

На правах рукописи



ПЕТРОВ АНДРЕЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ

**МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА  
ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В СИСТЕМЕ МЕТРОПОЛИТЕНА**

Специальность 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Новосибирск – 2019

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Новосибирский государственный технический университет»

**Научный руководитель:**

доктор технических наук, профессор  
**Щуров Николай Иванович**

**Официальные оппоненты:**

**Черемисин Василий Титович**, доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Омский государственный университет путей сообщения», г. Омск, кафедра «Подвижной состав электрических железных дорог», заведующий;

**Сизганова Евгения Юрьевна**, кандидат технических наук, доцент, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский федеральный университет», г. Красноярск, кафедра «Электротехнические комплексы и системы», доцент.

**Ведущая организация:**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Национальный исследовательский университет "МЭИ", г. Москва.

Защита диссертации состоится «30» января 2020 г. в 10-00 часов в конференц-зале на заседании диссертационного совета Д 212.173.04 при Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Новосибирский государственный технический университет» по адресу: 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Новосибирского государственного технического университета и на сайте организации <http://www.nstu.ru>

Автореферат разослан «\_\_» декабря 2019 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
кандидат технических наук



Максим Александрович Дыбко

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** На сегодняшний день в условиях развития макроэкономики происходит увеличение объёмов высокотехнологичных производств, возникает потребность в расширении электротехнического и информационно-коммуникационных комплексов, происходит формирование новых принципов автоматизации предприятий. Вместе с тем, вследствие урбанизации населения в городах-мегаполисах наблюдается экспоненциальный рост энергопотребления, в том числе и на решение транспортной проблемы, что в сумме определяет рост ценности топливно-энергетических ресурсов.

При этом актуальными становятся вопросы не только поиска новых источников энергии, но и рационального, эффективного использования существующих. В частности, в электроэнергетике это разработка комплекса энергосберегающих мероприятий, который помимо прочего включает в себя повышение качества электроэнергии.

Основные положения по улучшению показателей качества электроэнергии закреплены на законодательном уровне. Например, в «Энергетической стратегии России на период до 2030 года» ставится задача по разработке безопасных управляемых электроэнергетических систем, обеспечивающих необходимое качество электроэнергии.

Особое значение данные проблемы имеют в предприятиях городского электрического транспорта (ГЭТ). Развитием городской транспортной инфраструктуры занимаются инженеры, логисты, аналитики, социологи, экономисты, экологи и др., основной задачей которых является максимально комфортное перемещение за минимальное время большого количества пассажиров в пределах агломерации. Все перечисленные специалисты сходятся во мнении, что приоритетным направлением развития ГЭТ является повышение энергоэффективности перевозок. Что в свою очередь приведет: к уменьшению стоимости проезда, к экономии топливно-энергетических ресурсов, к повышению конкурентоспособности ГЭТ и разгрузки автомобильных дорог, к уменьшению экологической нагрузки и др. С точки зрения специалистов энергетической сферы для развития транспортной инфраструктуры требуется увеличение установленных мощностей. Внедрение технологий, позволяющих повысить энергоэффективность работы ГЭТ, помимо явного экономического и экологического эффектов, позволит высвободить установленные мощности, которые можно будет использовать на перспективу развития ГЭТ.

Метрополитен является лидером по провозной способности среди остальных видов городского транспорта, при этом являясь и одним из самых крупных потребителей электроэнергии.

В силу своих особенностей система электроснабжения метрополитена имеет низкие показатели качества электроэнергии и отрицательно влияет на промышленную сеть.

Во-первых, на подстанциях метрополитена происходит преобразование переменного напряжения в постоянное, что является причиной появления в сети высокочастотных искажений тока нагрузки и отрицательно влияет на других потребителей.

Во-вторых, появление подвижного состава в фидерной зоне, а также его движение в режиме тяги характеризуется резкопеременным потреблением электрического тока из сети, что также негативно сказывается на всей системе электроснабжения.

В-третьих, в метрополитене присутствует большое количество «нетяговых» потребителей, таких как: электропривод эскалаторов, система вентиляции, насосы, освещение и др., которые, в силу обеспечения безопасности, обладают большим запасом по мощности и, следовательно, работают в режиме близком к холостому ходу, что является причиной низких показателей качества электроэнергии.

Известным решением обозначенных проблем является применение активных силовых фильтров (АСФ), которые способны компенсировать не только реактивную составляющую тока нагрузки, но и высокочастотные нелинейные искажения. Принцип действия данного устройства заключается в получении информации о мгновенных значениях токов и напряжений в трехфазной сети, на основе которой вычисляются такие компенсационные токи, при генерации которых в сеть в результирующем токе исключаются неактивные компоненты, а именно, высокочастотные нелинейные искажения и реактивные составляющие, что также характеризуется синусоидальным и синфазным изменением переменных токов и напряжений в сети.

Основным преимуществом АСФ в первую очередь является быстроедействие, которое в значительной мере расширяет его область применения: помимо компенсации реактивной мощности это и компенсация высокочастотных нелинейных искажений, и борьба с несимметричностью нагрузки, и др. Другими преимуществами являются: устойчивость в изменяющихся режимах работы сети, низкие собственные потери, а также отсутствие каких-либо требований к качеству электроэнергии в сети, что в сумме снимает какие-либо ограничения по практическому применению АСФ.

Необходимо отметить, что реализация и практическое применение устройств АСФ стало возможным с появлением теории мгновенной мощности ( $p-q$  теории), родоначальником которой является Н. Akagi. На протяжении последних десятилетий наблюдается значительный интерес к совершенствованию и развитию данной теории. Наиболее известные решения это: модифицированная  $p-q$  теория;  $p-q-r$  теория;  $d-q$  теория; векторные формулировки, применение алгебры кватернионов для построения системы управления АСФ.

Также использование АСФ не накладывает ограничений на применение сторонних методов и средств повышения качества электроэнергии. Например, использование технологий активной фильтрации совместно с пассивными устройствами компенсации реактивной мощности позволяют в значи-

тельной мере уменьшить необходимую мощность АСФ, что сказывается на конечной стоимости фильтрокомпенсирующего устройства, данное решение принято называть гибридным силовым фильтром (ГСФ).

Большой вклад в развитие теоретической базы и практической реализации активной силовой фильтрации, а также в формирование принципов повышения качества электроэнергии внесли отечественные и зарубежные ученые: Ю.С. Железко, Г.С. Зиновьев, О.В. Нос, С.Н. Чижма, Г.Г. Жемеров, Н. Akagi, A. Nabae, H. Kim, J. L. Afonso, F. Z. Peng, R. S. Herrera, A. Ferrero и др.

Вместе с тем малоизученным является вопрос применения устройств АСФ и ГСФ на подстанциях ГЭТ, имеющих сложную составную нагрузку с различными уровнями напряжений на низкой стороне, включающую как резкопеременную тяговую нагрузку сложной формы, так и постоянную активно-индуктивную нагрузку нетяговых потребителей.

**Целью диссертационного исследования** является повышение энергоэффективности работы системы электроснабжения метрополитена посредством разработки и оптимизации средств компенсации реактивной мощности и нелинейных искажений.

Для достижения поставленной цели в диссертационной работе поставлены следующие **задачи**:

1. Рассмотреть основные положения и представить математическое описание наиболее известных теорий мгновенных мощностей, выявить достоинства и недостатки их применения при построении систем управления активными силовыми фильтрами для различных типовых нагрузок. Проанализировать и структурировать основополагающие методы и средства повышения коэффициента мощности, установить особенности и закономерности их использования.

2. Провести натурное исследование энергетических характеристик подстанций метрополитена, используя методы теории вероятности и математической статистики, дать детальный анализ реального состояния проблемы.

3. Спроектировать и разработать экспериментальную установку активного силового фильтра для проведения физического моделирования процессов коррекции высокочастотных искажений тока нагрузки, обосновать возможность использования теорий мгновенных мощностей для построения систем управления АСФ.

4. Разработать аналитическую методику расчета оптимальных мощностей активного силового фильтра и блока конденсаторов в составе ГСФ. С использованием разработанной методики провести оптимизацию мощностей активной и пассивной частей ГСФ по критерию максимизации коэффициента мощности при минимизации стоимости фильтра.

**Объект и предмет исследования.** Объектом исследования является электротехнический комплекс подстанций метрополитена.

Предметом исследования являются электротехнические системы и энергетические установки компенсации реактивной мощности и нелинейных искажений.

### **Научная новизна диссертационного исследования.**

1. Обоснована перспективность и доказана состоятельность практического применения активных силовых фильтров с системой управления, построенной по принципам теорий мгновенных мощностей в задачах повышения качества электроэнергии на подстанциях метрополитена.

2. Проведен комплексный статистический анализ электроэнергетических показателей подстанций метрополитена, поясняющий закономерности возникновения тех или иных факторов, влияющих на качество электроэнергии.

3. Разработана аналитическая методика расчета оптимальных значений мощностей активного силового фильтра и конденсаторной батареи в составе гибридного силового фильтра, которая позволяет повысить качество результатов в задачах коррекции коэффициента мощности.

4. С использованием разработанной методики решена задача оптимизации мощностей активной и пассивной частей гибридного силового фильтра по критерию максимизации коэффициента мощности при минимизации стоимости фильтра для подстанции метрополитена.

### **Методы исследования.**

При выполнении диссертационной работы для решения поставленных задач и обеспечения достоверности результатов применялись методы теории вероятности и статистической обработки информации, использовались методы многокритериальной оптимизации, в частности метод дискретного программирования и метод ветвей и границ. Для решения задачи проектирования энергоэффективной системы охлаждения АСФ использовался пакет программ *COMSOL Metaphysics*. Проверка работоспособности предложенных технических решений реализована методами и средствами имитационного математического моделирования в *Matlab Simulink*, а также результатами физического эксперимента.

**Достоверность** полученных результатов и сделанных в диссертационной работе выводов подтверждается конвергентностью теоретических и лабораторных исследований с результатами математического имитационного моделирования и натурального эксперимента.

**Теоретическая и практическая значимость работы** заключается в разработке комплекса решений по повышению коэффициента мощности подстанций метрополитена, что позволит существенно повысить энергоэффективность работы всей системы электроснабжения метрополитена, а именно:

1. Предложено техническое решение компенсации реактивной мощности и высокочастотных нелинейных искажений посредством гибридного силового фильтра, учитывающие особенности и характер работы системы электроснабжения метрополитена.

2. Разработана математическая имитационная модель активного силового фильтра в *Matlab Simulink*, позволяющая в комплексе исследовать взаимодействие устройства с системой электроснабжения метрополитена при ис-

пользовании различных подходов к формированию компенсационных воздействий.

3. Разработана экспериментальная установка активного силового фильтра, а также лабораторная нагрузочная станция, позволяющие исследовать различные подходы и режимы работы системы компенсации «неактивной» энергии.

4. Предложена методика оптимизации мощностей составных частей гибридного силового фильтра, которая может быть использована не только в системе электроснабжения ГЭТ, но и на любых других предприятиях, имеющих схожий характер нагрузки.

#### **Реализация результатов работы.**

Результаты, полученные в диссертационной работе, используются для расчетов оптимальной компенсации реактивной мощности и мощности искажений в МУП «Новосибирский метрополитен», а также МУП «НЭСКО» для подстанций МКП «ГЭТ» ГорЭлектротранспорта города Новосибирска.

#### **На защиту выносятся следующие основные результаты.**

1. Результаты анализа показателей качества электроэнергии подстанций Новосибирского метрополитена, выполненного с применением методов математической статистики и теории вероятности, обеспечивающие высокую точность и достоверность результатов дальнейших исследований.

2. Особенности построения и результаты моделирования компьютерных и физических моделей активного силового фильтра применительно к системам с различной нагрузкой.

3. Разработанная аналитическая методика расчета оптимальных значений мощностей активного силового фильтра и конденсаторной батареи в составе гибридного силового фильтра.

4. Результаты оптимизации мощностей активной и пассивной частей гибридного силового фильтра по критерию максимизации коэффициента мощности при минимизации стоимости фильтра для подстанции метрополитена.

**Апробация работы.** Основные положения и результаты работы докладывались и обсуждались на: 11rd – International Forum on Strategic Technology IFOST 2016 (Russia, Novosibirsk, 2016); The 17rd, The 18rd, The 19rd International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices – EDM–2016, EDM–2017, EDM–2018 (Russia, Altai, Erlagol, 2016, 2017, 2018); International Conference «Actual Issues of Mechanical Engineering» (AIME 2017) (Russia, Tomsk, 2017); 53-й, 54-й Международной научной студенческой конференции МНСК-2015, МНСК-2016, (г. Новосибирск, 2015, 2016); Всероссийской научной конференции молодых ученых «Наука. Технологии. Инновации» НТИ-2014, НТИ-2015, (г. Новосибирск, 2014, 2015); VII Международной научной конференции молодых учёных – Электротехника. Электротехнология. Энергетика. – ЭЭЭ-2015, (г. Новосибирск, 2015); городской научно-практической конференции аспирантов и магистрантов «Progress through Innovations». (Новосибирск, 2015); Всероссийской научно-

практическая конференция магистрантов и аспирантов «Science in Progress» (г. Новосибирск, 2016); конкурсе Научный потенциал студентов и молодых ученых новосибирской области (г. Новосибирск, 2014, 2015, 2016).

**Публикации.** Общее количество публикаций по теме диссертационной работы – 17 печатных работ, 5 из которых – в ведущих журналах, рекомендованных списком ВАК, 6 – в журналах и трудах научных конференций, индексируемых в международных базах Web of Science, Scopus, 6 – в материалах и трудах Всероссийских и международных научных конференций.

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа состоит из введения, 5 глав, заключения, списка литературы и 3 приложений. Она содержит 162 стр. основного текста, 77 рисунков, 15 таблиц и библиографический список из 128 наименований.

#### **Соответствие паспорту специальности.**

Исследования, проводимые в рамках диссертационной работы, соответствуют области исследования, приведенной в паспорте специальности 05.09.03 – «Электротехнические комплексы и системы» в связи с тем, что в работе рассматриваются вопросы компенсации реактивной мощности и нелинейных искажений, а также исследуются такие электротехнические средства коррекции коэффициента мощности, как активные и гибридные силовые фильтры. В частности, следующие пункты паспорта специальности полностью соответствуют содержанию работы: п. 1 – «развитие общей теории электротехнических комплексов и систем, изучение системных свойств и связей, физическое, математическое, имитационное и компьютерное моделирование компонентов электротехнических комплексов и систем»; п. 3 – «разработка, структурный и параметрический синтез электротехнических комплексов и систем, их оптимизация, а также разработка алгоритмов эффективного управления»; п. 4 – «исследование работоспособности и качества функционирования электротехнических комплексов и систем в различных режимах, при разнообразных внешних воздействиях».

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** отражены научные проблемы, актуальность темы, сформулированы цель и задачи работы, описаны методы исследований. Приведены основные положения, выносимые на защиту, изложены сведения о научной новизне и практической значимости, реализации и апробации работы.

**В первой главе** рассматривается классическое представление и понятие об активной и реактивной мощности, при этом отдельное внимание уделяется определению понятия и его физическому смыслу. При этом данный вопрос рассматривается также и в несинусоидальных режимах. Показано, что за совершение полезной работы отвечает не только первая гармоника тока  $I_1$ , но также и все те высокочастотные составляющие тока нагрузки  $I_i$  при  $i > 1$ , гармонический состав которых совпадает с гармоническим составом питающего напряжения  $U_i$ . В главе рассматриваются основные показатели



качества электроэнергии, которые характеризуют реактивную мощность и нелинейные искажения.

Ключевым вопросом первой главы является анализ наиболее известных теорий мгновенных мощностей, включающий математическое описание их основных положений. Группой японских учёных под руководством Н.Акаги в 1980х г. была представлена «Обобщенная теория мгновенной реактивной мощности в трехфазных системах», которая также известна как теория мгновенной мощности или  $p-q$  теория ( $p-q$  Theory). Впоследствии данная формулировка была доработана и получила название модифицированной  $p-q$  теории (*Modified  $p-q$  Theory*). В основе данных теорий используется линейно-ортогональное преобразование Е. Clarke. Затем в координатах  $\alpha-\beta-0$  производится расчет мгновенных значений активной и реактивной мощностей.

Далее в работе рассматриваются теории последователей Н.Акаги, которые развивали предложенные им идеи. Наиболее известными из них являются:  $p-q-r$  теория;  $i_d-i_q$  метод, который также известен как  $d-q$  теория; кросс-векторная теория мгновенной мощности.

**Вторая глава** посвящена обзору и анализу существующих методов и средств повышения коэффициента мощности подстанций. Вначале детально рассматриваются следствия влияния на сеть характера тока нагрузки. Затем приводится обзор способов повышения качества электроэнергии, а именно:

- увеличение пульсовости схем выпрямления, что позволяет за счет внедрения более совершенных схемотехнических решений уменьшить уровень вносимых в сеть нелинейных искажений;

- применение управляемых зонно-фазных выпрямителей, в качестве регулятора уровня напряжения с высоким уровнем коэффициента мощности, при наличии такой задачи;

- компенсация реактивной мощности, где рассматриваются основные теоретические принципы и существующие практические системы, в частности: использование синхронных машин, блоков конденсаторов, статических тиристорных компенсаторов;

- коррекция высокочастотных гармонических искажений с помощью активных силовых фильтров, где обозначен принцип работы устройств, основные схемные решения и преимущества

- применение гибридных средств, где обращается внимание на совмещении функций пассивной компенсации с активной в устройстве с одной системой управления.

Также необходимо заметить, что выбор компенсирующего устройства должен быть основан на анализе энергетических показателей потребителя, и в соответствии с этим сделан обоснованный выбор компенсирующего устройства.

На основании представленного обзора выполнен сравнительный анализ компенсирующих устройств, позволивший выявить преимущества и обосно-

вать необходимость использования тех или иных способов компенсации для определенных потребителей.

**В третьей главе** диссертационной работы выполнено исследование

качества электроэнергии на подстанциях метрополитена. Статистика распределения энергопотребления на подстанции в метрополитене приведена на рисунке 1.

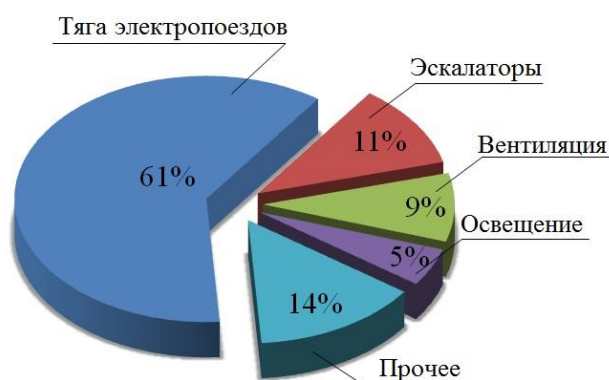


Рисунок 1 – Потребление электроэнергии на СТП-4 «Площадь Ленина»

Анализ представленной диаграммы позволяет заключить, что потребителей электроэнергии в метрополитене можно условно разделить на: 1) тяговую нагрузку подвижного состава и 2) нагрузки систем жизнеобеспечения: вентиляция, эскалаторы, насосы, освещение и др.

Движение подвижного состава по линии описывается характеристиками  $V(t)$ ,  $V(l)$ ,  $I(t)$ , которые, в свою очередь, зависят от множества факторов: режима ведения поезда, интервалов между поездами, количества пассажиров, и др. Следовательно, характеристики энергопотребления необходимо рассматривать как случайное явление и при их анализе использовать методы математической статистики.

Основной задачей статистического анализа коэффициента мощности является установление закона распределения вероятностей, устанавливающего связь между значением коэффициента мощности и его вероятностью.

Представлены методы, и основные соотношения, с помощью которых проводится анализ энергетических показателей и характеристик, среди них:

– математическое ожидание:

$$M[X] = \tilde{m}_x = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \quad (1)$$

где  $n$  – число членов статистического ряда;

$x$  – текущее значение случайной величины;

– дисперсия:

$$D[X] = D_x = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - m_x)^2 \text{ и др.} \quad (2)$$

Далее отдельно рассматриваются показатели реактивной энергии и мощности искажений, обусловленные тяговой нагрузкой. Представлены гистограммы плотности вероятности и функции распределения для  $\cos \varphi$  и ТНД (рисунок 2, 3), рассчитаны выравнивающие функции, которые проверены по критериям согласия. Рассчитан и представлен среднестатистический гармонический состав тока нагрузки.

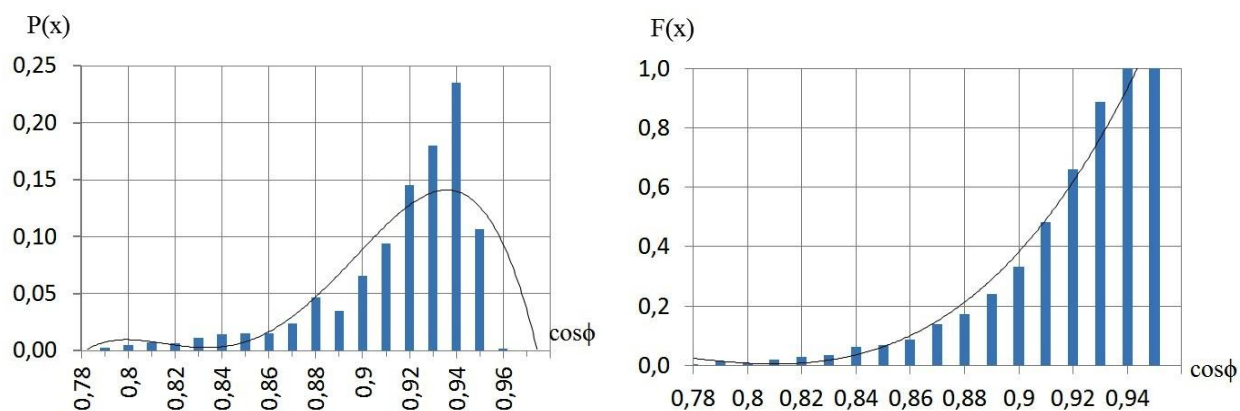


Рисунок 2 – Гистограмма плотности вероятности и функции распределения  $\cos \varphi$

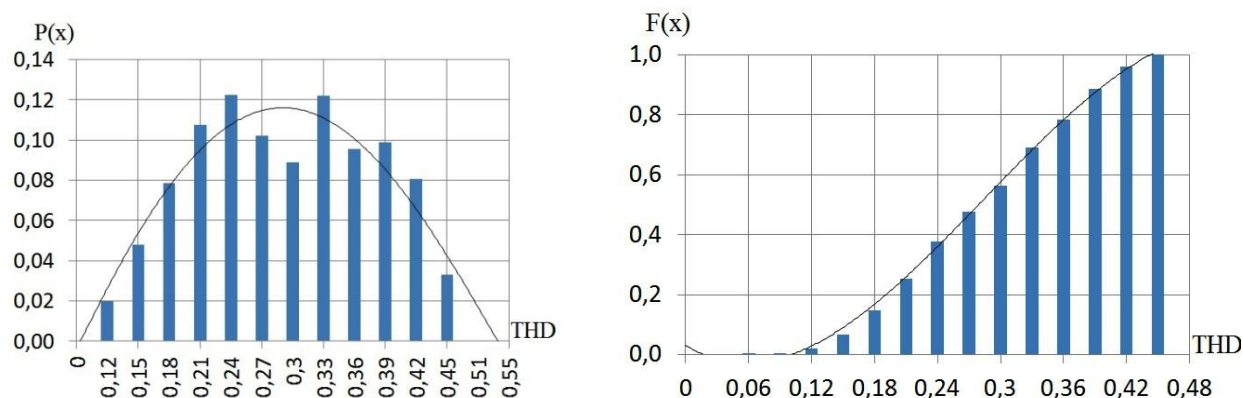


Рисунок 3 – Гистограмма плотности вероятности и функции распределения THD

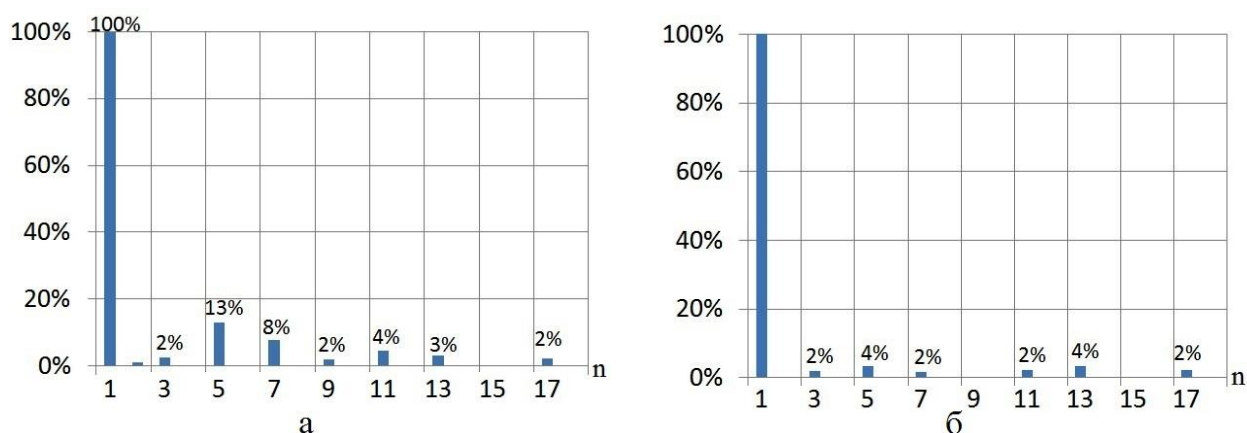


Рисунок 4 – Гармонический состав тока тяговой (а) и нетяговых (б) нагрузок относительно тока основной гармоники

Затем в главе рассматриваются особенности энергопотребления нетяговых потребителей, таких как электропривод эскалаторов и вентиляции, насосы, освещение, для которых также рассчитаны статистические показатели качества.

**В четвертой главе** описан процесс разработки и исследования экспериментальной установки активной компенсации реактивной мощности и нелинейных искажений. Устройство АСФ представлено в виде функциональных узлов, и дано описание и расчет по каждому из них. Также отдельно указаны технические подробности особенностей построения АСФ, например применение сердечника выходного дросселя с разомкнутой ферритной маг-

нитной системой с индивидуальными фазными индуктивностями. Приведен расчет схем измерительной аппаратуры: измерение напряжения в звене постоянного тока, фазных напряжений, фазных токов АСФ и нагрузки, температуры полупроводниковых силовых элементов.

Отдельное внимание уделено построению системы управления и формированию стратегии управления АСФ (рисунок 5).

На основе анализа теорий мгновенных мощностей, представленного в первой главе, и с учетом того, что система электроснабжения метрополитена является трехфазной трехпроводной принято решение использовать систему управления на основе  $p-q-r$  теории, так как в данной теории зависимость трех токов от соответствующих мгновенных мощностей имеет линейных характер. Также был сделан вывод о целесообразности применения стратегии управления, основанной на получении синусоидального сбалансированного тока нагрузки.

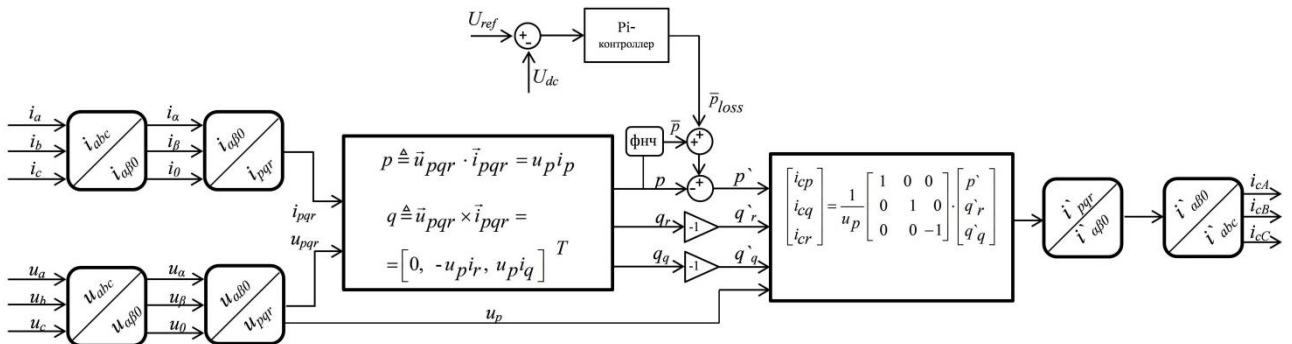


Рисунок 5 – Структурная схема системы управления АСФ

Выполнено моделирование АСФ в *Matlab Simulink*. Математическая имитационная модель включает в себя подсистемы: сети электроснабжения, тяговой нагрузки электроподвижного состава, нетяговых потребителей, самого АСФ (рисунок 6).

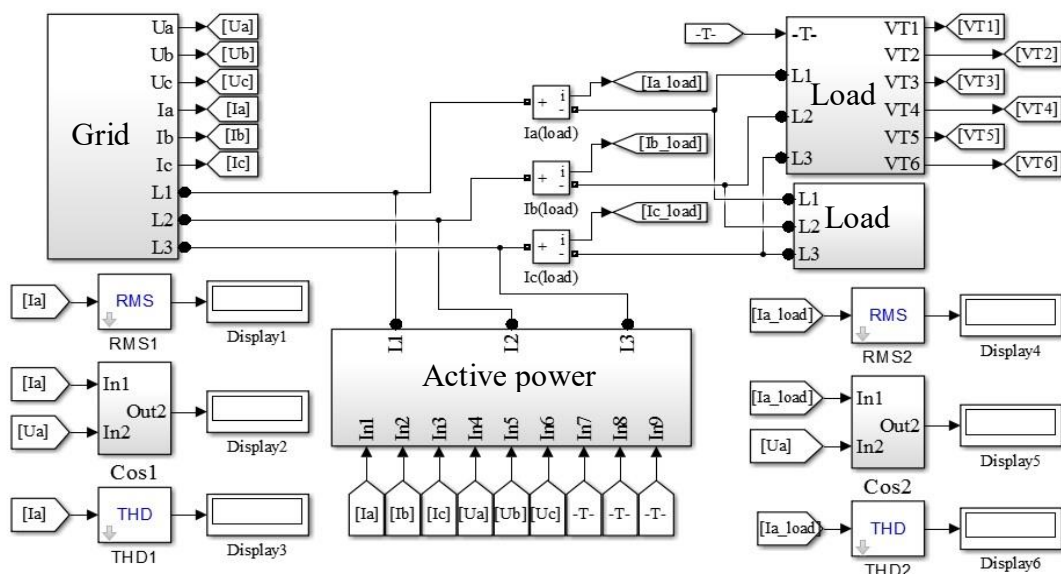


Рисунок 6 – Общий вид модели подключения АСФ к сети в *Matlab Simulink*

В свою очередь АСФ построен по типу параллельного компенсатора с системой управления на основе  $p-q-r$  теории. Подробно блок АСФ представлен на рисунке 7. Приведены результаты моделирования, как для синусоидального, так и для несинусоидального режима работы.

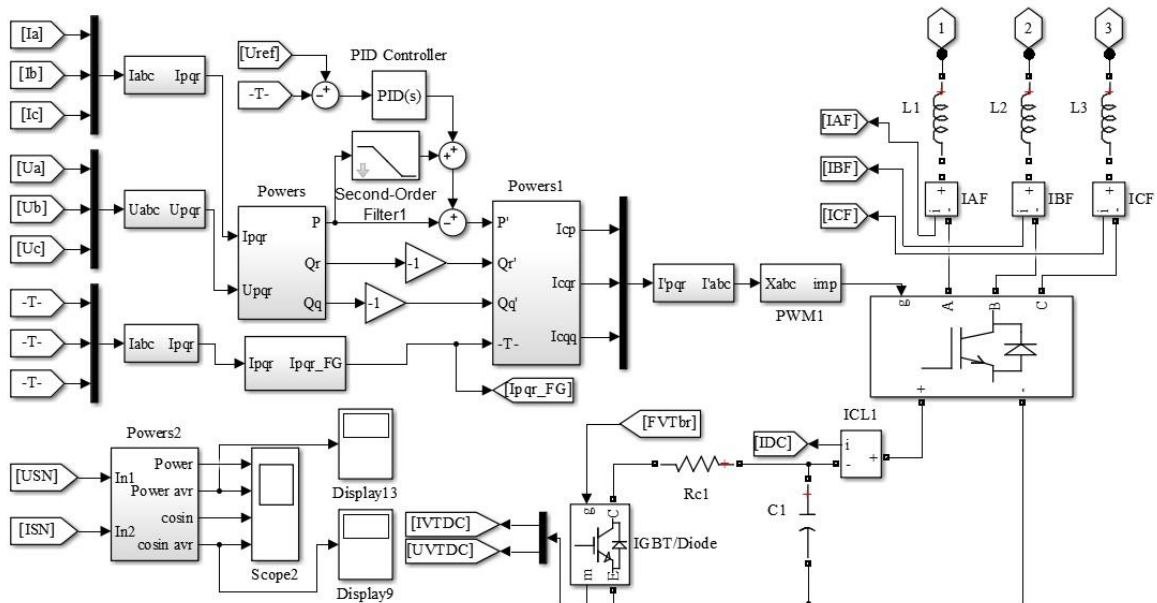


Рисунок 7 – Блок АСФ в *Matlab Simulink*

Результаты моделирования изображены на рисунке 8 и показывают полную компенсацию гармонических искажений, помимо небольших пульсаций на частоте работы ШИМ, а также практически полностью скомпенсированную реактивную составляющую тока нагрузки.

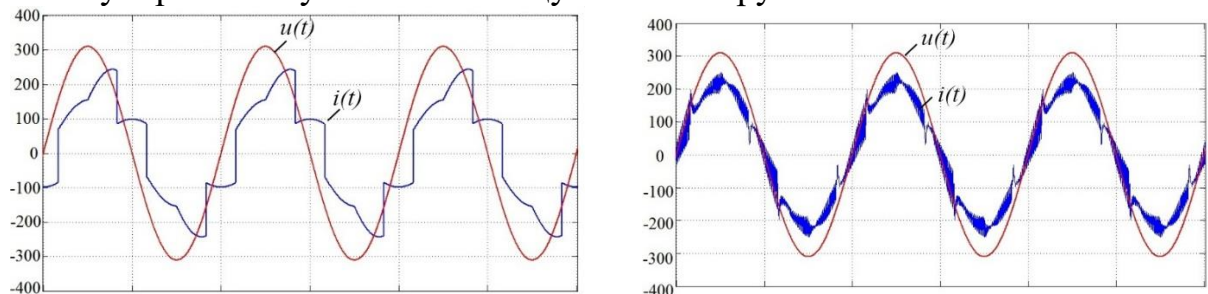


Рисунок 8 – Результаты моделирования АСФ в *Matlab Simulink*

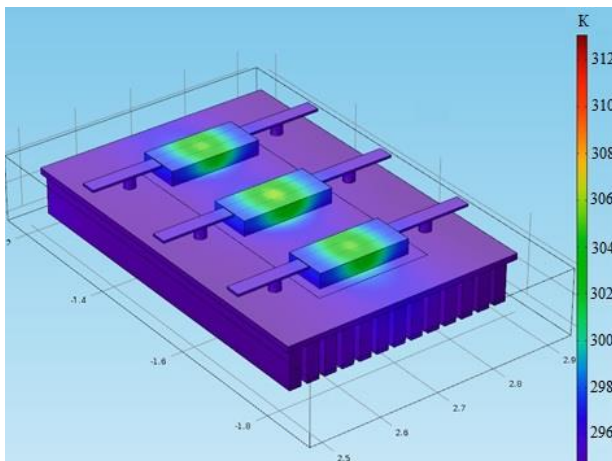


Рисунок 9 – Моделирование охлаждения силовых транзисторов

Также в работе представлены результаты исследования способов принудительного охлаждения силовых транзисторов, выполненного средствами моделирования в COMSOL Metaphysics. Исследования проводились с использованием вычислительных мощностей университета прикладных наук (University of Applied Sciences) г. Ландсхут, Германия, в рамках гранта DAAD. Результат представлен на рисунке 9.

В результате проведенных исследований, расчётов и моделирования разработана экспериментальная установка активной силовой фильтрации (рисунок 10) и физическая модель нагрузочной установки, имитирующей нагрузку метрополитена. Представленные результаты испытаний АСФ по компенсации реактивной мощности и нелинейных искажений (рисунок 11) коррелируют с результатами математических расчетов и компьютерного моделирования и подтверждают высокую эффективность использования АСФ для коррекции формы тока сложной нагрузки.

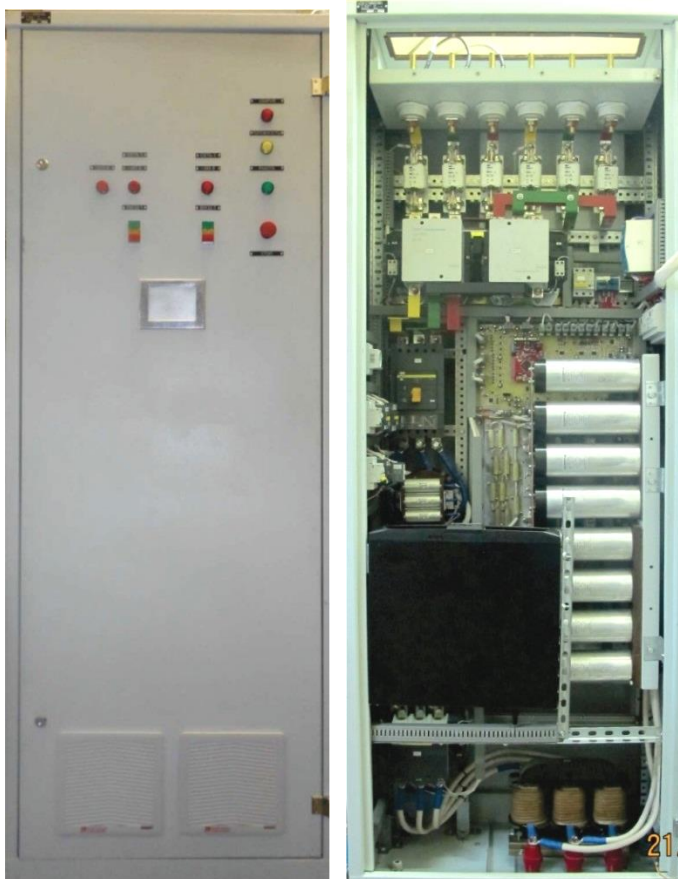


Рисунок 10 – экспериментальная установка активной силовой коррекции

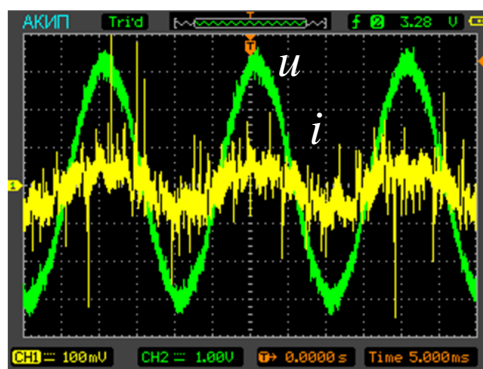
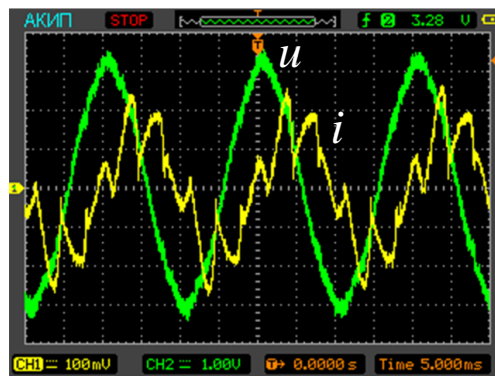


Рисунок 11 – Осциллограммы тока и напряжения при испытаниях АСФ

**В пятой главе** сделано предположение о том, что в задаче компенсации реактивной мощности и нелинейных искажений в системе электроснабжения метрополитена наибольшую эффективность покажет гибридный силовой фильтр, состоящий из параллельных АСФ и блока конденсаторов. При этом шаговое подключение к сети конденсаторных блоков обеспечит минимальные потери при компенсации реактивной мощности. Участие в задаче компенсации реактивной мощности активного силового фильтра позволит избежать эффектов недо- и перекомпенсации, а за счет применения шагового БК имеется возможность уменьшить номинальную мощность АСФ, а значит и конечную стоимость устройства коррекции. Распределение зон ответственности при компенсации реактивной мощности посредством ГСФ изображено на рисунке 12.

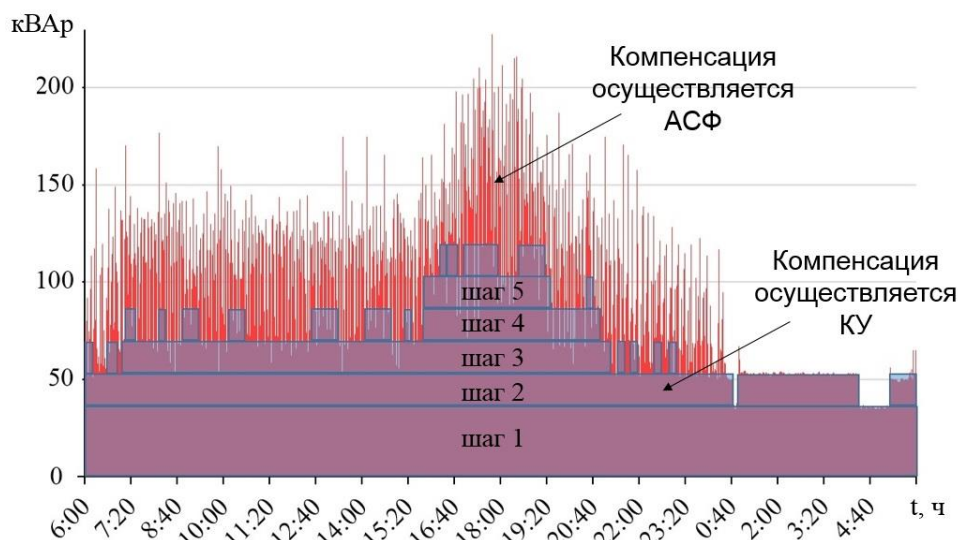


Рисунок 12 – Зоны ответственности за компенсацию реактивной мощности ГСФ

В частности, рассмотрен вопрос взаимодействия активной и пассивной части ГСФ, для этого разработана функциональная схема единой системы управления устройством; представлено схемное решение интеграции ГСФ в систему электроснабжения метрополитена, учитывающие разные уровни напряжений на низкой стороне у тяговой и нетяговой нагрузки; рассмотрен вопрос месторазмещения ГСФ на подстанции.

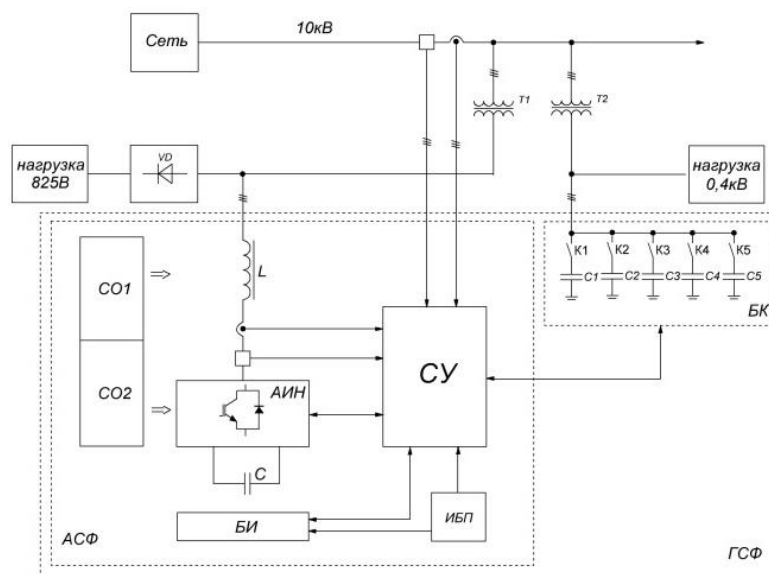


Рисунок 13 – Функциональная схема гибридного силового фильтра

При использовании ГСФ в качестве устройства коррекции актуальным становится вопрос, о соотношении мощностей БК и АСФ для получения оптимальных параметров ГСФ.

Для решения поставленного вопроса разработана аналитическая методика оптимального выбора мощностей активной и пассивной части ГСФ, которая включает в себя:

1. Исследование стоимости составных частей ГСФ разных мощностей, построение зависимости стоимости устройства от его мощности.

2. Постановка оптимизационной задачи, определение критериев оптимальности, обоснование и вывод целевой функции оптимизации.

Оптимизационная задача формулируется следующим образом:

– необходимо найти такое соотношение мощностей активной и пассивной частей гибридного фильтра, чтобы обеспечить требуемое качество электроэнергии в сети, при минимальной стоимости самого устройства.

Показателями, определяющими эффективность принимаемого решения, являются критерии оптимальности. Поставленную задачу описывают два критерия:

- критерий качества электроэнергии;
- экономический критерий.

целевая функция имеет вид:

$$\begin{aligned} PF &\rightarrow \max, PF(x, y) \mid x \in X \subseteq W \\ \xi &\rightarrow \min, \xi(x, y) \mid y \in Y \subseteq W \end{aligned} \quad (3)$$

где:  $W$  – множество решений;  $PF$  – коэффициент мощности подстанции;  $\xi$  – стоимость ГСФ;  $x$  – переменная мощности пассивного фильтра  $Q_{БК}$ ;  $y$  – переменная тока АСФ  $I_{АСФ}$ ,  $X$  – множество допустимых решений по мощности пассивной части фильтра  $Q_{БК}$ ;  $Y$  – множество допустимых решений по току АСФ  $I_{АСФ}$ .

3. Применение системы ограничений и допущений, определение граничных условий области допустимых значений.

4. Расчет и получение предельных решений, заключающихся в применении только активной или только пассивной частей ГСФ.

5. Расчет и получение «гибридных» решений, представляющих собой различные комбинации мощностей активной и пассивной части в составе ГСФ.

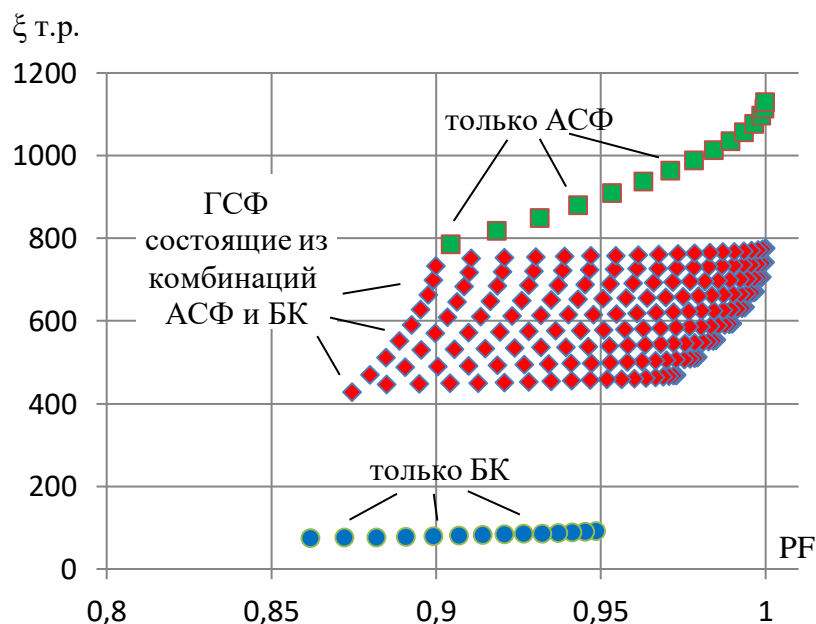


Рисунок 14 – Стоимость и коэффициент мощности ГСФ состоящих из различных комбинаций мощностей активной и пассивной частей, включая предельные решения



6. Определение множества допустимых решений в соответствии с заданными показателями необходимого качества электроэнергии.

7. Наложение условия эффективности по Парето, получение множества эффективных решений.

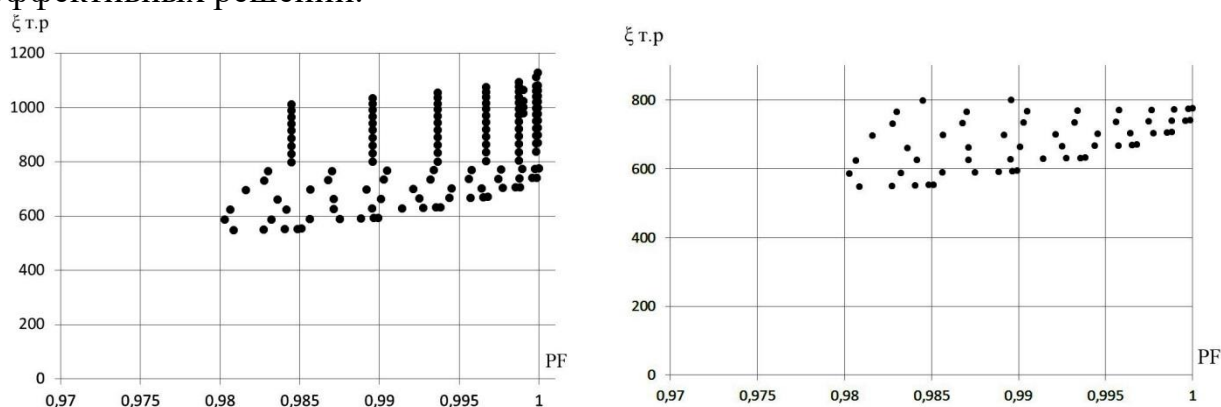


Рисунок 15 – Множество допустимых решений и множество Парето-эффективных решений

8. Определение оптимального решения, используя выбранный подход: по минимальной стоимости; по заданной стоимости; по критериям веса.

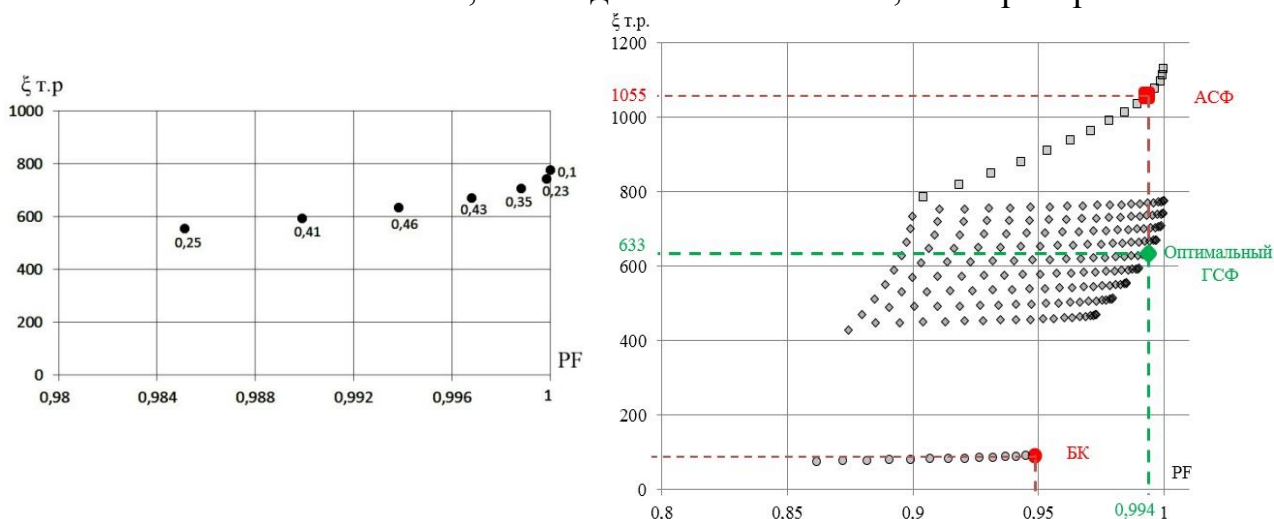


Рисунок 16 – Группа решений с максимальным условным обобщенным критерием для каждого подмножества  $A, B, G \in Z$  и сравнение использования АСФ, БК и ГСФ для коррекции коэффициента мощности подстанции метрополитена

Представлены результаты оптимизации мощностей активной и пассивной частей ГСФ по критерию максимизации коэффициента мощности при минимизации стоимости фильтра, полученные с использованием разработанной методики. Установлено, что в рамках решаемой задачи при заданном коэффициенте мощности стоимость гибридного фильтра ниже стоимости активного фильтра на 40%.

**В приложениях** представлена блок-схема методики расчёта мощности активной и пассивной частей ГСФ и принципиальная электрическая схема нагрузочной установки, а также акты внедрения результатов диссертационного исследования.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

В ходе выполнения диссертационного исследования по выявлению и решению проблем качества электроэнергии на подстанциях метрополитена были получены следующие результаты:

1. На основании выполненного сравнительного анализа рассмотрены базовые математические подходы к определению мгновенных мощностей в трехфазных системах с целью применения подходящего решения при формировании компенсационных воздействий активным силовым фильтром. Выявлены основные недостатки в теоретическом описании рассмотренных концепций, а также неоспоримые преимущества их применения в системах управления АСФ на практике. Также проанализированы основные методы и средства повышения коэффициента мощности, показано, что для расчета и проектирования экономически-обоснованного средства повышения качества электроэнергии необходимо детально изучить характер потребления энергии рассматриваемой нагрузкой.

2. Выполнено статистическое исследование показателей качества электроэнергии в реальных условиях работы метрополитена. Определено, что основным источником высших гармоник на тяговых подстанциях являются преобразовательные агрегаты, а реактивной мощности – электропривода служб собственного обеспечения, характер нагрузки – активно-индуктивный с наличием гармоник кратным  $6K \pm 1$ , а суммарная мощность гармоник составляет около 40% от мощности основной гармоники.

3. С использованием результатов математического имитационного моделирования в Matlab Simulink, а также аналитических расчетов функциональных блоков АСФ создана экспериментальная установка активной силовой фильтрации. Проведенными исследованиями доказана состоятельность и практическая применимость теорий мгновенных мощностей для компенсации реактивной мощности и мощности искажений в сложных технических системах.

4. Обоснована и аналитически доказана эффективность применения в качестве устройства компенсации нелинейных искажений и реактивной мощности на тяговых подстанциях метрополитена гибридного силового фильтра. Проведен ряд исследований по вопросам применения данного решения, а именно: на базе единой системы управления организовано взаимодействие составных частей ГСФ, рассмотрен вопрос локализации на тяговой подстанции, получены зависимости стоимости АСФ и БК от их мощности. Разработана аналитическая методика расчета оптимальных значений мощностей активного силового фильтра и блока конденсаторов в составе ГСФ. С использованием разработанной методики проведена оптимизация мощностей активной и пассивной частей ГСФ по критерию максимизации коэффициента мощности при минимизации стоимости фильтра. Установлено, что в рамках решаемой задачи при заданном коэффициенте мощности стоимость гибридного фильтра ниже стоимости активного фильтра на 40%.

## ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### Публикации в ведущих периодических изданиях, рекомендованных ВАК

1. Петров А.А. Оптимизация мощностей активной и пассивной частей гибридного силового фильтра / А.А. Петров, Н.И. Щуров, А.Г. Волков // Электропитание. – 2019. – № 1, с. 25-34.

2. Петров А.А. Повышение качества электроэнергии метрополитена [Electricity quality improving in metro] / А.А. Петров, Н.И. Щуров, А.А. Штанг // Доклады академии наук высшей школы Российской Федерации. – 2016. – № 4 (33), с. 80-87. doi:10.17212/1727-2769-2016-4-80-87

3. Петров А.А. Система управления устройством коррекции коэффициента мощности подстанции метрополитена // Доклады академии наук высшей школы Российской Федерации. – 2019. – № 1 (42), с. 83-90.

4. Разработка многофункционального стенда комплексного исследования накопителей энергии для транспортных систем / М. В. Калугин, А. А. Петров, Д. А. Шмаков, К. С. Шабалтас // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2014. – № 1-2. – с. 316-319.

5. Пригородные зоны в составе агломерации: Развитие транспортной и энергетической инфраструктуры / И. Г. Чиркова, А. А. Петров, Е.С. Казарин // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. - 2014. - № 1-2. - с. 33-36.

### Статьи в журналах и материалы конференций, входящих в международные базы SCOPUS, Web of Science

6. Petrov A. A. The analysis of reactive power in metro / A. A. Petrov, N. S. Logutenko; sci. ed. N. I. Schurov // 11 International forum on strategic technology (IFOST 2016): proc., Novosibirsk, 1–3 June 2016. – Novosibirsk: NSTU, 2016. – Pt. 2. – P. 121-123. - ISBN 978-1-5090-0853-7.

7. Petrov A. A. Hybrid system of reactive power compensation / A. A. Petrov, N. I. Shchurov, M. V. Rozhkova // The 18 international conference of young specialists on micro/nanotechnologies and electron devices, EDM 2017: proc., Altai, Erlagol, 29 June – 3 July 2017. – Novosibirsk: NSTU, 2017. – P. 533-536. - DOI: 10.1109/EDM.2017.798181

8. Petrov A.A. Reactive power compensation and high-frequency distortions correction in Metro. / A. A. Petrov, N. I. Shchurov // Advances in Engineering Research. Actual Issues of Mechanical Engineering, AIME 2017: proc., Tomsk Polytechnic University, 27– 29 July 2017. – Tomsk, 2017. – pp. 604-608 - doi:10.2991/aime-17.2017.98

9. Petrov A.A., Shurov N.I. Hybrid system of power factor correction. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 87 (2017) 032031. doi:10.1088/1755-1315/87/3/032031

10. Petrov, A.A. Improving the Quality of Electricity Metro / A. A. Petrov, N. I. Shchurov //14th International Scientific-Technical Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering, APEIE 2018 – Proceed-

ings Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.; Novosibirsk; Russian Federation; 2-6 October 2018 p. 339-342

11. Petrov, A.A. Comparative analysis of measures to improve the quality of electricity in metro / A. A. Petrov, N. I. Shchurov //19th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices, EDM 2018; Erlagol, Altai; Russian Federation; 29 June - 3 July 2018; p. 690-693

### **Публикации в трудах конференций**

12. Петров А. А. К вопросу выбора компенсирующего реактивную энергию устройства для метрополитена / А. А. Петров, П. А. Бахолдин; науч. рук. В. В. Бирюков // Фундаментальные и прикладные исследования: сб. науч. тр. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2016. – с. 33-35.

13. Петров А.А. Совершенствование системы оперативного постоянного тока метрополитена / А.А. Петров, П.А. Бахолдин, Н.С. Логутенко // Научный потенциал студентов и молодых ученых новосибирской области: сб. науч. тр. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2016. с. 137-139.

14. Petrov A. A. Reactive power in metro / A. A. Petrov, M. V. Rozhkova; sci. ed. N. I. Schurov // Science in Progress: тез. Всерос. науч.-практ. конф. магистрантов и аспирантов. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2016. – С. 166-168.

15. Петров А. А. Организация компенсации реактивной мощности на подстанциях метрополитена / А. А. Петров; науч. рук. Н. И. Щуров // Наука. Технологии. Инновации: сб. науч. тр. : в 9 ч., Новосибирск, 5–9 дек. 2016 г. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2016. – Ч. 5. – с. 239-240.

16. Петров А. А. Совершенствование системы оперативного постоянного тока метрополитена / А. А. Петров, А.А. Абрамская М. В. Калугин; науч. рук. М.В. Калугин// Электротехника. Электротехнология. Энергетика: в 3 ч.: сборник научных трудов VII Международной научной конференции молодых ученых. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2015. – с. 228-232.

17. Петров А.А. Компенсация реактивной мощности на метрополитене / А.А. Петров, Н.С. Логутенко // Наука. Технологии. Инновации: сб. науч. тр. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2015. –ч.5. – с. 148-150.

Отпечатано в типографии  
Новосибирского государственного технического университета  
630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20  
Тел./факс (383) 346-08-57  
Формат 60x84x1/16. Тираж 100 экз. Печ. л. 1.25.  
Заказ №1584 Подписано в печать «19» ноября 2019 г.