

На правах рукописи



**ГОЛИЦЫНА АНАСТАСИЯ ЕВГЕНЬЕВНА**

**НАКОПИТЕЛЬ ЭНЕРГИИ В СИСТЕМЕ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ  
СОБСТВЕННЫХ НУЖД СОВМЕЩЕННОЙ ТЯГОВОЙ ПОДСТАНЦИИ  
МЕТРОПОЛИТЕНА**

2.4.2. Электротехнические комплексы и системы

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Москва – 2023

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

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

Официальные оппоненты: **Строганов Владимир Иванович,**  
доктор технических наук, доцент,  
заведующий кафедрой «Электротехника и  
электрооборудование» федерального  
государственного бюджетного образовательного  
учреждения высшего образования «Московский  
автомобильно- дорожный государственный  
технический университет (МАДИ)»;

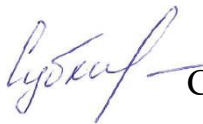
**Заруцкая Татьяна Алексеевна,**  
кандидат технических наук, доцент,  
и.о. заведующего кафедрой  
«Автоматизированные системы  
электроснабжения» федерального  
государственного бюджетного образовательного  
учреждения высшего образования «Ростовский  
государственный университет путей  
сообщения».

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

Защита диссертации состоится «28» июня 2023 г. в 13:00 часов  
на заседании диссертационного совета 40.2.002.11 на базе федерального  
государственного автономного образовательного учреждения высшего  
образования «Российский университет транспорта» по адресу: 127994, г. Москва,  
ул. Образцова, д. 9, стр.9., ауд. 2505.

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

Автореферат разослан «\_\_\_» мая 2023 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  **Субханвердиев Камиль Субханвердиевич**

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**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 станции, тоннелей, служебных помещений, вестибюлей и пр.), в электроэнергетической системе метрополитенов имеются более 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 является крайне актуальной и жизненно важной задачей.

**Степень разработанности темы исследования.** Проблемам надёжности 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 совмещенных тяговых подстанций (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 825 В постоянного тока, блоки электроснабжения собственных нужд 220-380 В 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 с ЗПТ и НЭ, с учетом

влияния тяговой нагрузки 825 В 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 надёжность 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 (ТС) через тяговые агрегаты 825 В 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 надёжности 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:

- 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 корреляционного анализа данных, полученных при имитационном моделировании работы устройств электроснабжения собственных нужд СТП, с данными экспериментальных замеров на нескольких действующих 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, 2019 г; на V Всероссийской научно-технической конференции с международным участием, «Приборы и методы измерений, контроля качества и диагностики в промышленности и на транспорте», Омск, 2022 г.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка используемых источников. Общий объем диссертации составляет 145 страниц, включая 68 иллюстраций, 7 таблиц, список использованных источников из 213 наименований.

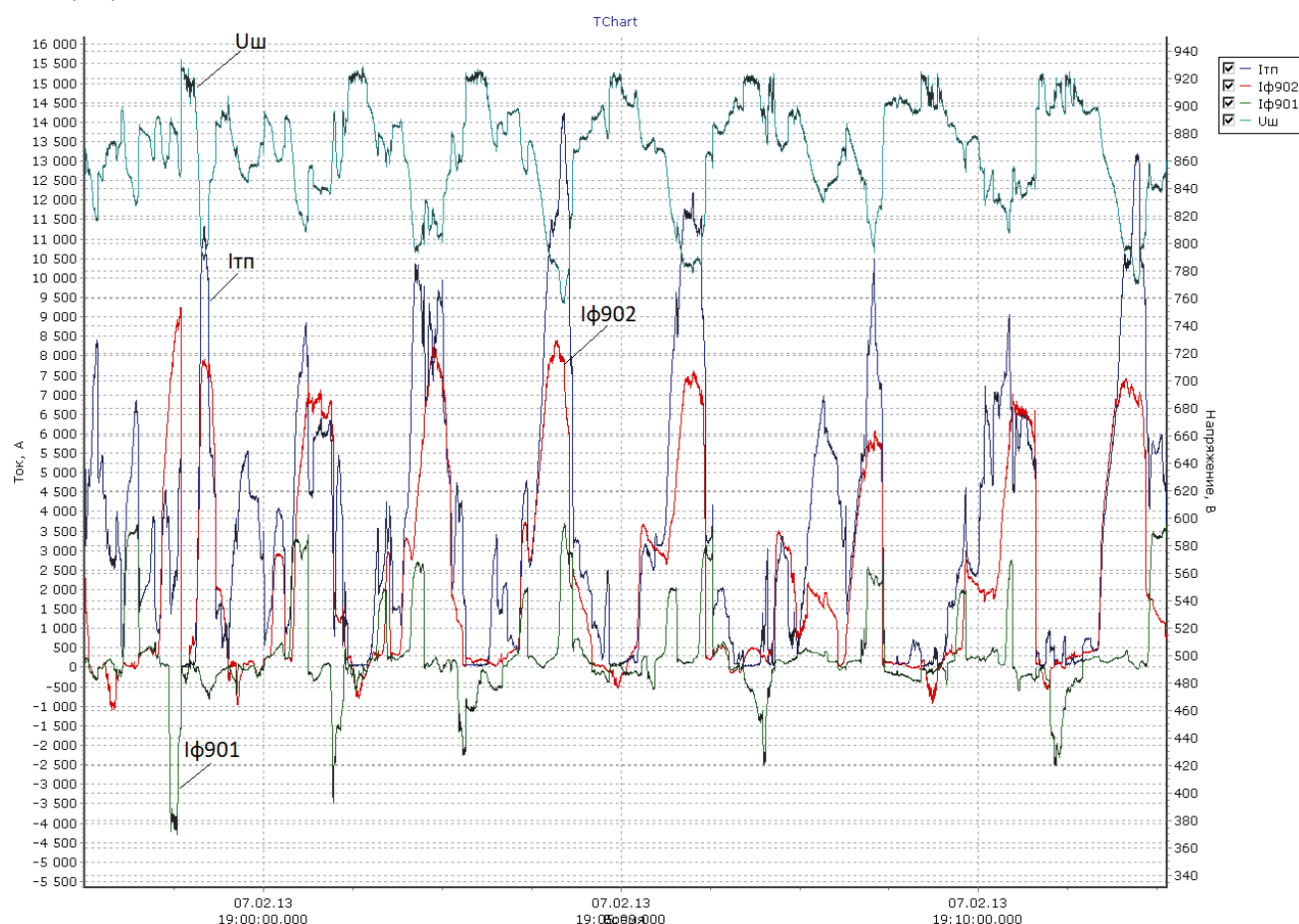
## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**В первой главе** описаны критерии, определяющие целесообразность применения НЭ в системе электроснабжения собственных нужд (СЭСН) СТП метрополитена. Особенностью СТП является то, что с одной стороны от шин 10 кВ питается мощная (до 12-15000 кВА) резко переменная тяговая нагрузка, с другой стороны от тех же шин 10 кВ питаются потребители собственных нужд 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 эскалаторов, вентиляционных шахт, дренажных систем); трансформатора СЦБ (Тсцб – светофоры, автоблокировка, маршрутно-линейная централизация и пр.).

Наиболее полно оценить процессы в электроэнергетических сетях метрополитена позволили длительные экспериментальные замеры показателей работы оборудования тяговых подстанций. На рисунке 1 представлены осциллограммы токов фидеров, тока СТП и напряжения на шинах 825 В подстанции Мосметро в течение 15 минут. Из этих осциллограмм следует, что тяговый ток подстанции крайне неравномерен – его значение может меняться от 1 А до 14000 А и более за единицы секунд, при этом напряжение на шинах подстанции так же резко может уменьшаться на 12-17% от номинального значения, а максимальный диапазон колебания напряжения на шинах 825В составляет около 20%. Подобная неравномерная нагрузка тяговой сети негативно влияет и на тяговые трансформаторы, и, через общие шины 10 кВ, так же негативно влияет на электроснабжение жизненно необходимых потребителей собственных нужд трансформаторов моторных приводов (ТМ) и трансформаторов СЦБ (Тсцб).

Стабилизировать напряжение на шинах собственных нужд, минимизировав влияния тяговой нагрузки, можно с помощью НЭ, параллельно подключенного к цепи питания в ЗПТ между шинами 10 кВ и шинами 0,4 кВ. В этом случае НЭ работает в буферном режиме и постоянно по ЗПТ подпитывает малыми токами

нагрузку собственных нужд СТП параллельно с основным источником от шин 10(20) кВ.



**Рисунок 1 – Фрагмент осциллограмм токов и напряжения на шинах 825 В СТП Московского метрополитена**

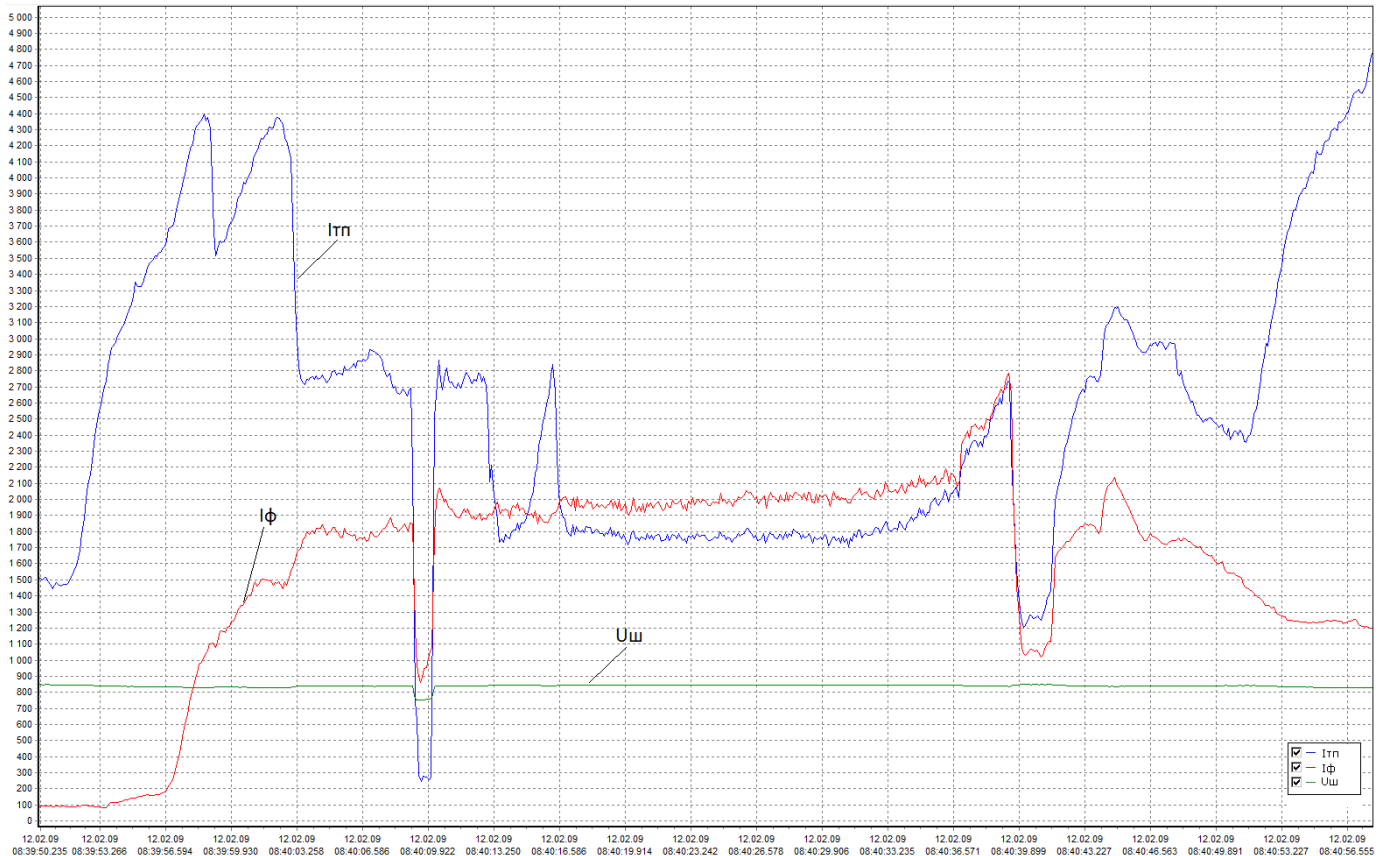
Оценку потребления энергии от НЭ для компенсации колебания напряжения, в течение суток  $A_{\text{Просадки}}^{\text{Сутки}}$ , можно оценить по следующей формуле:

$$A_{\text{Просадки}}^{\text{Сутки}} = \sum_{n=1}^m A_n = \sum_{n=1}^m \int_{T_n}^{T_n + \Delta T_n} I_{\text{CH}}(t) \Delta U_{\text{CH}}(t) dt, \quad (1)$$

где  $A_n$  – энергия НЭ при компенсации n-ной просадки напряжения;  $I_{\text{CH}}$  – значение мгновенного тока потребления собственных нужд;  $\Delta U_{\text{CH}}$  – значение падения мгновенного напряжения на шинах питания собственных нужд;  $m$  – количество просадок напряжения в сутки;  $T_n$  – время n-ной просадки напряжения;  $\Delta T_n$  – продолжительность n-ной просадки напряжения (5-20 с.).

Помимо нестабильности уровня напряжения на шинах 10 кВ в сетях метрополитена случаются также провалы напряжения, обусловленные аварийными режимами в СПЭ 10 кВ. На рисунке 2 показан фрагмент осциллограмм, на котором виден провал напряжения (замеры проводились на Т-14 Арбатско-Покровской линии Московского метрополитена).





**Рисунок 2 – Осциллограммы токов и напряжения с иллюстрацией аномального провала напряжения в тяговой сети**

Компенсацию провалов напряжения также можно осуществить с помощью внутренней буферизации энергии. При этом оценку единичного потребления энергии НЭ для компенсации провала  $A^{\text{провала}}$ , можно оценить следующим образом:

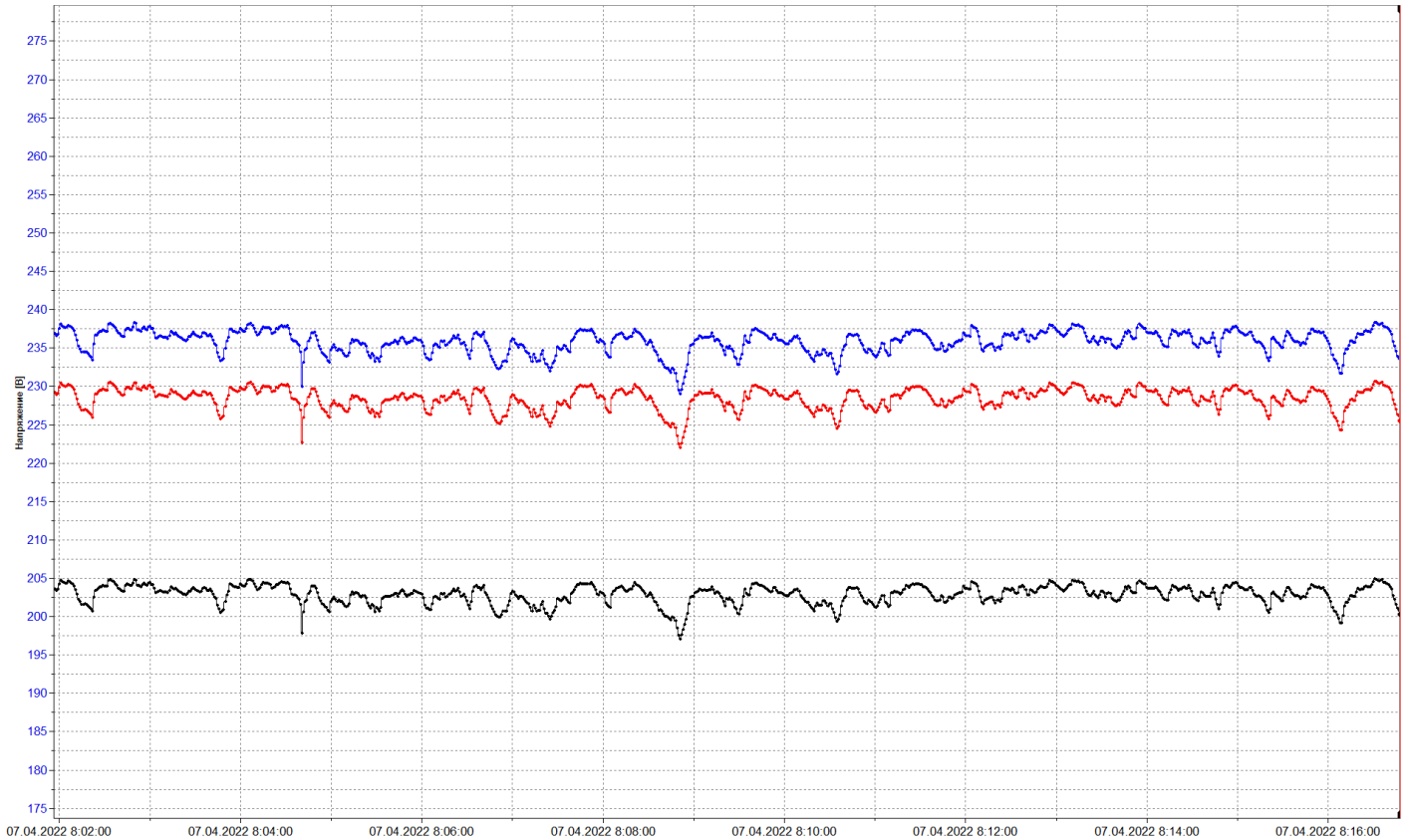
$$A^{\text{провала}} = \int_0^{t_{\text{провала}}} P_{\text{CH}}(t) dt = \int_0^{t_{\text{провала}}} I_{\text{CH}}(t) U_{\text{CH}}(t) dt, \quad (2)$$

где  $P_{\text{CH}}$  – значение мгновенной мощности потребления собственных нужд;  $U_{\text{CH}}$  – значение мгновенного напряжения на шинах питания собственных нужд;  $t_{\text{провала}}$  – время провала напряжения.

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.

Вместе с тем, к важным показателям качества электроэнергии относится несимметрия напряжений, которая может появиться на шинах 0,4 кВ со стороны СПЭ, а также за счет собственной, достаточно мощной несимметричной нагрузки. На рисунке 3 представлен фрагмент осциллограммы 3-х фазного напряжения на шинах 0,4 кВ при экспериментальных замерах на одной из СТП Московского метрополитена. Здесь отчетливо видна разница фазных напряжений –  $U_a$ ,  $U_b$  и  $U_c$ .

Так разница между  $U_a$  и  $U_c$  составляет порядка 16%, что не соответствует допустимым нормам.



**Рисунок 3 – Фазные напряжения на шинах собственных нужд СТП в функции времени при экспериментальных замерах**

При более детальном 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. В условиях неравномерной несимметрии во времени, фактический срок службы двигателя ( $T_{\text{Факт}}^{\text{Служ}}$ ) в зависимости от перегревов, можно оценить по следующему выражению:

$$T_{\text{Факт}}^{\text{Служ}} = \sum_{i=1}^n \left( \Delta T_i * \frac{1}{\gamma_{Z2}} \right) = \sum_{i=1}^n \left( \Delta T_i * \frac{1}{e^{b C_{2v} \left( \frac{U_2(t) \cdot 100}{U_1(t)} \right)^2}} \right), \quad (3)$$

где  $\Delta T_i$  – шаг временной дискретизации (в идеале стремиться к нулю);  $U_1(t)$  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  $K_{2u}$  ( $n = T_{\text{Ном}}^{\text{Служ}} / \Delta T$ );  $\Delta \vartheta_2$  – температура дополнительного перегрева ( $\Delta \vartheta_2 = C_{2v} K_{2u}^2$ );  $C_{2v}$  – коэффициент

передачи, который зависит от класса изоляции;  $K_{2u}$  – коэффициент несимметрии напряжения по обратной последовательности;  $\gamma_{z2}$  – кратность снижения срока службы ( $\gamma_{z2} = e^{b\Delta\vartheta_2}$ );  $b$  – параметр изоляции, характеризующий тепловые свойства асинхронного двигателя.

Таким образом, токи обратной последовательности, вызванные несимметрией, приводят к существенному снижению нормативных характеристик двигателя, а именно: снижению рабочего момента двигателя; повышению электрических и механических потерь и дополнительному нагреву двигателя; снижению КПД; затруднению процесса пуска двигателя; появлению радиальной вибрации, которая, в свою очередь, приводит к физическому разрушению механических узлов.

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, поступающие на обмотки электродвигателя, не обеспечивают его полезной энергией для вращения вала, а возникающие токи циркулируют в обмотках и, в конечном итоге, приводят к потере энергии. Эти потери рассеиваются в виде тепла и снижают эффективность электродвигателя, что приводит к дополнительным расходам электроэнергии и увеличению рабочей температуры.

4. Резкие перепады напряжения в сети 10 кВ ведут к росту тока в обмотках двигателя, что увеличивает его нагрев; ведут к динамической нестабильности работы механической части двигателей, которые со временем приводят к нарушению центрирования, дисбалансу и расшатанности вала, износу подшипников.

Описанные выше отклонения показателей качества электроэнергии от номинальных значений приводят к рискам для потребителей собственных нужд СТП, в частности, потребителей трансформаторов моторных приводов 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.

Значительно повысить надежность электроснабжения и энергоэффективность ответственных потребителей собственных нужд СТП в комплексе можно с помощью НЭ в составе звена постоянного тока (ЗПТ). Под НЭ в данном случае понимается аккумулирующий элемент в виде аккумуляторной батареи (АБ) или батареи суперконденсаторов (ионисторов), подключенных с

одной стороны через выпрямитель к шинам питающего напряжения, а с другой через инвертор – к шинам ответственных потребителей собственных нужд СТП.

Для оценки реальных показателей качества электроэнергии в сетях 0,4 кВ были проведены массовые замеры в течение 24 часов с частотой временной дискретизации в 1 секунду на различных СТП (рисунок 4а, 4б).

На рисунках 5 и 6 представлены результаты экспериментальных замеров в течение суток в виде осциллограмм фазных напряжений (в верхней части рисунка 5), токов (в нижней части рисунка 5), а также значения несимметрии по обратной последовательности (рисунок 6).



а)



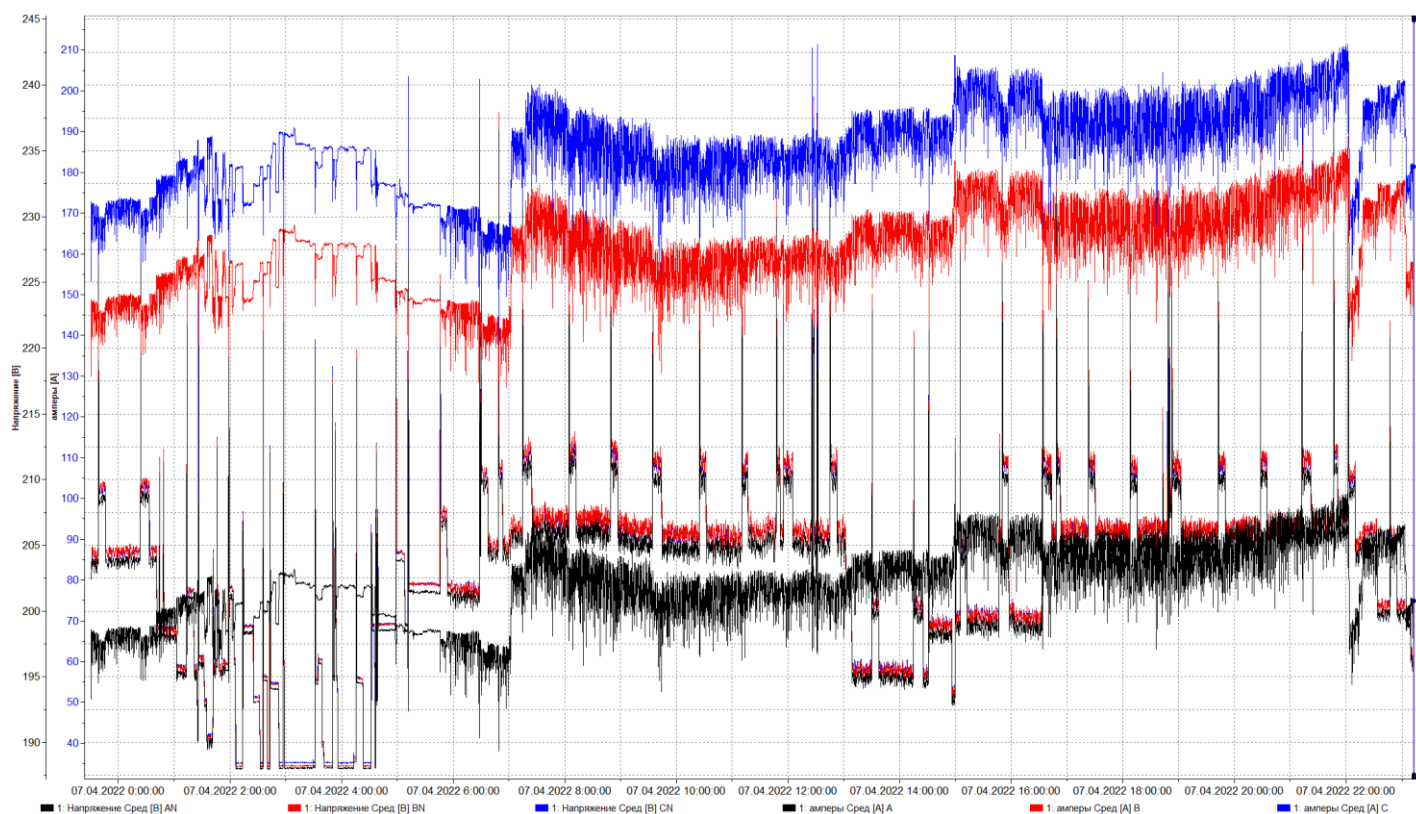
б)

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

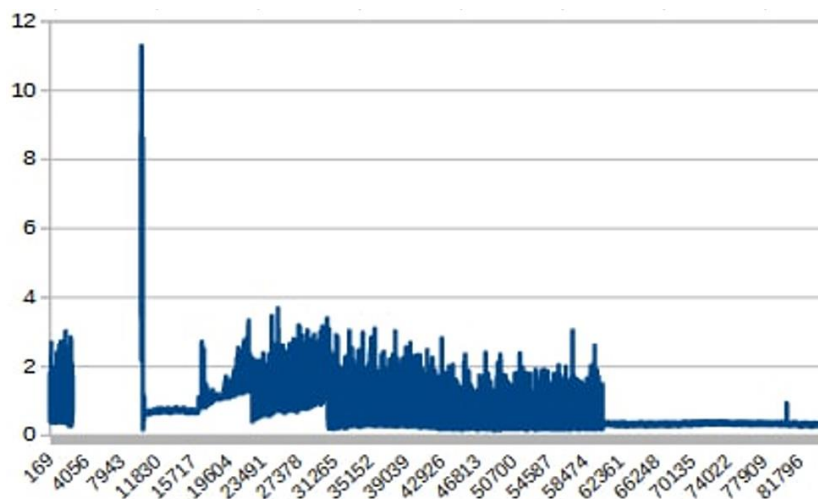
Следует отметить, что замер токов производился только с одного из пяти параллельно подводящих кабелей. В связи с этим показатели замеров тока необходимо умножать на коэффициент 5.

Обработка данных экспериментальных замеров показала, что показатели качества электроэнергии не соответствует нормативным показателям: максимальный коэффициент несимметрии по обратной последовательности ( $K_{2U}$ ) в пике превышает 11%, что значительно превышает норму в 4%, а в течении продолжительного времени  $K_{2U}$  превышает уровень в 2%, что также не соответствует норме. Искажения общего гармонического состава по напряжению и

току составляют свыше 9,75% и 18%, соответственно, что также значительно превышает нормированные показатели.



**Рисунок 5 – Замеры на шинах собственных нужд (фазные напряжения и токи)**

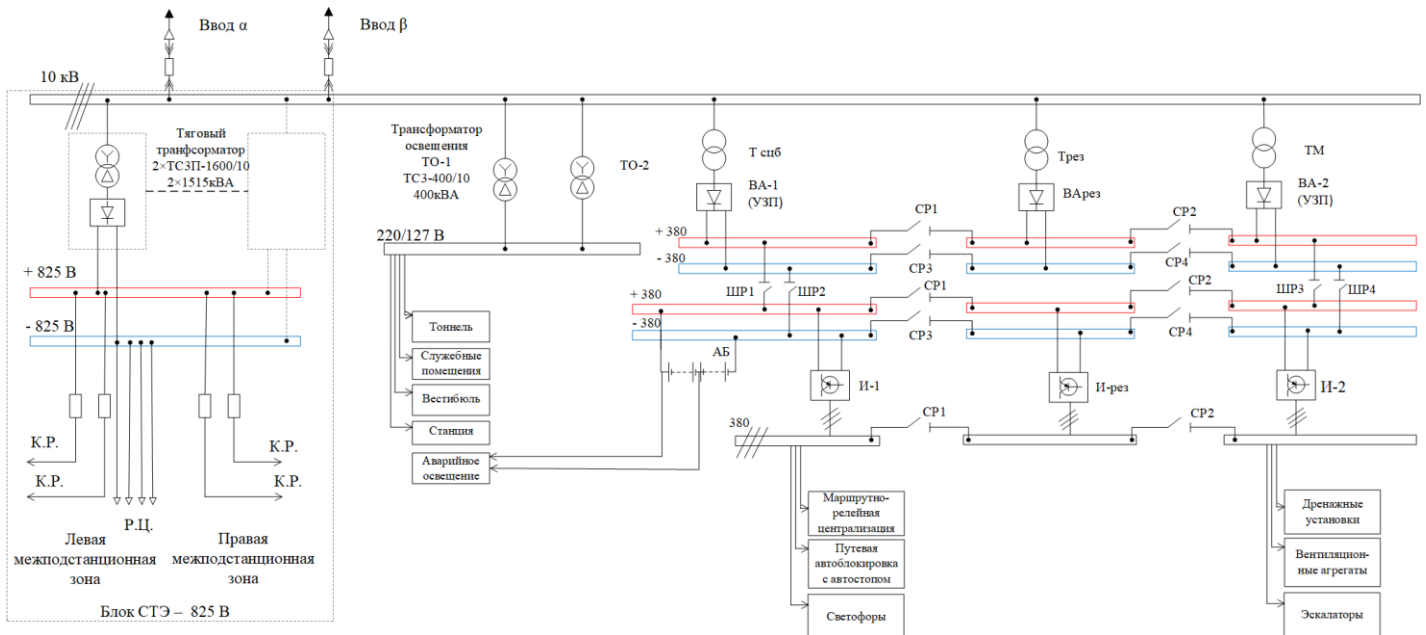


**Рисунок 6 – Значение несимметрии по обратной последовательности ( $K_{2U}$ ) в %, в функции времени**

**Во второй главе** представлены схема и конструкция звена постоянного тока с НЭ, по которой ответственные потребители (в данном случае потребители ТМ и Тсцб) питаются не на прямую от общих шин 10(20) кВ, а через инверторы от промежуточного звена постоянного тока (рисунок 7). В нормальном режиме потребители через звено постоянного тока и соответствующие трансформаторы ТМ и Тсцб питаются от шин 10(20) кВ. В случае возникновения значительных колебаний, провалов или даже полной пропажи питающего напряжения 10(20) кВ,



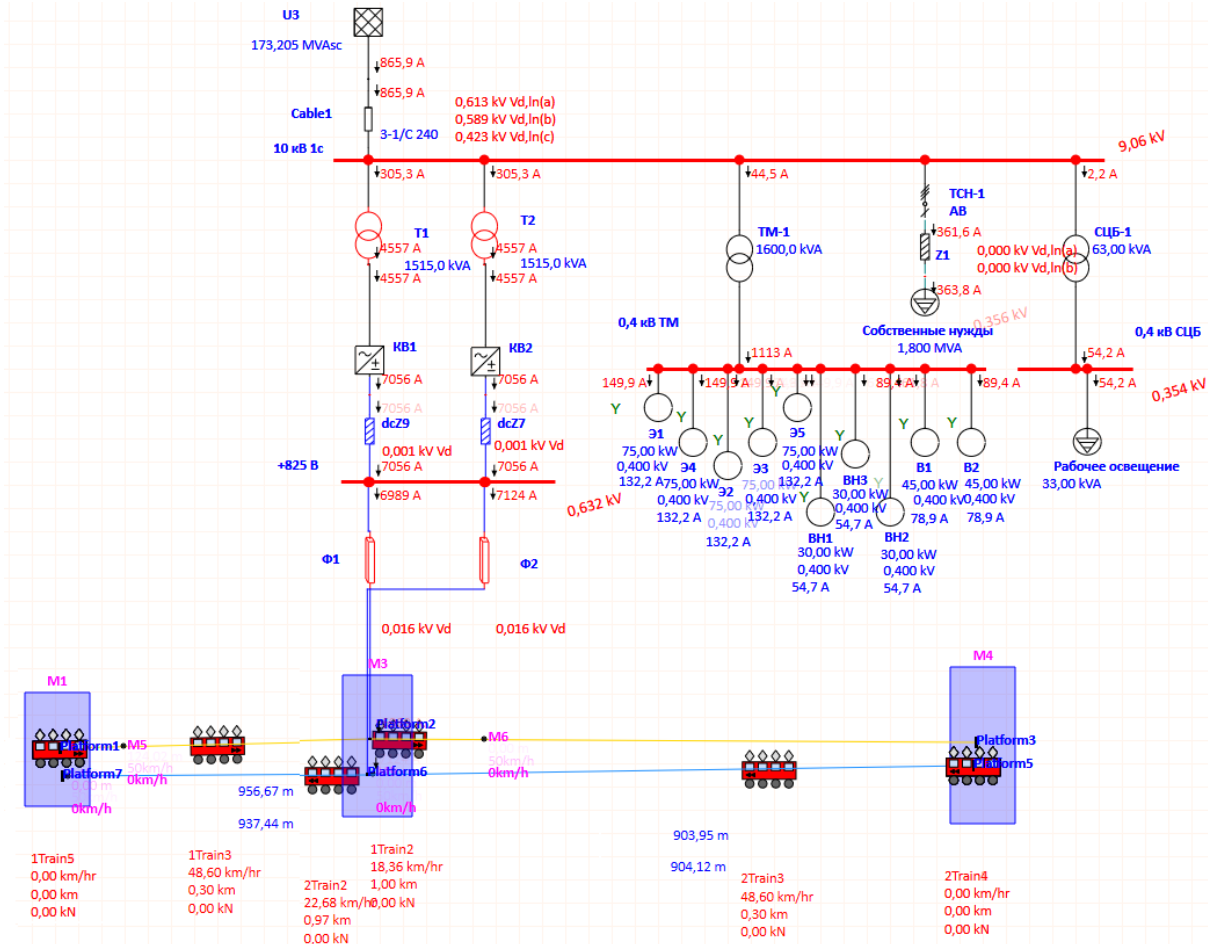
дефицит мощности будет компенсироваться за счет НЭ, параллельно подключенного к тем же шинам звена постоянного тока.



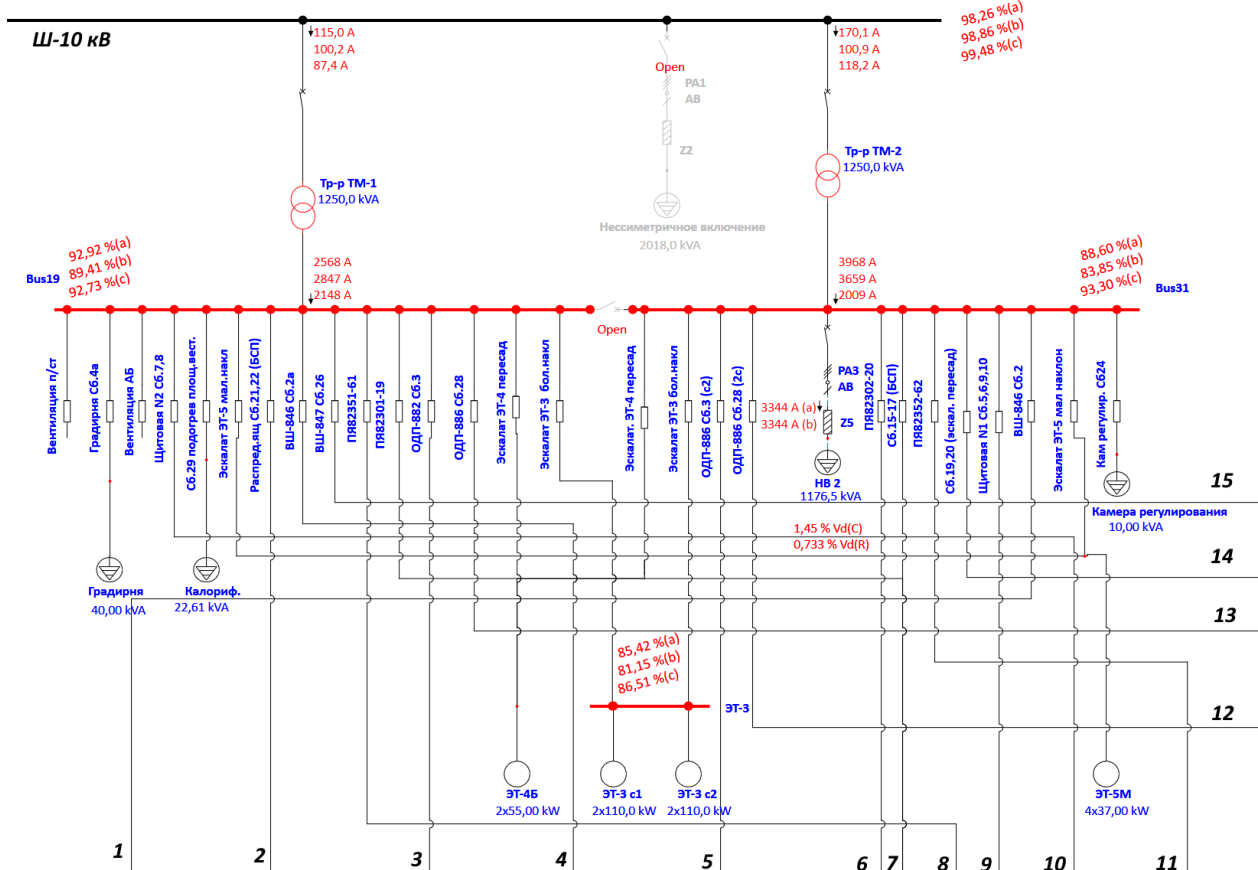
**Рисунок 7 – Схема питания потребителей собственных нужд блока 380В СТП со звеном постоянного тока и НЭ**

**Третья глава** посвящена разработке модели СТП с НЭ в составе СТЭ Серпуховско-Тимирязевской линии Московского метрополитена. Особенностью данной модели является то, что она в едином комплексе учитывает тяговую нагрузку с участком тяговой сети постоянного тока 825 В, по которому курсируют поезда, систему внешнего электроснабжения 10 кВ, а также потребители собственных нужд 0,4 кВ, влияние на которые оказывают первые две системы. На рисунке 8 представлена укрупненная мнемосхема исследуемой СТП из среды разработчика программного комплекса ЕТАР, на которой отражены все три электроэнергетические системы. На рисунке 9 представлена часть модели собственных нужд исследуемой СТП, а на рисунке 10 – аналогичная модель СТП, но уже с предлагаемым ЗПТ и НЭ в СЭСН.

При построении модели СТП с ЗПТ 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 для сетей с постоянной или мало изменяющейся топологией в процессе времени моделирования в гибридных сетях переменного–постоянного тока. В данном случае предлагается разбивать сложные электротехнические цепи на части и производить расчет, при котором данные фрагменты программно соединяются между собой через уравнения связи.



**Рисунок 8 – Укрупненная модель СТП с собственными нуждами, участком СТЭ и укрупненной системой внешнего электроснабжения**



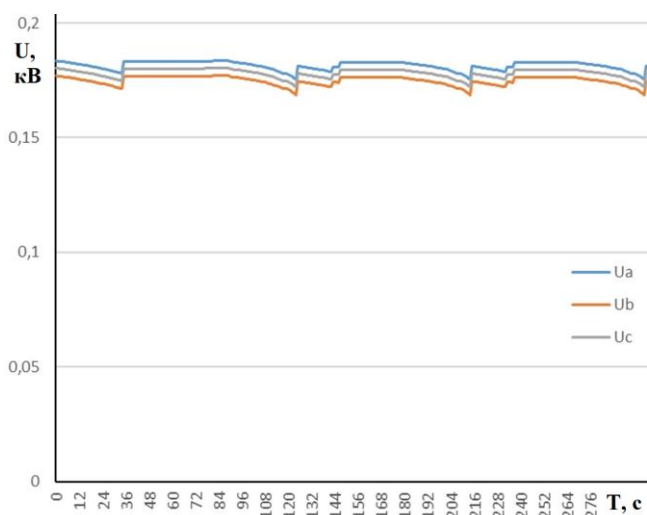
**Рисунок 9 – Детальная модель системы электроснабжения собственных нужд СТП без ЗПТ и НЭ**

Основное выражение метода при этом можно описать в следующей блочной форме:

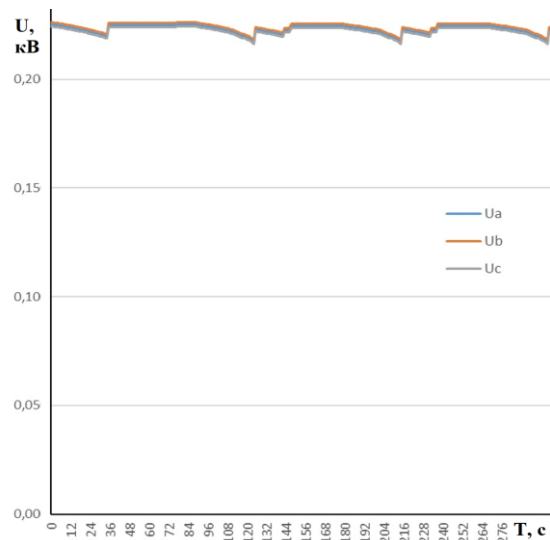
$$\begin{bmatrix} G & -B \\ B & G \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} U_{Re} \\ U_{Im} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -I_{Re} \\ -I_{Im} \end{bmatrix}, \quad (4)$$

**В четвертой главе** представлены результаты имитационного моделирования работы СТП с ЗПТ и НЭ в СЭСН в двух вариантах при одинаковых условиях. На рисунках 11,*а* и 12,*а* показаны осциллограммы фазных напряжений на клеммах двигателя без ЗПТ и НЭ. На рисунке 13,*а* представлено значение коэффициента несимметрии по обратной последовательности в функции времени за тот же период без ЗПТ и НЭ. На рисунках 11,*б*, 12,*б* и 13,*б* показаны аналогичные зависимости при использовании ЗПТ и НЭ.



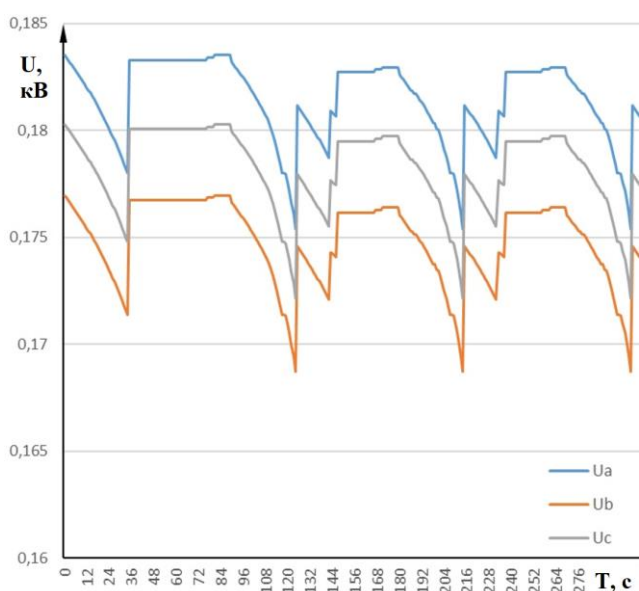


а)

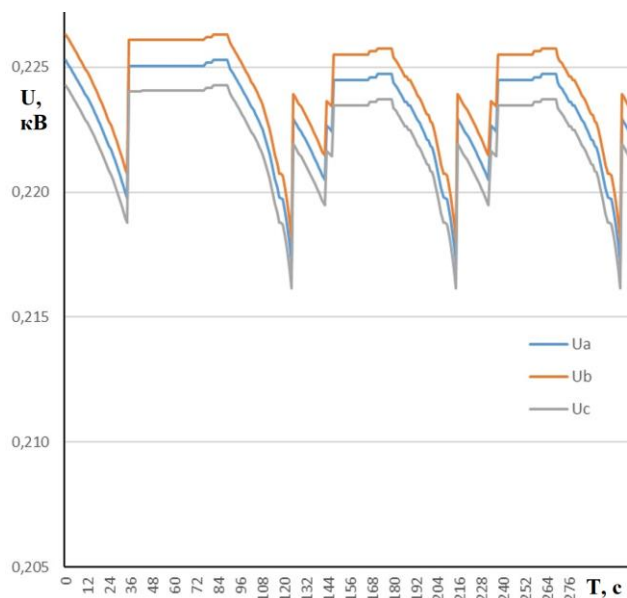


б)

**Рисунок 11 – Осциллограммы фазных напряжений без ЗПТ и НЭ (а); с ЗПТ и НЭ (б)**

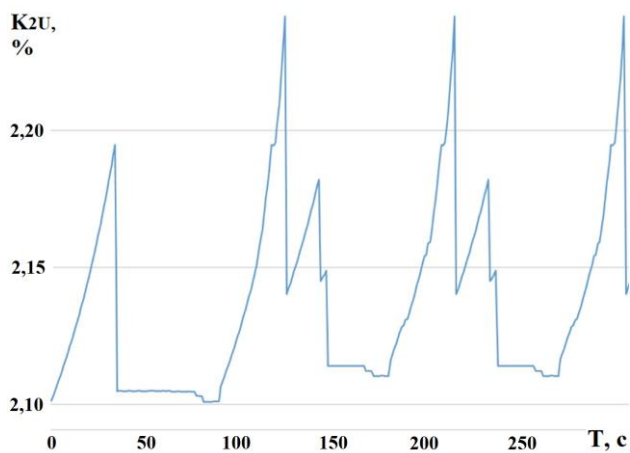


а)

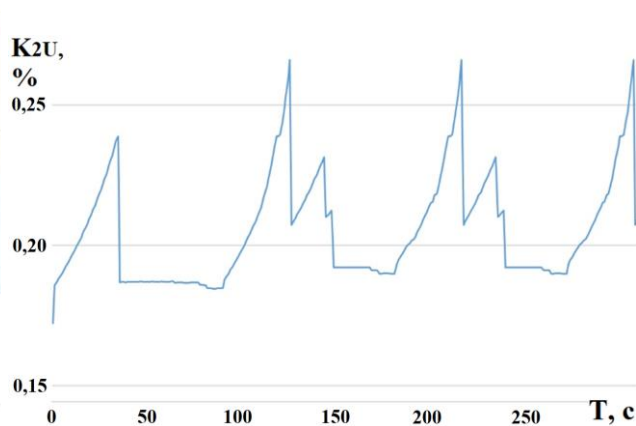


б)

**Рисунок 12 – Увеличенный фрагмент рисунка 11,а (а); рисунка 11,б (б)**



а)



б)

**Рисунок 13 – Коэффициент несимметрии по обратной последовательности  $K_{2U}$  в функции времени без ЗПТ и НЭ (а); с ЗПТ и НЭ (б)**

Из рисунка 13,а 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. Использование ЗПТ и НЭ значительно улучшили показатели качества электроэнергии. Результаты расчетов показателей качества электроэнергии по напряжению на «моторном» приводе сведены в таблицах 1-3.

**Таблица 1 – Разница показателей качества электрической энергии по напряжению при разных схемах питания**

| Фаза                                              | без ЗПТ с НЭ |        |        | с ЗПТ и НЭ |        |        |
|---------------------------------------------------|--------------|--------|--------|------------|--------|--------|
|                                                   | А            | В      | С      | А          | В      | С      |
| 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 номинала, %     | 21,2         | 24,1   | 22,7   | 3,0        | 2,5    | 3,4    |
| Отклонение минимального напряжения от номинала, % | 23,7         | 26,6   | 25     | 4,9        | 4,5    | 5,4    |

**Таблица 2 – Улучшение качества электрической энергии по напряжению у потребителей СН СТП при разных схемах питания**

| Эффективность                                              | Фаза |      |      |
|------------------------------------------------------------|------|------|------|
|                                                            | А    | В    | С    |
| Улучшение отклонения средних напряжения от номинала, %     | 85,9 | 90,0 | 85,0 |
| Улучшение отклонений минимальных напряжения от номинала, % | 79,3 | 83,1 | 78,4 |

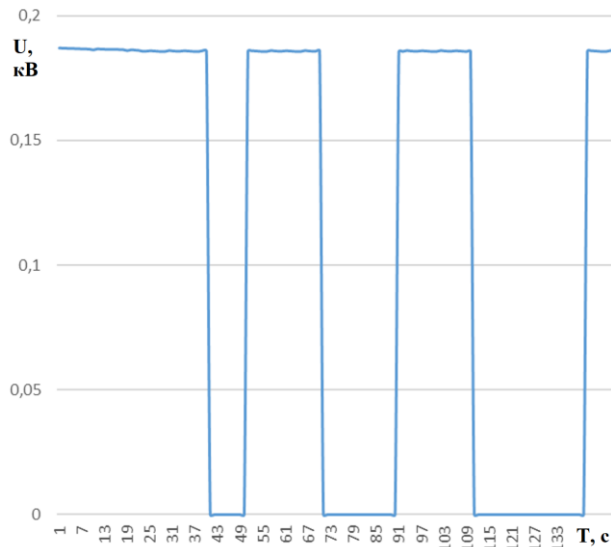
**Таблица 3 – Разница показателей качества электрической энергии по несимметрии у потребителей СН СТП при разных схемах питания**

| Показатель                                                             | без ЗПТ с НЭ | с ЗПТ и НЭ | Эффект (улучшение) |
|------------------------------------------------------------------------|--------------|------------|--------------------|
| Коэффициент несимметрии по обратной последовательности минимальный, %  | 2,1          | 0,17       | 92                 |
| Коэффициент несимметрии по обратной последовательности максимальный, % | 2,4          | 0,26       | 89                 |
| Коэффициент несимметрии по обратной последовательности средний, %      | 2,151        | 0,21       | 90                 |

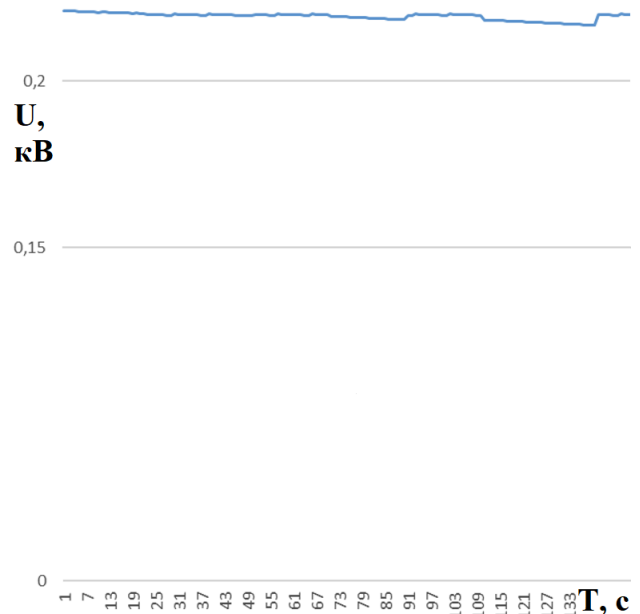
В компьютерных экспериментах воспроизводились также и аварийные режимы, под которыми, в данном случае, подразумеваются кратковременные полные пропажи напряжения на стороне СПЭ 10кВ. По более жестким условиям эксперимента, напряжение на шинах СТП 10 кВ пропадает три раза в течение 2,5 минут по 10, 20 и 30 секунд, соответственно. В случае схемы без ЗПТ и НЭ полностью пропадает напряжение питания собственных нужд СТП (рисунок 14).

Моделирование аварийного режима при использовании ЗПТ с НЭ показало, что пропажа напряжения на шинах 10 кВ СТП не влечет за собой полное отсутствие

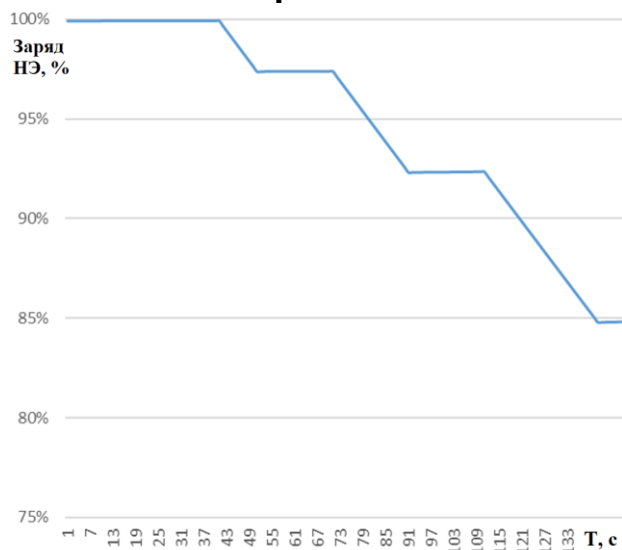
или сильный провал напряжения на шинах 0,4 кВ, так как его поддерживает АБ. На рисунке 15 и 17 представлено напряжение на клеммах двигателя при аварийных режимах с использованием ЗПТ и НЭ.



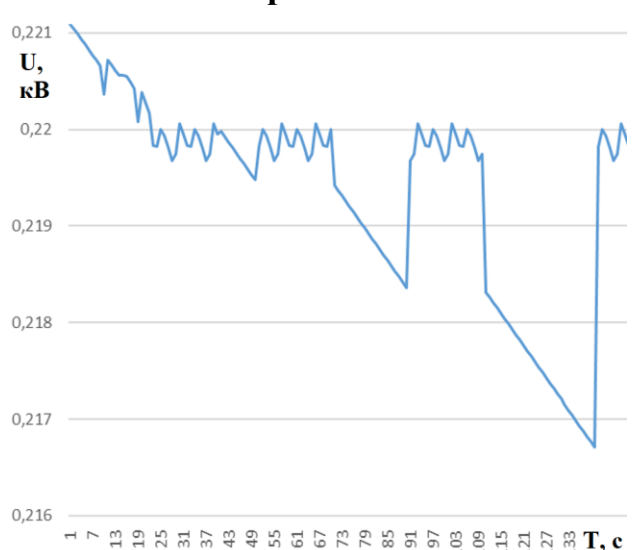
**Рисунок 14 – Напряжение фазы А на клеммах двигателя в аварийном режиме**



**Рисунок 15 – Напряжение фазы А на клеммах двигателя в аварийном режиме**



**Рисунок 16 – Уровень заряда АБ в функции времени при работе в аварийных режимах**



**Рисунок 17 – Напряжение фазы А на клеммах двигателя в аварийном режиме (увеличенный фрагмент рис. 15)**

Здесь видно, что даже в случае пропажи напряжения 10 кВ на 30 с АБ емкостью порядка 600 А\*ч способна держать напряжение на потребителях собственных нужд всего на 1,5-2% ниже номинального значения, при разряде – всего в 15%. На рисунке 16 представлен уровень заряда АБ при аварийном режиме.

**Пятая глава** посвящена технико-экономической оценке использования ЗПТ с НЭ в СЭСН метрополитена. Произвести оценку капитальных затрат на основное оборудование (два выпрямителя, дополнительные элементы к существующей АБ СТП в количестве 120 штук и два инвертора) ( $З_{\text{кап}}^{\text{ЗПТ}}$ ) можно по следующему выражению:

$$Z_{\text{кап}}^{\text{зпт}} = Z_{\text{кап}}^{\text{в}} \cdot 2 + Z_{\text{кап}}^{\text{и}} \cdot 2 + Z_{\text{кап}}^{\text{аб}} \cdot \left( \frac{\Delta U}{U_{\text{АЭ}}} \right) - Z_{\text{кап}}^{\text{тр.тм}}, \quad (5)$$

где:  $Z_{\text{кап}}^{\text{в}}$  – капитальные затраты на выпрямительный агрегат;  $Z_{\text{кап}}^{\text{и}}$  – капитальные затраты на инверторный агрегат;  $Z_{\text{кап}}^{\text{аб}}$  – капитальные затраты на необходимую часть АБ (рассчитывается из отношения дополнительного уровня напряжения АБ ( $\Delta U$ ) к общему уровню напряжения аккумулирующего элемента ( $U_{\text{АЭ}}$ ));  $Z_{\text{кап}}^{\text{тр.тм}}$  – капитальные затраты на резервный моторный трансформатор. При этом капитальные затраты на модернизацию СТП составили 17441400 рублей.

Дополнительные затраты ( $Z_{\text{экспл}}^{\text{год}}$ ), к которым можно отнести эксплуатационные затраты на новое оборудование и потери электроэнергии в промежуточных устройствах, оценивается следующим образом:

$$Z_{\text{экспл}}^{\text{год}} = Z_{\text{экспл}}^{\text{в,и,а}} + Z_{\text{ДА}}^{\text{в,и,а}} = (Z_{\text{кап}}^{\text{в,и}} \cdot K_{\text{экспл}}^{\text{в,и}} + Z_{\text{кап}}^{\text{а}} \cdot K_{\text{экспл}}^{\text{а}}) + (A_{\text{в,и}}^{\text{год}} \cdot (1 - \eta_{\text{в,и}}) + A_{\text{а}}^{\text{год}} \cdot (1 - \eta_{\text{а}})) \cdot C_{\text{э}}, \quad (6)$$

где  $Z_{\text{экспл}}^{\text{в,и,а}}$  – затраты на обслуживание выпрямителя, инвертора и АБ;  $Z_{\text{ДА}}^{\text{в,и,а}}$  – затраты, связанные с потерями энергии в выпрямителях, инверторах и АБ;  $Z_{\text{экспл}}^{\text{в,и}}$  – затраты на обслуживание выпрямителя и инвертора;  $K_{\text{экспл}}^{\text{в,и}}$  – коэффициент эксплуатационных затрат на обслуживание выпрямителя и инвертора, привязанный к капитальным затратам данного оборудования (грубо принимается равным 0,5%);  $Z_{\text{экспл}}^{\text{а}}$  – затраты на обслуживание АБ;  $K_{\text{экспл}}^{\text{а}}$  – коэффициент эксплуатационных затрат на обслуживание АБ, привязанный к капитальным затратам данного оборудования (грубо принимается равным 5%);  $Z_{\text{ДА}}^{\text{в,и}}$  – эксплуатационные затраты, связанные с потерями энергии в выпрямителях и инверторах;  $Z_{\text{ДА}}^{\text{а}}$  – затраты, связанные с потерями энергии в АБ;  $Z_{\text{кап}}^{\text{в,и}}$  – капитальные затраты на выпрямитель и инвертор;  $Z_{\text{кап}}^{\text{а}}$  – капитальные затраты на АБ;  $A_{\text{в,и}}^{\text{год}}$  – энергия, пройденная через выпрямитель и инвертор в течение года;  $\eta_{\text{в,и}}$  – КПД выпрямителя и инвертора;  $A_{\text{а}}^{\text{год}}$  – энергия, пройденная через АБ в течение года;  $\eta_{\text{а}}$  – КПД АБ;  $C_{\text{э}}$  – стоимость электроэнергии. Дополнительные затраты составили порядка 270000 рублей в год.

С учетом проведенных замеров для конкретной исследуемой подстанции метрополитена и оценки времени работы потребителей СЭСН с реальным («плавающим») коэффициентом несимметрии эффект от внедрения новой системы можно оценить следующим образом: повышение КПД двигателей СЭСН СТП – 6%; снижение потерь энергии в СЭСН СТП – 7%; повышение срока службы оборудования моторных приводов – 16,7%.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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

2) 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.

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

5) Показан эффект от использования НЭ в составе ЗПТ, 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);
- улучшение на 90% коэффициента несимметрии по обратной последовательности (до величины в 0,26%);
- повышение КПД двигателей СЭСН СТП (составило 6%);
- снижение потерь энергии в СЭСН СТП (составило 7%);
- повышение срока службы моторных приводов (составило 16,7%).

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

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

1. 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.

2. 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.

3. 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.

4. 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.

**б) в изданиях «Scopus»**

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

6. 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, S.P. Vlasov, A.E. Golitsyna // Russian Electrical Engineering. – 2019. – 90(9). – P. 638 – 640.

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

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

9. 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.

10. 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.

**в) в других изданиях и материалах конференций**

11. Шевлюгин, М.В. Согласование устройств релейной защиты для собственных нужд ТП в программном комплексе ЕТАР [Текст] / М.В. Шевлюгин, А.Е. Голицына, А.Г. Бутусов // Труды XVI научно-практической конференции «Безопасность движения поездов». – 2015. – С. II – 138 – II – 139.

12. Шевлюгин, М.В. Разработка контура заземления ТП в программном комплексе ЕТАР [Текст] / М.В. Шевлюгин, А.Е. Голицына, А.С. Кошечев // Труды XVI научно-практической конференции «Безопасность движения поездов». – 2015. – С. II – 139 – II – 140.

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

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

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

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

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

18. 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. – № 7. – P. 78 – 83.

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

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

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

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

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

24. Голицына, А.Е. Эффективность использования накопителей энергии в электроэнергетических сетях собственных нужд метрополитена [Текст] / А.Е. Голицына, Е.Д. Болотина, А.С. Соловьева // Труды Всероссийской научно-практической конференции «Неделя науки – 2019». – 2019. – С. IX – 29.



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

26. 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 – 2019. – С. 96 – 97.

27. Шевлюгин, М.В. Имитационная модель совмещенной тягово-понижительной подстанции метрополитена [Текст] / М.В. Шевлюгин, А.Е. Голицына, Е.Д. Болотина, Т.З. Сиукаев // 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.

28. 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.

29. 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.

30. 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.

**Голицына Анастасия Евгеньевна**

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

### **2.4.2. Электротехнические комплексы и системы**

Автореферат на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Подписано в печать – \_\_\_\_\_ 2023 г.

Заказ №

Формат 60x90/16

Тираж – 80 экз.

Усл. печ. л. 1,5

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