E. Gymez-Lazaro, A. Molina-GarcHa, J. Fuentes // Electrical Power and Energy Systems. – 2012. – P. 87–95.

179. Jouanne, A.V. Assessment of voltage unbalance / A.V. Jouanne, B. Banerjee // IEEE Trans. Power Delivery, 2001. – Vol. 16. – № 4. –pp. 782–790.

180. Kersting, W.H. Phase frame analysis of the effects of voltage unbalance on induction machines / W.H. Kersting, W.H. Phillips // IEEE Trans. Ind. Applicat., 1997. –Vol. 33. – P. 415–420.

181. Khoobroo, A. Effects of systemharmonics and unbalanced voltages on electromagnetic performance of induction motors / A. Khoobroo,
M. Krishnamurthy, B. Fahimi // The 34th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics, 2008. – P. 1173—1178.

182. Kilter, J. Assessment of Transmission Network Voltage Unbalance in Connection of High Speed Electrical Railway / J. Kilter, T. Sarnet, T. Kangro // Electric Power Quality and Supply Reliability Conference, 2014. – pp. 329—334.

183. Klyachko, L.M. A Model of a Combined Subway Traction Substation
Taking Traction Load and Consumers' Auxiliaries into Account / L.M. Klyachko,
M.V. Shevlyugin, M.N. Belov, A.E. Golitsyna // Russian Electrical Engineering. –
2021. – 92 (9). – P. 488-491.

184. Kontcha, A. Time-dependent voltage unbalance in three-phase grids feeding ac railways / A. Kontcha, P. Schmidt // Elektrische Bahnen, 1999. – P. 235–238.

185. Kularatna, N. Energy Storage Devices for Electronic Systems: Rechargeable Batteries and Supercapacitors Energy Storage Devices for Electronic Systems: Rechargeable Batteries and Supercapacitors / N. Kularatna // New Zealand: School of Engineering, The University of Waikato Hamilton, 2014.

186. Kulworawanichpong, T. Estimation of voltage unbalance at an AC traction substation with different train operational scenarios / T. Kulworawanichpong, N. Mingpruk, T. Ratniyomchai // Advances in Science, Technology and Engineering Systems Journal. – 2017. – Vol. 2. –  $N_{2}$  3. – P. 1086 – 1091.

187. Lee, Ching-Yin Effects of various unbalanced voltages on the operation performance of an induction motor under the same voltage unbalance factor condition / Ching-Yin. Lee, Bin-Kwie Chen, Wei-Jen Lee, Yen-Feng Hsu. // Electric Power Systems Research, 1998. –Vol. 47. – P.153–163.

188. Lee, C.Y. Effects of unbalanced voltage on the operation performance of a three- phase induction motor / C.Y. Lee // IEEE Trans. on Energy Conversion, 1999. – Vol. 14. –No2. – P. 202–208.

189. Mirabbasi, D. Effect of unbalanced voltage on operation of induction motors and its detection / D. Mirabbasi, Ghodratollah Seifossadat, Mehrdad Heidari // http://www.emo.org.tr/ekler/2c339764eb0c0c6\_ek.pdf.

190. Naumov, I.V. A method for estimation of additional power losses in spatially distributed electric networks / I.V. Naumov // In a book: Influence of Distributed and Renevable Generation on Power Security. Proceedings of the GRIS Workshop 2006, Magdeburg 6th-8th December 2006. ISSN 1612- 2526 ISBN 3-929757-99-0.

191. Pillay, P. Derating of Induction Motors Operating With a Combination of Unbalanced Voltages and Over or Under voltages / P. Pillay, P. Hofmann, M. Manyage // IEEE Transactions on Energy Conversion. – 2002, –17(4). – P. 485 - 491.

192. Rebrov, I. Electric power accumulators in system of supplying railways with traction energy by direct current / I. Rebrov, M. Shevlyugin, A. Kotelnikov, D. Ermolenko // MATEC Web of Conferences. 2018. – 239, 01057.

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

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

195. Santiyanona, D. Simulation on Voltage Unbalance Reduction in Railway Electrification System by Different Special Transformers / D. Santiyanona, K. Hongesombutb, S. Srisonphanc // 2016 International Electrical Engineering Congress, 2016. – P. 373 – 376.

196. Serra, H. Analysis of a multi-ratio switched capacitor DC-DC converter for a supercapacitor power supply (2015) / H. Serra, R. Madeira, N. Paulino // IFIP Advances in Information and Communication Technology, 2015. – P. 477-485.

197. Shahnia, F. Voltage unbalance problems and solutions for electrified railway systems / F. Shahnia, R. Esmaeilzadeh // http://www.ezepdico.ir/ uploads/2/Cms/user/File/2/papers/shahnia/railway-%20unbalance-%20eng-%20 poland.pdf.

198. Shevlyugin, M.V. A Digital Model of a Traction Substation with Two Types of Current / M.V. Shevlyugin, A.A. Korolev, A.O. Korolev, I.A. Aleksandrov // Russian Electrical Engineering. – 2018. – 89(9). – P.540–54.

199. Shevlyugin, M.V. An experimental study of the autonomous operation of subway electric rolling stock / M.V. Shevlyugin, D.S. Pletnev, M.D. Glushchenko, K.S. Zheltov // Russian Electrical Engineering. – 2021. – 92 (9). – P. 485-487.

200. Shevlyugin, M.V. The Use of Energy Storage Devices of Uncontrolled Type on the Moscow Metro (Theory and Practice) / M.V. Shevlyugin, A.N.

Stadnikov, A.E. Golitsyna // Journal of Information Technology and Applications – JITA. – 2017. –  $N_{2}7.$  – P. 78-83.

201. Shevlyugin, M. Energy-saving technologies in rail transportation using energy receptacles / M. Shevlyugin // Scientific Papers of the Institute of Electrical Engineering Fundamentals of Wroclaw Technical University Conferences. – 2006.– (43). – P. 67–76.

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

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

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

205. Shevlyugin, M.V. Power-saving circuits of railway traction power supply based on superconducting inductive energy storage / M.V. Shevlyugin // Russian Electrical Engineering. – 2008. – 79(7). – P. 377–381.

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

207. Smith, A.C. Calculation and measurement of unbalanced magnetic pull in cage induction motors with eccentric rotors. I. Analytical model / A.C. Smith, D.G. Dorrell // IEE Proceedings Electric Power Applications, 1996. – Vol.143. –  $N_{23}$ . – P. 193–201.
208. Souto, O. Induction motors thermal behavior and life expectancy under nonideal supply conditions / O. Souto, J. Oliveira, L. Neto // IX Int. Conf. Harmonics and Quality of Power, Orlando, FL, 2000.

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

210. Tulsky, V. Application of ETAP<sup>TM</sup>eTraX<sup>TM</sup> software package for digital simulation of distribution network that feeds an AC traction power supply system / V. Tulsky, M. Shevlyugin, A. Korolev, N. Khripushkin, R. Baembitov // E3S Web of Conferences. 2020. – 209, 07011(2020).

211. Vlasov, S.P. Joint operation of 6- and 12-pulse Rectifier Units when Modernizing Traction Substations / S.P. Vlasov, A.E. Golitsyna, V.A. Grechishnikov, N.D. Kurov // Russian Electrical Engineering. – 2021. – 92(9). – P. 481 – 484.

212. Whaite, S. Power quality in DC power distribution systems and microgrids (2015) / S. Whaite, B. Grainger, A. Kwasinski, // Energies. – 2015. – 8(5). – P. 4378-4399.

213. Williams J.E. Operation of 3-phase induction motors on unbalanced voltages / Williams J.E. // AIEE Trans. Power Apparat. Syst., – 1954. – Vol. 73. – P. 125–133.