

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«НОВОСИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи



ПЕТРОВ АНДРЕЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ

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

Специальность 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

Диссертация
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель
Щуров Николай Иванович
доктор технических наук, профессор

Новосибирск – 2019

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
Глава 1 СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА ОПРЕДЕЛЕНИЯ МГНОВЕННЫХ МОЩНОСТЕЙ В ТРЕХФАЗНЫХ СИСТЕМАХ.....	18
1.1 Классическое представление и понятие об активной и реактивной мощностях.....	18
1.2 Показатели качества электроэнергии, характеризующие реактивную мощность и нелинейные искажения.....	21
1.3 Реактивная мощность по S. Fryze.....	23
1.4 Оригинальная и модифицированная $p-q$ теории Н. Akagi.....	25
1.4.1 Оригинальная $p-q$ теория.....	26
1.4.2 Модифицированная $p-q$ теория.....	27
1.4.3 Стратегии управления активным фильтром на основе теорий Н. Akagi.....	28
1.5 $P-q-r$ теория мгновенной мощности.....	32
1.6 $D-q$ теория мгновенной мощности.....	34
1.7 Кросс-векторная теория мгновенной мощности.....	35
Выводы по главе 1.....	37
Глава 2 МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ПОВЫШЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА МОЩНОСТИ.....	39
2.1 Влияние характера тока нагрузки на эффективность работы электрических сетей.....	39
2.2 Увеличение пульсовости схемы выпрямления.....	42
2.3 Применение управляемых зонно-фазных выпрямителей.....	44
2.4 Компенсация реактивной мощности.....	46
2.4.1 Синхронные машины.....	49
2.4.2 Батареи конденсаторов.....	50
2.4.3 Статические тиристорные компенсаторы.....	52
2.5 Коррекция высокочастотных нелинейных искажений активным	

силовым фильтром.....	54
2.6 Гибридные устройства повышения коэффициента мощности...	57
2.7 Сравнение эффективности компенсирующих устройств.....	59
Выводы по главе 2.....	61
Глава 3 АНАЛИЗ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ НА ПОДСТАНЦИЯХ МЕТРОПОЛИТЕНА.....	62
3.1 Основные положения анализа качества электроэнергии в метрополитене.....	63
3.2 Реактивная энергия и мощность искажений, обусловленные тяговой нагрузкой электропоездов метрополитена.....	65
3.3 Реактивная энергия в системе электроснабжения эскалаторов, вентиляции и освещения метрополитена.....	73
3.3.1 Особенности энергопотребления нетяговых нагрузок метрополитена.....	73
3.3.2 Анализ показателей качества нетяговых потребителей электроэнергии.....	79
Выводы по главе 3.....	83
Глава 4 РАЗРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО УСТРОЙСТВА АКТИВНОЙ КОРРЕКЦИИ КОЭФФИЦИЕНТА МОЩНОСТИ ПОДСТАНЦИИ МЕТРОПОЛИТЕНА.....	84
4.1 Расчет и выбор элементов активного силового фильтра.....	85
4.2 Стратегия управления активным силовым фильтром	95
4.3 Математическое имитационное моделирование активного силового фильтра.....	97
4.3.1 Математическое имитационное моделирование активного силового фильтра в Matlab Simulink.....	97
4.3.2 Исследование отвода теплоты от силовых транзисторов в COMSOL Metaphysics.....	102
4.4 Проектирование, моделирование и испытание нагрузочной	

установки, имитирующей нагрузку метрополитена.....	106
4.5 Основные параметры и результаты испытаний экспериментальной установки активной силовой коррекции.....	113
Выводы по главе 4	116
Глава 5 МЕТОДИКА ОПТИМИЗАЦИИ МОЩНОСТЕЙ АКТИВНОГО СИЛОВОГО ФИЛЬТРА И БЛОКА КОНДЕНСАТОРОВ В СОСТАВЕ ГИБРИДНОГО СИЛОВОГО ФИЛЬТРА.....	117
5.1 Применение гибридного силового фильтра для коррекции коэффициента мощности.....	117
5.2 Система управления гибридным силовым фильтром.....	119
5.3 Локализация гибридного силового фильтра на подстанции метрополитена.....	122
5.4 Исследование стоимости составных частей гибридного фильтра	124
5.5 Оптимизация мощностей активной и пассивной частей гибридного фильтра.....	126
Выводы по главе 5.....	141
Заключение.....	142
Список литературы.....	144
Приложение А Блок-схема методики расчёта мощностей активной и пассивной частей гибридного силового фильтра.....	159
Приложение Б Принципиальная электрическая схема нагрузочной установки.....	160
Приложение В Акты внедрения научных результатов диссертации.....	161

ВВЕДЕНИЕ

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 топливо-энергетических ресурсов.

В настоящее время можно прогнозировать увеличение темпов роста энергопотребления в ближайшие десятилетия, что подтверждается механизацией промышленной и бытовой сферы, возрастанием энергозатрат на обеспечение качества жизни и даже приближающейся эрой электромобилей.

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 [30, 66, 72, 73, 74]. Например, в «Энергетической стратегии России на период до 2030 года» ставится задача по разработке безопасных управляемых электроэнергетических систем, обеспечивающих необходимое качество электроэнергии [74].

Ключевыми проблемами данной сферы электроэнергетики являются [13, 14]:

– низкие показатели коэффициента мощности подстанций;

- несинусоидальное потребление электроэнергии нелинейными нагрузками;
- высокие показатели реактивной мощности в сети;
- неравномерная загрузка фаз и др.

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 сторонних потребителей.

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.

На сегодняшний день для решения данных проблем в системе электроснабжения метрополитена применяются компенсаторы реактивной мощности, состоящие из наборных блоков конденсаторных батарей. Представленное решение имеет несколько значительных недостатков [37]:

- мощность конденсаторной установки рассчитана на среднюю реактивную мощность нагрузки, что означает постоянное появление эффектов недо- и перекомпенсации;
- появление резонансных явлений в силу наличия индуктивности в сети;
- результат компенсации зависит от формы кривой питающего напряжения;
- высокочастотные нелинейные искажения остаются не скомпенсированными и передаются по всей сети.

При этом последнее имеет отдельный набор неблагоприятных эффектов, а именно происходит:

- уменьшение пропускной способности и увеличение потерь на нагрев силовых линий электропередач;
- увеличение потерь в трансформаторах за счет увеличения потерь на гистерезис и появления вихревых токов;

- более быстрое старение изоляции кабельных линий;
- появление помех в сетях близлежащих коммуникаций и др.

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 [37].

Необходимо отметить, что реализация и практическое применение устройств АСФ стало возможным с появлением теории мгновенной мощности (p - q теории), родоначальником которой является Н. Akagi [82]. На протяжении последних десятилетий наблюдается значительный интерес к совершенствованию и развитию данной теории. Наиболее известные решения это: модифицированная p - q теория [83]; p - q - r теория [76]; d - q теория [123]; векторные формулировки [113], применение алгебры кватернионов для построения системы управления АСФ [37].

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 значительной мере уменьшить необходимую мощность АСФ, что сказывается на конечной стоимости фильтрокомпенсирующего устройства, данное решение принято называть гибридным силовым фильтром (ГСФ) [83].

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, Н. 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 использовании 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 различным характером нагрузки.

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 конференция аспирантов и магистрантов «Progress through Innovations». (Новосибирск, 2015); Всероссийской научно-практической 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».

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, отдельное внимание уделяется определению понятий и их физическому смыслу.

Далее 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. Это «Обобщенная теория мгновенной реактивной мощности в трехфазных системах», которая также известна как теория мгновенной мощности или $p-q$ теория Н.Акаги ($p-q$ Theory). Впоследствии данная формулировка была доработана и получила название модифицированной $p-q$ теории (*Modified $p-q$ Theory*). 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 и кросс-векторная теория мгновенной мощности.

Вторая глава посвящена обзору и анализу существующих методов и средств повышения коэффициента мощности. Вначале детально рассматриваются следствия влияния на сеть характера тока нагрузки. Затем приводится обзор способов повышения качества электроэнергии, а именно: увеличение пульсовости схем выпрямления; применение управляемых зонно-фазных выпрямителей; компенсация реактивной мощности; коррекция высокочастотных нелинейных искажений с помощью активных силовых фильтров; применение гибридных устройств компенсации.

На основании представленного обзора выполнен сравнительный анализ компенсирующих устройств, позволяющий выявить преимущества и обосновать необходимость использования тех или иных способов компенсации для различных потребителей. Также отмечено, что выбор

компенсирующего устройства должен быть основан на анализе энергетических показателей потребителя.

В третьей главе диссертационной работы выполнено исследование качества электроэнергии на подстанциях метрополитена. Представлены методы и основные соотношения, с помощью которых проводится исследование и анализ энергетических показателей и характеристик.

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

Затем в главе рассматриваются особенности энергопотребления нетяговых потребителей, таких как электропривод эскалаторов, вентиляции и насосов, система освещения, для которых также рассчитаны статистические показатели качества электроэнергии.

В четвертой главе описан процесс разработки и исследования экспериментальной установки активной компенсации реактивной мощности и нелинейных искажений. Устройство АСФ представлено в виде функциональных узлов, дано описание и расчет по каждому из них. Отдельное внимание уделено построению системы управления и выбору стратегии управления АСФ.

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

В результате проведенных исследований, расчётов, моделирования разработана экспериментальная установка активной силовой фильтрации и физическая модель нагрузочной установки, имитирующей нагрузку

метрополитена. Представленные результаты испытаний АСФ по компенсации реактивной мощности и нелинейных искажений коррелируют с результатами математических расчетов и компьютерного моделирования и подтверждают высокую эффективность использования АСФ для коррекции коэффициента мощности сложной нагрузки.

В пятой главе представлены результаты исследования составных частей гибридного силового фильтра в задаче компенсации реактивной мощности и нелинейных искажений в системе электроснабжения метрополитена. В частности, рассмотрен вопрос взаимодействия активной и пассивной части ГСФ, для этого разработана и представлена 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 нагрузок; рассмотрен вопрос месторазмещения ГСФ на подстанции.

В работе представлена аналитическая методика оптимального выбора мощностей активной и пассивной частей ГСФ. Показаны 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, принципиальная электрическая схема нагрузочной установки, а также акты внедрения результатов диссертационного исследования.

Глава 1 СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА ОПРЕДЕЛЕНИЯ МГНОВЕННЫХ МОЩНОСТЕЙ В ТРЕХФАЗНЫХ СИСТЕМАХ

1.1 Классическое представление и понятие об активной и реактивной мощностях

Электрический ток промышленной сети изменяется во времени по синусоидальному закону [4, 19]:

$$i = I_m \sin\left(\frac{2\pi t}{T} + \varphi\right) = I_m \sin(\omega t + \varphi). \quad (1.1)$$

Для количественного описания синусоидально изменяющегося тока применяют его среднее значение за полпериода [2, 4]:

$$I_{cp} = \frac{1}{T/2} \int_0^{T/2} I_m \sin \omega t dt = \frac{2}{\pi} I_m. \quad (1.2)$$

Также широко используется понятие действующего значения синусоидально изменяющейся величины, которое иначе называют среднеквадратичным или эффективным:

$$I_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T I_m^2 \sin^2 \omega t dt} = \frac{I_m}{\sqrt{2}} = 0,707 I_m. \quad (1.3)$$

Энергия, доставляемая потребителю, определяется средним значением мощности за определенный период времени, поэтому в электротехнике важной величиной является среднее значение мощности за период:

$$\begin{aligned} P &= \frac{1}{T} \int_0^T u i dt = \frac{1}{T} \int_0^T \left[\sqrt{2} U \sin \omega t \sqrt{2} I \sin(\omega t - \varphi) \right] dt = \\ &= \frac{UI}{T} \int_0^T [\cos \varphi - \cos(2\omega t - \varphi)] dt = UI \cos \varphi. \end{aligned} \quad (1.4)$$

Также данное выражение понимается как активная мощность, другими словами – мощность, которая за единицу времени совершает полезную работу и преобразуется в требуемые виды энергии.

Под реактивной мощностью понимается мощность, которая не совершает полезной работы, но является необходимой составляющей для функционирования реактивных нагрузок:

$$Q = UI \sin \varphi. \quad (1.5)$$

Физический смысл реактивной мощности заключается в следующем: реактивная мощность пропорциональна средней за четверть периода энергии, которая передается от источника потребителю на создание переменных электрических и магнитных полей реактивных элементов. Следовательно, реактивная мощность циркулирует между генератором и приемником дважды за период. Из-за этого реактивная мощность, являясь по своей сути «неактивной» мощностью, дополнительно загружает оборудование передачи и преобразования электроэнергии, вызывает добавочный нагрев проводов и в общем случае ухудшает коэффициент мощности, количественный показатель качества электроэнергии.

Для несинусоидального режима можно представить напряжение и ток рядами Фурье:

$$u = U_0 + U_{1m} \sin(\omega t + \varphi_1) + U_{2m} \sin(2\omega t + \varphi_2) + U_{3m} \sin(3\omega t + \varphi_3) + \dots, \quad (1.5)$$

$$i = I_0 + I_{1m} \sin(\omega t + \varphi_1 - \phi_1) + I_{2m} \sin(2\omega t + \varphi_2 - \phi_2) + I_{3m} \sin(3\omega t + \varphi_3 - \phi_3) + \dots$$

В свою очередь значение полной мощности для трехфазной системы электроснабжения, определяемое через произведение тока на напряжение в общем виде имеет следующий вид:

$$S = U \cdot I = \sqrt{\sum_{i=0}^n U_i^2 \times \sum_{i=0}^n I_i^2}, \quad (1.6)$$

где $U_i = \frac{U_{im}}{\sqrt{2}}$, $I_i = \frac{I_{im}}{\sqrt{2}}$ – действующие значения гармоник тока и напряжения;

i – порядковый номер гармоники.

При этом активная составляющая полной мощности определяется, согласно выражению (1.4), как среднее значение произведения тока на напряжение за период. Из чего следует, что активная мощность

несинусоидального тока равна сумме активных мощностей отдельных гармоник [4, 22].

$$P = U_0 I_0 + U_1 I_1 \cos \varphi_1 + U_2 I_2 \cos \varphi_2 + U_3 I_3 \cos \varphi_3 + \dots \quad (1.7)$$

Собственно, 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 . При этом, если гармоника тока порождается нелинейной нагрузкой, а не гармоникой питающего напряжения, полезной работы она не совершает, а ее действие наравне с реактивной мощностью проявляется в периодических повторяющихся перетоках мощности по системе электроснабжения.

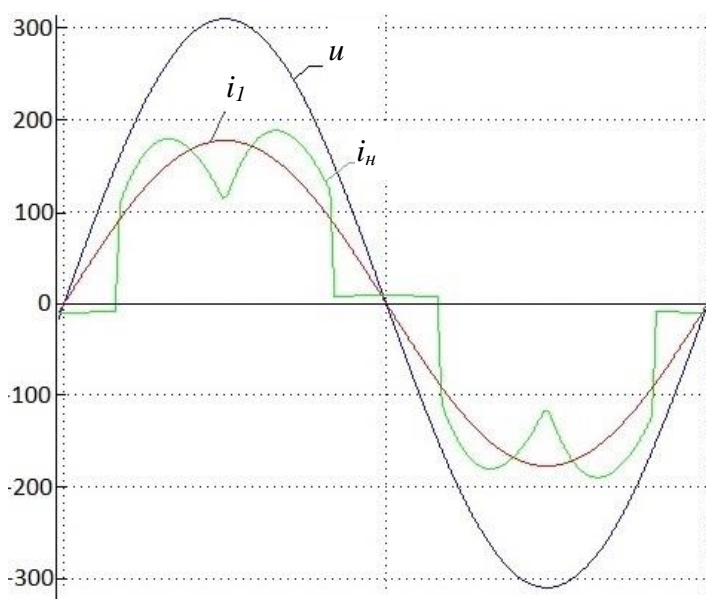


Рисунок 1.1 – Моделирование синусоидального источника напряжения и активной нелинейной нагрузки

где u – напряжение сети; i_n – ток нагрузки; i_1 – основная гармоника тока нагрузки.

Так для синусоидального источника напряжения и нагрузки, имеющей активный, но нелинейный характер потребляемого тока (рисунок 1.1), полезную работу совершает только первая гармоника тока I_1 , в то время как

высшие гармоники тока I_i при $i > 1$, в силу свойств ортогональности с U_1 дают нулевые средние значения мощности и не совершают полезной работы.

На рисунке 1.2а форма напряжения сформирована из 1-ой и 5-ой гармоник, ток на активной нагрузке повторяет несинусоидальную форму напряжения (рисунок 1.2а), гармонический состав тока и напряжения (рисунок 1.2б) идентичен, следовательно, в этом случае согласно (1.7) как основная гармоника I_1 , так и высокочастотная I_5 выполняют полезную работу.

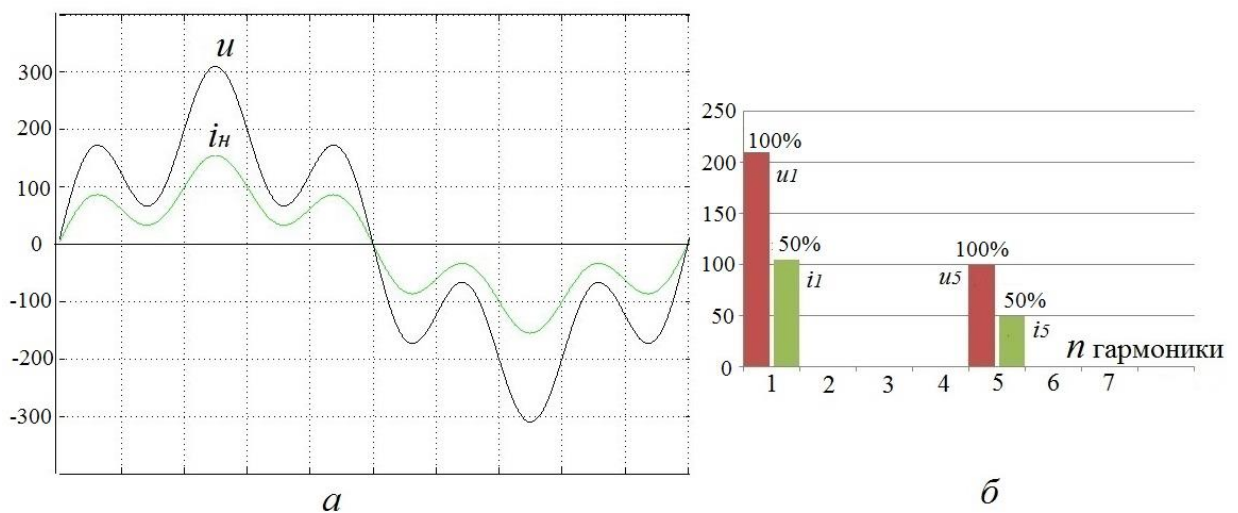


Рисунок 1.2 – Моделирование несинусоидального источника напряжения и активной нагрузки

1.2 Показатели качества электроэнергии, характеризующие реактивную мощность и нелинейные искажения

Одним из основных показателей, характеризующих наличие реактивной мощности в сети является косинус угла фазового сдвига функции тока относительно функции напряжения $\cos\varphi$, равный отношению полной мощности к активной, выражение для которого легко получить из (1.4):

$$\cos\varphi = \frac{P}{S}. \quad (1.8)$$

Из-за работы современных устройств с нелинейной вольт-амперной характеристикой в сетях возникают высокочастотные нелинейные искажения тока нагрузки, которые инициируют появление в системе мощности искажений.

Количественная оценка нелинейным искажениям в российской литературе представлена коэффициентом нелинейных искажений (КНИ):

$$K_H = \frac{\sqrt{I_2^2 + I_3^2 + \dots + I_n^2}}{I_1}. \quad (1.9)$$

Помимо КНИ используется и коэффициент гармонических искажений (КГИ), выражающий степень нелинейных искажений:

$$K_G = \frac{\sqrt{I_2^2 + I_3^2 + \dots + I_m^2}}{\sqrt{I_1^2 + I_2^2 + I_3^2 + \dots + I_m^2}}. \quad (1.10)$$

В англоязычной литературе применяется термин THD (Total Harmonic Distortion), который определяется как отношение суммы всех гармоник относительно основной гармонике. В силовой электронике для описания нелинейных искажений в сети приняты термины THD_F и THD_R , где THD_F определяется как отношение среднеквадратичной суммы всех высших гармоник к первой гармонике, что соответствует русскоязычному КНИ, а THD_R определяется как отношение среднеквадратичной суммы всех высших гармоник, к среднеквадратичной сумме всех гармонических составляющих, что соответствует русскоязычному КГИ.

В русскоязычной и немецкоязычной литературе долгое время наблюдалось несоответствие терминологий, которое заключалось в инверсном толковании понятий КНИ и КГИ, что и на сегодняшний день вносит некоторую путаницу, например, инверсные определения КНИ продолжают использоваться в некоторых анализаторах сети [127]. Согласно европейскому стандарту качества сетевого электропитания (EN 62040-3) коэффициент нелинейных искажений определяется как THD_F . Также согласно действующему национальному стандарту РФ ГОСТ 32144-2013

показателями качества электроэнергии, относящимися к гармоническим составляющим, являются значения суммарных коэффициентов гармонических составляющих до 40-го порядка K_I , % [9]. Данный показатель также соответствует определению THD_f .

Следовательно, коэффициентом нелинейных искажений на сегодняшний день является следующее выражение:

$$THD_f = K_I = K_n = \frac{\sqrt{I_2^2 + I_3^2 + \dots + I_n^2}}{I_1}. \quad (1.11)$$

Коэффициент мощности или Power Factor (PF) характеризует и реактивную мощность, и нелинейные искажения сети:

$$\chi = PF = \frac{U_1 I_1 \cos \varphi}{U_1 I_{RMS}}, \quad (1.12)$$

где $\frac{I_1}{I_{RMS}}$ можно представить в виде:

$$\frac{I_1}{I_{RMS}} = \frac{1}{\sqrt{1 + THD^2}} = DPF, \quad (1.13)$$

где DPF – (Distortion Power Factor) не имеет устоявшегося русскоязычного терминологического эквивалента и определяется как «коэффициент мощности искажений».

Учитывая 1.12 и 1.13, коэффициент мощности для несинусоидальной сети будет равен:

$$\chi = PF = \frac{\cos \varphi}{\sqrt{1 + THD^2}} = DPF \cdot \cos \varphi. \quad (1.14)$$

1.3 Реактивная мощность по S. Fryze

В 30-х годах XX века немецкий ученый S. Fryze впервые предложил представить функцию электрического тока в виде активной и «неактивной» составляющих [95]:

$$i = i_p + i_q, \quad (1.15)$$

где i_p – активный ток, соответствующий току активного сопротивления; i_q – «невязка» до полного тока, что в современном представлении часто понимается как реактивный ток совместно с током нелинейных искажений нагрузки.

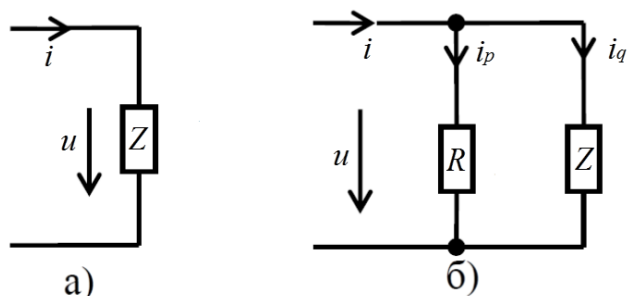


Рисунок 1.3 – Схемы замещения S. Fryze

Активная составляющая тока нагрузки представлена равенством:

$$i_p = \frac{P}{U^2} \cdot u. \quad (1.16)$$

А реактивная составляющая определяется как разность полного и активного токов:

$$i_q = i - i_p. \quad (1.17)$$

Далее, используя математический аппарат средних значений, можно получить следующие выражения [96]:

$$U^2 = \frac{1}{T} \int_0^T u^2 dt$$

$$I^2 = \frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt, \quad (1.18)$$

а с учетом ортогональности:

$$\int_0^T u i_q dt = 0; \quad \int_0^T i_p i_q dt = 0, \quad (1.19)$$

S. Fryze было получено следующее выражение [97]:

$$I^2 = I_p^2 + I_q^2, \quad (1.20)$$

которое при умножении на напряжение в итоге даёт известное соотношение:

$$S^2 = P^2 + Q^2. \quad (1.21)$$

Графически выражение (1.21) часто представляют прямоугольным треугольником, у которого катеты и гипотенуза – активная, реактивная и полная мощности соответственно.

Таким образом, S. Fryze впервые предложил разложение полной мощности на активную и реактивную составляющие с помощью вычисления среднеквадратичных значений и указал на необходимость компенсации последней.

При работе современных устройств компенсации реактивной мощности по алгоритму, основанному на теории S. Fryze, проявляются низкие динамические свойства компенсирующего устройства вследствие использования математического аппарата средних значений.

1.4 Оригинальная и модифицированная p - q теории Н. Akagi

Развитие полупроводниковой техники в конце двадцатого столетия стало причиной поиска новых решений при проектировании силовых фильтров. Так группой японских учёных под руководством Н. Akagi в 1980х г. были сформулированы основные положения «Обобщенной теории мгновенной реактивной мощности в трехфазных системах», которая также известна как теория мгновенной мощности или p - q теория (p - q Theory) [80-86].

Впоследствии данная формулировка была доработана и получила название модифицированной p - q теории (*Modified p-q Theory*). В основе своих исследований Н. Akagi использует преобразование системы координат значений мгновенных токов и напряжений (a - b - c) в систему координат 0 - α - β посредством линейно-ортогонального преобразования E. Clarke [91]:

$$\begin{bmatrix} u_0 \\ u_\alpha \\ u_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \\ 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix}, \quad (1.22)$$

$$\begin{bmatrix} i_0 \\ i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \\ 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix}. \quad (1.23)$$

1.4.1 Оригинальная p-q теория

В 1983г. было впервые предложено выражение для определения активных мгновенных мощностей p_0 , $p_{\alpha\beta}$ и мгновенной реактивной мощности $q_{\alpha\beta}$ в трехфазной четырехпроводной системе:

$$\begin{bmatrix} p_0 \\ p_{ab} \\ q_{ab} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_0 & 0 & 0 \\ 0 & u_a & u_b \\ 0 & u_b & -u_a \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_0 \\ i_a \\ i_b \end{bmatrix}, \quad (1.24)$$

Из чего следует, что мгновенные активная и реактивная мощности находятся следующим образом:

$$p = u_\alpha \cdot i_\alpha + u_\beta \cdot i_\beta, \quad (1.25)$$

$$q = u_\beta \cdot i_\alpha - u_\alpha \cdot i_\beta. \quad (1.26)$$

Мгновенная мощность нулевой последовательности:

$$p_0 = u_0 \cdot i_0. \quad (1.27)$$

Также было предложено и обратное преобразование:

$$\begin{bmatrix} i_0 \\ i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{u_0 u_{\alpha\beta}} \begin{bmatrix} u_{\alpha\beta}^2 & 0 & 0 \\ 0 & u_0 u_\alpha & u_0 u_\beta \\ 0 & u_0 u_\beta & -u_0 u_\alpha \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} p_0 \\ p_{\alpha\beta} \\ q_{\alpha\beta} \end{bmatrix}, \quad (1.28)$$

где $u_{\alpha\beta}^2 = u_\alpha^2 + u_\beta^2$.

Из которого представляется возможным выразить токи непосредственно в координатах α - β -0:

$$i_0 = \frac{1}{u_0} \cdot p_0$$

$$\begin{aligned}
 i_{\alpha} &= \frac{1}{u_{\alpha\beta}^2} \cdot u_{\alpha} \cdot p_{\alpha\beta} + \frac{1}{u_{\alpha\beta}^2} \cdot u_{\beta} \cdot q_{\alpha\beta} = i_{\alpha p} + i_{\alpha q} \\
 i_{\beta} &= \frac{1}{u_{\alpha\beta}^2} \cdot u_{\beta} \cdot p_{\alpha\beta} + \frac{1}{u_{\alpha\beta}^2} \cdot (-u_{\alpha}) \cdot q_{\alpha\beta} = i_{\beta p} + i_{\beta q}
 \end{aligned}
 \tag{1.29}$$

где $i_{\alpha p}$ – мгновенный активный ток по оси α ;

$i_{\alpha q}$ – мгновенный реактивный ток по оси α ;

$i_{\beta p}$ – мгновенный активный ток по оси β ;

$i_{\beta q}$ – мгновенный реактивный ток по оси β ;

При этом выражения для расчета мощностей принимают следующий

вид:

$$\begin{aligned}
 p_{\alpha p} &= u_{\alpha} \cdot i_{\alpha p} = \frac{u_{\alpha}^2}{u_{\alpha\beta}^2} \cdot p_{\alpha\beta} \\
 p_{\alpha q} &= u_{\alpha} \cdot i_{\alpha q} = \frac{u_{\alpha} \cdot u_{\beta}}{u_{\alpha\beta}^2} \cdot q_{\alpha\beta} \\
 p_{\beta p} &= u_{\beta} \cdot i_{\beta p} = \frac{u_{\beta}^2}{u_{\alpha\beta}^2} \cdot p_{\alpha\beta} \\
 p_{\beta q} &= u_{\beta} \cdot i_{\beta q} = \frac{-u_{\alpha} \cdot u_{\beta}}{u_{\alpha\beta}^2} \cdot q_{\alpha\beta}
 \end{aligned}
 \tag{1.30}$$

1.4.2 Модифицированная p-q теория

Согласно модифицированной теории определяется активная мгновенная мощность p и три составляющие реактивной мгновенной мощности $q_0, q_{\alpha}, q_{\beta}$,:

$$\begin{bmatrix} p \\ q_0 \\ q_{\alpha} \\ q_{\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_0 & u_{\alpha} & u_{\beta} \\ 0 & -u_{\beta} & u_{\alpha} \\ u_{\beta} & 0 & -u_0 \\ -u_{\alpha} & u_0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_0 \\ i_{\alpha} \\ i_{\beta} \end{bmatrix} .
 \tag{1.31}$$

Тогда выражение для токов принимает вид:

$$\begin{bmatrix} i_0 \\ i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_0 & 0 & u_\beta & -u_\alpha \\ u_\alpha & -u_\beta & 0 & u_0 \\ u_\beta & u_\alpha & -u_0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} p \\ q_0 \\ q_\alpha \\ q_\beta \end{bmatrix}. \quad (1.32)$$

Из которого следует, что токи в координатах α - β -0:

$$\begin{aligned} i_0 &= \frac{1}{u_{0\alpha\beta}^2} \cdot u_0 p + \frac{1}{u_{0\alpha\beta}^2} \cdot (u_\beta \cdot q_\alpha - u_\alpha \cdot q_\beta) = i_{0p} + i_{0q} \\ i_\alpha &= \frac{1}{u_{0\alpha\beta}^2} \cdot u_\alpha \cdot p + \frac{1}{u_{0\alpha\beta}^2} \cdot (u_0 \cdot q_\beta - u_\beta \cdot q_0) = i_{\alpha p} + i_{\alpha q}, \\ i_\beta &= \frac{1}{u_{0\alpha\beta}^2} \cdot u_\beta \cdot p + \frac{1}{u_{0\alpha\beta}^2} \cdot (u_\alpha \cdot q_0 - u_0 \cdot q_\alpha) = i_{\beta p} + i_{\beta q} \end{aligned} \quad (1.33)$$

где $u_{0\alpha\beta}^2 = u_0^2 + u_\alpha^2 + u_\beta^2$,

i_{0p} – нулевая последовательность активного мгновенного тока;

i_{0q} – нулевая последовательность реактивного мгновенного тока.

1.4.3 Стратегии управления активным фильтром на основе теорий Н. Akagi

Оригинальная p - q теория определяет токи компенсатора i_{C0} , $i_{C\alpha}$, $i_{C\beta}$:

$$\begin{bmatrix} i_{C0} \\ i_{C\alpha} \\ i_{C\beta} \end{bmatrix} = \frac{1}{u_0 u_{\alpha\beta}^2} \begin{bmatrix} u_{\alpha\beta}^2 & 0 & 0 \\ 0 & u_0 u_\alpha & u_0 u_\beta \\ 0 & u_0 u_\beta & -u_0 u_\alpha \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} p_{C0} \\ p_{C\alpha\beta} \\ q_{C\alpha\beta} \end{bmatrix}. \quad (1.34)$$

Далее необходимо выбрать составляющие мощности p_{C0} , $p_{\alpha\beta}$, $q_{C\alpha\beta}$

которые подлежат компенсации, например в случае:

$$\begin{aligned} p_{C0} &= p_{L0} = u_0 \cdot i_{L0} \\ p_{\alpha\beta} &= -p_{L0} = -u_0 \cdot i_{L0}, \\ q_{C\alpha\beta} &= u_\alpha \cdot i_{L\beta} - u_\beta \cdot i_{L\alpha} \end{aligned} \quad (1.35)$$

токи компенсации вычисляются следующим образом:

$$\begin{aligned}
i_{C0} &= i_{L0} \\
i_{C\alpha} &= \frac{1}{u_{\alpha\beta}^2} \cdot (-u_0 \cdot u_\alpha \cdot i_{L0} + u_\beta^2 \cdot i_{L\alpha} - u_\alpha \cdot u_\beta \cdot i_{L\beta}) \\
i_{C\beta} &= \frac{1}{u_{\alpha\beta}^2} \cdot (-u_0 \cdot u_\beta \cdot i_{L0} - u_\alpha \cdot u_\beta \cdot i_{L\alpha} + u_\beta^2 \cdot i_{L\beta})
\end{aligned} \tag{1.36}$$

В заключение необходимо выполнить обратное преобразование переменных в систему координат a-b-c:

$$\begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} 1/\sqrt{2} & 1 & 0 \\ 1/\sqrt{2} & -1/2 & \sqrt{3}/2 \\ 1/\sqrt{2} & -1/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_0 \\ i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix}. \tag{1.37}$$

Модифицированная p - q теория, в свою очередь, определяет токи компенсации i_{C0} , $i_{C\alpha}$, $i_{C\beta}$:

$$\begin{bmatrix} i_{C0} \\ i_{C\alpha} \\ i_{C\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_0 & 0 & u_\beta & -u_\alpha \\ u_\alpha & -u_\beta & 0 & u_0 \\ u_\beta & u_\alpha & -u_0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} p_C \\ q_{C0} \\ q_{C\alpha} \\ q_{C\beta} \end{bmatrix}. \tag{1.38}$$

Выбирая следующие составляющие мощности, которые подлежат компенсации:

$$\begin{aligned}
p_C &= 0 \\
q_{C0} &= q_{L0} \\
q_{C\alpha} &= q_{L\alpha} \\
q_{C\beta} &= q_{L\beta}
\end{aligned}, \tag{1.39}$$

выражения для токов компенсации принимают следующий вид:

$$\begin{aligned}
i_{C0} &= \frac{1}{u_{0\alpha\beta}^2} \cdot \left\{ (u_\alpha^2 + u_\beta^2) \cdot i_{L0} - u_0 \cdot u_\alpha \cdot i_{L\alpha} - u_0 \cdot u_\beta \cdot i_{L\beta} \right\} \\
i_{C\alpha} &= \frac{1}{u_{0\alpha\beta}^2} \cdot \left\{ -u_0 \cdot u_\alpha \cdot i_{L0} + (u_0^2 + u_\beta^2) \cdot i_{L\alpha} - u_\alpha \cdot u_\beta \cdot i_{L\beta} \right\} \\
i_{C\beta} &= \frac{1}{u_{0\alpha\beta}^2} \cdot \left\{ -u_0 \cdot u_\beta \cdot i_{L0} - u_\alpha \cdot u_\beta \cdot i_{L\alpha} + (u_0^2 + u_\alpha^2) \cdot i_{L\beta} \right\}
\end{aligned} \tag{1.40}$$

Для преобразования токов компенсации в систему $a-b-c$ необходимо выполнить обратное преобразование E. Clarke (1.37).

Выбор составляющих полной мощности, подлежащих компенсации, определяет форму тока сети после фильтрации.

Особенности оригинальной и расширенной $p-q$ теорий заключаются в следующем:

- данные теории могут быть применены к любой трехфазной системе (трех- или четырехпроводной, сбалансированной или несимметричной, с гармоническими составляющими тока и напряжения или без таковых);

- управление АСФ, организованное по принципам обеих $p-q$ теорий основано на вычислениях мгновенных значений мощностей, а значит, обладает лучшей динамикой в сравнении с АСФ, система управления которых базируется на аппарате средних значений;

- вычисление мгновенных значений предложенным способом не выставляет повышенных требований к микропроцессорам систем управления АСФ;

- может быть использовано несколько различных стратегий управления: по поддержанию постоянной мгновенной мощности нагрузки, по коррекции тока нагрузки и др.

Также необходимо отметить, что полученные активные и реактивные мощности Н. Акаги предлагает разделить на две составляющие: постоянную и осциллирующую:

$$\text{Активная мощность: } p = \bar{p} + \tilde{p}$$

$$\text{Реактивная мощность: } q = \bar{q} + \tilde{q}$$

где \bar{p} и \tilde{p} представляют собой постоянную и высокочастотную составляющую активной мощности p , а \bar{q} и \tilde{q} постоянную и высокочастотную составляющую реактивной мощности q .

Н.Акаги определяет физический смысл составляющих активной и реактивной мощности следующим образом [83]:

\bar{p} – постоянная составляющая мгновенной активной мощности сети и за единицу времени представляет собой полезную энергию, которая преобразуется в другие виды энергии;

\tilde{p} – переменный во времени энергетический поток, который имеет нулевое среднее значение, и представляет дополнительную мощность в системе без эффективного вклада в передачу энергии от источника к нагрузке;

\bar{q} – постоянная составляющая мгновенной реактивной мощности, которая характеризует циркулирующую по сети между источником и нагрузкой реактивную энергию;

\tilde{q} – переменная составляющая мгновенной реактивной мощности сети, которая также имеет нулевое среднее значение и не вносит положительного вклада при преобразовании энергии нагрузкой.

В научных работах последних лет указывается на недопустимость разложения «высокочастотных составляющих мощности» на активную и реактивную части, что является попыткой применить свойства реактивной мощности в синусоидальных режимах на системы с искажениями [68].

Также определение \tilde{q} , данное Н. Akagi, не поясняет физический смысл указанной переменной и её аналитический расчет. Характеристика \tilde{p} , являясь высокочастотной активной составляющей, согласно Н. Akagi, не выполняет никакой полезной работы, хотя обратное было показано на рисунке 1.2.

Помимо прочего недостатками систем управления АСФ, построенных по теориям Н. Akagi, является то, что при формировании компенсационных токов возникает проблема отсутствия прямой связи между исходными токами и векторами мгновенной мощности.

1.5 P - q - r теория мгновенной мощности

С целью однозначного определения токов компенсации в зависимости от соответствующих мгновенных мощностей в [76, 104] для трехфазной четырехпроводной системы были предложены основные положения p - q - r теории, в которой все три компонента мгновенной мощности независимы друг от друга и непосредственно определяют токи компенсационного воздействия АСФ. Для этого выполняется трехкратное преобразование исходных переменных:

Фазные токи и напряжения трехфазной системы из a - b - c системы координат преобразуются в α - β - 0 по типу (1.22, 1.23).

Далее осуществляется переход к системе координат α' - β' - 0 посредством вращения 0 – оси α - β - 0 системы координат на угол θ_1 с целью выравнивания α – оси с проекцией пространственного вектора напряжения на α - β плоскость. Пространственный вектор тока в α' - β' - 0 координатах может быть описан как:

$$\begin{bmatrix} i_{\alpha}' \\ i_{\beta}' \\ i_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta_1 & \sin\theta_1 & 0 \\ -\sin\theta_1 & \cos\theta_1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{\alpha} \\ i_{\beta} \\ i_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{u_{\alpha}}{u_{\alpha\beta}^2} & \frac{u_{\beta}}{u_{\alpha\beta}^2} & 0 \\ -\frac{u_{\beta}}{u_{\alpha\beta}^2} & \frac{u_{\alpha}}{u_{\alpha\beta}^2} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{\alpha} \\ i_{\beta} \\ i_0 \end{bmatrix}, \quad (1.41)$$

где $u_{\alpha\beta}^2 = u_{\alpha}^2 + u_{\beta}^2$.

Затем, p - q - r система координат может быть получена вращением оси β' α' - β' - 0 системы координат на угол θ_2 для взаимной ориентации α' – оси с пространственным вектором напряжения. Токи в системе координат p - q - r представлены:

$$\begin{bmatrix} i_p \\ i_q \\ i_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta_2 & 0 & \sin\theta_2 \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\theta_2 & 0 & \cos\theta_2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i'_\alpha \\ i'_\beta \\ i_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{u_{\alpha\beta}^2}{u_{\alpha\beta 0}^2} & 0 & \frac{u_0}{u_{\alpha\beta 0}^2} \\ 0 & 1 & 0 \\ -\frac{u_0}{u_{\alpha\beta 0}^2} & 0 & \frac{u_{\alpha\beta}^2}{u_{\alpha\beta 0}^2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i'_\alpha \\ i'_\beta \\ i_0 \end{bmatrix}, \quad (1.42)$$

где $u_{\alpha\beta 0}^2 = u_\alpha^2 + u_\beta^2 + u_0^2$.

Тогда, из (1.41) и (1.42), преобразование из α - β -0 в p - q - r систему координат может быть записано в виде (1.43):

$$\begin{bmatrix} i_p \\ i_q \\ i_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{u_\alpha}{u_{\alpha\beta 0}^2} & \frac{u_\beta}{u_{\alpha\beta 0}^2} & \frac{u_0}{u_{\alpha\beta 0}^2} \\ -\frac{u_\beta}{u_{\alpha\beta}^2} & \frac{u_\alpha}{u_{\alpha\beta}^2} & 0 \\ -\frac{u_0 u_\alpha}{u_{\alpha\beta}^2 u_{\alpha\beta 0}^2} & -\frac{u_\beta u_0}{u_{\alpha\beta}^2 u_{\alpha\beta 0}^2} & \frac{u_{\alpha\beta}^2}{u_{\alpha\beta 0}^2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ i_0 \end{bmatrix}. \quad (1.43)$$

Согласно p - q - r теории мгновенные активная/реактивная мощности могут быть представлены как скалярное/векторное произведения пространственных векторов тока и напряжения [105, 106]:

$$p \triangleq \vec{u}_{pqr} \cdot \vec{i}_{pqr} = u_p i_p, \quad (1.44)$$

$$q \triangleq \vec{u}_{pqr} \times \vec{i}_{pqr} = [0, -u_p i_r, u_p i_q]^T. \quad (1.45)$$

Представив (1.44) и (1.45) в матричной форме, могут быть получены следующие зависимости между мгновенными мощностями и пространственными векторами токов:

$$\begin{bmatrix} p \\ q_r \\ q_q \end{bmatrix} = u_p \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_p \\ i_q \\ i_r \end{bmatrix}, \quad (1.46)$$

$$\begin{bmatrix} i_p \\ i_q \\ i_r \end{bmatrix} = \frac{1}{u_p} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} p \\ q_r \\ q_q \end{bmatrix}, \quad (1.47)$$

где мгновенная активная мощность p и мгновенные реактивные q_r, q_q уникально определяются тремя компонентами i_p, i_q, i_r пространственного вектора тока, которые, в свою очередь, линейно независимы. Вследствие чего компонентами i_q, i_r можно управлять отдельно для компенсации только мгновенных реактивных мощностей q_r, q_q .

Полная мощность в p - q - r системе координат определяется:

$$\begin{aligned} s &\triangleq \sqrt{u_a^2 + u_b^2 + u_c^2} \cdot \sqrt{i_a^2 + i_b^2 + i_c^2} \triangleq \sqrt{u_\alpha^2 + u_\beta^2 + u_0^2} \cdot \sqrt{i_\alpha^2 + i_\beta^2 + i_0^2} \triangleq \\ &\triangleq u_p \cdot \sqrt{i_p^2 + i_q^2 + i_r^2} = \sqrt{p^2 + q_q^2 + q_r^2} \end{aligned} \quad (1.48)$$

1.6 D - q теория мгновенной мощности

Данная теория мгновенной мощности широко представлена в работах [93, 123] и также известна под названием (i_d - i_q метод).

Где координаты d - q (d представляет собой продольную ось, q её квадратуру) определяются углом θ_1 по отношению к α - β координатам, которые использовались в теориях, представленных выше. Преобразование системы координат α - β -0 в систему координат d - q -0 называется преобразованием R. Н. Park и имеет вид:

$$\begin{bmatrix} i_0 \\ i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta & \sin\theta \\ 0 & -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_0 \\ i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix}. \quad (1.49)$$

Если d -ось совпадает по направлению с вектором напряжения, то составляющая нулевой последовательности постоянна и преобразование принимает следующую форму:

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = S \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix}, \quad (1.50)$$

$$S = \frac{1}{\sqrt{u_\alpha^2 + u_\beta^2}} \cdot \begin{bmatrix} u_\alpha & u_\beta \\ -u_\beta & u_\alpha \end{bmatrix}. \quad (1.51)$$

Комплексная мощность d - q теории является аналогом комплекса полной мощности:

$$P_{dq} = (u_d + ju_q)(i_d + ji_q) = p_p + jq_p, \quad (1.52)$$

где p_p , q_p - реальная и мнимая мощности R.H. Park:

$$p_p = \text{Re}(p_{dq}) = u_d i_d + u_q i_q, \quad (1.53)$$

$$q_p = \text{Im}(p_{dq}) = u_q i_d - u_d i_q. \quad (1.54)$$

Мощность нулевой последовательности:

$$p_0 = u_0 i_0. \quad (1.55)$$

Полная мощность имеет вид:

$$S_{dq0} = \sqrt{(\text{Re}(p_{dq}) + p_0)^2 + (\text{Im}(p_{dq}))^2}. \quad (1.56)$$

1.7 Кросс-векторная теория мгновенной мощности

Основные положения данного способа расчета мгновенных токов компенсации описаны в [16, 113]. Авторы предлагают мгновенные токи и напряжения представить в виде пространственных векторов в декартовом пространстве a - b - c :

$$\vec{u} = \begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix}, \quad \vec{i} = \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix}. \quad (1.57)$$

Тогда активная мгновенная мощность равна скалярному произведению векторов тока и напряжения:

$$p = \vec{u} \cdot \vec{i} = u_a \cdot i_a + u_b \cdot i_b + u_c \cdot i_c, \quad (1.58)$$

а реактивная мгновенная мощность равна векторному произведению векторов тока и напряжения:

$$\vec{q} = \vec{u} \times \vec{i}, \quad (1.59)$$

что в матричной форме записи:

$$q = \begin{bmatrix} q_a \\ q_b \\ q_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \|u_b & u_c\| \\ i_b & i_c \\ \|u_c & u_a\| \\ i_c & i_a \\ \|u_a & u_b\| \\ i_a & i_b \end{bmatrix}, \quad (1.60)$$

$$q = \|q\| = \sqrt{q_a^2 + q_b^2 + q_c^2}. \quad (1.61)$$

Тогда, обратные выражения для определения векторов активного мгновенного тока \vec{i}_p , мгновенного реактивного тока \vec{i}_q :

$$\vec{i}_p = \begin{bmatrix} i_{ap} \\ i_{bp} \\ i_{cp} \end{bmatrix} \stackrel{def}{=} \frac{P}{u \cdot u} u, \quad (1.62)$$

$$\vec{i}_q = \begin{bmatrix} i_{aq} \\ i_{bq} \\ i_{cq} \end{bmatrix} \stackrel{def}{=} \frac{q \times u}{u \cdot u}. \quad (1.63)$$

Скалярные и векторные величины, которые используются в кросс-векторной теории, имеют следующие свойства [16]:

1) вектор трехфазного тока \vec{i} всегда равен сумме мгновенных активного и реактивного токов:

$$\begin{aligned} i = i_p + i_q &= \frac{P \cdot u}{u \cdot u} + \frac{q \times u}{u \cdot u} = \frac{(u \cdot i)u + (u \times i) \times u}{u \cdot u} = \\ &= \frac{(u \cdot i)u + [-(i \cdot u)u + (u \cdot u)i]}{u \cdot u} = \frac{(u \cdot u)i}{u \cdot u} = i \end{aligned}; \quad (1.64)$$

2) вектор реактивного мгновенного тока \vec{i}_q ортогонален \vec{u} , а вектор мгновенного активного тока \vec{i}_p параллелен \vec{u} , следовательно:

$$\vec{u} \cdot \vec{i}_q = \vec{u} \cdot \left(\frac{q \times \vec{u}}{\vec{u} \cdot \vec{u}} \right) = \vec{u} \cdot \left(\frac{(\vec{u} \times \vec{i}) \times \vec{u}}{\vec{u} \cdot \vec{u}} \right) = \frac{-(\vec{i} \cdot \vec{u})(\vec{u} \cdot \vec{u}) + (\vec{u} \cdot \vec{u})(\vec{i} \cdot \vec{u})}{\vec{u} \cdot \vec{u}} = 0, \quad (1.65)$$

$$\vec{u} \times \vec{i}_p = \vec{u} \times \left(\frac{P}{\vec{u} \cdot \vec{u}} \vec{u} \right) = 0, \quad (1.66)$$

из данного свойства следует, что реактивный ток не участвует в передаче электроэнергии.

3) так как \vec{i}_p и \vec{i}_q взаимно ортогональны, имеют место быть следующие соотношения:

$$i^2 = i \cdot i = (i_p + i_q) \cdot (i_p + i_q) = i_p \cdot i_p + i_q \cdot i_q + 2(i_p \cdot i_q) = i_p^2 + i_q^2, \quad (1.67)$$

$$p^2 + q^2 = s^2;$$

4) если $\vec{i}_q = 0$, тогда $\|\vec{i}\|$ минимизируется для передачи мгновенной активной мощности, а коэффициент мощности стремится к максимуму $\lambda = 0$.

Выводы по главе 1

С появлением теорий мгновенных мощностей стало возможным осуществление компенсации неактивных высокочастотных составляющих тока нагрузки посредством активных силовых фильтров. В свою очередь, некоторые из данных теорий были подвергнуты серьезной критике по причине несоответствия основополагающим положениям теоретической электротехники. Вследствие чего можно утверждать, что на сегодняшний день не существует единой теории мощности, логично описывающей физические процессы передачи электроэнергии в несимметричных и несбалансированных сетях, а также пригодной для практического расчета токов компенсации нежелательных составляющих тока нагрузки активным силовым фильтром.

Основным фактором, стимулирующим развитие теорий мгновенной мощности, является быстрое действие активных силовых фильтров, зависящее от интервала времени, необходимого системе управления для выполнения расчетов токов компенсации.

На основании рассмотренных в первой главе основных положений наиболее известных теорий мгновенных мощностей, а также анализа представленных в [92, 97, 103] математических имитационных моделей систем управления АСФ, построенных на базе этих теорий, можно сделать следующие выводы:

1. Системы управления АСФ, построенные по принципам рассмотренных теорий мгновенных мощностей, обеспечивают полную компенсацию реактивной мощности, если система сбалансирована и синусоидальна.

2. Каждая из перечисленных теорий имеет определенные недостатки и трудности при компенсации мощности искажений в несинусоидальной и несбалансированной системе, в основном заключающиеся в обеспечении быстродействия и устойчивости системы.

3. В оригинальной и модифицированной $p-q$ теории, а также $d-q$ теории отсутствует прямая зависимость между исходными токами и векторами мгновенной мощности, что существенно затрудняет построение систем управления АСФ на основе этих теорий.

4. $P-q-r$ теория имеет линейную зависимость трех токов от соответствующих мгновенных мощностей, что сильно облегчает построение системы управления АСФ в трехфазных трехпроводных сетях.

5. Наиболее быстродействующей из представленных теорий является кросс-векторная теория мгновенной мощности, так как в ней не используется преобразование исходных токов и напряжений в другие системы координат.

Глава 2 МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ПОВЫШЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА МОЩНОСТИ

2.1 Влияние характера тока нагрузки на эффективность работы электрических сетей

Снижение потерь электроэнергии и повышение пропускной способности линий электропередач – важнейшие части общего комплекса энергосберегающих мероприятий. Данные положения утверждены на законодательном уровне. 23.11.2009 принят закон № 261-ФЗ «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности...», а также «Энергетическая стратегия России на период до 2030» года призваны уменьшить потери электроэнергии в электрических сетях на 30% до 2030 года [74]. Здесь также необходимо отметить зарубежный опыт, в США, Японии, Германии и др. на федеральном уровне приняты положения по нормированию коэффициента мощности на высоком уровне с тенденцией на дальнейшее увеличение показателей до 0,98-0,99.

На качество электроэнергии в сети влияют не только электростанции, которые ее генерируют, но и потребители. В наиболее общем случае, влияние потребителей электроэнергии характеризуется:

а) наличием реактивных элементов, электродвигателей и другого оборудования, которое является причиной фазового сдвига тока относительно напряжения;

б) несинусоидальным потреблением тока, что вносит в сеть высшие гармоники;

в) несимметричной загрузкой фаз в линиях 0,4кВ.

Реактивная энергия, циркулирующая между генератором и потребителем по сети, не является прямыми потерями, но является причиной следующих негативных воздействий на сеть:

– передача реактивной энергии приводит к дополнительной нагрузке элементов сети (главным образом питающих линий), что приводит к снижению их пропускной способности;

– увеличивается действующее значение тока линии и, следовательно, активные потери во всех звеньях цепи, что также способствует снижению напряжения у потребителей электроэнергии;

– ухудшение показателей качества электроэнергии у сторонних потребителей данной сети и др.

При несинусоидальном потреблении тока отрицательное влияние на сеть характеризуется появлением высших гармоник, которые являются причиной:

– искажения формы питающего напряжения;

– увеличения потерь в трансформаторах за счет увеличения потерь на гистерезис и появления вихревых токов;

– дополнительных потерь в шинпроводах, вследствие поверхностного эффекта и эффекта близости;

– возникновения резонансных явлений в сети;

– появления помех в сетях близлежащих коммуникаций;

– более быстрого старения изоляции кабельных линий и многое другое

[12].

При несимметричном потреблении электроэнергии нагрузкой в трехфазных четырехпроводных системах 0,4кВ происходит:

– увеличение тока в нулевом проводе;

– возникновение в первичной сети гармоник кратных трём;

– искажение формы питающего напряжения;

– просадки напряжения по перегруженным фазам [53].

Все вышеперечисленные негативные последствия влияния нагрузки на сеть являются причиной повышенного внимания к качеству электроэнергии

со стороны энергохозяйств и требуют принятия решений по коррекции коэффициента мощности потребителей.

Появление в сети перечисленных процессов влияния потребителей на качество электроэнергии является основанием для рассмотрения вопроса о мероприятиях, которые позволят повысить такие показатели как: коэффициент мощности, коэффициент нелинейных искажений и $\cos\varphi$. Подобные мероприятия условно можно разделить на два типа: организационные и технические.

Организационные мероприятия по увеличению коэффициента мощности подстанции метрополитена связаны с естественным уменьшением потребляемой реактивной энергии за счет более рационального использования уже имеющегося оборудования.

По результатам анализа качества электроэнергии метрополитена [43, 47], выявлено, что главными потребителями реактивной энергии на метрополитене являются асинхронные двигатели привода эскалаторов и вентиляции, а также насосные и осветительные установки. Для увеличения $\cos\varphi$ перечисленных нагрузок могут быть выполнены следующие организационные мероприятия:

- понижение напряжения питания электродвигателей, систематически работающих с малой загрузкой;

- отключение в период малых нагрузок части силовых трансформаторов.

Технические мероприятия включают в себя изменения связанные с заменой оборудования, принципиальных схем электроснабжения, привлечения дополнительных устройств, способных улучшить качество электроснабжения. Технические мероприятия повышения коэффициента мощности для метрополитена:

- применение энергоэффективных электрических схем преобразования электроэнергии;

- замена асинхронных двигателей эскалаторов, на синхронные двигатели с постоянными магнитами меньшей номинальной мощности;
- применение новых решений в области управления двигателями переменного тока;
- компенсация реактивной мощности;
- коррекция высокочастотных гармонических искажений.

2.2 Увеличение пульсовости схемы выпрямления

Надежность и экономичность работы тяговых подстанций во многом определяются типом принятого выпрямителя. Исторически сложилось так, что наиболее распространёнными являются выпрямители, включенные по 6-пульсовым схемам. Такие схемы имеют существенные недостатки: относительно низкий коэффициент мощности, искаженная форма кривой потребляемого тока и, как следствие, низкое качество электрической энергии [3, 11].

Технико-экономическую эффективность тяговых подстанций можно повысить, увеличив пульсовость выпрямителей, т.е. увеличив число пульсаций в кривой выпрямленного напряжения за период питающего напряжения.

Сложные многопульсовые схемы выпрямления обеспечивают повышение уровня напряжения в тяговой сети, улучшение формы кривой выпрямленного напряжения, снижение потерь электрической энергии.

В целом 12-пульсовые выпрямители, как известно, позволяют:

- повысить коэффициент мощности тяговой подстанции;
- улучшить форму кривой потребляемого тока и тем самым повысить качество электрической энергии;
- улучшить форму кривой выпрямленного напряжения и снизить влияние тяговой сети на линии связи;

- повысить уровень напряжения в тяговой сети без применения специальных устройств регулирования напряжения;
- снизить расход электротехнических материалов, затрачиваемых на изготовление выпрямителя [11].

В настоящее время двенадцатипульсовые выпрямительные агрегаты (ВА) чаще всего образованы трехфазными двухмостовыми схемами выпрямления, представляющими собой два трехфазных моста Ларионова, соединенных по выходу либо параллельно, либо последовательно, схемы включения изображены на рисунке 2.1.

Трансформатор, входящий в двенадцатипульсный ВА, имеет две системы вентильных обмоток: одну – соединенную звездой, а другую – треугольником. Каждая из указанных систем обмоток питает свой трехфазный мост Ларионова. Благодаря этому на входе трехфазных мостов действуют две трехфазные системы линейных напряжений, сдвинутые друг относительно друга на 30° , что необходимо для реализации двенадцатипульсового выпрямления за период.

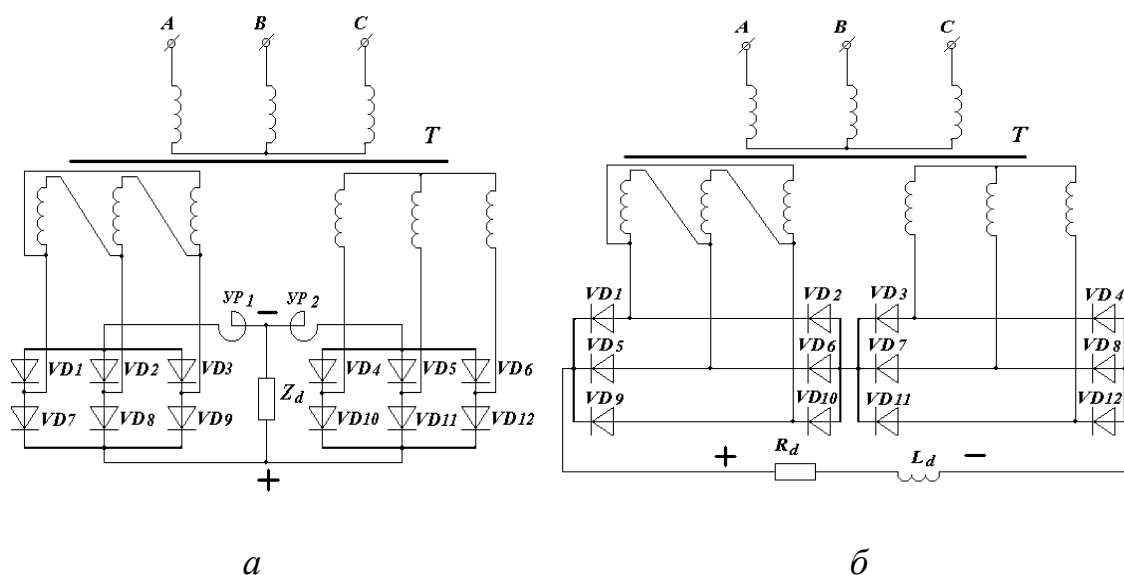


Рисунок 2.1– Функциональные схемы 12-пульсных ВА

- a* – с параллельным соединением трехфазных мостов;
- б* – с последовательным соединением трехфазных мостов

Вместе с тем, если в двенадцатипульсовом ВА предусматривается параллельное соединение трехфазных мостов, то в этом случае необходимо использование уравнивающих реакторов (УР). Применение же УР ведет к увеличению суммарной установленной мощности трансформаторного оборудования приблизительно на 7%, вызывает дополнительные потери активной мощности в самом УР от протекающих по нему токов и требует на изготовление УР дополнительного расхода электротехнических материалов, стоимость которых в настоящее время только возрастает. Кроме того, в случае несимметрии питающих напряжений в двенадцатипульсовом ВА с параллельным соединением трехфазных мостов возможна неравномерная загрузка секций. Учитывая это, для создания двенадцатипульсовых ВА широко используется последовательная схема соединения трехфазных мостов, изображенная на рисунке 1.1,б.

Основной недостаток схем последовательного соединения трехфазных мостов заключается в более высоких суммарных потерях активной мощности в вентилях по сравнению с параллельными схемами соединения [11].

В настоящее время развиваются также другие схемы, например, такие как: двенадцатипульсовый выпрямитель по кольцевой схеме, многопульсовый выпрямитель на ортогональных напряжениях и многие другие.

2.3 Применение управляемых зонно-фазных выпрямителей

Регулирование напряжения посредством использования зонно-фазного управляемого выпрямителя происходит вследствие одновременного регулирования угла открытия тиристоров и переключения секций вторичных обмоток трансформаторов. Существуют различные варианты зонно-фазных выпрямителей, которые отличаются числом зон и соотношением напряжений в них. На сегодняшний день наиболее распространены четырехзонные регуляторы, собранные по мостовой схеме выпрямления, представленные на рисунке 2.2.

Особенности коммутации тиристоров требуют наличия искусственной задержки угла открытия тиристоров, что приводит к снижению коэффициента мощности [128].

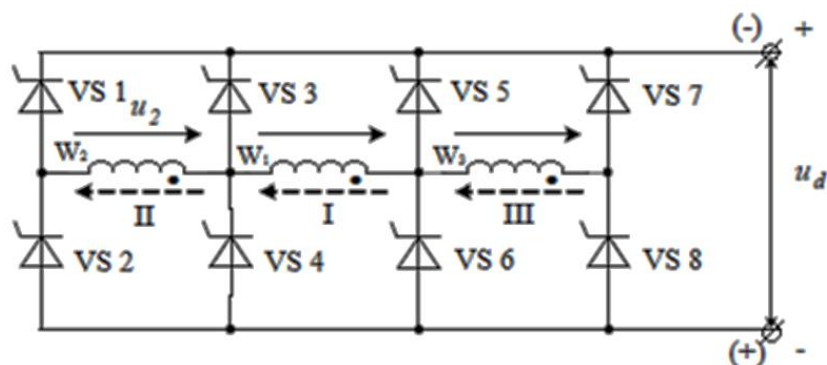


Рисунок 2.2 – Классический четырехзонный управляемый выпрямитель

На кафедре электротехнических комплексов НГТУ была разработана улучшенная схема зонно-фазного выпрямителя, которая получила название четырехзонный выпрямитель с лестничной структурой, представленный на рисунке 2.3 [128]. По результатам математического моделирования и физических экспериментов можно отметить уменьшение времени коммутационных процессов у четырехзонного выпрямителя с лестничной структурой по сравнению с управляемым мостовым выпрямителем.

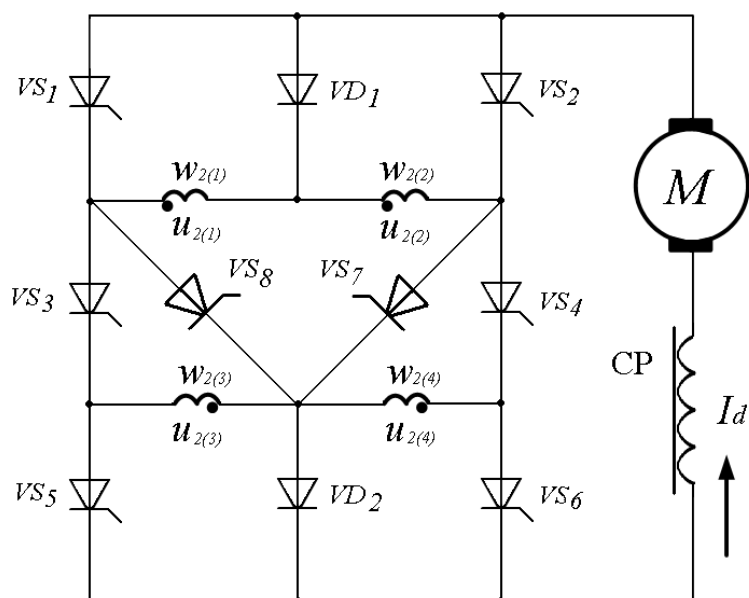


Рисунок 2.3 – Четырехзонный выпрямитель с лестничной структурой

Благодаря особой топологии схемного решения применение данных схем выпрямления позволяет повысить коэффициент мощности на 2-4% [128]. Также неоспоримым преимуществом управляемых зонных выпрямителей является возможность эффективно работать в широком диапазоне регулирования со стабильными энергетическими показателями.

2.4 Компенсация реактивной мощности

Важнейшим и наиболее эффективным техническим средством повышения $\cos\varphi$ является компенсация реактивной мощности, которая заключается в подключении к нагрузке источника реактивной мощности (рисунок 2.4).

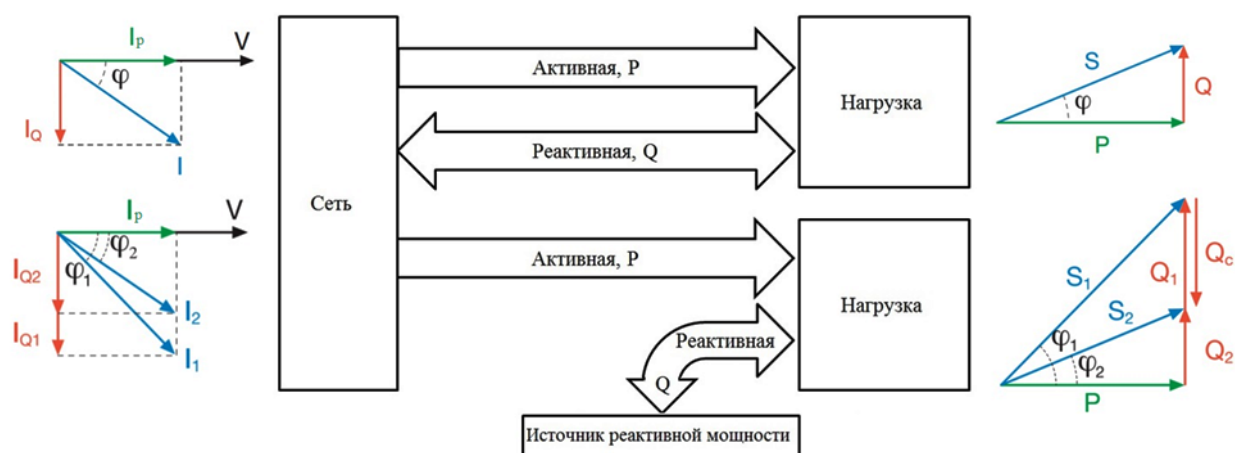


Рисунок 2.4 – Компенсация реактивной мощности

где S , P , Q – полная, активная и реактивная мощности соответственно;

I , I_R , I_Q – полный, активный, реактивный ток;

Q_1 , I_{Q1} , φ_1 – реактивная мощность, реактивный ток и угол сдвига фаз до компенсации реактивной мощности;

Q_2 , I_{Q2} , φ_2 – реактивная мощность, реактивный ток и угол сдвига фаз после компенсации;

Q_c – реактивная мощность, необходимая для осуществления компенсации.

Вследствие проведения мероприятий по снижению реактивной мощности уменьшается загрузка основного оборудования и увеличивается пропускная способность электросетей, создается резерв для подключения дополнительных мощностей.

Внедрение компенсаторов реактивной мощности позволяет не только обеспечить баланс мощностей, но также дает и значительный экономический эффект, который заключается в уменьшении потерь электроэнергии в сетях вследствие их нагрева, снижении просадок напряжения, в рациональном использовании оборудования подстанций.

Проектирование энергосистемы с добавлением средств компенсации реактивной мощности на стадии разработки позволяет снизить номинальную мощность трансформаторов и преобразовательных агрегатов, уменьшить сечение проводов и кабелей, а также уменьшить номинальную мощность другого оборудования передачи и распределения электроэнергии [17, 18].

Появление просадок напряжения может привести к появлению брака, неправильной работе оборудования, сбоем программного обеспечения, прекращению выпуска продукции. В электротранспортном комплексе снижается энергоэффективность перевозок. Уменьшение просадок напряжения приводит к более стабильной работе потребителя. Перечисленные факторы выражаются в положительном косвенном экономическом эффекте.

Наиболее целесообразным местом подключения компенсатора реактивной мощности является точка сети, физически близкая к потребителю, в этом случае уменьшается контур циркуляции реактивной энергии между компенсатором и нагрузкой.

Согласно [34] потери энергии в активном сопротивлении R и реактивным X составляющих электрического сопротивления сети через активную P и реактивной Q мощности могут быть определены согласно выражениям:

$$\Delta P = \frac{P^2 + Q^2}{U^2} \cdot R \quad \text{и} \quad \Delta Q = \frac{P^2 + Q^2}{U^2} \cdot X. \quad (2.1)$$

Потери напряжения, которые появляются в сети при передаче реактивной мощности, можно представить в виде:

$$\Delta U = \frac{PR + QX}{U}. \quad (2.2)$$

Ток в линии до установки компенсирующих устройств определяется выражением:

$$\dot{I}_1 = I_R - jI_{Q1}. \quad (2.3)$$

Мощность нагрузки равна:

$$\bar{S}_1 = P - jQ_1. \quad (2.4)$$

После установки компенсирующих устройств мощностью Q_K реактивный ток и реактивная мощность в сети уменьшаются.

При этом в линии будет протекать ток:

$$I_2 = I_R - jI_{Q2}. \quad (2.5)$$

Мощность составит:

$$\bar{S} = P - j(Q_1 - Q_2). \quad (2.6)$$

Таким образом, после установки компенсирующих устройств реактивная мощность уменьшается, т. е. линия разгружается по реактивной мощности. При этом уменьшаются потери мощности:

$$\Delta P = \frac{P_H^2 + (Q_H - Q_K)^2}{U^2} \cdot R_L; \quad \Delta Q = \frac{P_H^2 + (Q_H - Q_K)^2}{U^2} \cdot X_L, \quad (2.7)$$

и просадки напряжения:

$$\Delta U = \frac{P_H R_L + (Q_H - Q_K) \cdot X_L}{U}, \quad (2.8)$$

Выбор типа и расчет мощности компенсирующего устройства определяется исходя из следующих условий:

- соблюдение выполнения теоремы Теллеждена на всех участках цепи;
- величина напряжения сети должна находиться в заданных пределах;

– нагрузка по току и нагреву основных коммутационных и защитных элементов не должна превышать номинальных значений.

2.4.1 Синхронные машины

Одним из наиболее известных способов компенсации реактивной мощности является применение синхронных машин в режиме перевозбуждения.

Синхронные машины можно использовать в качестве источников реактивной энергии. Данный тип машин отличает:

- высокий КПД;
- возможность создания тихоходных синхронных машин;
- зависимость между подводимым напряжением и моментом на валу машины не является квадратичной;
- скорость вращения вала данной машины практически не зависит от приложенного момента;
- возможность использования данного типа машин в качестве источников реактивной мощности в режиме перевозбуждения.

Режим работы синхронной машины определяет, является ли машина источником или потребителем реактивной энергии. Режимы работы синхронной машины задается величиной тока возбуждения в роторе.

При недовозбуждении машина представляет собой активно-индуктивную нагрузку для сети, в режиме перевозбуждения нагрузка имеет активно-емкостной характер, а значит происходит выработка реактивной энергии. На рисунке 2.5 изображена U-образная характеристика синхронной машины.

В режиме работы при $\varphi = 0$ значение $\cos \varphi = 1$ из сети не происходит ни потребления, ни отдачи реактивной энергии. В этом режиме машина потребляет только активную энергию. Для работы в режиме компенсатора необходимо повышать ток возбуждения. Для длительной работы в режиме

компенсации реактивной энергии можно снизить активную нагрузку, а ток возбуждения оставить равным номинальному. В этом случае двигатель развивает не максимальную реактивную мощность.

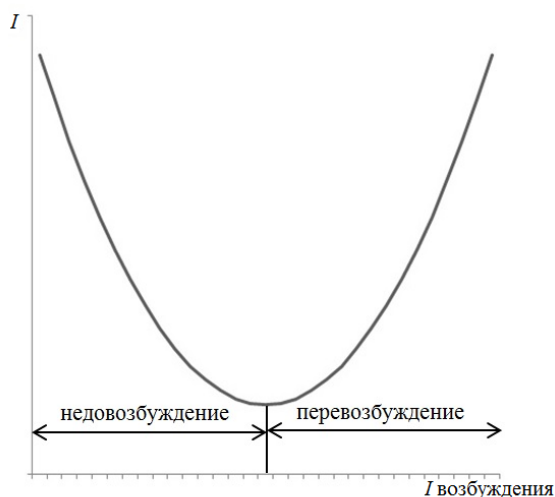


Рисунок 2.5 – U образная характеристика синхронной машины

Вследствие чего применение синхронной машины в режиме компенсатора реактивной мощности в каждом конкретном случае должно быть экономически оправдано, ведь данный тип компенсации можно рассматривать, как расход активной энергии на компенсацию реактивной. Практический опыт показывает, что целесообразно использовать данный вид компенсаторов в промышленных сетях большой мощности.

2.4.2 Батареи конденсаторов

Батареи конденсаторов (БК) можно рассматривать как источник реактивной мощности и, соответственно, они могут являться компенсаторами реактивной мощности в промышленных сетях. БК представляют собой набор конденсаторов подсоединяемых параллельно сети. Номинальные значения емкости отдельно взятых конденсаторов, как и всей установки, выбираются в зависимости от нужд потребителя. В промышленных трехфазных сетях БК могут быть соединены как в звезду, так и в треугольник, схемы подсоединения изображены на рисунке 2.6.

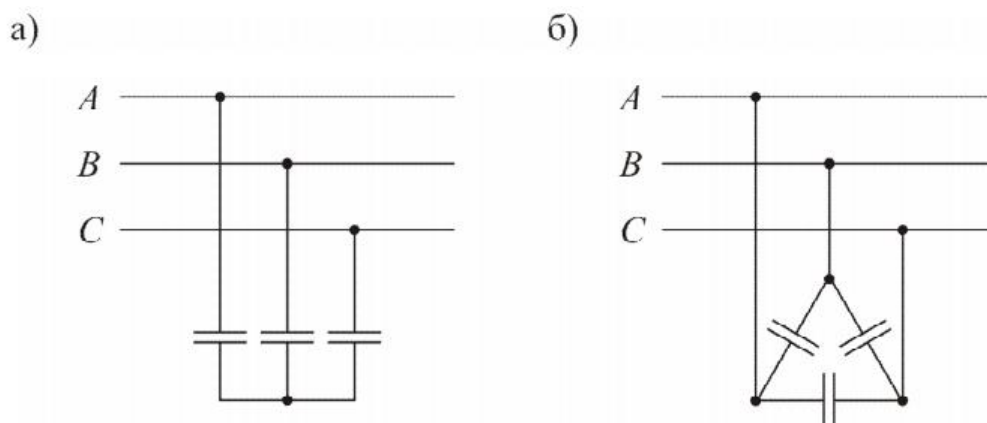


Рисунок 2.6 – Схемы соединения фаз БК:

а) – соединение в звезду; б) – соединение в треугольник

При соединении фаз в звезду мощность БК [29, 34]:

$$Q_{БК} = 3 \cdot \left(\frac{U}{\sqrt{3}} \right)^2 \cdot \omega C = U^2 \cdot \omega C. \quad (2.9)$$

При соединении в треугольник:

$$Q_{БК} = 3 \cdot U^2 \cdot \omega C. \quad (2.10)$$

БК совместно с коммутационной аппаратурой, а также средствами управления называется конденсаторной установкой (КУ). КУ подключают к сети одну или несколько ступеней конденсаторов, в зависимости от значений требуемой реактивной мощности. Данные установки нашли широкое применение у потребителей, имеющих стабильное постоянное потребление реактивной энергии. Неоспоримыми преимуществами КУ является простота конструкции, а также модульная система построения БК, что позволяет легко заменять, добавлять или убирать конденсаторы, кроме того установленная мощность такой установки может быть расширена.

Автоматическое управление современными конденсаторными установками осуществляется микропроцессором, на основе информации полученной с датчиков тока и напряжения. Данный регулятор переключает ключевые элементы, присоединяя блоки конденсаторов к сети при этом избегая эффектов недо- или перекомпенсации.

В современных конденсаторных установках применяют металлоплёночные конденсаторы, в качестве электродов в которых используется металлизированная полипропиленовая пленка. За счёт специальной системы напыления металлического слоя, а также за счет полного поверхностного контакта обеспечивается необходимая коммутационная прочность.

Основными преимуществами БК являются:

- минимальные потери активной мощности;
- простота конструкции и легкость монтажа;
- простота в эксплуатации;
- возможность установки БК рядом с потребителем;
- система работает в сложных климатических условиях;
- имеется возможность нарастить установленную мощность.

К недостаткам БК можно отнести:

- прямая зависимость генерации реактивной мощности от напряжения в сети;
- отрицательный регулирующий эффект, т.е. при снижении напряжения в сети БК снижают выдаваемую реактивную мощность, из-за чего напряжение еще больше уменьшается;
- недостаточная защита от перенапряжений и коротких замыканий;
- зависимость от формы кривой питающего напряжения;
- ступенчатое регулирование реактивной мощности;
- крайне низкое быстродействие при изменении реактивной мощности в сети.

2.4.3 Статические тиристорные компенсаторы

Развитие силовой электроники второй половины XX века обеспечило возможность перейти от БК, подключаемых к сети контакторами, к статическим тиристорным компенсаторам (СТК). Этот класс устройств

подключает к сети конденсаторные батареи парой тиристоров, включенных встречно-параллельно, что позволяет ступенчато регулировать реактивную мощность, которую отдают в сеть конденсаторы [21, 55]. За счет разнообразных схемных решений организуется большое количество режимов работы СТК [24].

Изменения реактивной составляющей полной мощности сети отслеживаются микроконтроллером, на основе информации, полученной от датчиков тока и напряжения. При превышении определенного, заранее заданного уровня реактивной мощности, происходит подключение или отключение блока конденсаторов. Чем больше ступеней находится в установке, тем более плавное осуществляется регулирование.

Дальнейшее развитие компенсаторы реактивной мощности получили при использовании одного блока конденсаторов, подключаемого тиристорным преобразователем к трем фазам. В иностранной литературе данный тип преобразователей имеет название *Statcom* (Статком) [27, 64].

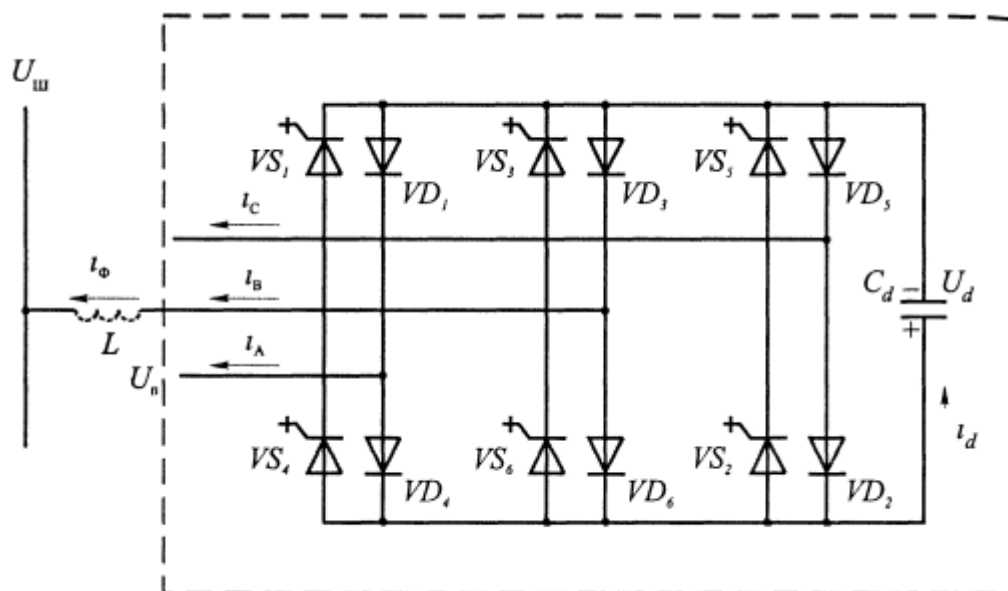


Рисунок 2.7 – Схема Статкома

Напряжение в конденсаторах сменяется зарядными и разрядными циклами, соответственно для инверторного и выпрямительного режимов

работы тиристорного преобразователя. Мощность блока конденсаторов в схеме Статкома составляет около 10% от мощности компенсатора, это возможно вследствие того, что тиристорный блок осуществляет обмен энергии между фазами, забирая энергию с одной фазы и передавая ее в другую фазу.

Из недостатков данной схемы можно отметить наличие гармоник кратных $6K \pm 1$, основными из которых являются пятая и седьмая. Данные гармоники могут быть устранены схемными решениями, для этого необходимо организовать многомостовые 12-фазные или 24-фазные схемы. Либо ввести управление по широтно-импульсной модуляции (ШИМ), которая по специальному алгоритму будет осуществлять два дополнительных переключения запираемых тиристоров, при этом образуются дополнительные ступени в фазном регулировании реактивной мощности.

С 80-х годов в ВНИИЭ была разработана научно методическая основа расчетов параметров Статкома, а также созданы экспериментальные образцы. Проведенные эксперименты доказали высокие показатели работы Статкома, особенно для многопульсовых систем [27].

2.5 Коррекция высокочастотных нелинейных искажений активным силовым фильтром

С развитием силовой полупроводниковой техники в начале XXI века стало возможным производить не только компенсацию реактивной мощности, но также и коррекцию высокочастотных гармонических искажений [57]. Устройства, позволяющие выполнять такие задачи, называются активными силовыми фильтрами. Данные устройства на основе информации об энергетических параметрах сети, поступающих в реальном времени, рассчитывают такой ток компенсации, который обеспечивает высокие показатели качества электроэнергии. При этом реализуется, как потребление или генерация избыточной, или недостающей реактивной

мощности, так и проводится коррекция мощности нелинейных искажений, принцип работы АСФ изображен на рисунке 2.8.

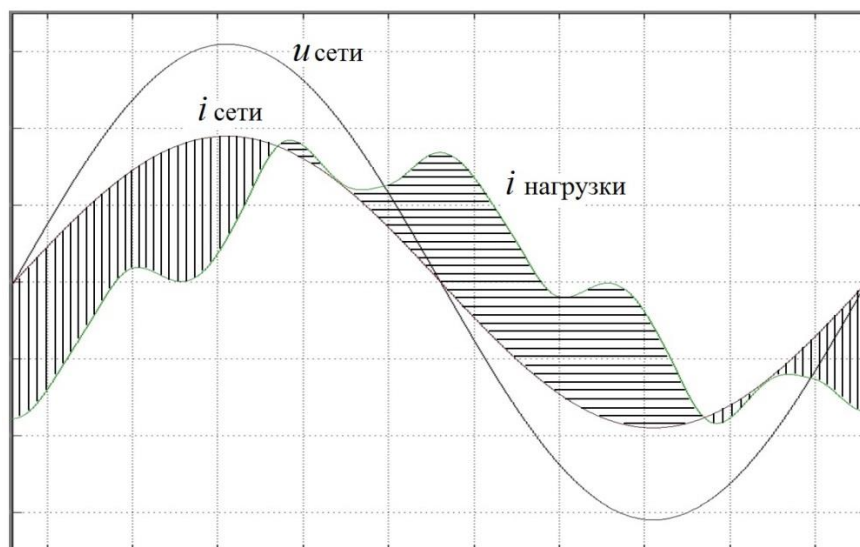


Рисунок 2.8 – Принцип работы АСФ на графиках тока и напряжения сети

На сегодняшний день АСФ подключается к сети двумя основными способами: последовательно и параллельно. В первом случае АСФ рассчитывается на полный ток потребителя и управляет фазным напряжением, вследствие чего он имеет большую мощность, что соответствует более высокой стоимости. Параллельное подключение АСФ к сети является более распространённым из-за более гибкого подхода к выбору номинальной мощности, возможности компенсации различного рода пульсаций тока, асимметрии и сдвига по фазе, нелинейных искажений, которые генерируются преобразовательными агрегатами [36, 48]. Схемы подключения АСФ к сети изображены на рисунке 2.9.

АСФ состоит из трёхфазного инвертора напряжения, ключевыми элементами которого являются *IGBT*-транзисторы, сглаживающего дросселя, блока конденсаторов, а также управляющего микропроцессора, который формирует сигналы управления для задания компенсационного воздействия на основе информации полученной с датчиков тока и напряжения. Предварительный заряд конденсаторной батареи организован без использования дополнительных источников питания.

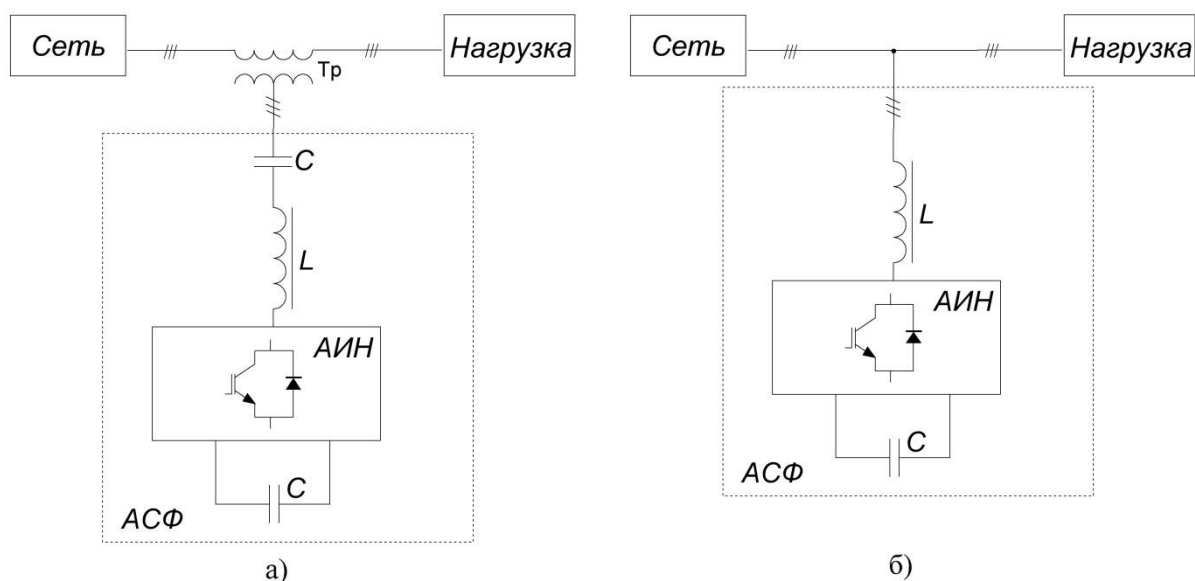


Рисунок 2.9 – Функциональная схема подключения активного фильтра
а – с последовательным АСФ, б – с параллельным АСФ

Автономный инвертор напряжения обычно реализуется по схеме двухуровневого *IGBT*-инвертора. Величина индуктивности сглаживающего дросселя рассчитывается из условий сглаживания ШИМ пульсаций и возможности обеспечить высокие значения тока фильтра.

АСФ является многофункциональным устройством способным выполнять несколько параллельных задач. Помимо компенсации реактивной мощности по основной гармонике и коррекции высших гармоник, АСФ может выполнять распределение нагрузок между фазами (устранение дисбаланса фаз), что позволяет значительно уменьшить разность потенциалов между нейтральным проводом и землей в четырёхпроводных системах [10]. АСФ нечувствителен к большим изменениям импеданса сети, который может возникнуть, например, при переключении с сетевого питания на питание от генератора. Применение цифровых контроллеров обеспечивает надежность, универсальность и точность системы коррекции мощности.

Основные преимущества АСФ:

- быстрое действие, заключающееся в коррекции высокочастотных искажений до 50-ой гармоники;

- комплексное решение проблем компенсации (реактивной мощности, высших гармоник, токов обратной последовательности, дисбаланса фаз);
- многофункциональность при подавлении высших гармоник;
- компактные масса-габаритные показатели;
- низкие собственные активные потери.

2.6 Гибридные устройства повышения коэффициента мощности

Понятие гибридных силовых фильтров в сфере компенсации реактивной мощности впервые было предложено Н. Akagi [82, 84]. Автор предлагает называть гибридными комбинацию нескольких типов фильтров с одной системой управления. А также выделяет следующие типы гибридных фильтров: последовательно подключенный активный фильтр с параллельно подключенным пассивным фильтром; параллельное подсоединение к сети, последовательно соединенных, активного и пассивного фильтров [108, 121].

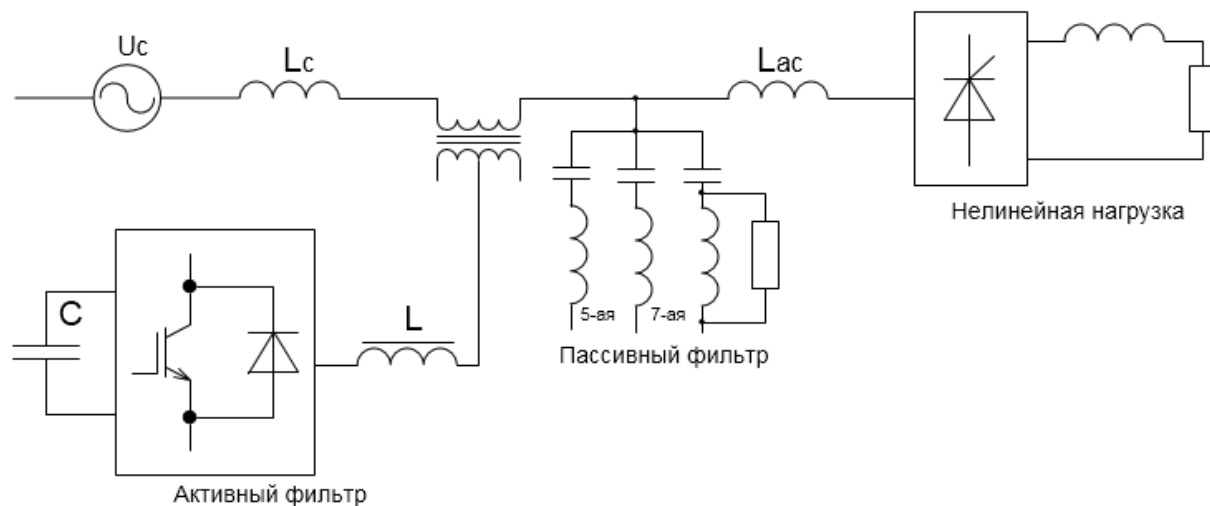


Рисунок 2.10 – Комбинация последовательного активного и параллельного пассивного фильтров

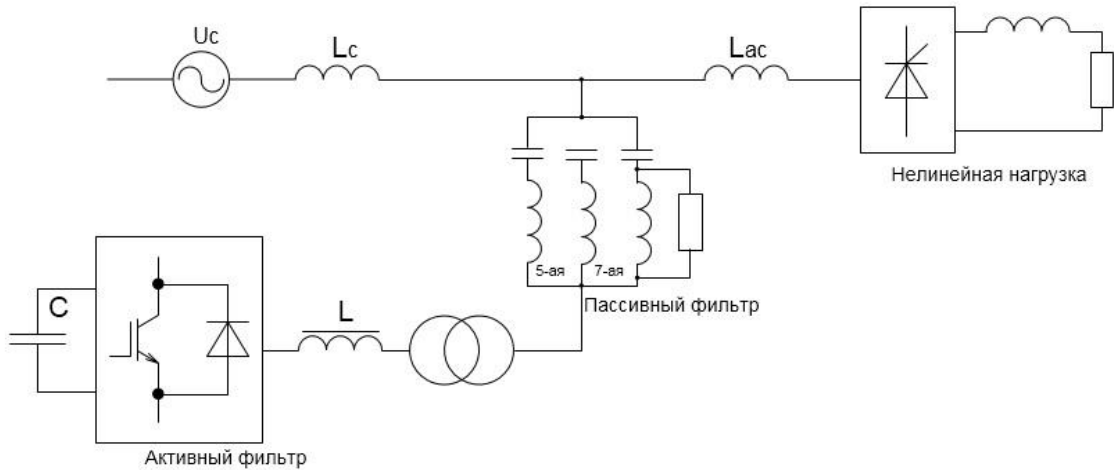


Рисунок 2.11 – Последовательное соединение активного и пассивного фильтров

Несмотря на то, что представленные гибридные фильтры имеют разную конфигурацию, они имеют похожие задачи фильтрации и принципы управления. Пассивные фильтры в данных комбинациях состоят из трех блоков, которые рассчитаны на фильтрацию 5-ой, 7-ой и 11-ой гармоник. Такие комбинации АСФ с пассивным фильтром дают возможность существенно уменьшить мощность активного фильтра.

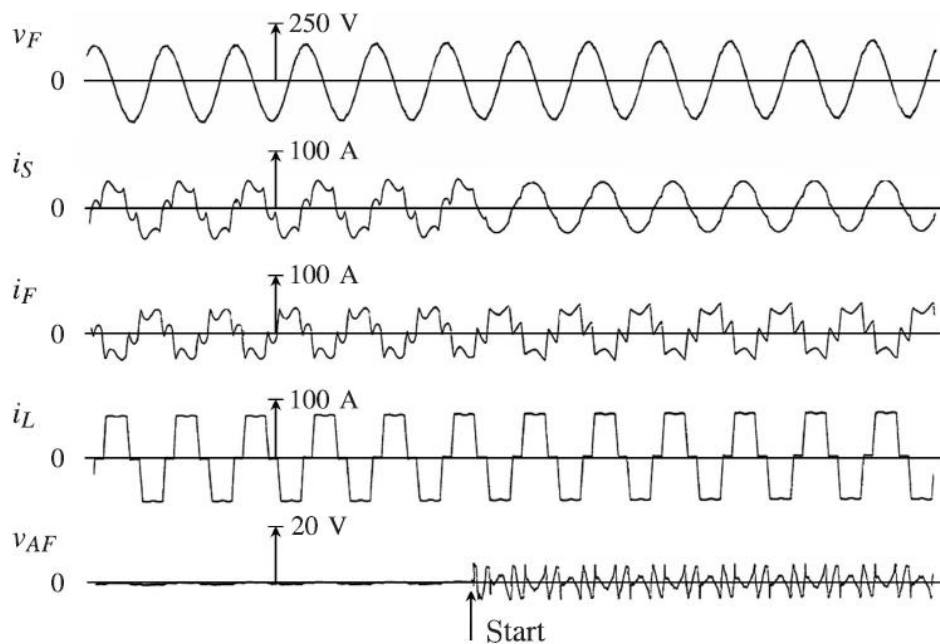


Рисунок 2.12 – Графики токов и напряжений при работе ГСФ

Задача активного фильтра в данных системах является не компенсация гармонических составляющих тока нагрузки, а стабилизация напряжения сети. Также активный фильтр помогает избежать проблем с резонансными явлениями между пассивным фильтром и нагрузкой. Работа гибридного фильтра представлена на рисунке 2.12 [82].

В итоге комбинация параллельного пассивного фильтра и маломощного активного фильтра является эффективным и экономически целесообразным способом фильтрации высших гармоник. В соответствии с задачами на фильтрацию в проведенных исследованиях [52, 56, 64], гибридные фильтры показывали лучшие фильтровые характеристики, чем отдельно пассивные и активные фильтры.

2.7 Сравнение эффективности компенсирующих устройств

Сравнительный анализ информации о способах и средствах повышения коэффициента мощности дает возможность оценить эффективность различных организационных и технических мероприятий для решения поставленной задачи компенсации. Сложность заключается в том, что эффективность работы систем электроснабжения зависит от многих факторов, а средства улучшения работы одних системы зачастую негативно влияют на другие системы. Решение данной проблемы состоит в комплексном и обоснованном применении способов и средств повышения коэффициента мощности в зависимости от характера нагрузки.

Организационные мероприятия повышения эффективности электроснабжения должны быть применены в первую очередь по причине их эффективности и экономичности, что в отдельных случаях повысит коэффициент мощности на 3-5%.

Также должна выполняться модернизация схем выпрямления для потребителей, работающих на постоянном токе. Например, замена бипульсовых схем на 12ти-пульсовые дает до 3-8% к уменьшению гармонических составляющих тока сети.

Применение средств компенсации реактивной мощности и коррекции высших гармоник зависит от характера нагрузки конкретного потребителя [49]. Сравнение основных параметров наиболее известных технических средств компенсации реактивной мощности и мощности искажений представлены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Сравнение средств компенсации реактивной мощности

функция	Тип компенсатора					
	Синхр. машины	БК	СТК	СТАТ-КОМ	АСФ	ГСФ
КРМ по основной гармонике	регулир.	ступен.	ступен.	рег.	рег.	регулир.
КРМ по высшим гармоникам	–	–	–		+	+
Выравнивание нагрузки фаз	–	–	–	+	+	+
Сглаживание бросков активной мощности	–	–	–	–	+	+
Устойчивость в переходных режимах	низкая	низкая	низкая	средняя	высокая	высокая

Из таблицы 2.1 следует, что существует группа пассивных компенсаторов (БК, СТК), которые позволяют повысить коэффициент мощности за счет внесения в систему реактивных элементов с ёмкостным характером нагрузки. Данные компенсаторы обычно имеют несколько номинальных уровней подключаемой реактивной мощности, и хорошо подходят для потребителей со стабильной, постоянной активно-индуктивной нагрузкой. Схемы типа *statcom* являются следующим этапом развития компенсирующих устройств, они способны решать более широкий круг задач за счет использования тиристорных переключателей, но имеют низкое быстродействие по сравнению с АСФ. Компенсация мощности нелинейных высокочастотных гармонических искажений становится возможной при использовании АСФ за счет применения современных *IGBT* транзисторов и математического аппарата теорий мгновенных мощностей. Не стоит забывать

о возможных гибридных комбинациях различных фильтрокомпенсирующих устройств, наилучшие результаты среди которых показывают комбинации пассивных БК работающих совместно с АСФ.

Выводы по главе 2

1. Рассмотрены вопросы негативного влияния реактивной мощности, мощности искажений, несимметричной и неравномерной загрузки фаз на качество электроэнергии в сети.

2. Изменение схем преобразования электроэнергии с увеличением пульсовости выпрямления или использование управляемых зонно-фазных выпрямителей становится целесообразно в случае проектирования новых подстанций или при глубокой модернизации существующих, а также не решает всех проблем низкого качества электроэнергии.

3. Организационные мероприятия повышения коэффициента мощности подстанций вследствие их экономичности и эффективности должны применяться в обязательном порядке.

4. Наиболее перспективным средством компенсации реактивной мощности и мощности искажений в сети за счет их быстрого действия и широкой multifunctionality являются современные АСФ.

5. Разделение задач компенсации между несколькими различными фильтрами в составе ГСФ снижает стоимость устройства компенсации без падения показателей качества электроэнергии.

6. Для экономически-обоснованного выбора средства повышения качества электроэнергии необходимо детально изучить характер потребления энергии рассматриваемой нагрузкой.

Глава 3 АНАЛИЗ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ НА ПОДСТАНЦИЯХ МЕТРОПОЛИТЕНА

Исторически система энергоснабжения метрополитена является системой постоянного тока, что обусловлено проблемами передачи электроэнергии подвижному составу. И если для потребителей, использующих систему переменного тока, характерно наличие в сети реактивной мощности, то для электротранспорта с системой постоянного тока основным негативным фактором касательно качества электроэнергии являются высокочастотные нелинейные искажения, вносимые в питающую сеть выпрямительными агрегатами. Вследствие этого потребителей электроэнергии в метрополитене можно условно разделить на: 1) тяговую нагрузку постоянного тока т.е. сами электропоезда и 2) нагрузки систем жизнеобеспечения, такие как вентиляция, эскалаторы, насосы, освещение и др., работающие на переменном токе. Статистика распределения энергопотребления на подстанции в метрополитене приведена на рисунке 3.1.

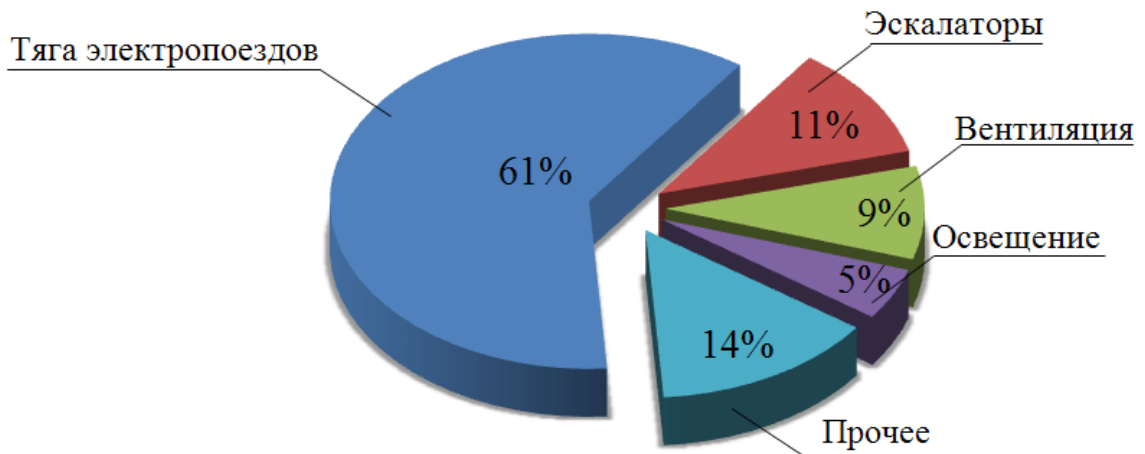


Рисунок 3.1 – Потребление электроэнергии на СТП-4 «Площадь Ленина» за июнь 2015 года

Согласно [70] среднегодовое потребление электроэнергии на тягу поездов составляет около 65%, в то время как на системы жизнеобеспечения около 35%, данные пропорции могут иметь сильные отличия в разных городах и зависят от пассажиропотока, глубины заложения метрополитена,

климата и других факторов. По данным Новосибирского метрополитена на подстанции СТП-4 на тяговую нагрузку в среднем расходуется около 60% электроэнергии.

3.1 Основные положения анализа качества электроэнергии в метрополитене

Основная энергетическая характеристика тяговой подстанции $I(t)$ формируется из значения тока $I_{nc}(t)$ поезда и $n(t)$ - количества поездов на секциях, питающихся от данной подстанции. Движение подвижного состава по линии описывается характеристиками $V(t)$, $V(l)$, $l(t)$, которые, в свою очередь, зависят от множества факторов: режима ведения поезда, интервалов между поездами, количества пассажиров, метеоусловий и др. Следовательно, характеристики энергопотребления необходимо рассматривать как случайное явление и при их анализе использовать методы математической статистики. Измеренные значения коэффициента мощности подстанции являются случайными величинами, а сама выборка статистическим рядом. Из чего следует, что разброс значений коэффициента мощности формируется в результате влияния различных внешних факторов, а необходимое количество измерений случайной величины зависит от желаемой точности результата обработки статистического ряда.

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

Анализ статистического ряда согласно [5] выполняется в следующей последовательности:

1) упорядочивается случайный ряд (СР), путём расположения числовых значений в порядке возрастания;

2) оцениваются числовые характеристики случайной величины (СВ) по формулам [5]:

– математическое ожидание:

$$M[X] = \tilde{m}_x = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \quad (3.1)$$

где X – обозначение СВ;

n – число членов СР;

x – текущее значение СВ;

– дисперсия:

$$D[X] = D_x = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - m_x)^2. \quad (3.2)$$

– среднее квадратическое отклонение:

$$\tilde{\sigma}_x = \sqrt{\tilde{D}_x}. \quad (3.3)$$

3) вычисляются производные числовые параметры ряда:

– коэффициент вариации:

$$K_v = \frac{\tilde{\sigma}_x}{\tilde{m}_x}, \quad (3.4)$$

– квадрат среднеквадратического значения СВ:

$$k_{\text{эx}}^2 = \frac{\tilde{a}_2}{\tilde{m}_x^2} = \frac{\tilde{\sigma}_x^2 + \tilde{m}_x^2}{\tilde{m}_x^2} = K_{\text{vx}}^2 + 1, \quad (3.5)$$

– относительное значение дисперсии СВ:

$$\tilde{D}_{*x} = \sigma_{*x}^2 = K_{\text{vx}}^2 = K_{\text{эx}}^2 - 1, \quad (3.6)$$

4) производится группировка СР в разряды.

Число разрядов группирования R принимают $R = 5 \dots 15$.

Ширина разряда определяется по формуле:

$$\Delta x = \frac{x_{\text{max}} - x_{\text{min}}}{R}. \quad (3.7)$$

В упорядоченном исходном ряде подсчитывается количество попаданий СВ в j -ый разряд (m_j). Далее целесообразно перейти к относительным значениям СВ в разрядах и статистическим плотностям вероятностей, пересчитав ряд по формулам:

$$x_{*j} = \frac{x_j}{m_{x^*}}, \quad P_{*j} = \frac{m_j}{n}, \quad (3.8)$$

где математическое ожидание:

$$m_{x^*} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (x_j \cdot m_j). \quad (3.9)$$

Статистическая функция определяется:

$$\begin{aligned} F_*(x_{*1}) &= P_{*1}; \\ F_*(x_{*2}) &= P_{*1} + P_{*2}; \\ &\dots\dots\dots \\ F_*(x_{*k}) &= \sum_{j=1}^k P_{*j} = 1. \end{aligned}$$

При наличии в СР постоянной величины имеет смысл вынести её за ряд и обрабатывать только вариационный ряд. При построении гистограммы статистической плотности вероятности и статистической функции в относительных единицах постоянная величина не учитывается [5, 6].

3.2 Реактивная энергия и мощность искажений, обусловленные тяговой нагрузкой электропоездов метрополитена

Самыми энергозатратными потребителями в метрополитене являются электропоезда, на которые приходится около 60% всей потребляемой электроэнергии. С точки зрения качества электроэнергии данная нагрузка характеризуется нелинейностью характеристик преобразовательных агрегатов, значительными кратковременными пиками токов при пуске поезда, неравномерным характером тяговой нагрузки, а также функционированием трансформаторов в недогруженном состоянии большую часть времени.

Индуктивный характер реактивной составляющей электрического сопротивления в электротехническом оборудовании подстанции способствует возникновению фазового сдвига тока по отношению к фазе

питающего напряжения. Нелинейные искажения, порожденные работой выпрямительных агрегатов, проявляются в виде высших гармоник в кривой тока и ухудшают качество электроэнергии.

Ленинскую линию метрополитена в г. Новосибирске обслуживают девять тяговых подстанций, среди которых одной из самых загруженных является СТП-9 «Студенческая». Расход активной энергии по тяговым подстанциям Ленинской линии метрополитена г. Новосибирска показан на рисунке 3.2.

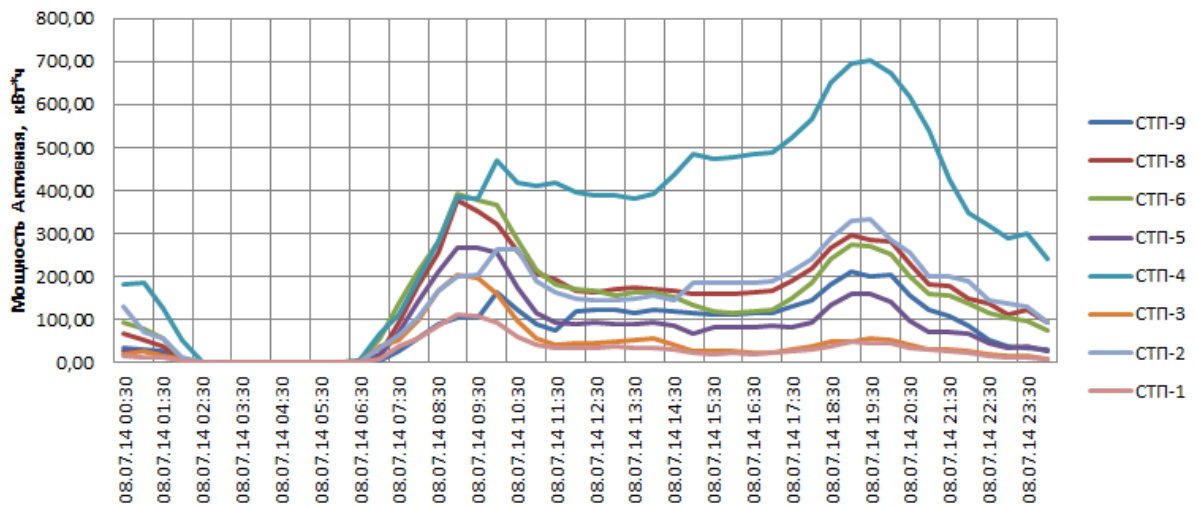


Рисунок 3.2 – Суточный график активной мощности тяговых подстанций метрополитена г. Новосибирска

С целью анализа протекающих энергетических процессов, а также оценки качества электроэнергии были сняты более 10 миллионов значений различных энергетических показателей подстанции СТП-4 «Площадь Ленина», среди которых: токи, напряжения, фазовые углы, частота сети и ее отклонение, гармоники тока, напряжения, мощность гармоник на шинах 10кВ. Также собраны данные на секциях электроснабжения эскалаторов, вентиляции и на секции питания освещения.

Измерения проводились сертифицированным и поверенным прибором ЭМ-3.3Т1, предназначенным для измерения и регистрации основных показателей качества электроэнергии (ПКЭ), установленных ГОСТ 32144-13

и EN 50160, действующих значений напряжений и токов при синусоидальной и искаженной формах кривых, активной, реактивной и полной электрической мощности.

Наиболее близко и полно график нагрузки может быть проанализирован с использованием понятий, применяемых в математическом описании случайного процесса, которым и является потребление электроэнергии. Основным показателем качества электроэнергии является коэффициент мощности. Для получения достоверных значений данного параметра были проанализированы показатели качества электроэнергии $\cos\varphi$ и THD [47, 114].

Результаты расчетов числовых характеристик случайной величины представлены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Результаты расчётов по формулам 3.1-3.9

	$f(\cos\varphi)$	$f(THD)$
Мат.ожидание	0,92	0.28
Дисперсия	0,08	0.03
Среднее квадратическое отклонение	0,28	0.17
Коэффициент вариации	0,31	0.29
Квадрат среднеквадратического значения СВ	1,12	1.08
Относительное значение дисперсии СВ	0.25	0.16

Для гистограммы плотности вероятности с целью выдвижения гипотезы вида выравнивающей функции согласно [5] был рассчитан параметр m :

$$m = \frac{1}{\sigma_*^2} = \frac{1}{K_{zx}^2 - 1} = \frac{1}{K_v^2}, \quad (3.10)$$

$$m = \frac{1}{0.17} = 5.88.$$

При положительной асимметрии и по параметру m , если параметр $m=1,5\dots 8$, можно выдвинуть гипотезу о Гамма – распределении [5].

Плотность вероятности значений $\cos\varphi$ за сутки показана на рисунке 3.3. график статистической функции $\cos\varphi$ на рисунке 3.4.

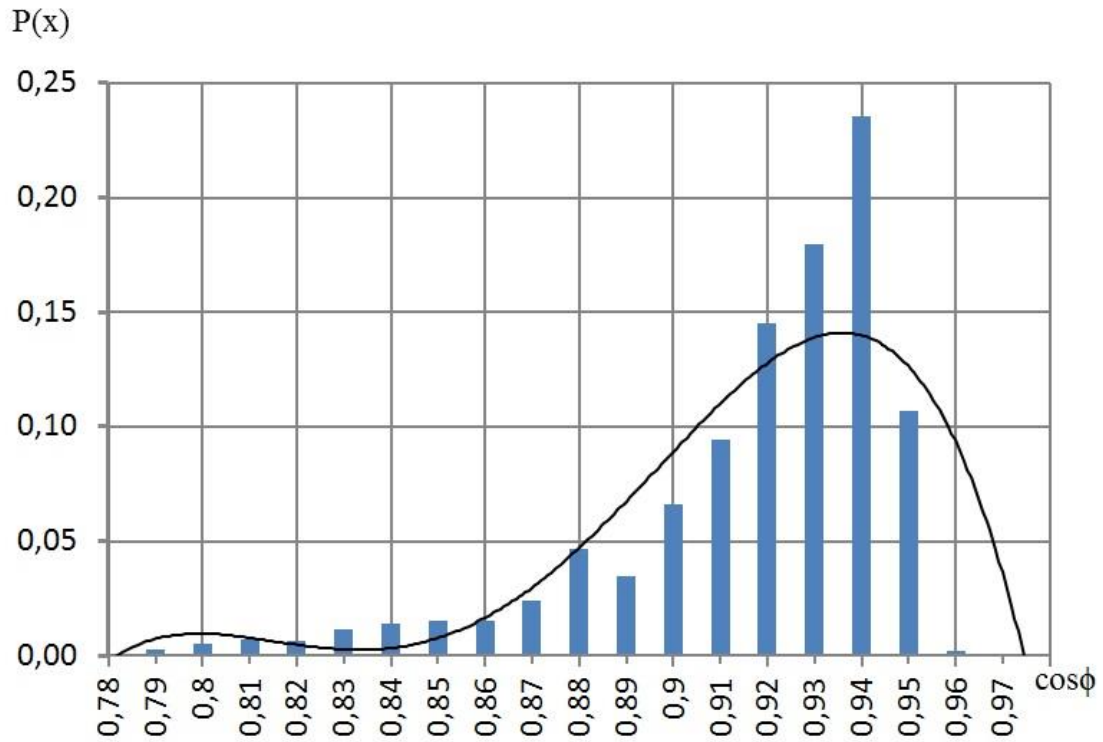


Рисунок 3.3 – Гистограмма плотности вероятности $\cos\varphi$

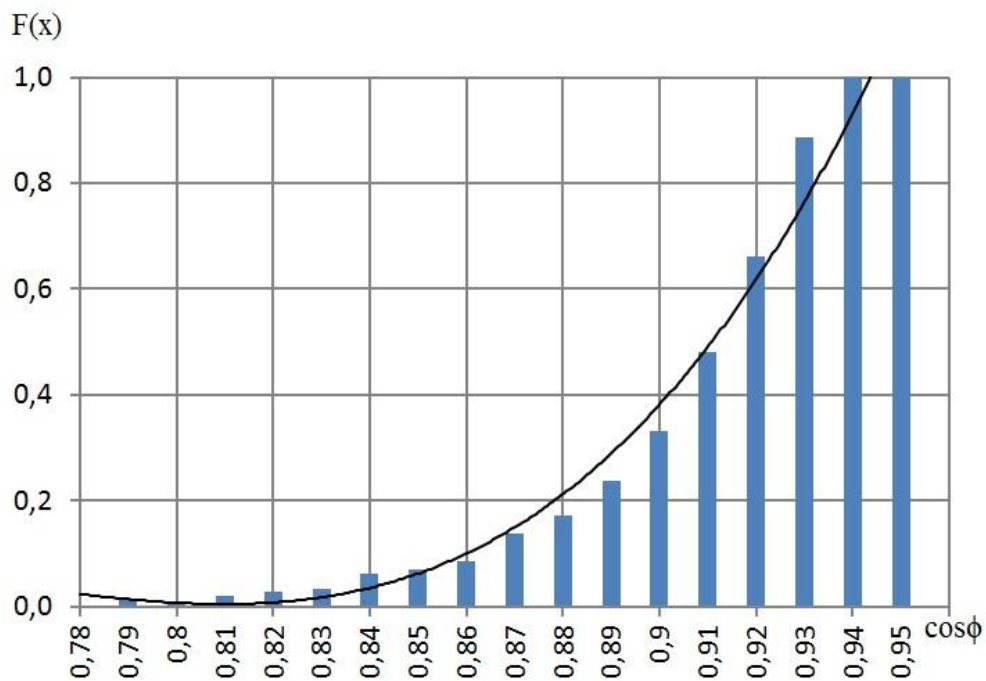


Рисунок 3.4 – График функции распределения $\cos\varphi$

Для системы относительных единиц плотность и функция распределения описываются формулами:

$$f(x) = \frac{m^m}{\Gamma(m)} \cdot x_*^{m-1} \cdot e^{-mx_*}, \quad 0 < x < \infty \quad (3.11)$$

$$\text{и } F(x) = \frac{m^m}{\Gamma(m)} \int_0^{x_*} x_*^{m-1} \cdot e^{-mx_*}, \quad -\infty < x < 0.$$

Для точной оценки вероятностей Гамма-распределения следует использовать таблицы [5]. Вероятности неполной Гамма-функции задаются в форме функций $T(x_T, m)$, $1 - I(x_T, m)$ и $I(x_T, m)$, где $x_T = \lambda x$, $m = k$. При задании ряда в относительных единицах $\lambda = k = m$. В этом случае $F(x_*) = F(mx_*, m) = I(x_T m)$, т.е. $x_T = mx_*$. Пересчёт вспомогательной функции $T(x_*, m)$ выполняется по формуле:

$$T(x_T, m) = \frac{I(x_T, m)}{x_T^m}, \quad (3.12)$$

где $I(x_T, m) = F(m x, m) = (m x)^m \cdot T(x_*, m)$.

В случае формы $1 - I(x_*, m)$ функция распределения:

$$F(m x_*, m) = 1 - [1 - I(x_T, m)]. \quad (3.13)$$

Плотность вероятностей Гамма-распределения (неполной Гамма-функции) определяется по формуле:

$$f_m(x_*) = F(m x_*, m - 1) - F(m x_*, m). \quad (3.14)$$

Выравнивающая функция данной гистограммы является полиномом шестой степени и имеет вид:

$$y = -6 \cdot 10^{-9} \cdot x^6 + 6 \cdot 10^{-7} \cdot x^5 - 2 \cdot 10^{-5} \cdot x^4 + 4 \cdot 10^{-4} \cdot x^3 - 0,0036 \cdot x^2 + 0,0137 \cdot x - 0,0131;$$

Гипотезу о выравнивающей функции проверяют по критериям согласия. В качестве критерия для оценки соответствия гипотезы статическим данным чаще всего используется критерий Пирсона χ^2 . Значение χ^2 определяется по формуле:

$$\chi^2 = n \sum_{j=1}^R \frac{(P_{*j} - P_j)^2}{P_j} = \sum_{j=1}^R \frac{(m_{*j} - np_j)^2}{np_j}, \quad (3.15)$$

Количество степеней свободы:

$$r = R - S, \quad (3.16)$$

где S – количество наложенных связей. В случае однопараметрической функции – $S = 2$

$$\chi^2 = 15 \cdot 0,73 = 11,$$

$$r = 15 - 2 = 13.$$

Искомая вероятность P при $\chi^2 = 11$ и $r = 13$ приблизительно равно 0,6. Эта вероятность малой не является, поэтому гипотезу о том что, величина X распределена по закону Гамма-распределения, можно считать правдоподобной.

Для уточнения гипотезы воспользуемся критерием согласия А.Н. Колмогорова.

В качестве меры расхождения между теоретическим и статистическим распределениями рассматривается максимальное значение модуля

$$D = \max |F^*(x) - F(x)|, \quad (3.17)$$

где $F^*(x)$, $F(x)$ – значения статистической и теоретической функций.

Определяется величина $\lambda = D\sqrt{n}$ и по таблице (1.2) значение $P(\lambda)$ – соответствия экспериментальных данных теоретическому распределению:

$$D = 0,0799;$$

$$\lambda = 0,0799 \cdot \sqrt{15} = 0,31.$$

Вероятность $P(\lambda)$ при $\lambda = 0,31$ приблизительно равна 0,99. Гипотезу о том что, величина X распределена по закону Гамма-распределения, можно считать правдоподобной.

Таблица 3.2 – Значение вероятности $P(\lambda)$ по критерию А.Н. Колмогорова

λ	0.3	0.5	0.7	0.9	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0
$P(\lambda)$	1.00	0.964	0.711	0.393	0.270	0.112	0.040	0.012	0.003	0.001

Для графика функции распределения выравнивающая функция принимает вид:

$$y = 2 \cdot 10^{-4} \cdot x^3 + 3 \cdot 10^{-5} \cdot x^2 - 0.01 \cdot x + 0.032$$

Кроме анализа $\cos\varphi$, с целью оценки влияния высших гармоник на сеть, был проведен анализ показателя THD.

Для системы электроснабжения подвижного состава метрополитена в г. Новосибирске основными устройствами, вносящими гармонические искажения, являются преобразовательные агрегаты. По Ленинской линии на всех тяговых подстанциях применяется бти-пульсная схема выпрямления электрического тока. Данная схема характеризуется наличием 5-ой, 7-ой, 11-ой и 13-ой и т. д. гармоник. Гармонический состав тока первичной обмотки тягового трансформатора представлен на рисунке 3.5.

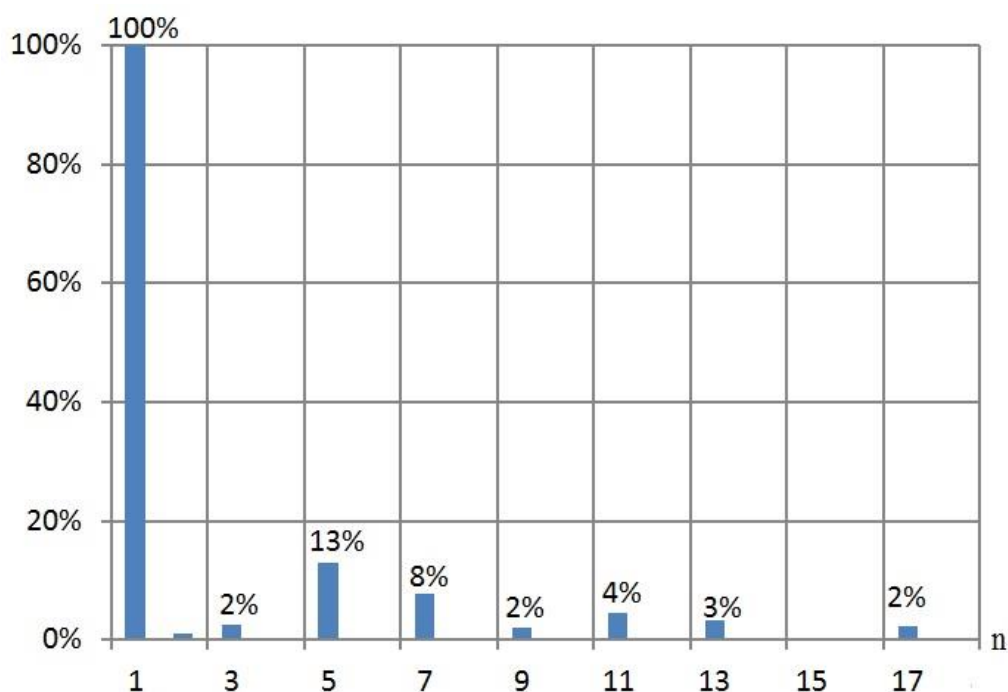


Рисунок 3.5 – Гармонический состав тока первичной обмотки тягового трансформатора

где n – номер гармоники.

Гистограмма и выравнивающая функция плотности вероятности THD за сутки показана на рисунке 3.6.

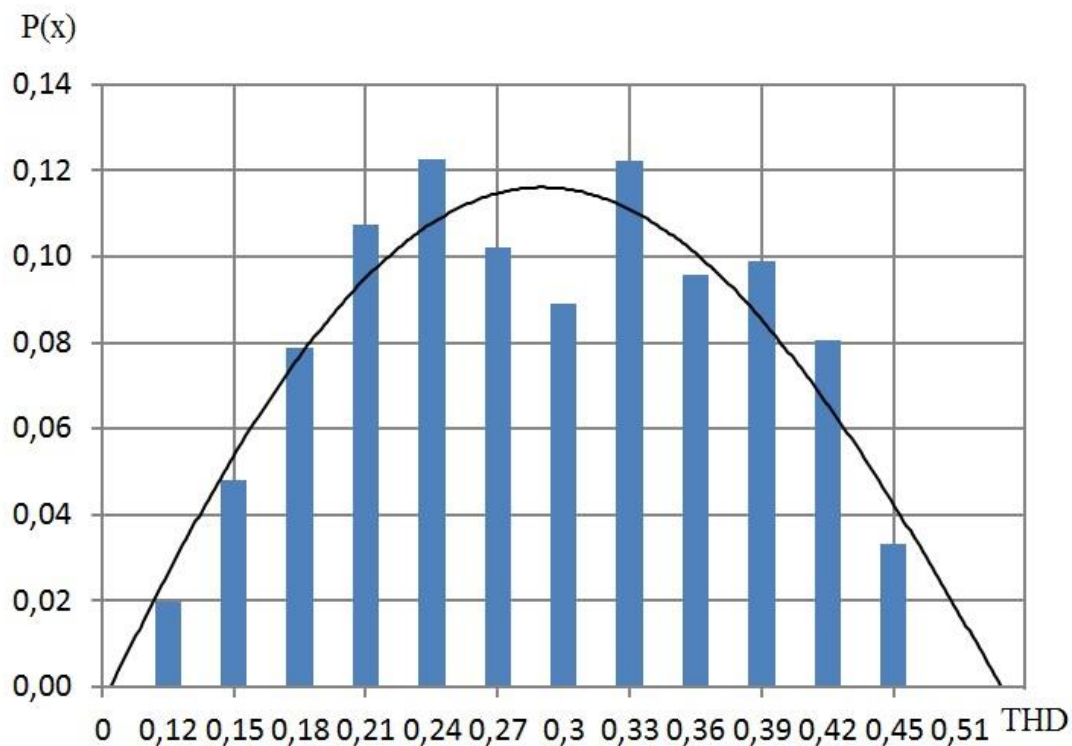


Рисунок 3.6 – Гистограмма плотности вероятности THD

Выравнивающая функция данной гистограммы является полиномом пятой степени и имеет вид:

$$y = 1 \cdot 10^{-5} \cdot x^5 + 3 \cdot 10^{-4} \cdot x^4 - 4 \cdot 10^{-3} \cdot x^3 + 0,028 \cdot x^2 - 0,078 \cdot x + 0,06$$

График функции распределения THD изображен на рисунке 3.7.

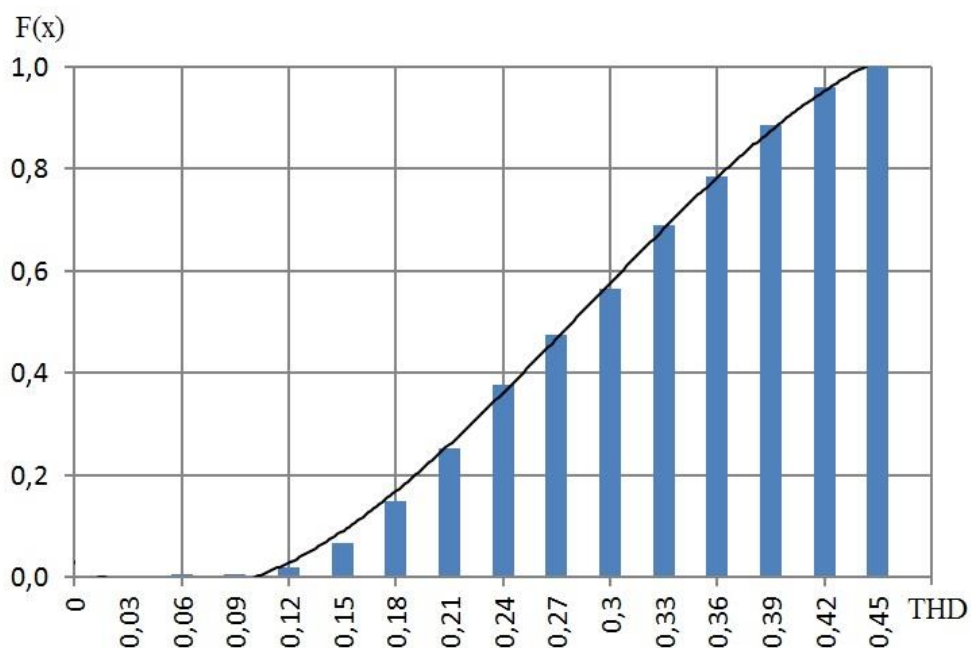


Рисунок 3.7 – График функции распределения THD

Для которого выравнивающая функция:

$$y = -6 \cdot 10^{-4} \cdot x^3 + 0,02 \cdot x^2 - 0,102 \cdot x + 0,11$$

Статистические методы обработки данных позволяют получить более точное представление о характере нелинейных искажений и на основе полученной информации наиболее точно подобрать методы и средства увеличения коэффициента мощности в исследуемой сети. В случае тяговой секции подстанции СТП-4 можно сделать вывод, что характер потребления электроэнергии активно-индуктивный, а суммарная мощность гармоник составляет 38% от мощности основной гармоники. По результатам расчетов, согласно (1.12), общий коэффициент мощности тяговой секции подстанции составляет 0,87.

Ширина диаграммы плотности вероятности показывает, насколько сильно меняется значение реактивной мощности и мощности искажений в сети. Это означает, чем шире будет разброс значений коэффициента мощности, тем более гибко необходимо подходить к вопросу компенсации неактивных мощностей.

3.3 Реактивная энергия в системе электроснабжения эскалаторов, вентиляции и освещения метрополитена

3.3.1 Особенности энергопотребления нетяговых нагрузок метрополитена

– *Электропривод эскалаторов* представляет собой электромеханический комплекс, обеспечивающий перевозку пассажиров. Для осуществления движения исполнительного механизма с малой скоростью во время производства ремонтно-наладочных работ используется вспомогательный электродвигатель. Потребителями электроэнергии являются также тормозные устройства, аппараты схемы управления,

сигнализации и электрической защиты. Потребление электроэнергии эскалаторами составляет 3,5—10% от общего её расхода на метрополитене.

Важным условием повышения эффективности функционирования метрополитена является снижение энергозатрат при сохранении объёма перевозок. В Новосибирском метрополитене эксплуатируется 29 эскалаторов.

Мощность электродвигателя определяется высотой эскалатора и зависит от скорости движения полотна и динамических пуско-тормозных характеристик. Питание электродвигателей эскалаторов осуществляется от трансформаторов собственных нужд с номинальным напряжением во вторичной обмотке 0,4кВ. Для станций мелкого заложения и переходов с высотой подъема до 20м используются асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором мощностью от 14 до 55 кВт [70].

Нагрузочный режим электродвигателя характеризуется резким изменением потребляемого тока. Наиболее тяжелым является режим работы во время пуска на подъем при полном заполнении ходового полотна пассажирами. Указанные условия пуска возникают после внезапной остановки эскалатора, перевозящего пассажиров. При повторном пуске двигатель должен развивать вращающий момент без существенного снижения напряжения в питающей сети. Кратность вращающего момента по сравнению с номинальным, достигает 2...2,5. При этом должна соблюдаться плавность пуска, а ускорение не превышать $0,6 \text{ м/с}^2$. Для обеспечения плавного нарастания пускового вращающего момента в цепь фазных обмоток ротора включается резистор, сопротивление которого ступенчато уменьшается по мере разгона машины. При использовании электродвигателей с короткозамкнутым ротором пусковые резисторы включают в цепь статора. Как правило, при этом ограничиваются одно-, двухступенчатым выведением пусковых резисторов из цепи.

Во время работы эскалаторов мощность, развиваемая электродвигателями, изменяется в зависимости от направления движения (на

подъем или на спуск) и от заполнения пассажирами ходового полотна. По эксплуатационным данным мощность, которая нужна для перемещения одного пассажира вверх на высоту 1м, составляет примерно 250...350 Вт, а расход электроэнергии – 0,1...0,15 Вт·ч.

Для вспомогательного (малого) привода используют короткозамкнутые асинхронные двигатели, мощность которых колеблется от 1,1 до 6,2 кВт. Небольшая мощность электродвигателей позволяет осуществлять пуск эскалаторов на малой скорости без применения дополнительных резисторов.

Неравномерная нагрузка двигателей, особенно в часы, когда пассажиропотоки невелики, влияет на энергетические показатели электропривода эскалаторов.

Развиваемую электродвигателями реактивную мощность при питании от трёхфазной сети можно представить в виде:

$$Q = 3I_1^2 x_1 + 3I_1^2 x_2' + 3I_0^2 x_0 \approx 3I_0^2 (x_1 + x_0) + 3I_1^2 (x_1 + x_2') = Q_0 + Q_p, \quad (3.18)$$

где Q_0 и Q_p – реактивные мощности режимов холостого хода и короткого замыкания. Причем Q_0 не зависит от нагрузки и является реактивной мощностью намагничивания, а Q_p квадратично зависит от нагрузки и является реактивной мощностью полей рассеяния [70].

Таким образом, развиваемая асинхронным двигателем реактивная мощность равна:

$$Q_{ад} = Q_0 + Q_p = Q_0 + Q_{НОМ} K_3^2, \quad (3.19)$$

где $Q_{НОМ}$ – потери на рассеяние при номинальной нагрузке;

$K_3 = P / P_{НОМ}$ – коэффициент загрузки асинхронного двигателя по активной мощности.

Из чего следует, что асинхронный двигатель имеет две составляющие реактивной мощности, причем последняя зависит от приложенной нагрузки.

В свою очередь, коэффициент K_3 является функцией $\text{tg}\varphi$, зависимость $\text{tg}\varphi = f(K_3)$ представлена на рисунке 3.8 [34].

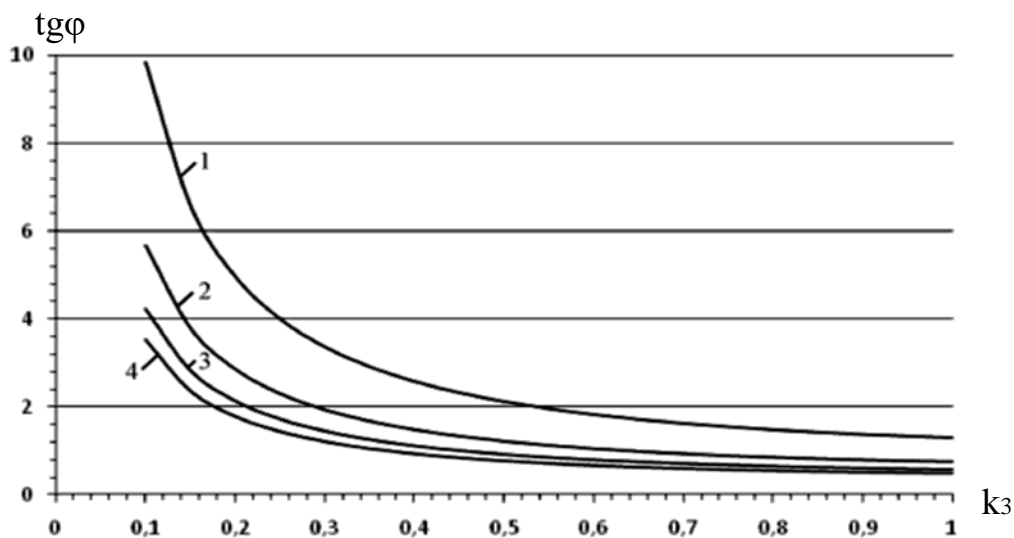


Рисунок 3.8 – Графики зависимости $\text{tg}\varphi = f(K_3)$ для асинхронных двигателей АИ основного исполнения с $n=3000$ об/мин:
1 – 0,09-0,25кВт; 2 – 0,37-4кВт; 3 – 5,5-45 кВт; 4 – 55-90 кВт

Из представленных зависимостей следует, что реактивная составляющая полной мощности, квадратично увеличивается с уменьшением нагрузки на двигатель и достигает максимума в режиме холостого хода.

Асинхронные двигатели, приводящие в движение эскалаторы метрополитена, по условиям техники безопасности рассчитаны на запуск под полной нагрузкой. Учитывая сложности пуска асинхронного двигателя с большим пусковым моментом, двигатели выбираются с большим запасом по мощности. Следовательно, большую часть рабочего времени электродвигатель работает в недогруженном состоянии, что отрицательно влияет на КПД и коэффициент мощности.

– *Электропривод системы вентиляции.* В Новосибирском метрополитене вследствие условий мелкого заложения станций и тоннелей и резко-континентального климата Западной Сибири используют реверсивную вентиляцию с искусственным побуждением при продольном способе распределения воздуха. Также необходимо отметить, что работа вентиляционных систем имеет сезонный характер. Кроме годичных

изменений существенно меняется потребность в вентиляции в течение суток, в зависимости от пассажиропотока (рис. 3.9).

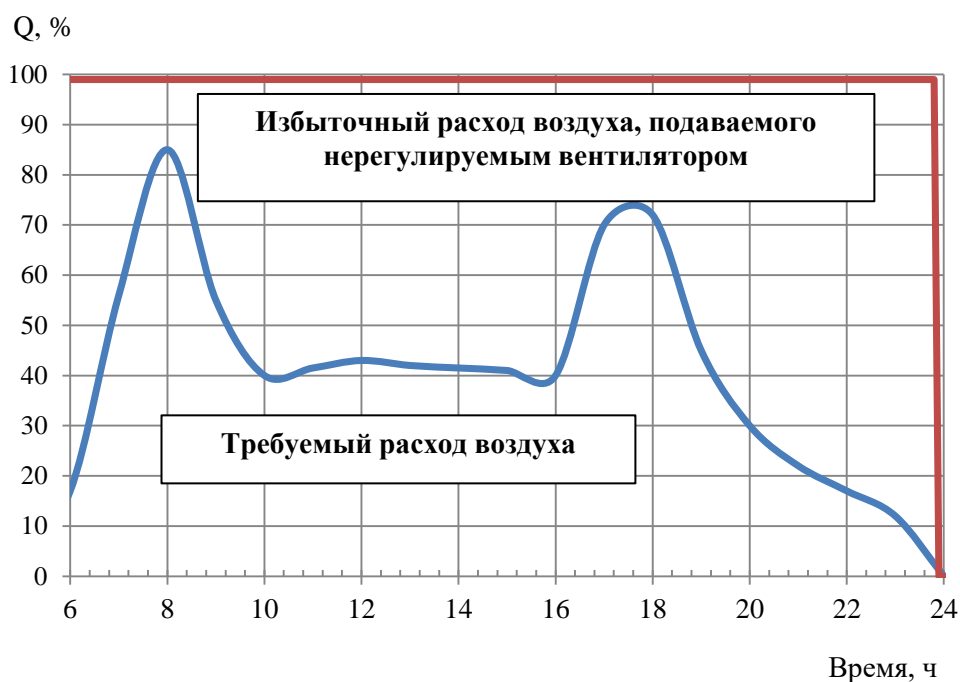


Рисунок 3.9 – Графики требуемого и текущего расхода воздуха

Система вентиляции Новосибирского метрополитена работает в условиях избыточной производительности с перерасходом электроэнергии до 42% [1].

– *Электроснабжение системы освещения* станции и примыкающих к ней участков тоннелей осуществляется от двух трансформаторов целевого назначения, расположенных на подстанции. Секционирование сети дает возможность резервирования, которое происходит или автоматически, или при переключении коммутационных аппаратов техническим персоналом. В распределительных пунктах освещения все групповые линии могут быть переведены на одну секцию, а на подстанциях обе секции подключены, в случае необходимости, на один трансформатор. Часть светильников при внезапном прекращении питания переменным током автоматически

переключается на независимый источник энергии, которым является аккумуляторная батарея.

Освещенность на уровне пола соответствует нормам для помещений, рассчитанных на пребывание в них большого количества людей. Для люминесцентных ламп норма освещенности в 2...2,5 раза выше, чем для ламп накаливания. На большинстве станций в качестве основного источника электрического освещения служат люминесцентные лампы. Мощность этих ламп составляет 15...80 Вт, а ламп накаливания – от 20 до 1000 Вт.

Освещение тоннеля подразделяется на рабочее и дополнительное. Рабочее освещение создает на уровне головок рельсов освещенность 0,5 лк, а вместе с дополнительным 2,5 лк. Рабочее освещение тоннеля при полном исчезновении переменного тока автоматически переключается на питание от аккумуляторной батареи. На отдельных линиях движение поездов происходит при погашенном освещении в тоннеле. На открытых участках трассы освещенность должна быть не менее 1 лк на уровне головки рельсов.

В тоннельных условиях напряжение для освещения выбрано 127В как по технико-экономическим критериям, так и с учетом повышенной опасности для персонала. На открытых участках линий, где нет условий повышенной опасности, напряжение на светильниках принято равным 220В. Для линий механизации ремонтных работ, распределительные пункты которых запираются и доступны для подключения передвижных потребителей только электротехническому персоналу, принято напряжение 380 и 220 В.

В течение суток нагрузка от осветительных устройств претерпевает изменения, но без непосредственного совпадения с изменением графика движения поездов. Отдельные осветительные устройства продолжают использовать электроэнергию и в ночное время по окончании движения пассажирских поездов. Иногда дополнительно подключаются светильники местного освещения для увеличения освещенности в местах проведения ремонтных работ.

3.3.2 Анализ показателей качества нетяговых потребителей электроэнергии

На подстанциях Новосибирского метрополитена системы электроснабжения эскалаторов, освещения и вентиляционных установок питаются от секций 0,4кВ, поэтому их показатели качества рассматриваются совместно.

Для детального анализа $\cos\varphi$ и THD нетяговых потребителей подстанции СТП-4 воспользуемся статистическими методами обработки информации.

Значения $\cos\varphi$ и THD нетяговых потребителей также являются случайной величиной. Результаты расчетов числовых характеристик представлены в таблице 3.3.

Таблица 3.3- Результаты расчётов по формулам 3.1-3.9

	$f(\cos\varphi)$	$f(THD)$
Мат. ожидание	0,56	0,04
Дисперсия	0,008	0,007
Среднее квадратическое отклонение	0,09	0,083
Коэффициент вариации	0,16	2,09
Квадрат среднеквадратического значения СВ	1,025	5,37
Относительное значение дисперсии СВ	0,25	4,37

Усредненное значение $\cos\varphi$ равно 0,56, суточный график изменения данного параметра приведен на рисунке 3.10. В утренний час-пик прослеживается увеличение $\cos\varphi$ вследствие большей загруженности полотна эскалаторов, также небольшое увеличение происходит в 17-19 часов, что соответствует вечернему часу-пик. Также можно наблюдать ступенчатое изменение показателя в 10:30, которое происходит вследствие выключения одного из трех эскалаторов.

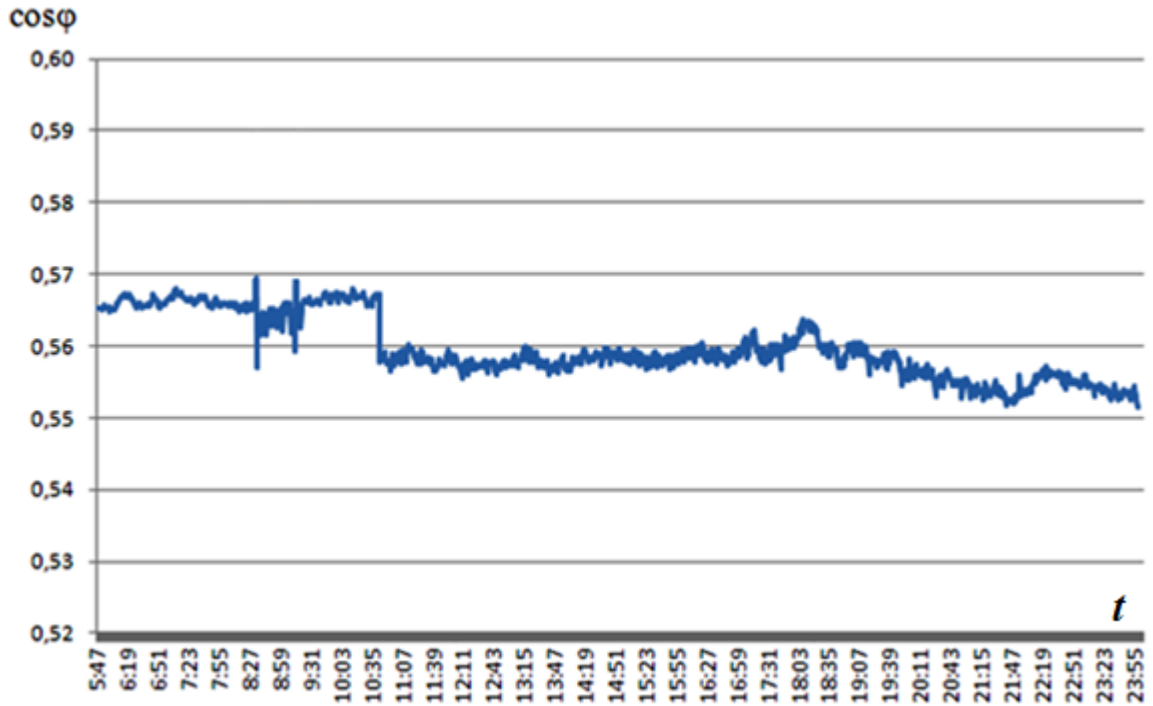


Рисунок 3.10 – График значений $\cos\phi$ секции 0,4кВ подстанции СТП-9

Плотность вероятности и функция распределения значений $\cos\phi$ показаны на рисунках 3.11 и 3.12.

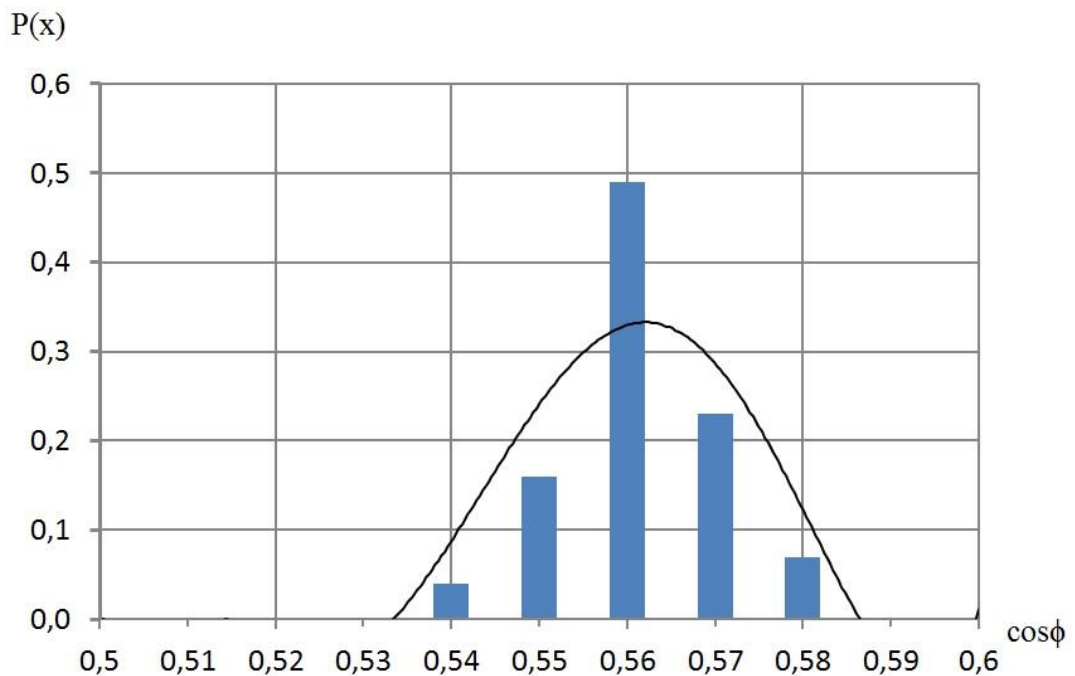


Рисунок 3.11 – Гистограмма плотности вероятности $\cos\phi$ нетяговых потребителей

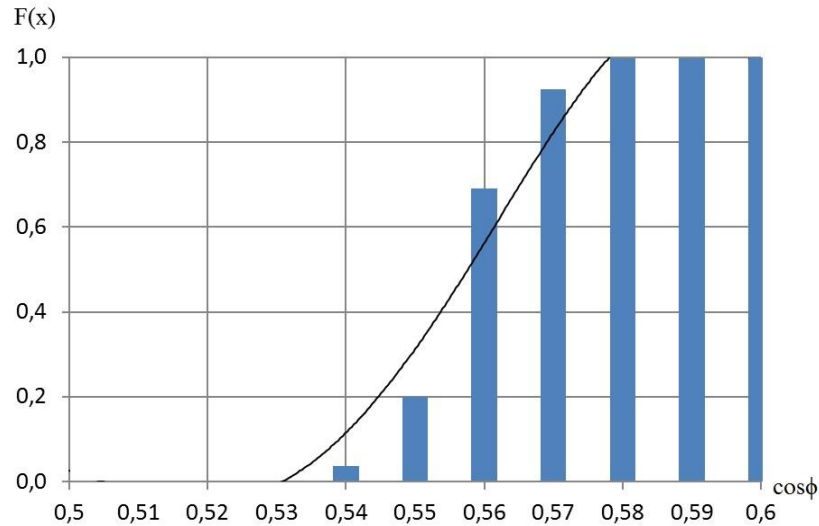


Рисунок 3.12 – Функция распределения $\cos \varphi$ нелинейных потребителей

Гистограмма статистической плотности вероятности имеет форму нормального распределения. Выравнивающая функция данной гистограммы является полиномом пятой степени и имеет вид:

$$y = 0,0004x^5 - 0,0122x^4 + 0,1217x^3 - 0,5116x^2 + 0,8867x - 0,4911$$

Асинхронный привод нелинейных потребителей не вносит в сеть сколько-либо существенных нелинейных гармонических искажений, что можно наблюдать на гистограмме гармонического состава тока вторичной обмотки трансформатора секции 0,4кВ на подстанции СТП-4, показанной на рисунке 3.13.

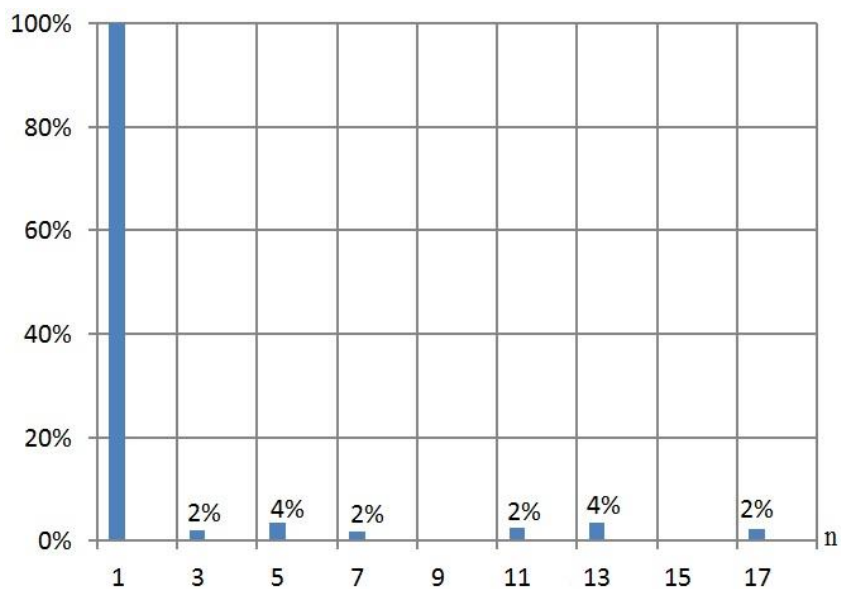


Рисунок 3.13 – Гармонический состав тока секции нелинейных потребителей

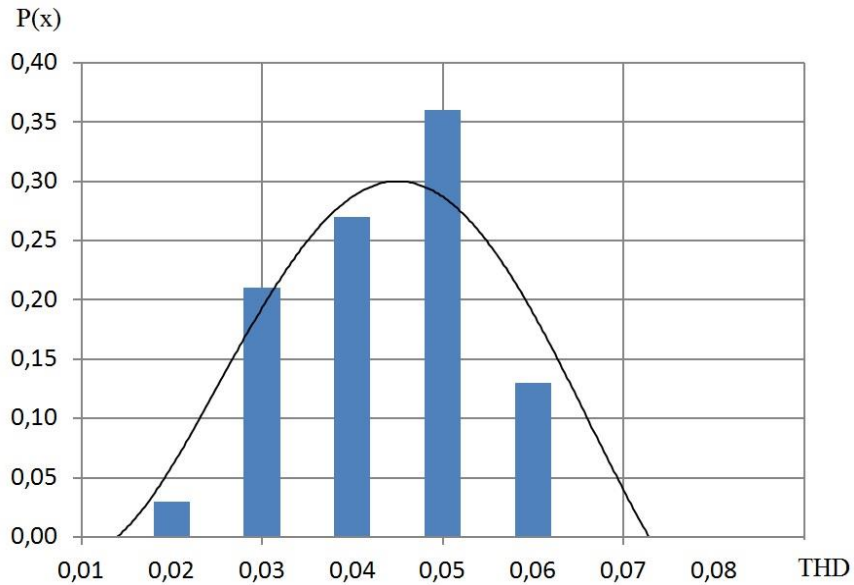


Рисунок 3.14 – Гистограмма плотности вероятности ТНД нетяговых потребителей

Гистограммы плотности вероятности и функции распределения, изображенные на рисунках 3.14 и 3.15, показывают, что гармонические составляющие тока нагрузки у данного потребителя практически отсутствуют, а показатель ТНД за все время наблюдений не превысил значений выше 0,06. Ширина гистограммы плотности вероятности показывает, что гармонический состав тока нагрузки у нетяговых потребителей практически постоянен и не имеет значительных отклонений.

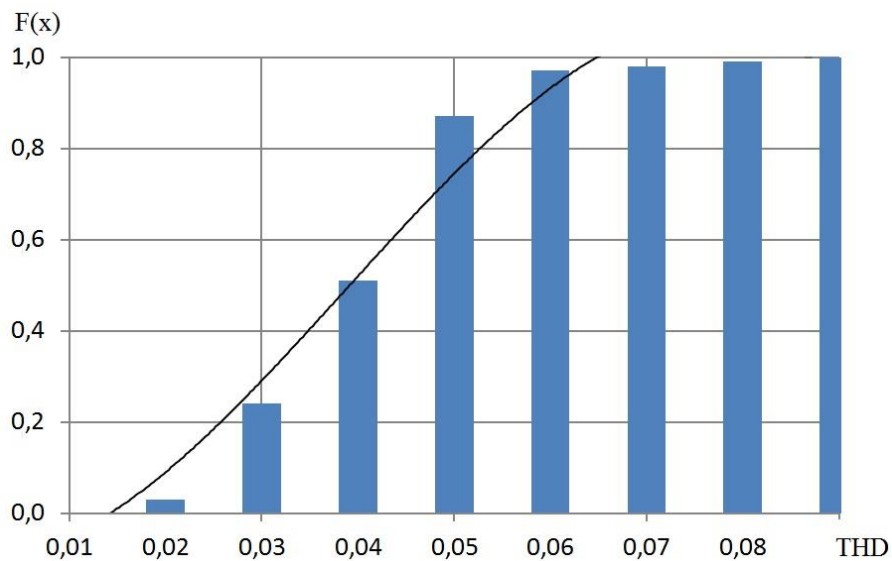


Рисунок 3.15 – Гистограмма функции распределения ТНД нетяговых потребителей

Коэффициент мощности «нетяговых» потребителей, а именно эскалаторов, вентиляции, насосов и др. равен 0,55.

Представленный анализ позволяет выявить следующую закономерность: основным фактором, ухудшающим коэффициент мощности тяговой нагрузки, являются нелинейные высокочастотные искажения, а нетяговых потребителей – фазовый сдвиг тока относительно фазы напряжения. При этом коэффициент мощности подстанции равен 0,86.

Выводы по главе 3

1. Характеристики энергопотребления тяговой подстанции, вследствие влияния множества внешних факторов, следует рассматривать как случайный процесс и при его анализе использовать методы математической статистики.

2. В ходе анализа выявлено, что нелинейные высокочастотные искажения, производимые тяговыми преобразовательными агрегатами, составляют 95% от суммарной мощности искажений тяговой подстанции.

3. Нетяговые нагрузки, такие как: эскалаторы, насосные и вентиляционные установки, вследствие низких показателей $\cos\varphi$ являются основными потребителями реактивной энергии на тяговой подстанции.

4. Проведенный анализ показал, что усредненный коэффициент мощности подстанции СТП-4 Новосибирского метрополитена равен 0,86; характер нагрузки – активно-индуктивный с наличием гармоник кратным $6K\pm 1$, а суммарная мощность гармоник составляет около 40% от мощности основной гармоники.

Глава 4 РАЗРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО УСТРОЙСТВА АКТИВНОЙ КОРРЕКЦИИ КОЭФФИЦИЕНТА МОЩНОСТИ ПОДСТАНЦИИ МЕТРОПОЛИТЕНА

Анализ качества электроэнергии на подстанциях метрополитена показал необходимость не только компенсации реактивной мощности, но и коррекции нелинейных искажений, которые вносятся в сеть силовыми выпрямительными агрегатами. Также в ходе исследования были рассмотрены различные способы, позволяющие повысить качество электроэнергии, наиболее перспективными из которых являются применение активного или гибридного силового фильтра. Помимо основных функций коррекции высокочастотных искажений и компенсации реактивной мощности, неоспоримыми преимуществами данных устройств является выравнивание нагрузки фаз, стабилизация напряжения в сети, уменьшение пиков тока нагрузки и др.

Тенденция к внедрению активных силовых фильтров с целью повышения качества электроэнергии наблюдается в Японии, США, а также в некоторых странах Европы. Активно развивается направление увеличения быстродействия системы управления данного фильтра, а также расширяется её функционал. Стремительное развитие полупроводниковой техники позволяет наращивать мощность и частоту работы АСФ, за счет чего повышается точность регулирования и уменьшается стоимость фильтра.

С целью экспериментального подтверждения, представленных теоретических изысканий, а также исследования режимов работы и апробации новых технических решений в Новосибирском Государственном Техническом Университете на кафедре Электротехнических комплексов совместно с АО «Импульс-проект» была разработана экспериментальная установка активного силового фильтра, рассчитанного на ток коррекции 250А.

4.1 Расчет и выбор элементов активного силового фильтра

АСФ можно представить в виде функциональных узлов, каждый из которых выполняет определенные задачи, а также связей между ними. Данный подход позволяет более детально рассмотреть функционал каждого из элементов устройства. Функциональная схема АСФ представлена на рисунке 4.1.

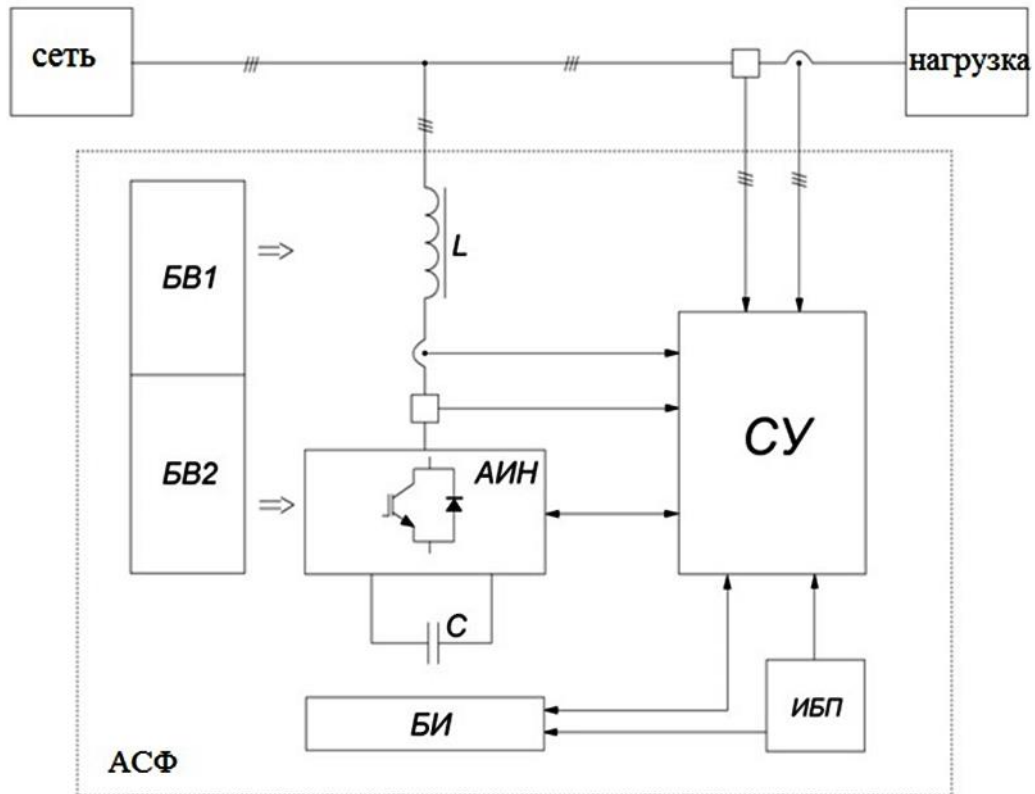


Рисунок 4.1 – Функциональная схема АСФ

где: С – блок конденсаторов; L – трехфазный дроссель; АИН – автономный инвертор напряжения; СУ – система управления АСФ; БВ1, БВ2 – блоки вентиляции; БИ – блок индикации.

На основе информации, полученной с датчиков тока и напряжения, система управления АСФ формирует сигналы задания компенсационного воздействия для АИН, который через сглаживающий дроссель направляет в сеть ток коррекции.

Блок конденсаторов (С) – является одним из основных компонентов в АСФ, так как является накопительным устройством, позволяющим организовать большинство режимов работы. Основываясь на [15, 61], для АСФ выбраны восемь конденсаторов *electronicon E50N25-754N50* со следующими параметрами:

Таблица 4.1 – Параметры *electronicon E50N25-754N50*

Параметр	U, В	C, мкФ	I _{max}	R _s , мОм	R _{th} , К/W
Значение	1100	750±10%	80	0.61	2.3

Ёмкость звена постоянного тока выбирается исходя из [15]:

$$C_{dc} = \frac{P_c}{\omega_s \cdot \Delta u_{dc}^{\max} \cdot U_{dc}}, \quad (4.1)$$

где P_c – мощность на выходе АСФ;

Δu_{dc}^{\max} – величина максимального отклонения текущего напряжения в звене постоянного тока.

Величина стабилизируемого напряжения на конденсаторе, которое регулирует ПИ-регулятор, должно быть не менее [15]:

$$U_{dc} = 2\sqrt{2} \cdot U_s, \quad (4.2)$$

где U_s – среднеквадратичное значение линейного напряжения на входе АСФ.

Трехфазный дроссель (L) – величина индуктивности сглаживающего дросселя рассчитывается из условий сглаживания ШИМ пульсаций и возможности обеспечения высокой динамики тока нагрузки.

Минимальное значение индуктивности определяется по формуле [15]:

$$L = \frac{U_{dc}}{1.2 \cdot \omega_s \cdot i_{ms}}, \quad (4.3)$$

где U_{dc} – желаемое значение напряжения звена постоянного тока;

i_{ms} – амплитудное значение компенсационных токов на выходе АСФ;

ω_s – угловая частота сети.

Расчетные параметры дросселя приведены в таблице 4.2:

Таблица 4.2 – Параметры дросселя

Параметр	L, мкГн	I _n , А	f, Гц	H, А/см	B, Тл
Значение	100	250	10 ³ -10 ⁴	1,6	1,7

Таблица 4.3– Параметры магнитопроводов

Тип магнитопровода	Геометрические размеры, мм			масса, кг	ЭДС, В/вит	f, Гц	H, А/см	B, Тл
	A	B	H					
АФ-270	270	40	230	12,3	0,655	400	1,6	1,7
Ферритовый тороидальный	320	320	250	25,6	0,9	10 ⁴	1,8	2,1

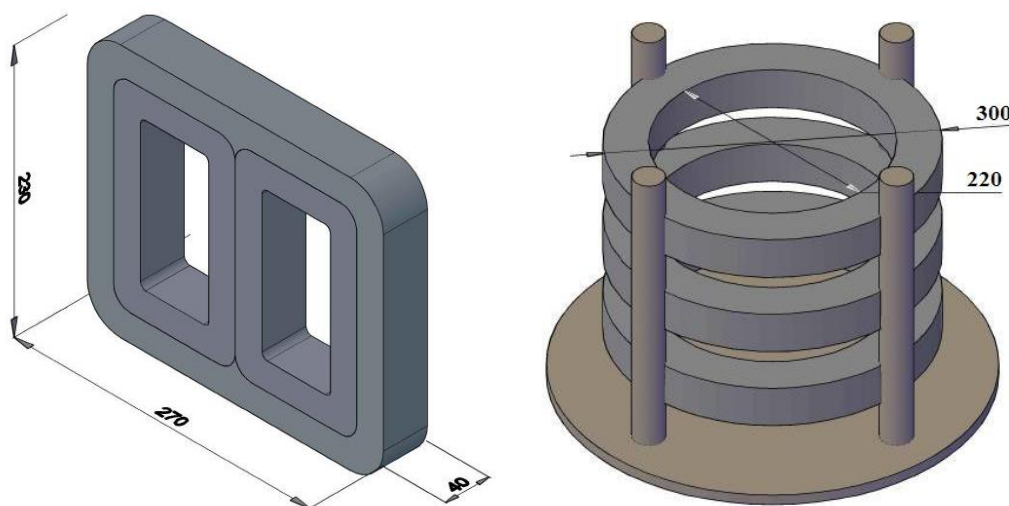


Рисунок 4.2 – 3d-визуализация магнитопроводов дросселей

Во время исследования было спроектировано и испытано два типа выходного дросселя, которые отличались типом магнитопровода. В результате моделирования и испытаний АСФ было выявлено, что в дросселе с магнитопроводом типа АФ-270 при создании активным силовым фильтром нелинейных несимметричных токов в сердечнике образуется подмагничивающий поток, уменьшающий значение индуктивности. Также данный дроссель имеет низкую перемгничивающую способность, вследствие использования сердечника стального типа. По результатам

исследования было принято решение об использовании дросселя с разомкнутой ферритной магнитной системой с индивидуальными фазными индуктивностями. В качестве проводника используется изолированная шина сечением 95 мм².

Измерительная аппаратура и цепи управления – контроль и управление работой питания цепей управления АСФ осуществляется программным обеспечением *IPPONsmartwinner 1000*.

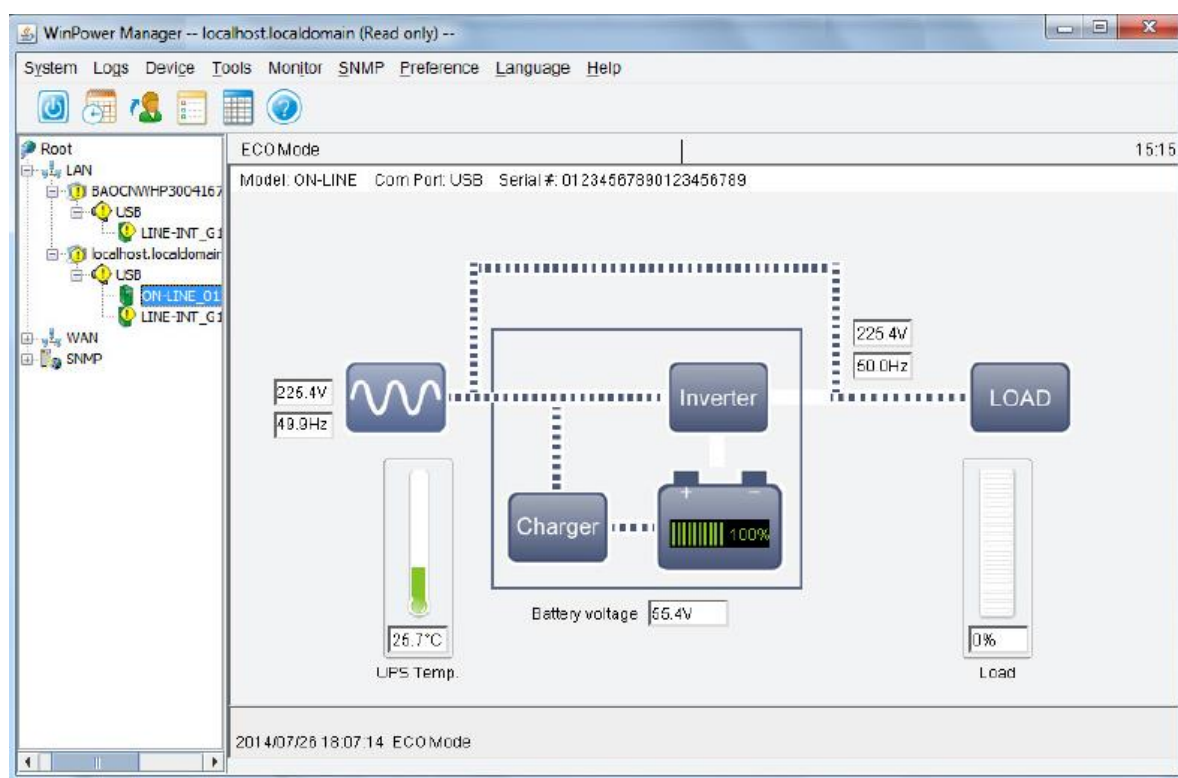


Рисунок 4.3 – Контроль и управление питанием цепей управления

Измерительная аппаратура:

– измерение напряжения в звене постоянного тока.

Напряжение измеряется на батареях конденсаторов. В схеме осуществляется контроль превышения напряжения в звене постоянного тока.

Схема прохождения сигнала напряжения в звене постоянного тока UDC приведена на рисунке 4.4.

Коэффициент усиления неинвертирующего усилителя:

$$K = \frac{R63 + R89}{R63} = 1 + \frac{R89}{R63} = 1 + \frac{10}{20} = 1.5.$$

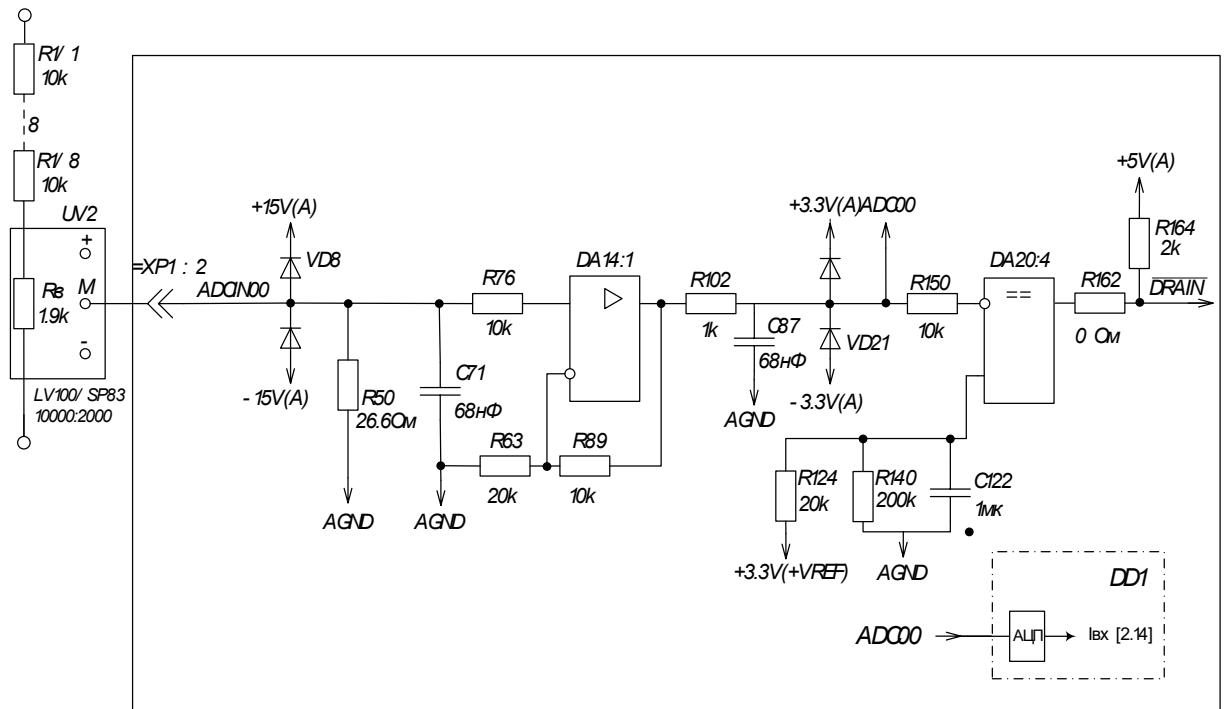


Рисунок 4.4 – Схема измерения напряжения UV2

Сигнал ошибки DRAIN на выходе компаратора формируется при напряжении на его инвертирующем входе равном 3В.

Максимальный ток через нагрузочный резистор датчика напряжения составит:

$$I = \frac{3B}{1.5 \cdot 26.6 \text{ Ом}} = 75 \text{ мА}.$$

Максимальное значение измеряемого напряжения составит:

$$U_{DC \text{ max}} = \frac{75 \text{ мА} \cdot 2000}{10000} \cdot (8 \cdot 10 \text{ кОм} + 1.9 \text{ кОм}) = 1229 \text{ В}.$$

При однократном замере АЦП число единичных преобразований для однополярного сигнала равно 4096. Таким образом, величина однократно измеряемого напряжения равна:

$$\Delta U = \frac{1229}{4096} = 0.3 \text{ В}.$$

– измерение фазных напряжений:

Схема прохождения сигнала напряжения в фазе U_A приведена на рисунке 4.5. Остальные напряжения в фазе U_B и U_C измеряются аналогичным образом.

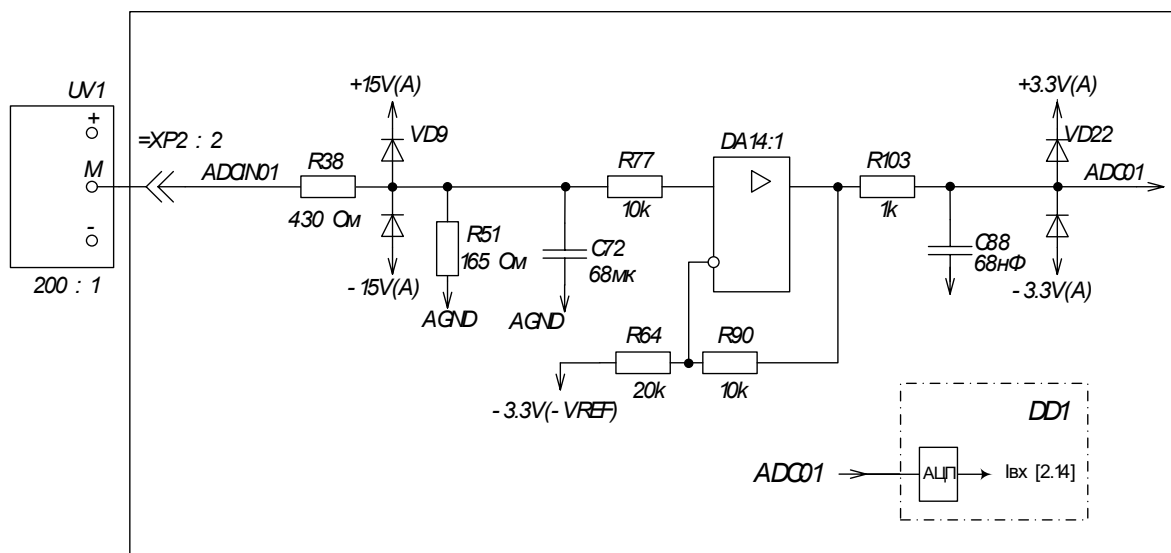


Рисунок 4.5 – Схема измерения напряжения U_A

Коэффициент усиления неинвертирующего усилителя:

$$K = 1 + \frac{R90}{R64} = 1 + \frac{10}{20} = 1.5.$$

Максимальное напряжение на выходе датчика напряжения составит:

$$u = \frac{3B - 1.65B}{1.5} \cdot \frac{430\text{Om} + 165\text{Om}}{165\text{Om}} = 3.3B.$$

Максимальный диапазон измеряемого напряжения составит:

$$u_{A\text{max}} = \pm 3.3B \cdot 200 = \pm 660B.$$

При однократном замере АЦП число единичных преобразований для двухполярного сигнала равно 2048. Таким образом, величина однократно измеряемого напряжения равна:

$$\Delta U = \frac{660}{2048} = 0.322B.$$

– измерение фазных токов в АСФ:

Схема прохождения сигнала тока в фазе I_A приведена на рисунке 4.6. Остальные токи фаз I_B и I_C измеряются аналогичным образом.

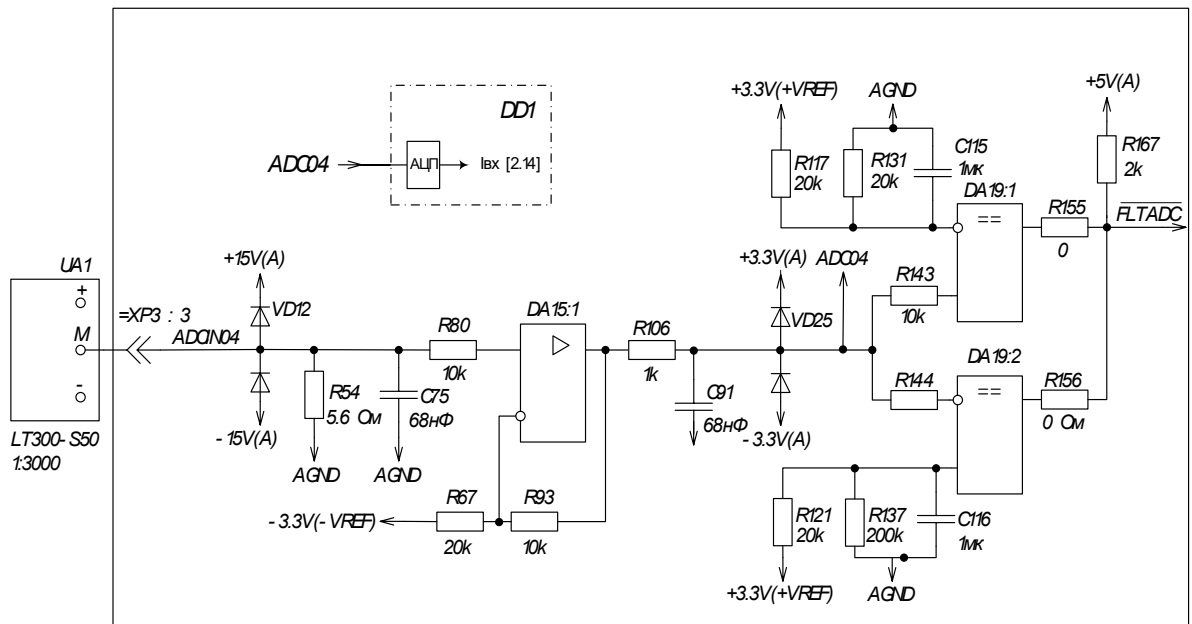


Рисунок 4.6 – Схема измерения тока UA1

Коэффициент усиления неинвертирующего усилителя:

$$K = 1 + \frac{R93}{R67} = 1 + \frac{10}{20} = 1.5.$$

Максимальный ток через нагрузочный резистор датчика тока составит:

$$i = \frac{3B - 1.65B}{1.5} \cdot \frac{1}{5.6\Omega} = 161\text{mA}.$$

Максимальный диапазон измеряемого тока составит:

$$i_{\phi\text{max}} = \pm 161\text{mA} \cdot 3000 = \pm 482\text{A}.$$

При однократном замере АЦП число единичных преобразований для двухполярного сигнала равно 2048. Таким образом, величина однократно измеряемого тока равна:

$$\Delta I = \frac{482}{2048} = 0.235\text{B}.$$

– измерение фазных токов в нагрузке:

Схема прохождения сигнала тока в фазе IUA приведена на рисунке 4.7. Остальные токи фаз IVA, IWA, IUB, IVB, IWB измеряются аналогичным образом.

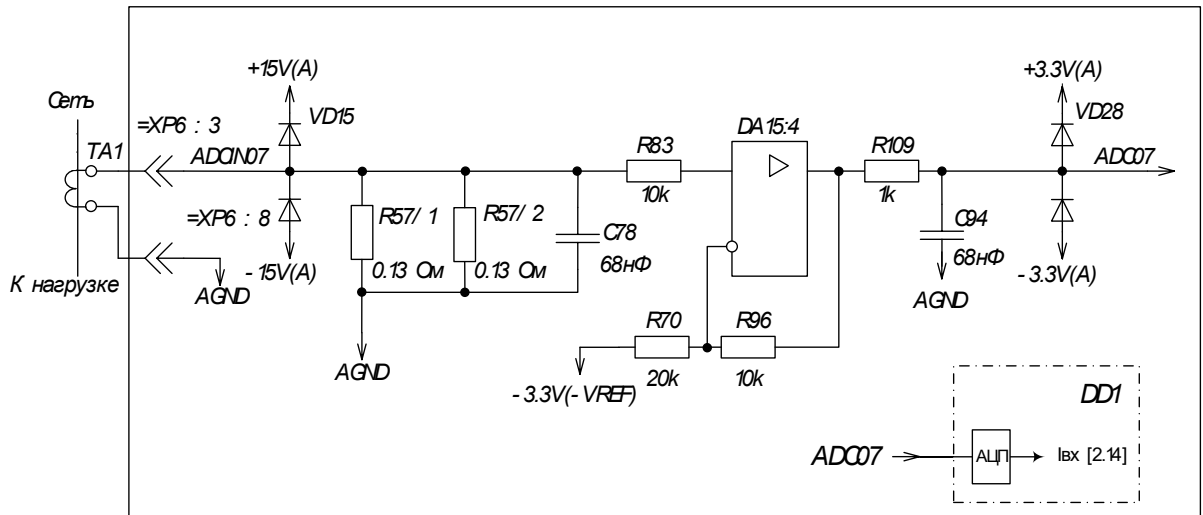


Рисунок 4.7 – Схема измерения тока в нагрузке TA1

Коэффициент усиления неинвертирующего усилителя:

$$K = 1 + \frac{R96}{R70} = 1 + \frac{10}{20} = 1.5.$$

Максимальный ток через нагрузочный резистор датчика составит:

$$i = \frac{3B - 1.65B}{1.5 \cdot 0.065 \text{ Ом}} = 13.8 \text{ A}.$$

Максимальный диапазон измеряемого тока при подключении к нагрузочному шкафу составит:

$$i_{\phi \max} = \pm \frac{300}{5} \cdot 13.8 = \pm 828 \text{ A};$$

$$I_{\phi \max} = \pm \frac{828 \text{ A}}{1.41} = \pm 587 \text{ A}.$$

Максимальный диапазон измеряемого тока при подключении к нагрузке на объекте составит:

$$i_{\phi \max} = \pm \frac{1000}{5} \cdot 13.8 = \pm 2769 \text{ A};$$

$$I_{\phi \max} = \pm \frac{2769 \text{ A}}{1.41} = \pm 1963 \text{ A}.$$

При однократном замере АЦП число единичных преобразований для двухполярного сигнала равно 2048. Таким образом, величина однократно измеряемого тока при подключении к нагрузочному стенду равна:

$$\Delta U = \frac{828}{2048} = 0.404B.$$

Величина однократно измеряемого тока при подключении к нагрузке на объекте:

$$\Delta U = \frac{2769}{2048} = 1.35B.$$

– измерение температуры силовых транзисторов:

В каждый силовой модуль встроен терморезистор, сопротивление которого изменяется в зависимости от температуры по следующему закону:

$$R_{(t)} = R_{100} \exp \left[B_{100/125} \left(1/T - 1/T_{100} \right) \right], [\text{Ом}]$$

где $R_{100} = 493 \text{ Ом}$ – сопротивление терморезистора при температуре транзистора $T_c = 100^\circ\text{C}$; $B_{100/125} = 3550$ – температурный коэффициент; T – температура транзистора, $T_{100} = 100\text{K}$.

Схема измерения представлена на рисунке 4.8. Аналогичным образом измеряется температура транзисторов VT1, VT2 и VT4.

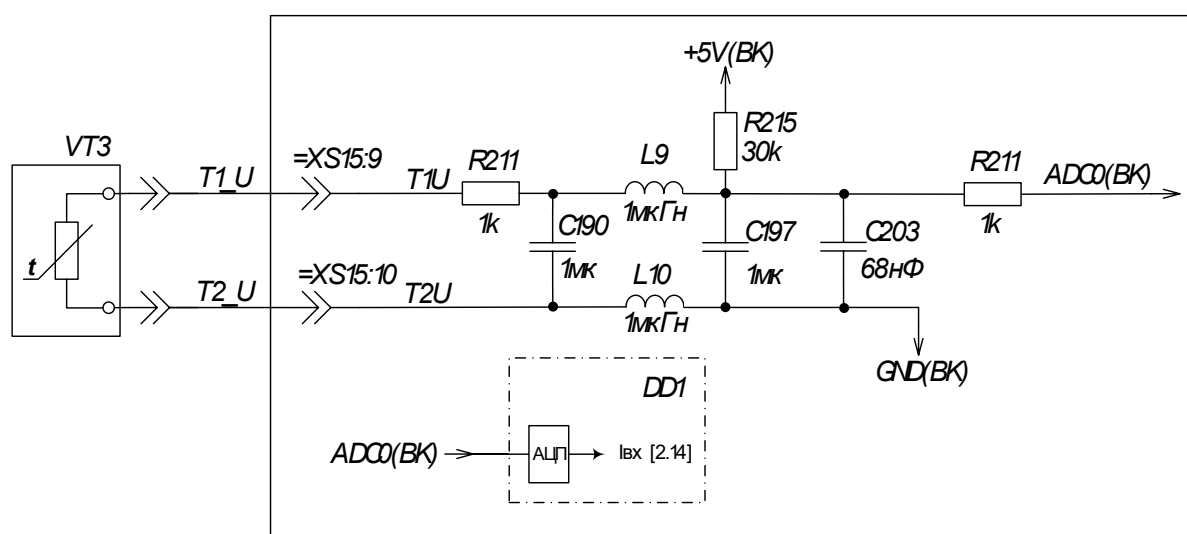


Рисунок 4.8 – Схема измерения температуры транзистора

Общий вид шкафа АСФ с учетом коммутационного, защитного и другого оборудования изображен на рисунке 4.9:

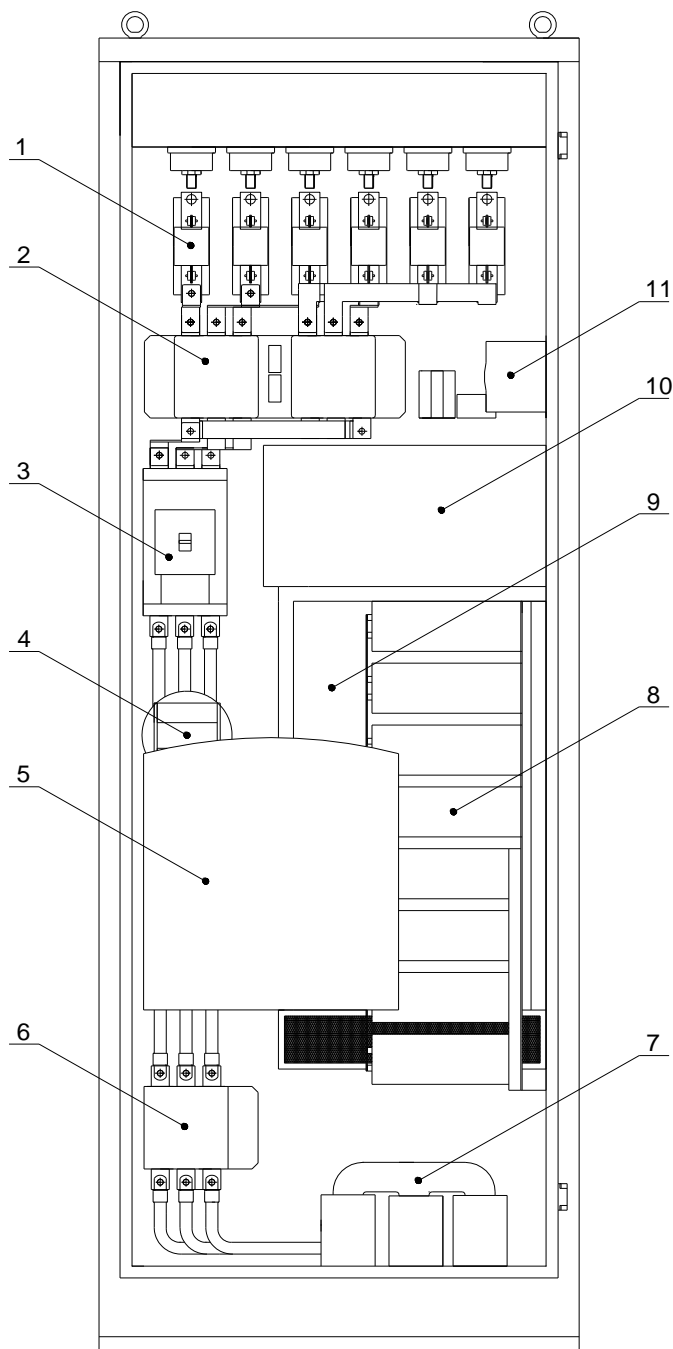


Рисунок 4.9 – АСФ-0,4-250А-2 Вид спереди

где: 1 – Плавкие предохранители ППНИ37-400; 2 – реверсивный контактор NC2-400NS; 3 – автоматический выключатель ВА88-37(электронный); 4 – высокочастотный фильтр; 5 – ИБП IPPON smart winner 1000; 6 – контактор КТИ-6400; 7 – дроссель; 8 – блок конденсаторов electronicon E50N25-754N50; 9 – радиатор; 10 – плата системы управления; 11 – источники питания СУ.

4.2 Стратегия управления активным силовым фильтром

В [25, 58, 62] выделяют несколько основных стратегий управления АСФ, а именно: устранение тока в нулевом проводе, стабилизация напряжения сети, получение синусоидального сбалансированного тока. В каждой из стратегий управления АСФ устанавливаются определенные задачи – это устранение дисбаланса фаз, компенсация гармонических составляющих тока нагрузки, компенсация реактивной мощности и др.

Для электроснабжения питающих линий метрополитена используется трехпроводная система подведения электроэнергии. На основе анализа теорий мгновенных мощностей, представленного в первой главе, можно заключить, что для трехпроводных сетей наиболее удобно использовать систему управления на основе p - q - r теории, так как в данной теории зависимость трех токов от соответствующих мгновенных мощностей имеет линейный характер [40, 109, 118]. При этом ток нагрузки метрополитена имеет большое количество гармонических составляющих в силу использования мощных выпрямительных агрегатов, что позволяет сделать вывод о целесообразности применения стратегии управления, основанной на получении синусоидального сбалансированного тока нагрузки.

На рисунке 4.10 изображена структурная схема системы управления АСФ на основе p - q - r теории мгновенной мощности. Где на первом этапе происходит преобразование исходной системы координат в α - β - 0 систему координат, посредством преобразования вида (1.22), затем осуществляется переход в p - q - r систему координат, используя выражения (1.43). Расчет мощностей мгновенной активной мощности p и мгновенных реактивных q_r , q_q осуществляется по (1.44) и (1.45). Далее осуществляется выбор мощностей, подлежащих компенсации с учетом стабилизации звена постоянного тока, где U_{ref} – заданное значение напряжения, которое требуется для работы АСФ.

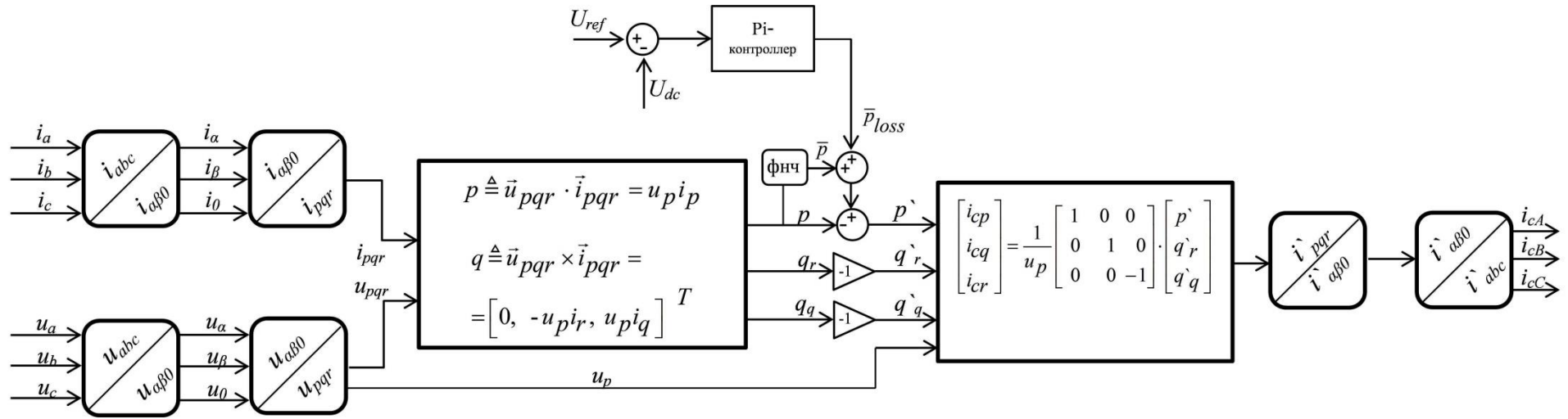


Рисунок 4.10 – Структурная схема системы управления АСФ

U_{dc} – текущее значение напряжения в звене постоянного тока.

Следовательно, мощности подлежащие компенсации имеют вид: $p^{\wedge} = -\tilde{p} + \bar{p}_{loss}$, $q^{\wedge}_r = -q_r$, $q^{\wedge}_q = -q_q$, где знак минуса показывает то, что токи компенсации должны подаваться в сеть в противофазе. Затем выполняется расчет токов компенсации в соответствии с (1.47) и обратные преобразования для перехода в $a-b-c$ систему координат.

В представленной системе управления компенсируются токи высших гармоник и реактивная составляющая тока нагрузки, что обеспечивает синусоидальную форму тока сети.

4.3 Математическое имитационное моделирование активного силового фильтра

4.3.1 Математическое имитационное моделирование активного силового фильтра в Matlab Simulink

При проектировании сложных технических систем (СТС), таких как АСФ, применяются средства математического имитационного моделирования (ИМ), в задачи которого входит: прогнозирование поведения системы в реальных условиях работы, определение динамических характеристик системы, отработка различных вариантов управления, оценка изменения показателей качества электроэнергии, а также других характеристик систем при внедрении АСФ [60].

Представленная на рисунке 4.11 ИМ состоит из трех взаимосвязанных систем: модель тяговой подстанции, модель нагрузки, модель АСФ. При этом используется два различных варианта нагрузки:

- *активно-индуктивная*, моделирующая фазовый сдвиг тока, относительно напряжения, позволяющая оценить работу АСФ в системе с низким значением $\cos\varphi$;

- *комбинированная*, которая состоит из выпрямительного агрегата с нагрузкой в звене постоянного тока, моделирующей подвижной состав на

линии, и асинхронных двигателей, которые имитируют работу «нетяговых» потребителей.

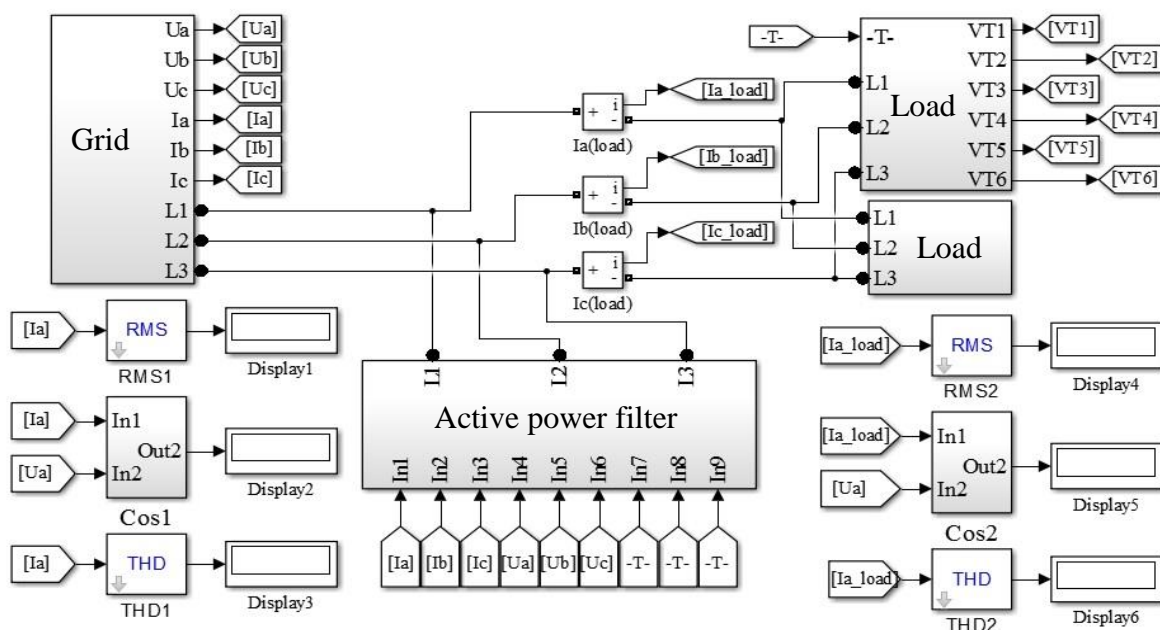


Рисунок 4.11 – Общий вид модели подключения АСФ к сети в *Matlab Simulink*

Модель тяговой подстанции включает в себя блок понижающего трансформатора, с характеристиками, применяемого в метрополитене ТСЗП-1600/10, а также учитывает активно-индуктивное сопротивление шин и кабелей, здесь же располагаются измерительные приборы высокой точности для обеспечения работы АСФ.

Модель АСФ построена по типу параллельного АСФ, имеющего стандартную структуру [41, 82, 118], включающую: звено постоянного тока с обеспечением стабилизации уровня напряжения и наличием балластного резистора, АИН на основе IGBT транзисторов, выходного дросселя с заданной индуктивностью L . Система управления АСФ основана на $p-q-r$ теории мгновенной мощности. В качестве стратегии управления выбрана стабилизация тока сети, а именно приведение характеристики тока к синусоидальной форме с полной компенсацией реактивной мощности. Модель АСФ изображена на рисунке 4.12.

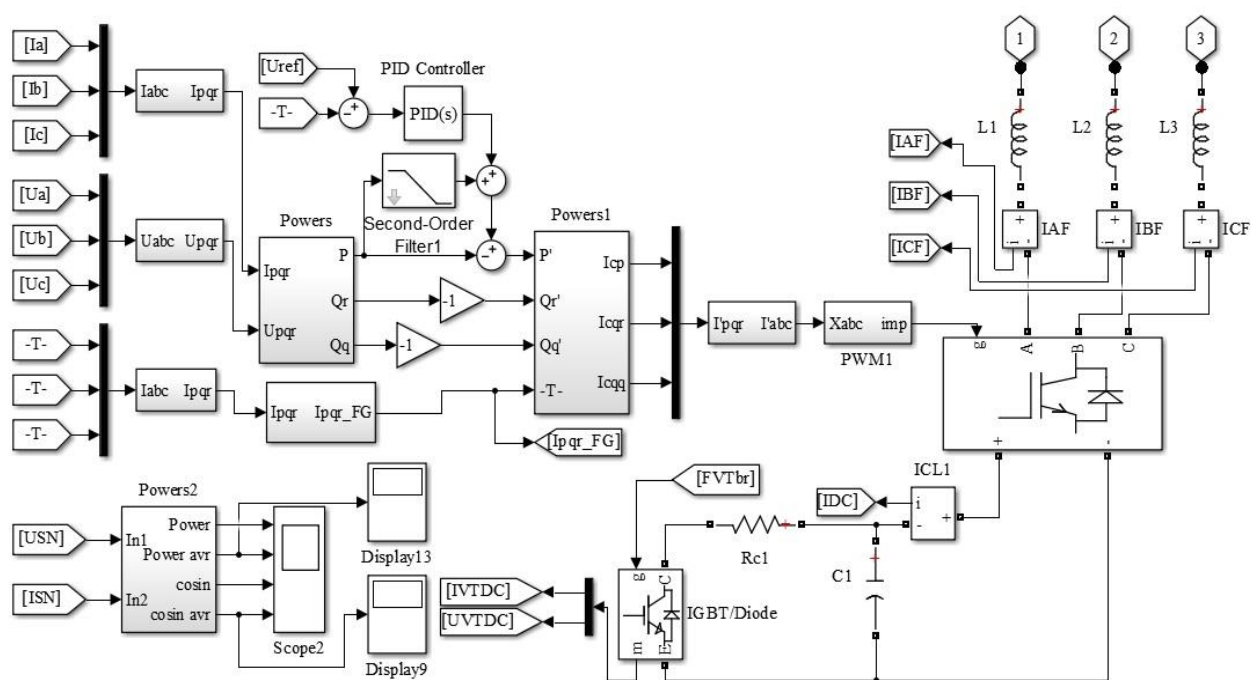


Рисунок 4.12 – Блок АСФ в *Matlab Simulink*

С целью упрощения расчетов и уменьшения времени моделирования в данной ИМ:

- не учитывается влияние сторонних потребителей, поэтому напряжение сети принимается синусоидальным и сбалансированным;
- не учитываются потери в самом АСФ, так как по оценке, данной в [32] они составляют 1-2% от полной мощности устройства;
- принимается, что на линии находится один ПС в режиме тяги, а также постоянно работают вентиляторы и эскалаторы.

В первом случае, в качестве потребителя выступает активно-индуктивная нагрузка со значением $\cos\varphi = 0.4$. Основной задачей эксперимента является проверка работоспособности модели АСФ, а также оценка показателей качества электроэнергии после компенсации реактивной мощности. Исходные значения напряжения и тока фазы «А» сети представлены на рисунке 4.13а, где фаза тока опережает фазу напряжения.

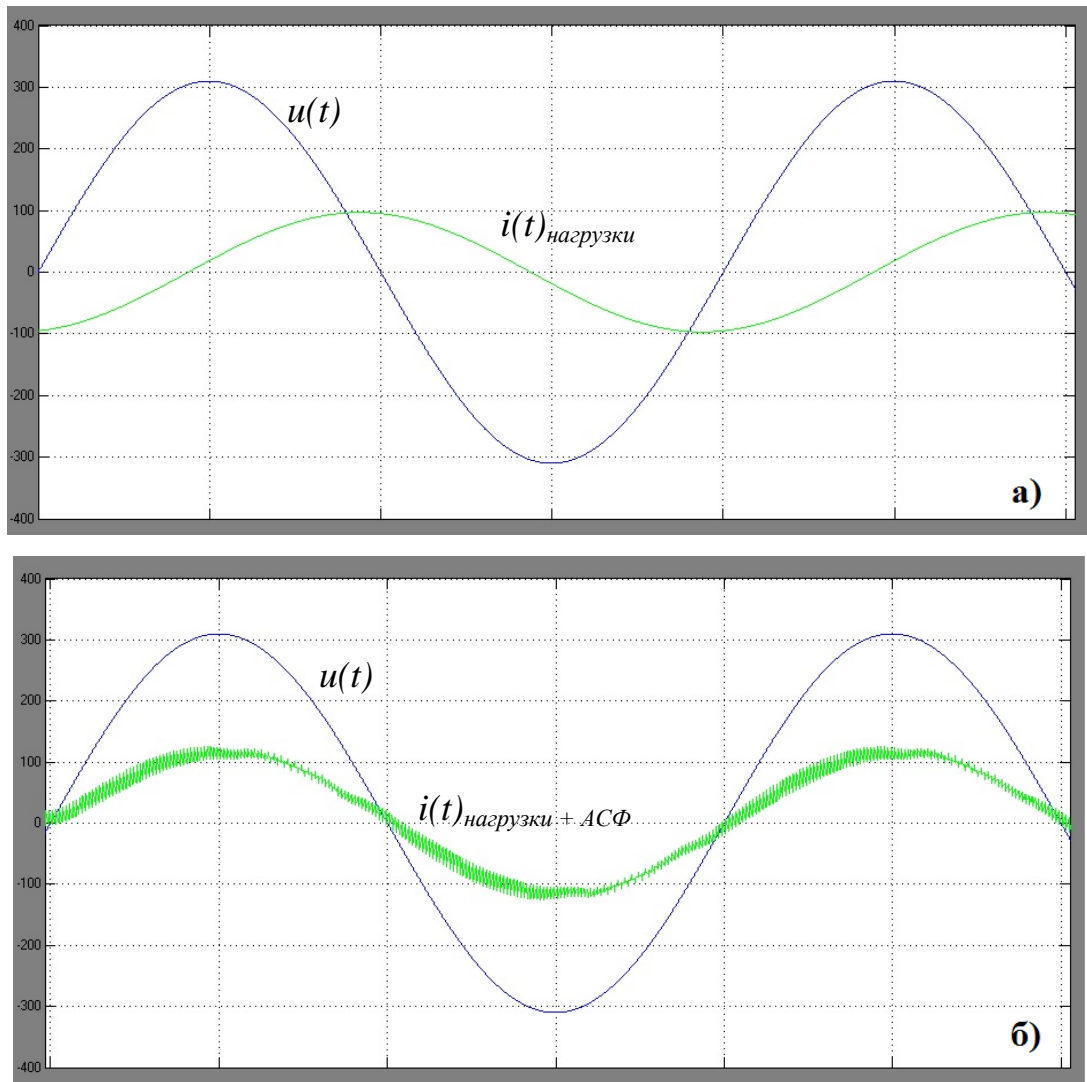


Рисунок 4.13 – Результаты моделирования АСФ в *Matlab Simulink*

На рисунке 4.13б представлен результирующий ток сети при работающем АСФ с показателем $\cos\varphi = 0.987$ при $\text{THD} = 0.02$. Данные показатели и графики позволяют сделать вывод о выполнении задачи компенсации реактивной мощности с заданным качеством.

Во втором эксперименте, нагрузка имеет не только резко нелинейный характер, но и фазовое смещение тока относительно напряжения. Графики тока и напряжения фазы «А» приведены на рисунке 4.14.

Показатели качества электроэнергии: $\cos\varphi = 0.906$ при коэффициенте гармонических искажений $\text{THD} = 0.47$ (что соответствует показателям метрополитена, где $\cos\varphi = 0.91$, а $\text{THD} = 0.43$).

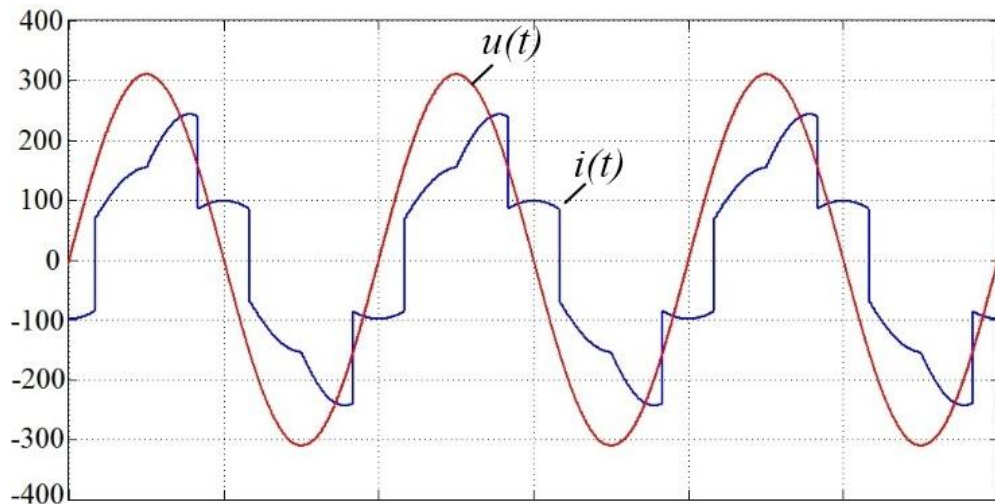


Рисунок 4.14 – График нагрузки в *Matlab Simulink*

Результаты моделирования изображены на рисунке 4.15 и показывают полную компенсацию гармонических искажений, помимо небольших пульсаций на частоте работы ШИМ, а также практически полностью скомпенсированную реактивную составляющую тока нагрузки.

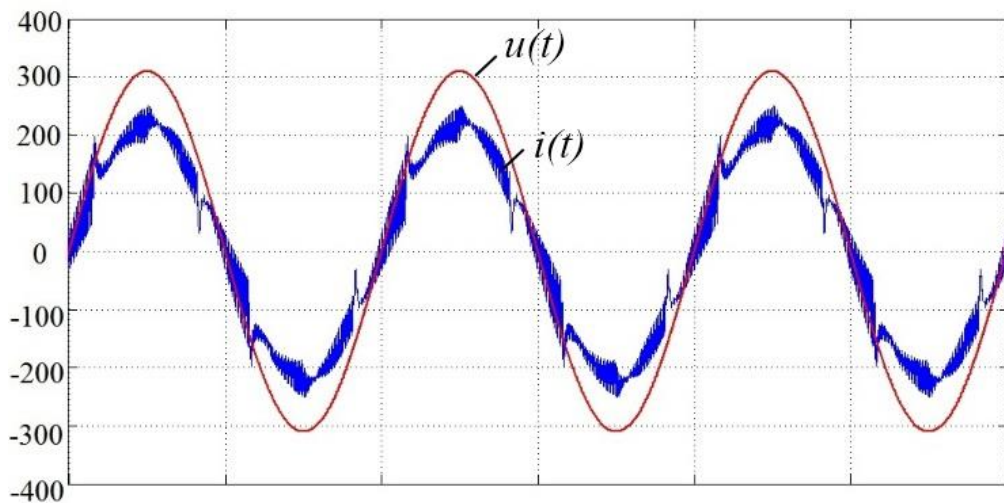


Рисунок 4.15 – Результаты моделирования АСФ в *Matlab Simulink*

Возникшие пульсации можно минимизировать увеличением индуктивности выходного дросселя, но в этом случае большое значение индуктивности ведет к запаздыванию системы при компенсации нелинейных искажений, что увеличивает коэффициент гармоник.

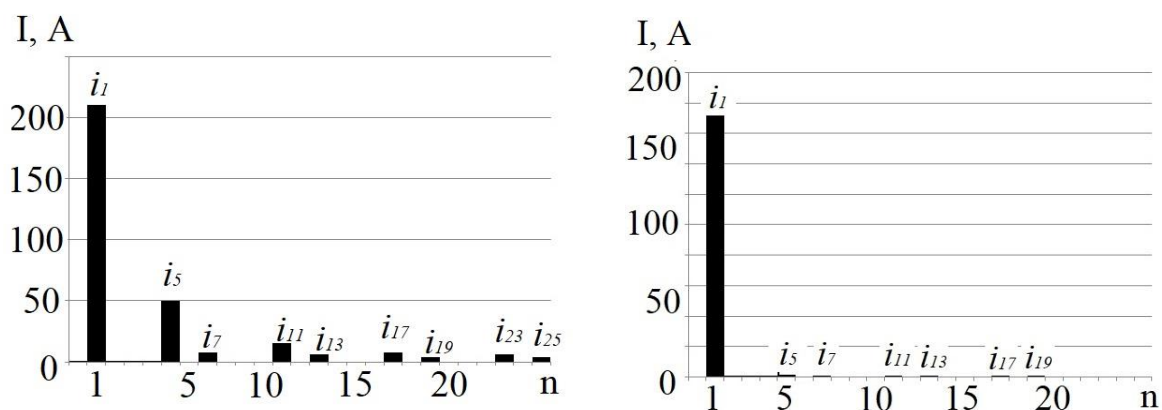


Рисунок 4.16 – Гармонический состав тока сети до и после компенсации

Гармонический состав тока сети до и после коррекции показан на рисунке 4.16. Результаты наглядно демонстрируют уменьшение мощности высших гармоник, а также уменьшение тока первой гармоники на 22%.

4.3.2 Исследование отвода теплоты от силовых транзисторов в *COMSOL Metaphysics*

Одной из существенных проблем при эксплуатации АСФ является перегрев рабочего кристалла полупроводниковых приборов при коммутации токов свыше 200А на высоких частотах. Обеспечение рабочего теплового режима работы транзисторов является одной из наиболее важных задач при проектировании подобных электроустановок. Для решения этой задачи необходимо выбрать тип и способ отвода теплоты с целью обеспечения стабильной работы трех силовых *IGBT* модулей. Расчеты показали, что транзисторы выделяют 400-500 Вт теплоты, а максимально возможный типоразмер радиатора 1000x600x80 мм. Для решения данной задачи использовались средства математического имитационного моделирования в *COMSOL Metaphysics 5.2*.

Радиаторы, применяемые для подобных целей, могут быть разделены на три основных типа: пластинчатый, ребристый, штыревой, которые отличаются по строению, способности к охлаждению и стоимости.

По способу отводу теплоты радиаторы можно разделить на два типа: с принудительным отводом теплоты, без принудительного отвода теплоты. В случае применения силовых модулей, выделяющих более 100Вт теплоты, рекомендуется принудительно охлаждать радиатор. Производительность расчетных вентиляторов составляет 1000 л/час, что соответствует скорости потока воздуха 5 м/с.

Геометрия объекта состоит из радиатора охлаждения, модулей IGBT к которым подходят силовые шины, а также воздуховода, который служит для отвода потока воздуха. Геометрия силовых модулей и радиаторов в модели импортируется из *AutoCad*. В качестве источника теплоты используется объект COMSOL внутри модуля IGBT, который выделяет теплоту, в соответствии с данными о транзисторе.

1. Ребристый радиатор с треугольным исполнением ребер.

Данный тип радиатора имеет пластинчатое основание и треугольные ребра, которые увеличивают площадь соприкосновения воздуха и алюминия.

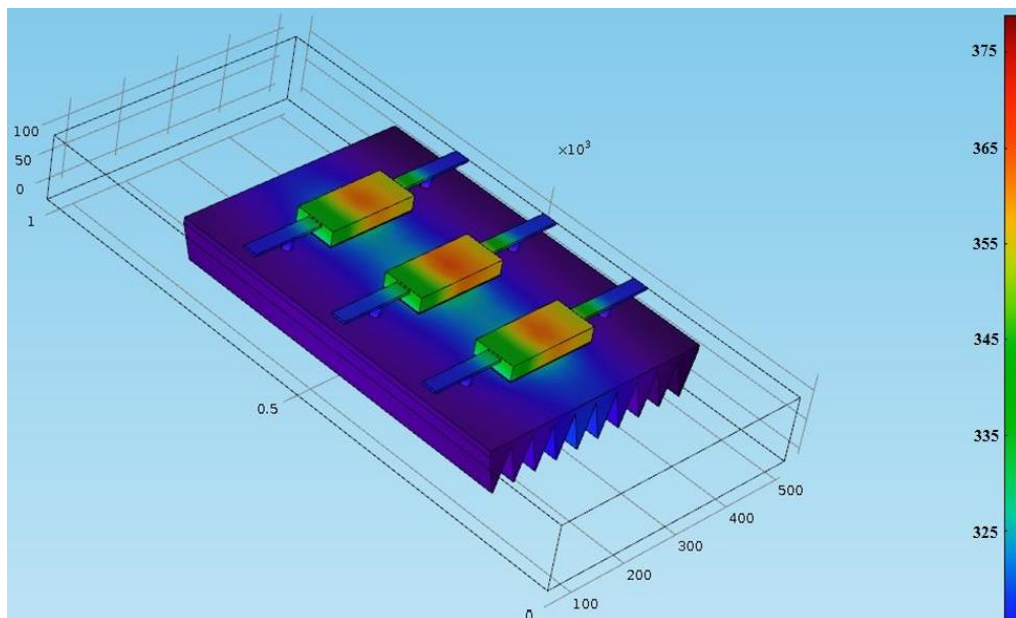


Рисунок 4.17 – Моделирование нагрева ребристого радиатора с треугольным исполнением ребер

При проведении математического моделирования в *COMSOL Multiphasic 5.2*, радиатор был помещен в воздуховод размерами 1000x500x100, продув которого осуществляется со скоростью движения

воздуха 5 м/с. Моделирование нагрева данного радиатора представлено на рисунке 4.17. По результатам моделирования видно, что максимальная температура кристалла достигла 375К, что превышает допустимую.

2. Радиатор с прямоугольным исполнением ребер.

Прямоугольное исполнение ребер радиатора обеспечивает большую площадь поверхности охлаждения. Моделирование данного типа радиатора представлено на рисунке 4.18.

В ходе эксперимента максимальная температура достигла 345К. Нагрев транзисторов неравномерен.

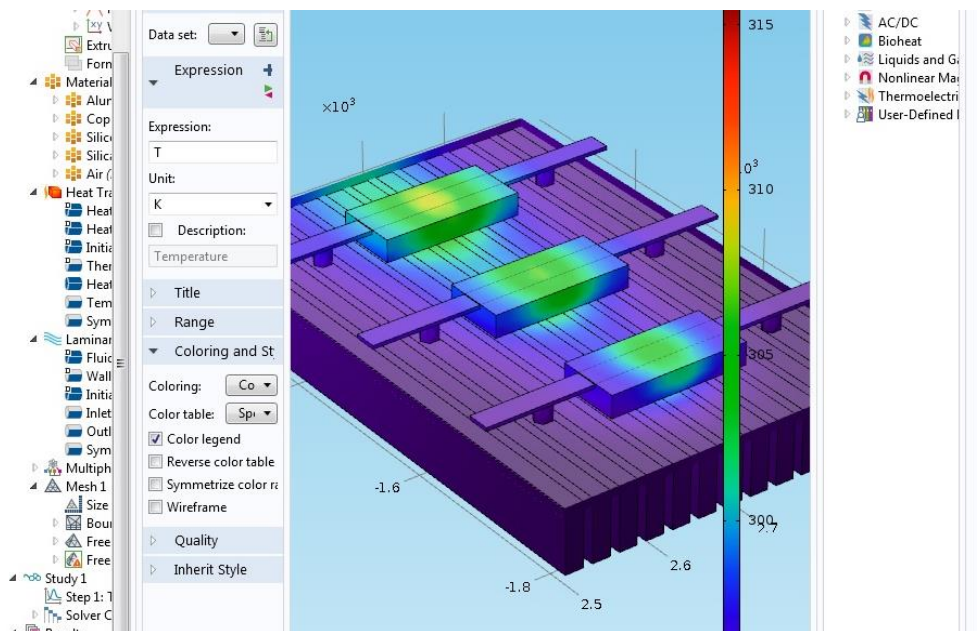


Рисунок 4.18 – Моделирование нагрева ребристого радиатора с прямоугольным исполнением ребер

3. Радиатор со штыревым исполнением ребер

Радиатор со штыревым исполнением ребер более сложен в изготовлении и имеет большую стоимость. Результаты эксперимента показывают незначительное улучшение по сравнению с радиатором, имеющим прямоугольные ребра (рисунок 4.19).

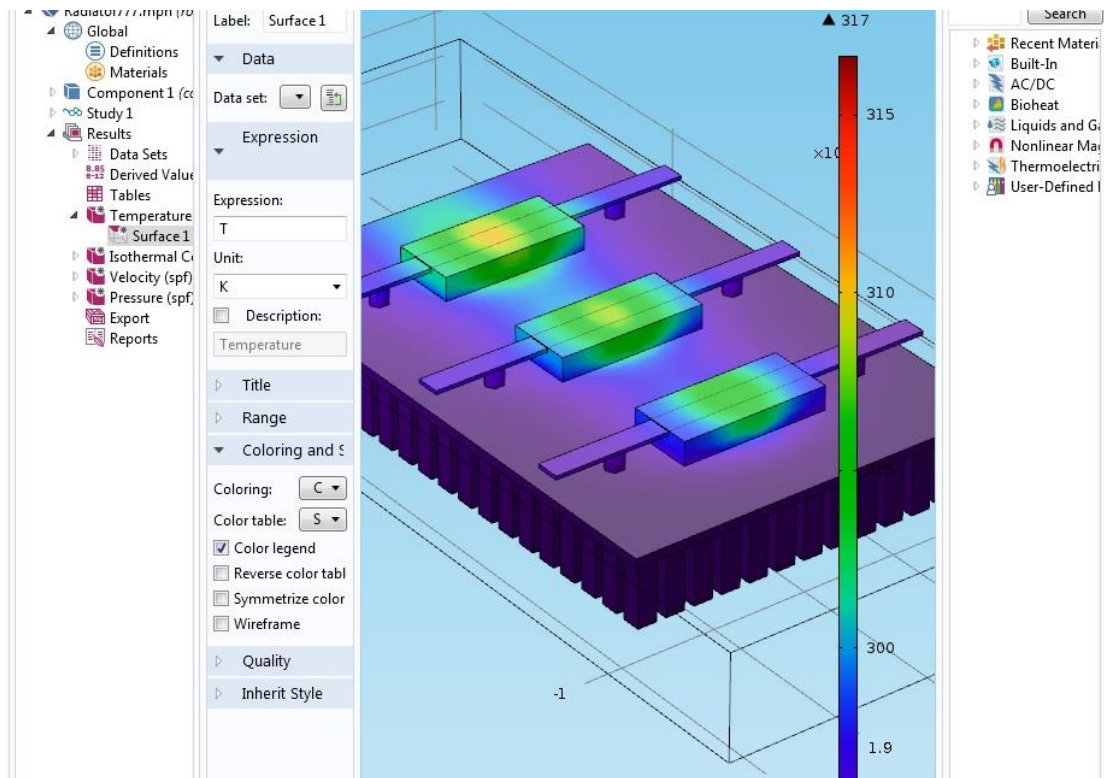


Рисунок 4.19 – Моделирование нагрева ребристого радиатора со штыревым исполнением ребер

Максимальная температура во время моделирования достигла 338К, на рисунке отчетливо видно, что транзисторы прогреты неравномерно вследствие обдува с одной стороны.

При моделировании перпендикулярного продува тела радиатора с отводом теплоты в обе стороны воздуховода получен более равномерный прогрев силовых элементов. В данном случае результаты штыревого исполнения радиатора сопоставимы с результатами радиатора, имеющего прямоугольные ребра. При выборе типа радиатора, при прочих равных условиях рационально отдать предпочтение более дешевому радиатору с прямоугольными продольными ребрами, а также осуществлять перпендикулярный продув тела радиатора.

Результаты продува представлены на рисунке 4.20:

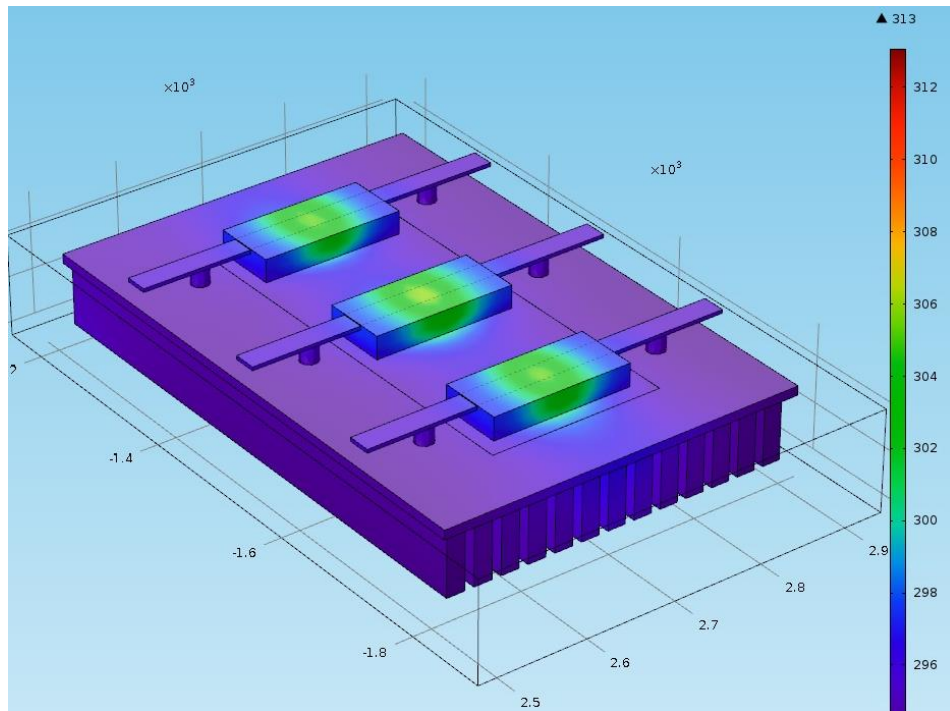


Рисунок 4.20 – Моделирование нагрева ребристого радиатора с прямоугольным исполнением ребер и перпендикулярным продувом

На рисунке представлено моделирование охлаждения транзисторов, выделяющих 1500Вт суммарной мощности посредством радиатора с прямоугольными ребрами и перпендикулярным охлаждением. Максимальная температура полупроводников достигла 312К, на рисунке видно, что транзисторы прогреты равномерно вследствие перпендикулярного, равномерного обдува. По результатам имитационного моделирования можно сделать вывод, что данный вид радиатора, а также тип охлаждения наиболее эффективен.

4.4 Проектирование, моделирование и испытание нагрузочной установки, имитирующей нагрузку метрополитена

Для проведения исследований, настройки, отладки и испытаний АСФ возникает потребность в установке, имитирующей характер нагрузки метрополитена. Такая установка должна обеспечивать различные режимы

нагрузки, для реализации всех возможностей АСФ по компенсации. Основные требования к нагрузочному стенду:

- реализация нагрузки на звено постоянного тока, с шестипульсным типом выпрямительного устройства, содержащим активно-индуктивную нагрузку с С-фильтром мощностью до 50кВт;

- обеспечение гармонического состава тока установки, соответствующего гармоническому составу току метрополитена;

- реализация нагрузки на звено постоянного тока с высокочастотными помехами (более 20-й гармоники);

- реализация реактивной нагрузки мощностью до 250кВАр.

Исходя из предъявленных требований, была разработана принципиальная электрическая схема нагрузочного шкафа (см. Приложение Б):

Звено постоянного тока реализовано посредством диодного моста *CRYDOMM50-100TB1600* на нагрузку R с подключаемой емкостью C13-C15, для которой реализована схема предзаряда с помощью реле времени и токоограничительных резисторов R4-R6.

Высокочастотная составляющая нагрузки добавляется подключением конденсаторов C16-C18 ёмкостью 4,7мкФ.

Реализация реактивной нагрузки большой мощности происходит за счет явления резонанса в LRC контуре, реализованном на элементах L1, C1-C12. Также конденсаторы C1-C12 разделены на четную и нечетную группы и могут включаться в сеть независимо друг от друга. Изменение подключаемой ёмкости позволяет изменять частоту резонанса, и соответственно изменять вносимые в сеть гармоники. При работе одного из блоков конденсаторов основной является 7-ая гармоника, при работе двух блоков конденсаторов в сеть вносятся искажения по 5-ой гармонике.

Ток в нагрузочном стенде при полной мощности в 250 кВА равен:

$$I = \frac{S}{3U} = \frac{250 \cdot 10^3}{3 \cdot 220} = 378 \text{ A}.$$

Пульсации в дросселе принимаются на уровне 5%:

$$5\% \cdot 220 = 11V. \quad (4.26)$$

Тогда индуктивность равна:

$$L = \frac{11}{2\pi 50} = 100 \cdot 10^{-6} \text{ Гн.} \quad (4.27)$$

Емкость конденсаторов для резонанса на пятой гармонике:

$$C_5 = \frac{1}{L \cdot \omega_5} = \frac{1}{100 \cdot 10^{-6} \cdot (2\pi 50 \cdot 5)^2} = 4065 \cdot 10^{-6} \Phi. \quad (4.28)$$

Учитывая схему соединения конденсаторов:

$$C_{\Delta} = \frac{C_Y}{3} = \frac{4065 \cdot 10^{-6}}{3} = 1355 \cdot 10^{-6} \Phi. \quad (4.29)$$

Емкость конденсаторов для резонанса на седьмой гармонике:

$$C_7 = \frac{1}{L \cdot \omega_7} = \frac{1}{100 \cdot 10^{-6} \cdot (2\pi 50 \cdot 7)^2} = 2069 \cdot 10^{-6} \Phi. \quad (4.30)$$

Учитывая схему соединения конденсаторов:

$$C_{\Delta} = \frac{C_Y}{3} = \frac{2069 \cdot 10^{-6}}{3} = 689 \cdot 10^{-6} \Phi. \quad (4.31)$$

Сопротивление контура рассчитывается по формуле:

$$\tau_5 = \frac{L}{R} = \frac{2\pi}{3\omega_5} \Rightarrow R = \frac{3 \cdot 50 \cdot 5 \cdot 100 \cdot 10^{-6}}{2\pi} = 0.011 \text{ Ом.} \quad (4.32)$$

С целью расчета масса-габаритных показателей, а также упрощения монтажа установки была создана 3d-модель шкафа, которая изображена на рисунке 4.21:

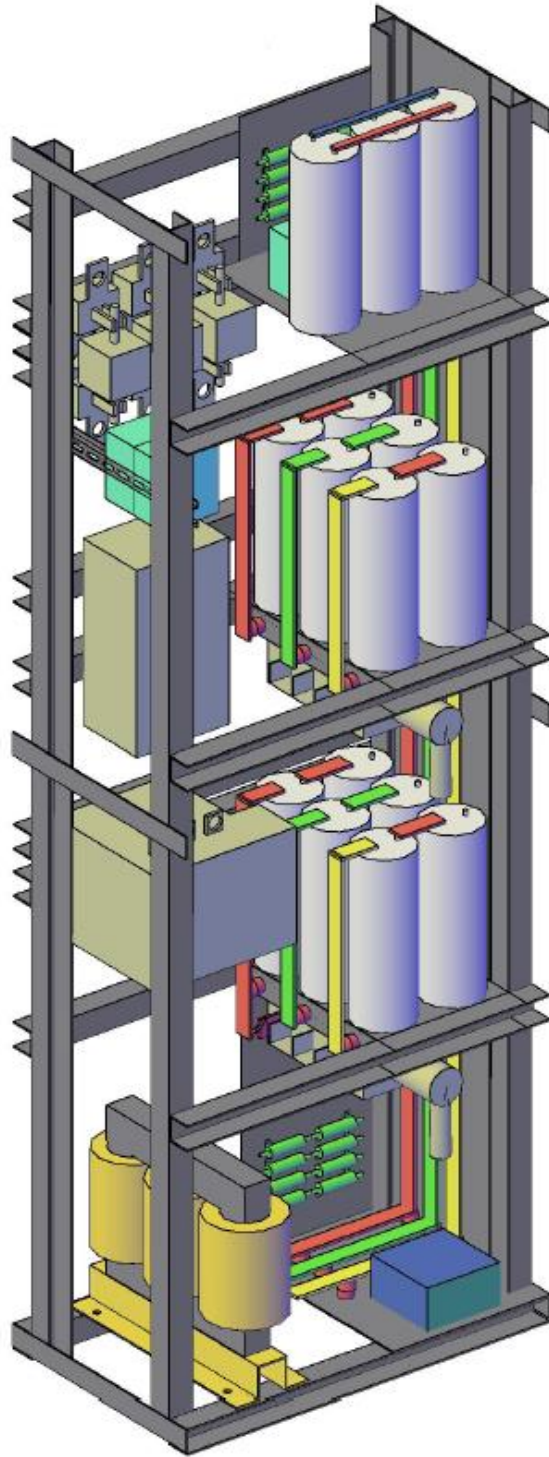


Рисунок 4.21 – 3d-модель нагрузочного шкафа

Также для проверки расчетных значений была реализована имитационная математическая модель нагрузочного стенда в среде *Matlab Simulink*, которая показала следующие результаты, представленные на рисунке 4.22:

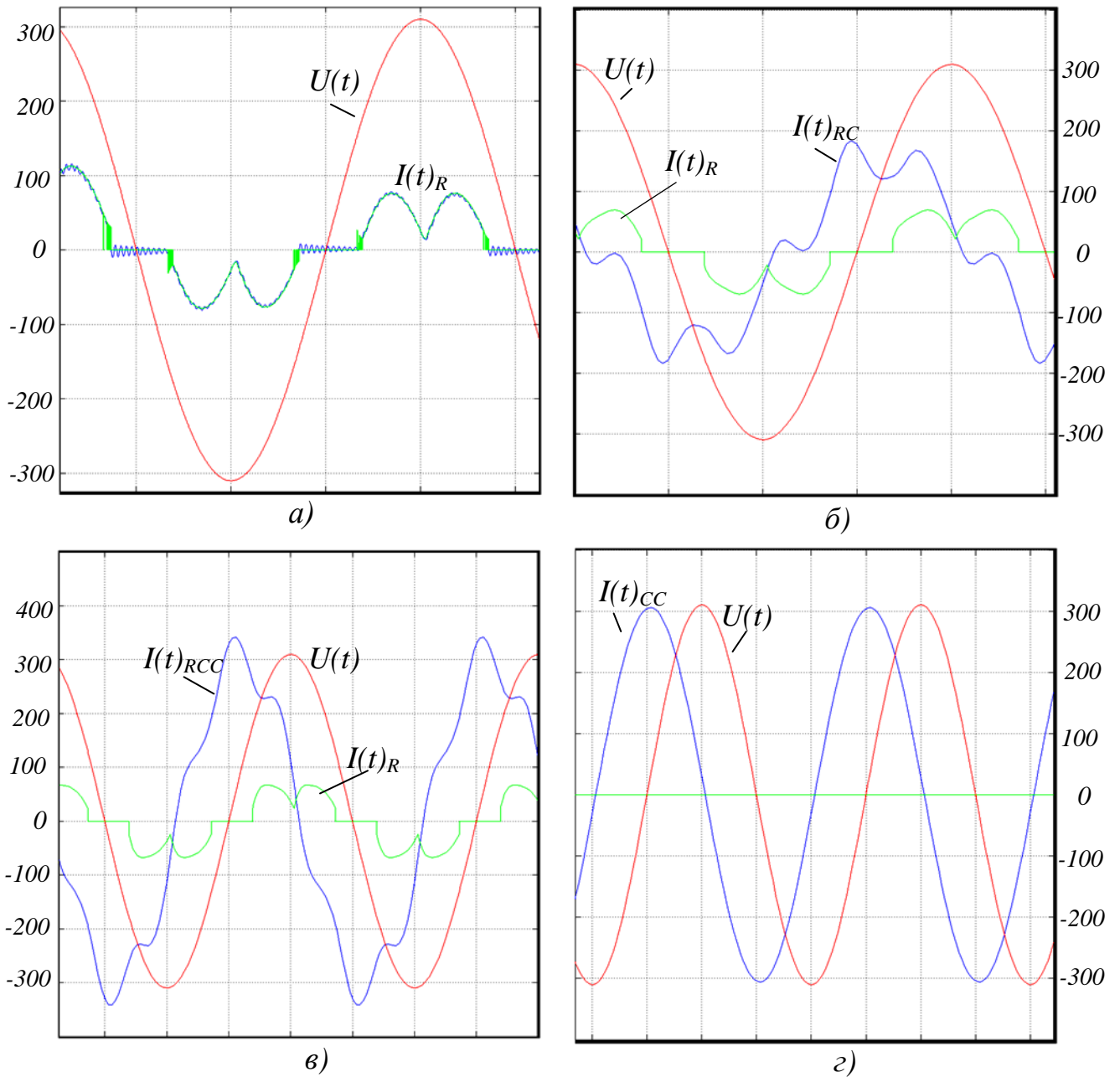


Рисунок 4.22 – Результаты моделирования работы нагрузочного стенда в *Matlab Simulink* для режимов

- а) R – звено постоянного тока и конденсаторы C15-C18; б) RC1 – звено постоянного тока и один блок конденсаторов; в) RC1C2 – звено постоянного тока и два блока конденсаторов; г) C1C2 – включены только два блока конденсаторов.

Универсальная имитационная физическая модель нагрузочных систем изображена на рисунке 4.23:



Рисунок 4.23 – Нагрузочный стенд, имитирующий режимы работы метрополитена

Испытания нагрузочного стенда проводились для всех режимов работы стенда. В таблице 4.4 представлены режимы работы нагрузочного стенда:

Таблица 4.4 – Режимы работы нагрузочного стенда

Режим работы	R	RC1	RC1C2	C1	C1C2
Звено постоянного тока	+	+	+	-	-
Блок конденсаторов №1	-	+	+	+	+
Блок конденсаторов №2	-	-	+	-	+

На рисунке 4.24 изображены осциллограммы испытаний установки для различных режимов работы нагрузочного стенда.

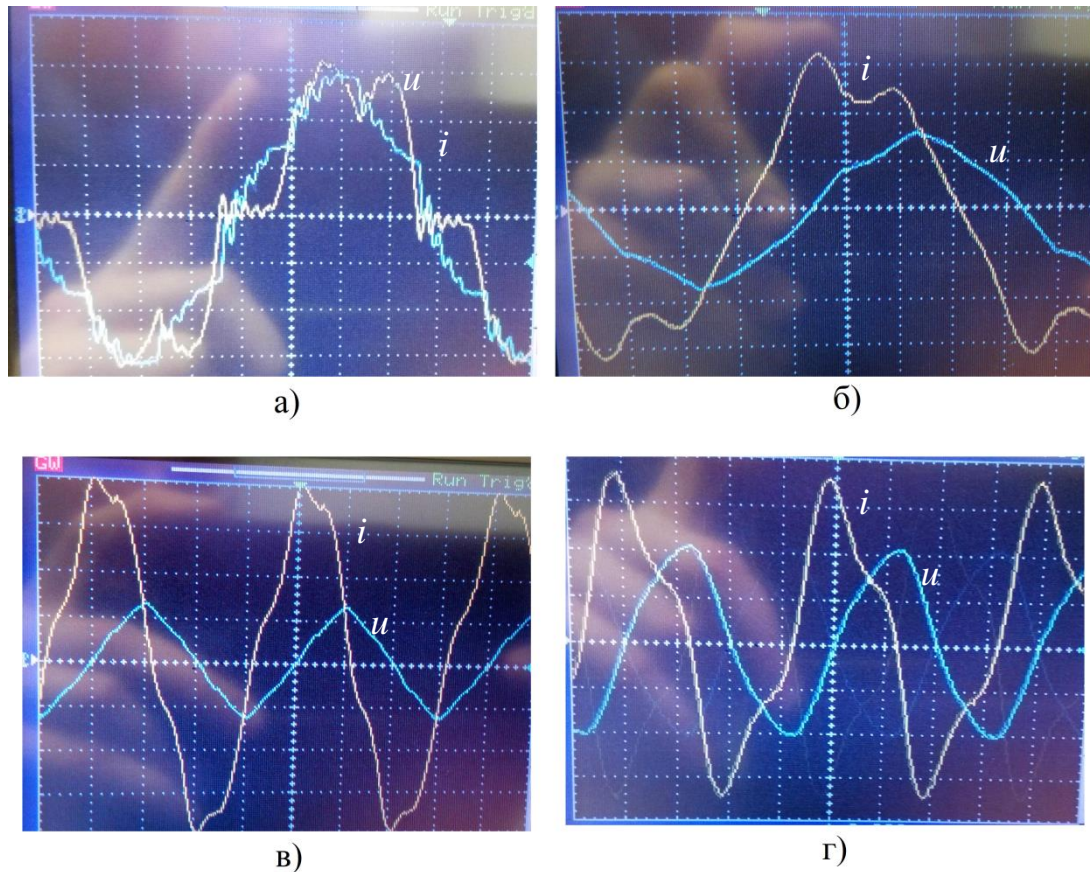


Рисунок 4.24 – Осциллограммы работы нагрузочного стенда для режимов:

а) R; б) RC1; в) RC1C2; г) C1C2

Результаты испытаний приведены в таблице 4.5:

Таблица 4.5 – результаты испытаний нагрузочного стенда

Режим работы	R	RC1	RC1C2	C1	C1C2
$\sim U_{AB}, B$	291	351	387	356	390
$\sim U_{AN}, B$	182	199	221	208	237
$\sim I_A, A$	59	124	242	116	216
U_{dc}, B	383	453	504.9	-	-
I_{dc}, A	69	83	92.6	-	-
$t_{VD}, ^\circ C$	37	43	55	-	-
$t_R, ^\circ C$	85	115	165	-	-

Полученные в ходе эксперимента численные значения энергетических параметров нагрузочного стенда, а также осциллограммы сопоставимы с данными расчетов и математического моделирования.

4.5 Основные параметры и результаты испытаний экспериментальной установки активной силовой коррекции

На основании расчетов, представленных в п.4.1, системы управления, построенной в соответствии с $p-q-r$ теорией (п.4.2), математического имитационного моделирования в п.4.3, а также [33, 38, 39, 50, 51] реализована экспериментальная установка АСФ. В таблице 4.6 приведены основные технические характеристики АСФ:

Таблица 4.6 – технические характеристики АСФ-0,4-250А-2

Параметры	Значение
1	2
3.1. Внешний источник питания блока: <ul style="list-style-type: none"> • трехфазная сеть переменного тока с номинальным уровнем напряжения, В • допустимые отклонения напряжения питания, В..... • номинальная частота переменного тока, Гц • допустимые отклонения частоты переменного тока, Гц 	 380 +38, -57 50 +/- 2,5
3.2. Фазный ток: <ul style="list-style-type: none"> • номинальный, А • предельный, А (не более 10мин) 	 250 300
3.3. Время выхода на режим блока после подключения внешнего источника питания, сек	30
3.4. Уставки срабатывания защит блока: а) от перегрузки по току, А	330
б) тепловая защита, °С	85
в) от понижения входного напряжения, В	270
г) от повышения входного напряжения, В	480
3.5. Тип присоединения	Трехфазное без N
3.11. Режим работы	продолжи- тельный
3.12. Охлаждение	Принудити- тельная вентиляция
3.13. Масса, кг	280
3.14. Габаритные размеры, (ДхШхВ), мм	800х500х22 00
3.22. Тест на электромагнитную совместимость в соответствии:	EN-50081-1 и 2 класс А

На рисунке 4.25 изображен внешний вид АСФ:

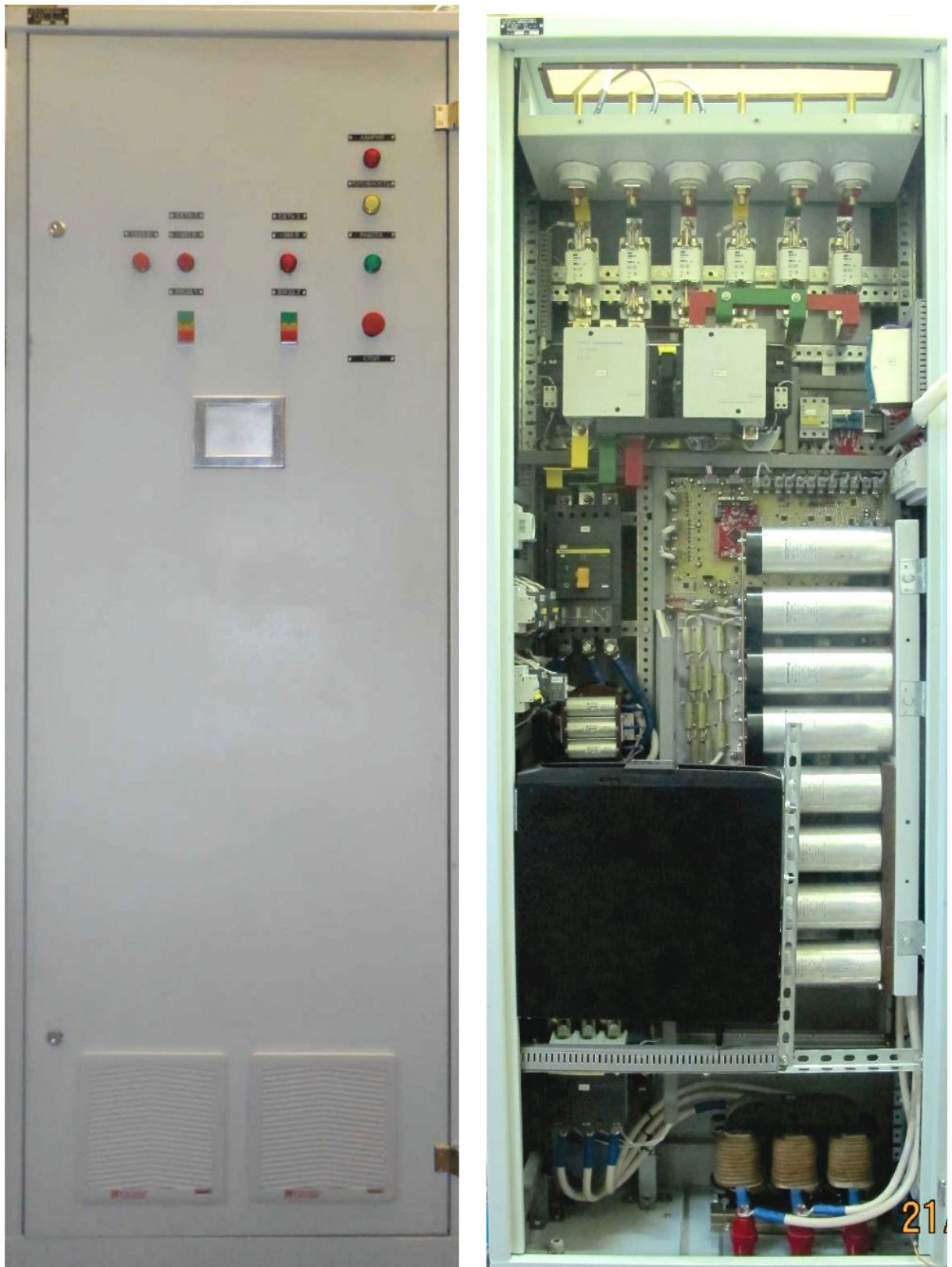


Рисунок 4.25 – АСФ-0,4-250А-2: вид спереди

Результаты финальных испытаний АСФ приведены на рисунке 4.26.

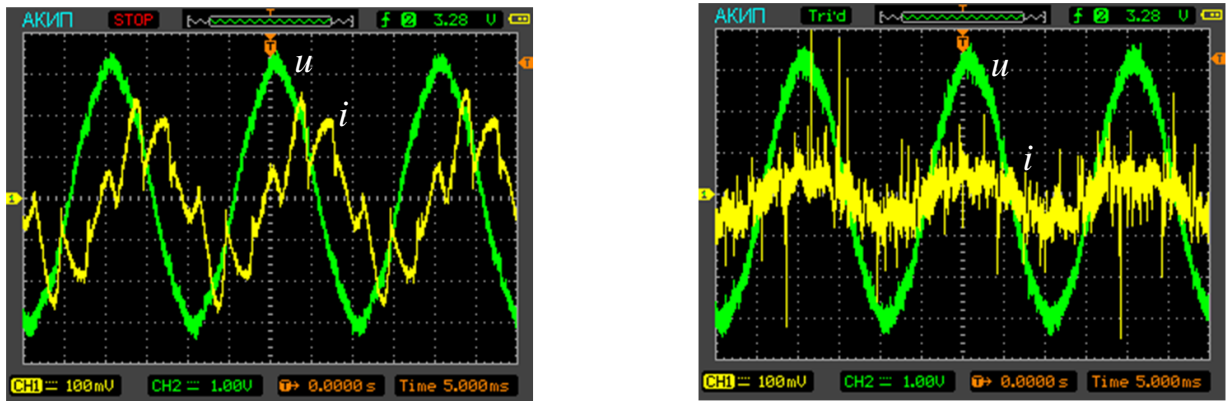


Рисунок 4.26 – Осциллограммы тока и напряжения при испытаниях АСФ

Для испытаний АСФ была создана нагрузка сложной формы, включающая в себя как наличие фазового сдвига, так и наличие нелинейных высокочастотных искажений, подобных зафиксированным на подстанциях в метрополитене. При включении АСФ наблюдается выравнивание фазы тока относительно фазы напряжения, а также сглаживание кривой. Действующее значение тока потребления в опыте уменьшилось в три раза.

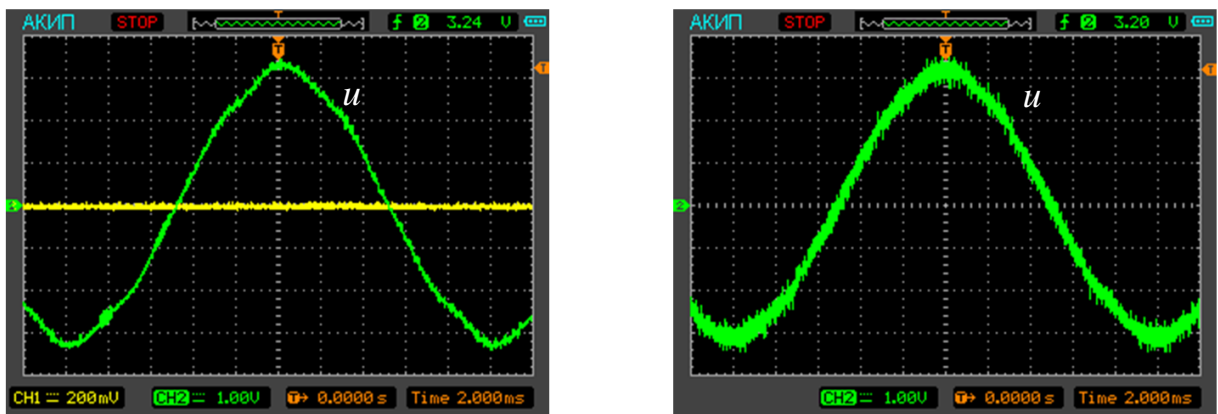


Рисунок 4.27 – Осциллограммы напряжения сети до и после включения АСФ

На рисунке 4.27 показана осциллограмма напряжения сети. До включения активного фильтра наблюдаются характерные искажения для выпрямительной нагрузки в верхней части синусоиды. После включения АСФ напряжение изменяется по синусоидальному закону без искажений.

Результаты эксперимента подтверждают, что активный фильтр способен улучшить качество электроэнергии в сети, снизить потребление тока от источника за счет компенсации реактивной энергии.

Выводы по главе 4

1. На основе элементной базы программного комплекса *Matlab Simulink* создана имитационная математическая модель АСФ, интегрированная с моделями тяговой сети и нагрузки.

2. Во избежание перегрева полупроводниковых элементов АСФ, проведено имитационное моделирование в *COMSOL Metaphysics* системы охлаждения *IGBT* транзисторов, выбран тип и способ охлаждения.

3. Выявлено, что при использовании сердечника дросселя состоящего из шихтованной стали протекающий через него несинусоидальный несимметричный высокочастотный ток создает подмагничивающий поток, уменьшающий значение индуктивности данного дросселя.

4. Спроектирована, разработана и создана универсальная нагрузочная установка, позволяющая симитировать характер нагрузки соответствующий характеристикам подстанции метрополитена.

5. Замечено, что немаловажным фактором при построении АСФ является электромагнитная совместимость устройства, а именно влияние помех на цепи передачи информации, вследствие чего предлагается использовать оптические каналы связи.

6. Проведенными исследованиями доказана состоятельность и практическая применимость теорий мгновенных мощностей для компенсации реактивной мощности и мощности искажений.

7. Создана экспериментальная установка АСФ-0,4-250А-2. Результаты физического эксперимента подтверждают данные аналитических расчетов и математического моделирования.

Глава 5 МЕТОДИКА ОПТИМИЗАЦИИ МОЩНОСТЕЙ АКТИВНОГО СИЛОВОГО ФИЛЬТРА И БЛОКА КОНДЕНСАТОРОВ В СОСТАВЕ ГИБРИДНОГО СИЛОВОГО ФИЛЬТРА

5.1 Применение гибридного силового фильтра для коррекции коэффициента мощности

Тяговые подстанции Новосибирского метрополитена характеризуются неравномерным потреблением электроэнергии в течение суток. Кроме того, принцип работы тяговых преобразовательных агрегатов является причиной появления в сети высокочастотных искажений. В свою очередь, службы собственных нужд метрополитена, такие как: система вентиляции, эскалаторы, освещение, насосные системы, имеют активно-индуктивный характер нагрузки, в результате чего в сети происходит циркуляция реактивной энергии. Причем в случае тяговой нагрузки практически не наблюдается смещения фаз, а у нетяговых потребителей минимальны высокочастотные составляющие тока нагрузки.

Для повышения качества электроэнергии на подстанции, необходимо произвести смещение и выравнивание тока нагрузки, до синусоидальной формы синфазной с напряжением сети, что изображено на рисунке 5.1.

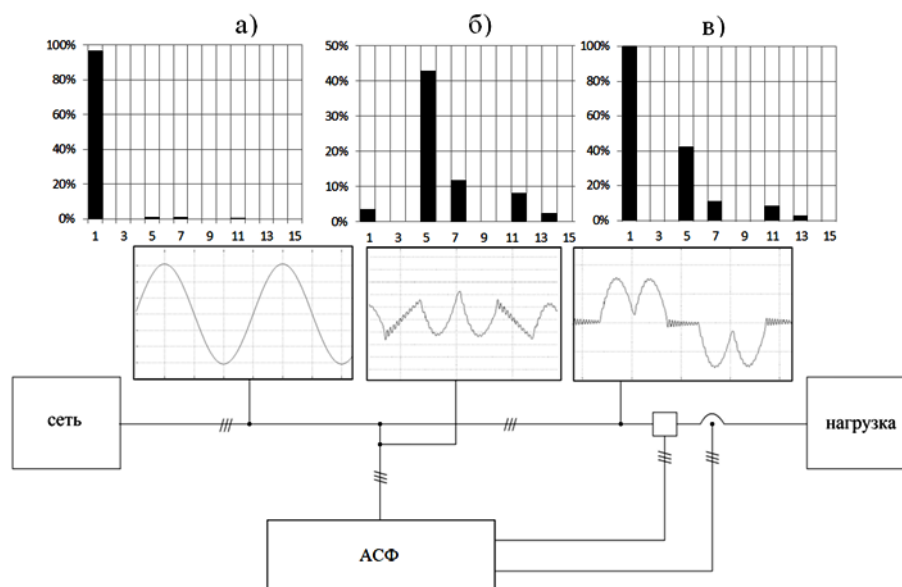


Рисунок 5.1 – Общий случай коррекции коэффициента мощности

По результатам сравнительного анализа существующих технических мероприятий по повышению коэффициента мощности и [23, 56, 63, 101, 102, 114] на подстанциях метрополитена предлагается использовать гибридный силовой фильтр (ГСФ), состоящий из комбинации активного силового фильтра (АСФ) и блока конденсаторов (БК) с единой системой управления. В этом случае БК со ступенчатым регулированием используется для компенсации реактивной мощности, постоянно циркулирующей в сети, а в круг задач АСФ входит:

1. коррекция высокочастотных гармонических искажений тока нагрузки;
2. устранение дисбаланса нагрузки по фазам;
3. устранение эффектов недо- и пере-компенсации БК.

За счет того, что функция компенсации реактивной мощности практически полностью отдается пассивным батареям, удастся значительно уменьшить мощность АСФ без ухудшения качества электроэнергии. На рисунке 5.2 представлен пример разделения задач компенсации реактивной мощности между БК и АСФ.

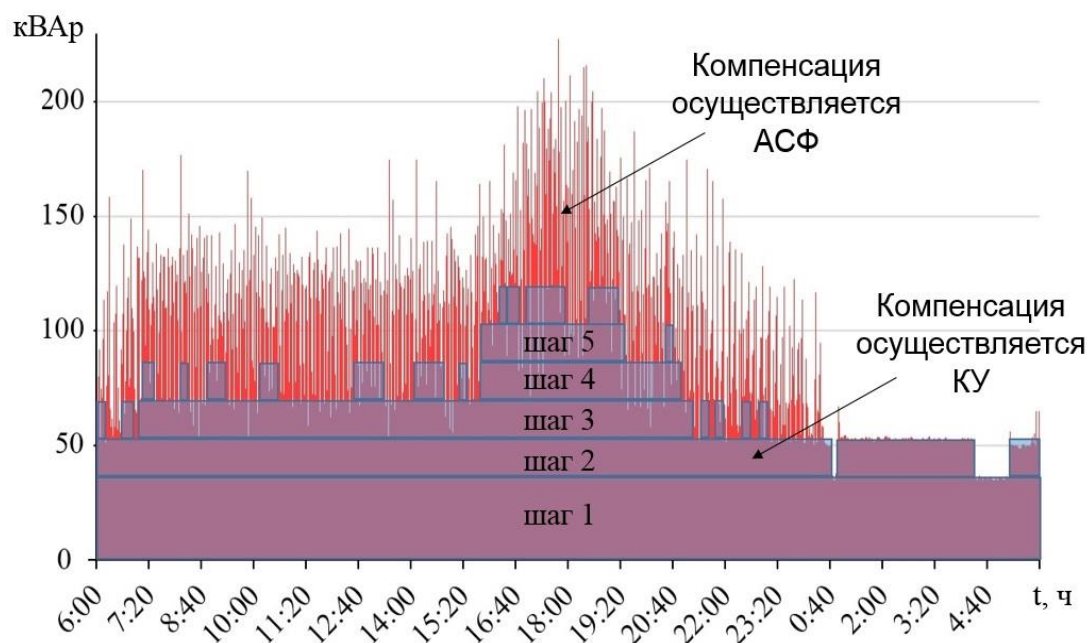


Рисунок 5.2 – Реактивная мощность в течение суток на подстанции СТП-4

Функциональная схема ГСФ представлена на рисунке 5.3

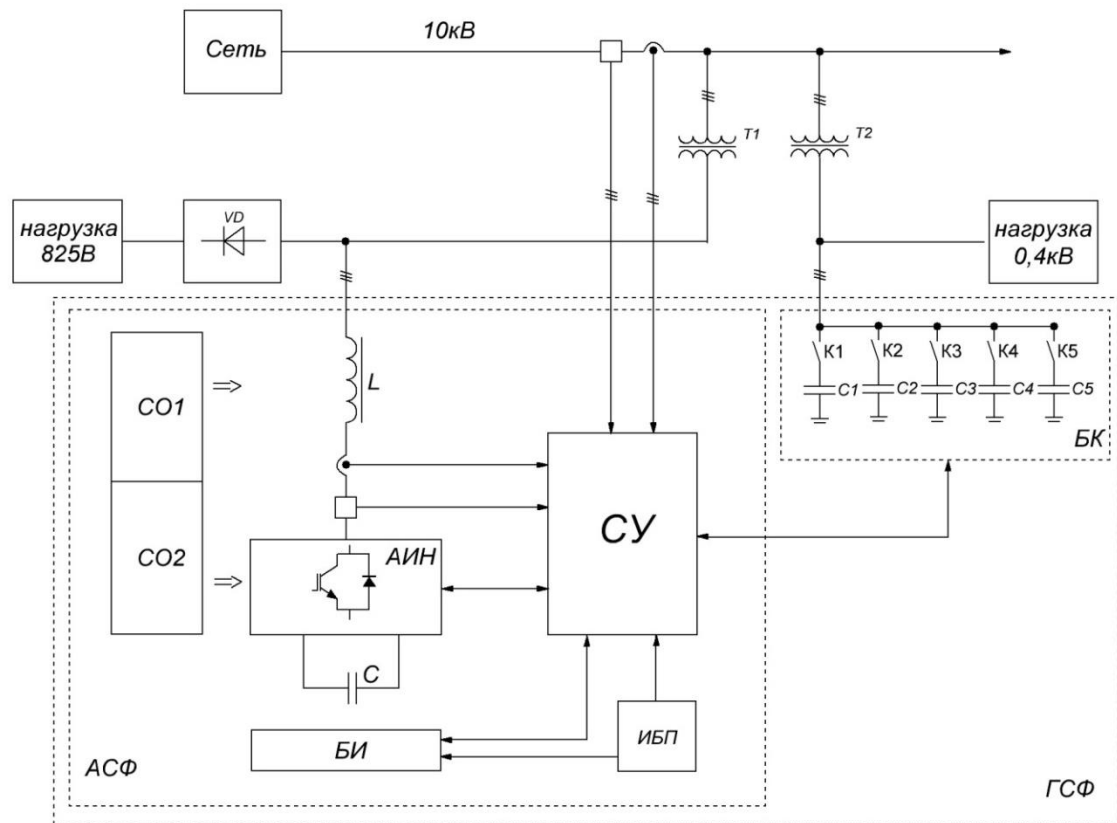


Рисунок 5.3 – Функциональная схема ГСФ

где: СУ – система управления ГСФ; АИН – автономный инвертор напряжения; БИ – блок индикации; СО1 – система охлаждения дросселя; СО2 – система охлаждения АИН.

Контроль энергетических показателей на шине 10кВ позволяет объединить СУ для устройств компенсации тяговой нагрузки и собственных нужд метрополитена. Также в этом случае появляется возможность учесть реактивную мощность и нелинейные искажения, вносимые в сеть трансформаторами.

5.2 Система управления гибридным силовым фильтром

Согласно $p-q-r$ теории мгновенной мощности полную мощность можно представить мгновенной активной мощностью p и мгновенными

реактивными q_r , q_q [116]. Полную мощность системы можно представить, как сумму активных и реактивных мощностей:

$$s = \sqrt{p^2 + q_q^2 + q_r^2}. \quad (5.1)$$

Тогда в качестве мощностей, подлежащих компенсации, могут быть выбраны как все компоненты равенства 5.1 за исключением p , так и его отдельные элементы.

В случае гибридного фильтра, БК с шаговым регулированием компенсирует реактивную постоянную составляющую (рисунок 5.5, 5.6):

$$БК \gg q_q.$$

Так как шаговое подключение ёмкости к сети не позволяет точно скомпенсировать всю реактивную мощность, появляется нескомпенсированный остаток:

$$q^* = q_q - q_{step}, \quad (5.2)$$

который подлежит компенсации посредством АСФ, совместно с q_r (рисунок 5.5-5.7).

$$АСФ \gg q_r + q^*.$$

Система управления гибридного компенсатора реактивной мощности функционально выглядит следующим образом:

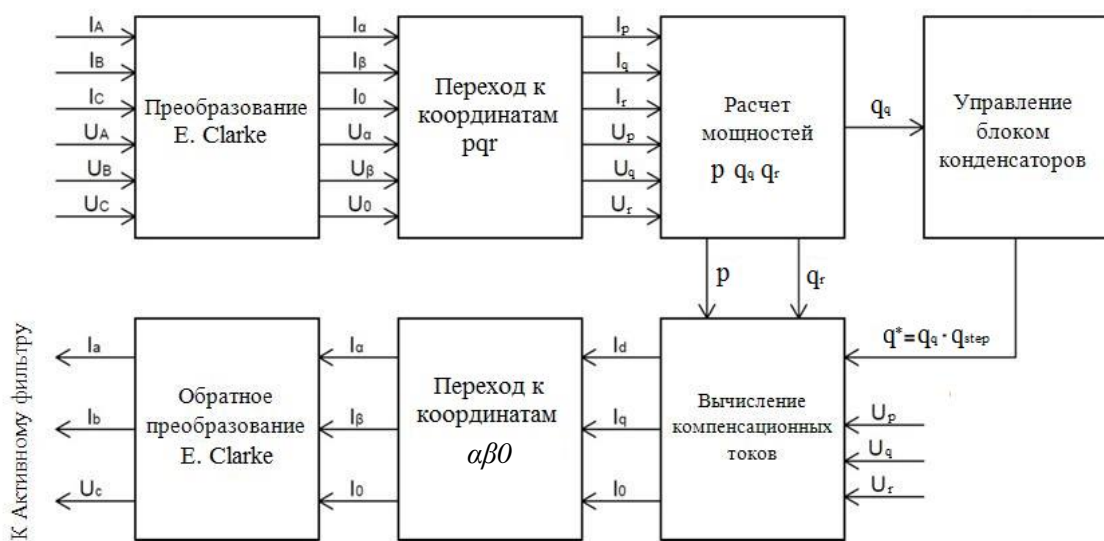


Рисунок 5.4 – Функциональная схема системы управления ГСФ

Принцип работы ГСФ представлен на следующем примере: потребитель имитируется активно-индуктивной нагрузкой с наличием 5-ой, 7-ой, 11-ой, 13-ой и т.д. гармоник, при этом $\cos\varphi=0,6$.

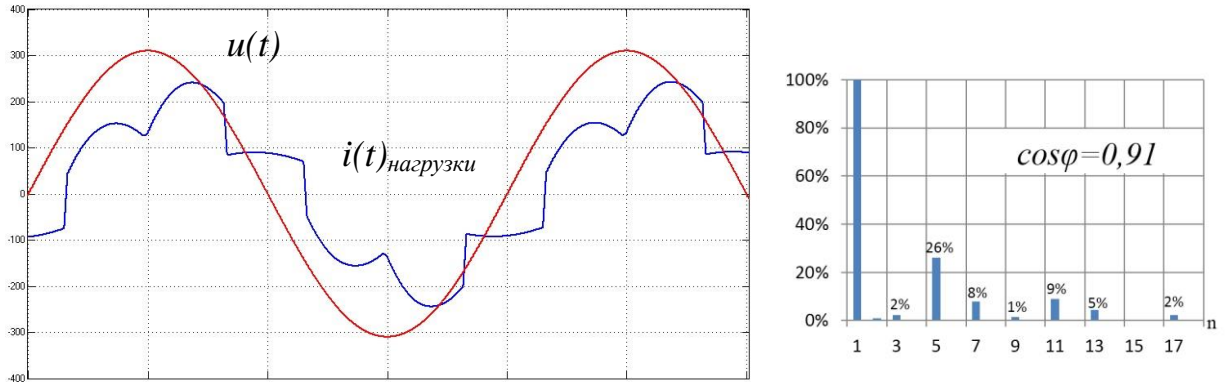


Рисунок 5.5 – Напряжение сети и ток нагрузки

После включения пассивной составляющей ГСФ наблюдается уменьшение сдвига фазы тока к фазе напряжения, увеличение $\cos\varphi$ до 0,94. При этом остается некомпенсированной некоторая реактивная мощность и нелинейные высокочастотные искажения.

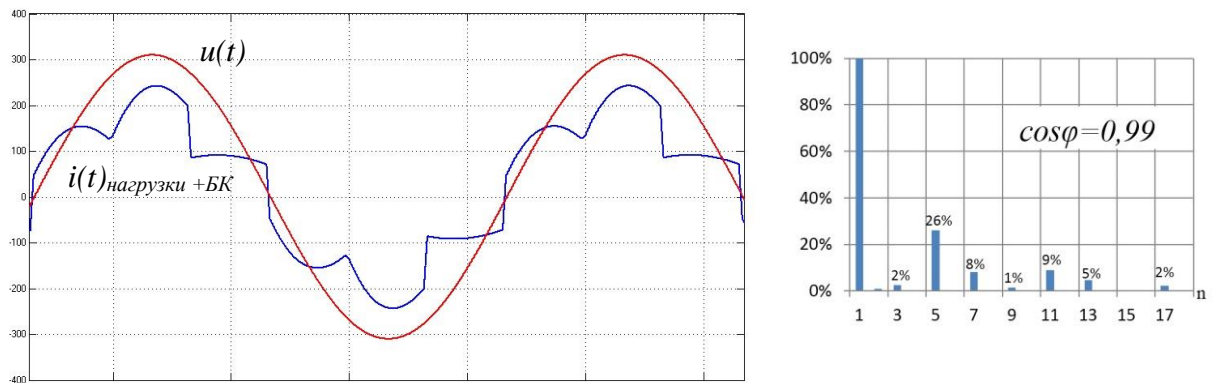


Рисунок 5.6 – Напряжение сети и ток после подключения БК

При включении активной части фильтра наблюдается уменьшение гармоник тока до суммарного значения менее 1% от тока основной гармоники, а значение $\cos\varphi$ достигает 0,99.

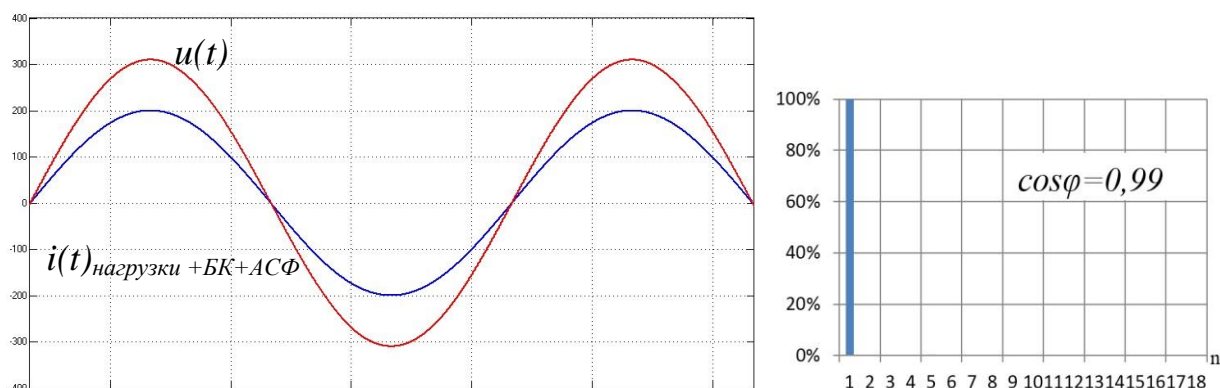


Рисунок 5.7 – Напряжение сети и ток сети при использовании ГСФ

5.3 Локализация гибридного силового фильтра на подстанции метрополитена

Одним из актуальных вопросов применения компенсирующих устройств является их месторазмещение. Согласно [29, 34] размещать данные устройства следует как можно ближе к нагрузке с целью уменьшения контура циркуляции реактивной мощности. Но практически месторазмещение зависит от типа устройства и целей компенсации.

1. Промышленная компенсация реактивной мощности. В случае отсутствия возможности обеспечения компенсации реактивной мощности на местах, в энергосистеме производят глобальную коррекцию $\cos\varphi$, как правило, это делают в транспортных узлах энергосистем. Компенсирующим устройством при этом зачастую являются синхронные машины.

2. Компенсация реактивной мощности группы потребителей. В качестве группы потребителей обычно выступают несколько небольших заводов или производственных предприятий с похожим характером нагрузки. В данном случае компенсацию обычно осуществляют на общих шинах 6-35кВ. В зависимости от характера нагрузки используются как пассивные батареи, так и устройства типа СТК или statcom.

3. Компенсация реактивной мощности одного потребителя. Наиболее эффективный способ это применение АСФ или ГСФ. Применяется для

крупных предприятий или потребителей, имеющих индуктивный характер нагрузки, а также вносящих в сеть высокочастотные искажения. Преимуществом является то, что устройства коррекции можно расположить в непосредственной близости от нагрузки.

В метрополитене имеется необходимость и возможность выполнять коррекцию коэффициента мощности на каждой подстанции в отдельности.

Кроме того при выборе ГСФ в качестве устройства коррекции, необходимо рассмотреть вопрос размещения фильтра на самой подстанции. Активную часть предлагается размещать после вторичной обмотки тягового трансформатора, а пассивную после понижающих трансформаторов силовых нагрузок $\sim 380\text{В}$. Размещение АСФ и БК на типовой схеме подстанции метрополитена, которая изображена на рисунке 5.8. Обе части ГСФ имеют одну систему управления, расположенную в непосредственной близости к полупроводниковым элементам АСФ.

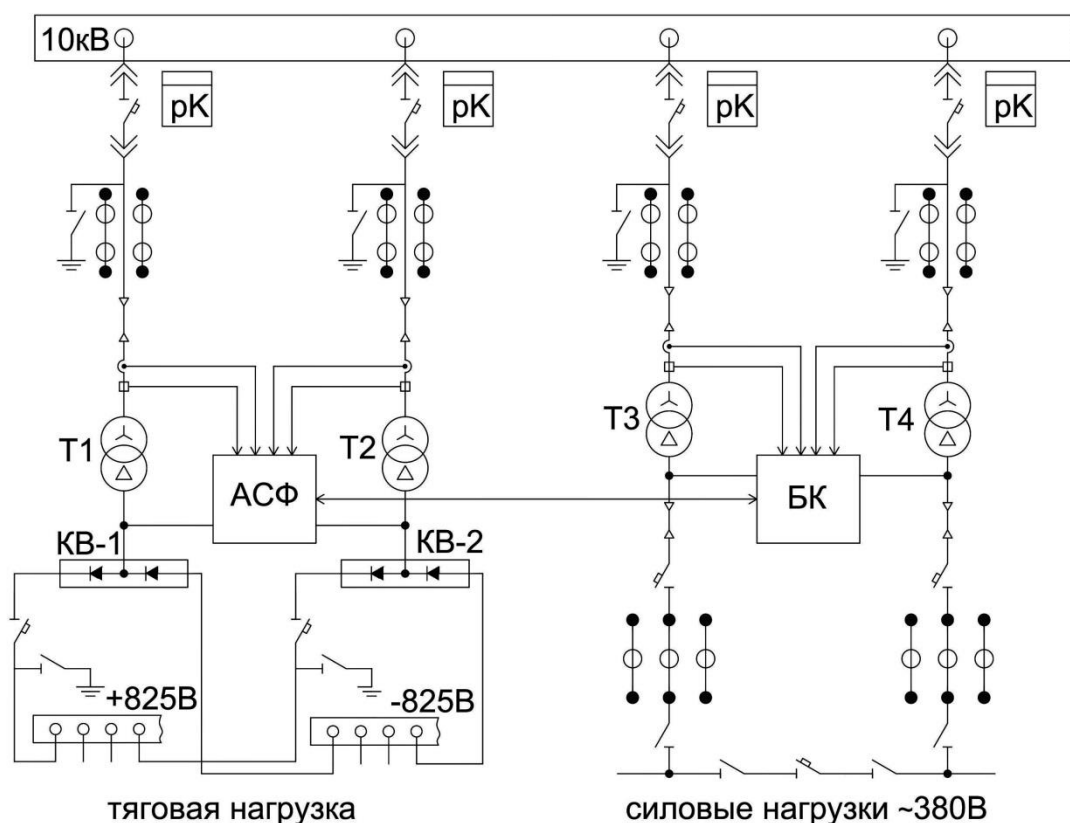


Рисунок 5.8 – Схема подключения ГСФ на подстанции метрополитена

Отличительной особенностью подстанции метрополитена является то, что понижение и выпрямление напряжения локализовано в одном месте. Это дает возможность включить в задачу коррекции коэффициента мощности, компенсацию неактивных токов, вызванных работой понижающих трансформаторов в недогруженном режиме. Для этого датчики тока и напряжения сети предлагается разместить на шине 10кВ непосредственно перед трансформаторами, а систему управления настроить таким образом, чтобы компенсирующим воздействием АСФ, максимально повысить коэффициент мощности на шине 10кВ. По сравнению с размещением датчиков после вторичной обмотки трансформатора, данное решение позволит снизить негативные воздействия тягового трансформатора на сеть. Эффект составит от 1 до 1,5% к качеству электроэнергии.

5.4 Исследование стоимости составных частей гибридного фильтра

С целью решения вопроса экономического обоснования применяемого решения, а также вопросов оптимизации активной и пассивной мощностей ГСФ, был изучен рынок предложений блоков конденсаторов и активных фильтров, построены аналитические зависимости.

Основными поставщиками БК в сибирском регионе являются российские компании, которые также предлагают услуги по расчету, установке и обслуживанию пассивных фильтров. Результаты исследования зависимости стоимости БК от его мощности представлены на рисунке 5.9.

Аппроксимация зависимости стоимости БК от мощности имеет линейный характер и может быть представлена следующим характеристическим уравнением:

$$y = 0,2646 \cdot x + 17,883, \quad (5.3)$$

при этом достоверность аппроксимации:

$$R^2 = 0,98.$$

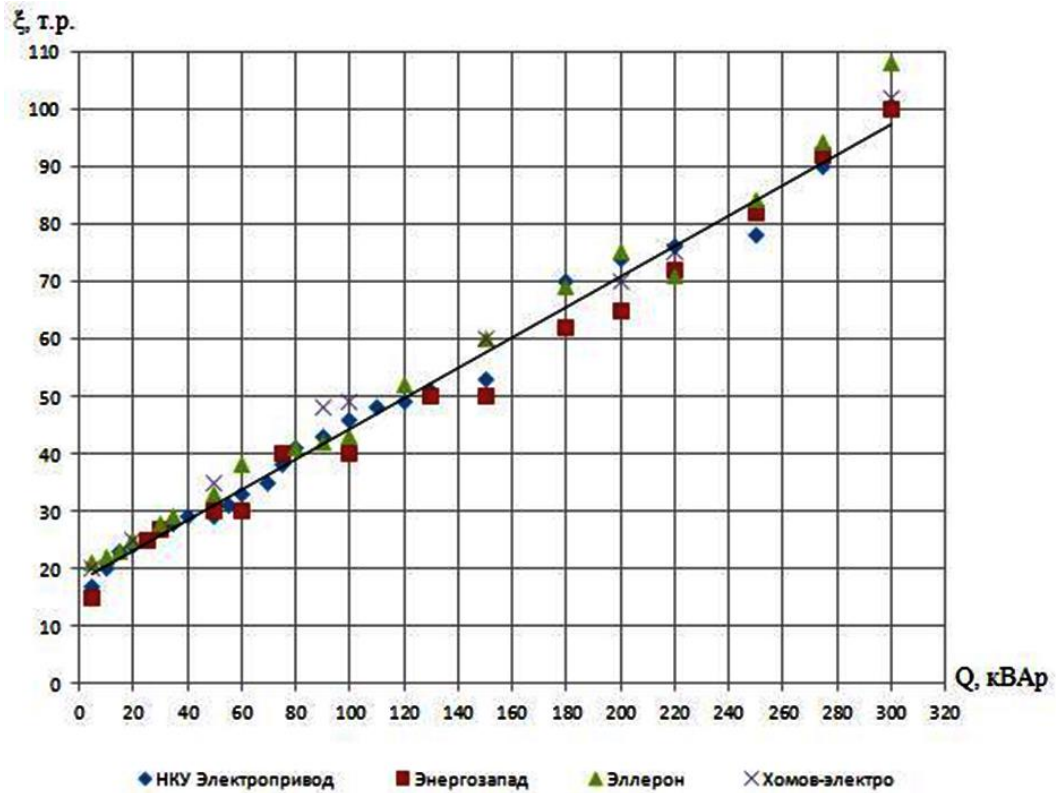


Рисунок 5.9 – Стоимость БК в зависимости от его мощности

В свою очередь АСФ производятся в основном зарубежными компаниями Германии, Японии, Индии и Китая. На сегодняшний день в России промышленного производства АСФ нет, но существуют компании, разрабатывающие опытные образцы.

На основании данных Российских и зарубежных компаний (ABB, Schneider Electric и др.) зависимость стоимости АСФ от его номинального тока компенсации (рисунок 5.10) имеет нелинейный характер и описывается полиномиальной функцией второго порядка.

$$y = -0,0064 \cdot x^2 + 4,5875 \cdot x + 338, \quad (5.4)$$

при этом достоверность аппроксимации:

$$R^2 = 0,99.$$

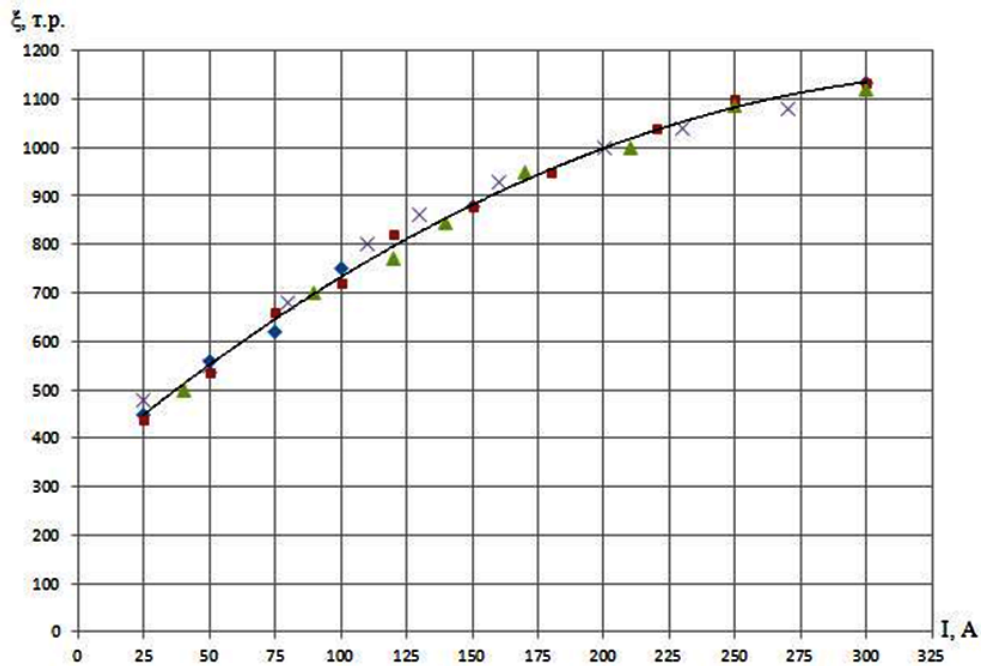


Рисунок 5.10 – Стоимость АСФ в зависимости от его номинального тока компенсации

5.5 Оптимизация мощностей активной и пассивной частей гибридного фильтра

На сегодняшний день многокритериальные оптимизационные задачи являются неотъемлемой частью построения СТС. Основной проблемой, решаемой данным классом задач, является рациональное расходование времени и средств, для получения максимального качества/дохода.

В энергетике оптимизационные задачи занимают особое место в силу того, что многие решения носят глобальный характер: задача нахождения мощности, которую необходимо произвести электростанции, транспортная задача энергетики, задача нахождения оптимального средства преобразования электроэнергии в другие виды энергии и многие другие [8, 26, 35].

Для решения проблемы качества электроэнергии в зависимости от типа потребителя необходимо выбрать подходящие средства компенсации и фильтрации. В качестве силового средства коррекции для метрополитена выбран гибридный силовой фильтр. При известных энергетических данных

метрополитена неизвестной остается мощность главных составляющих ГСФ: пассивной и активной частей фильтра. При неправильном выборе данных мощностей система может работать неэффективно. Например, при чрезмерном увеличении пассивной части фильтра, активной части не хватит мощности для коррекции нелинейных высокочастотных искажений и для выполнения других функций, а в обратной ситуации останется нескомпенсированной реактивная мощность. Еще одной предпосылкой к проведению оптимизации стало экономическое обоснование применения данного технического решения. Так как основной причиной отказа от применения АСФ в пользу ГСФ является высокая стоимость АСФ, становится актуальной задача минимизации затрат на построение ГСФ, особенно его активной части.

Для решения поставленных вопросов оптимизационная задача выглядит следующим образом:

необходимо найти такое соотношение мощностей активной и пассивной части 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.

Необходимо отметить, что представленные критерии в данной задаче можно считать независимыми по предпочтению, так как изменение стоимости фильтра не изменит необходимых требований по качеству и наоборот.

Также можно заключить, что критериальное пространство W является m -мерным линейным пространством R^m это означает, что частные критерии являются числовыми и с ними можно выполнять математические операции

[31]. Также можно сделать предположение о монотонности критериев по предпочтению. В скалярном случае практически всегда используется предположение о том, что улучшению качества решения соответствует изменение значения критерия. В процессе анализа задач с критериальными функциями $\varphi_1 \dots \varphi_m$, где $m > 1$, аналогичным образом, удобно предположение о том, что увеличение (уменьшение) частного критерия (при постоянных значениях других критериев) является предпочтительным [31]. Также в соответствии с 5.9 и 5.10 можно заключить, что зависимость критериев близка к линейной и не имеет локальных минимумов и максимумов.

Вследствие того что, поставленная задача является критериальной, и ее критерии независимы по предпочтению, отображение φ действует в \mathbb{R}^m и частные критерии монотонны по предпочтению, задача может быть решена методами многокритериальной оптимизации.

Математическая запись критериев оптимальности называется целевой функцией и для обозначенной задачи выглядит:

$$\begin{aligned} PF(x, y) &\rightarrow \max \\ \xi(x, y) &\rightarrow \min \end{aligned}$$

где: PF – коэффициент мощности подстанции; ξ – стоимость ГСФ; x – переменная мощности пассивного фильтра $Q_{БК}$; y – переменная тока АСФ $I_{АСФ}$.

Так как переменные x, y являются дискретными и их число конечно, а зависимости $\xi_{АСФ} = f(I_{АСФ})$ $\xi_{БК} = f(Q_{БК})$ близки к линейным, то оптимизационная задача может быть решена методами дискретного программирования, а целевая функция имеет вид:

$$\begin{aligned} PF &\rightarrow \max, PF(x, y) && \left| \begin{array}{l} x \in X \subseteq W \\ y \in Y \subseteq W \end{array} \right. \end{aligned} \quad (5.5)$$

где: W – множество решений; X – множество допустимых решений по мощности пассивной части фильтра $Q_{БК}$; Y – множество допустимых решений по току АСФ $I_{АСФ}$.

Выражение, характеризующее зависимость коэффициента мощности от $Q_{БК}$ и тока $I_{АСФ}$:

$$PF = \frac{\cos \varphi}{\sqrt{1 + THD^2}} = \frac{I_1 \cdot \sqrt{S^2 - Q_{БК}^2}}{S \cdot \sqrt{I_2^2 + I_3^2 + \dots + I_n^2}}. \quad (5.6)$$

Стоимость АСФ и БК являются функциями $I_{АСФ}$ и $Q_{БК}$ соответственно:

$$\xi_{АСФ} = f(I_{АСФ}),$$

$$\xi_{БК} = f(Q_{БК}).$$

Стоимость ГСФ складывается из суммы стоимостей его составляющих:

$$\xi_{ГСФ} = f(I_{АСФ}) + f(Q_{БК}). \quad (5.7)$$

Выражение, характеризующее зависимость $\xi_{ГСФ}(I_{АСФ}, Q_{БК})$ с учетом (5.7):

$$\xi = -0,0064 \cdot I_{АСФ}^2 + 4,58 \cdot I_{АСФ} + 0,264 \cdot Q_{БК} + 355,8. \quad (5.8)$$

Граничными условиями области допустимых значений выступают следующие неравенства:

$$0 \leq Q_{БК} \leq Q_M,$$

$$0 \leq I_{АСФ} \leq I_\Gamma + I^*.$$

где Q_m – максимальное значение реактивной мощности в системе;

I^* – ток компенсации реактивной мощности, некомпенсированной БК.

Для уменьшения количества возможных решений вводится система ограничений:

1) Мощность ГСФ не должна превышать мощности, необходимой для компенсации реактивной мощности и коррекции нелинейных искажений более чем на 15%;

2) Мощность БК кратна 5кВАр;

3) Значения номинального тока компенсации АСФ кратно 10А;

- 4) АСФ может выполнять функции БК;
- 5) БК не может выполнять функции АСФ.

При расчете энергетических параметров принимаются следующие допущения:

- 1) Не учитываются потери на нагрев ГСФ;
- 2) Не учитываются электромагнитные потери;
- 3) Не учитывается расход энергии на охлаждение дросселя и полупроводниковых элементов.

Для расчётов используются характеристики подстанции СТП-4 Новосибирского метрополитена:

Таблица 5.1 – Среднесуточные энергетические показатели подстанции

п/п	среднесуточные показатели	значения
1	полная мощность	218кВА
2	реактивная мощность	95кВАр
3	напряжение тяговой линии	825В
4	напряжение нетяговых потребителей	~380В
5	$\cos \varphi$ подстанции	0,9
6	THD подстанции	0,3

Так как ГСФ состоит из двух типов фильтров, предельными решениями в определении мощностей его составляющих будет применение только АСФ или только БК различной мощности, зависимости PF и $\xi_{ГСФ}$ от $I_{АСФ}, Q_{БК}$:

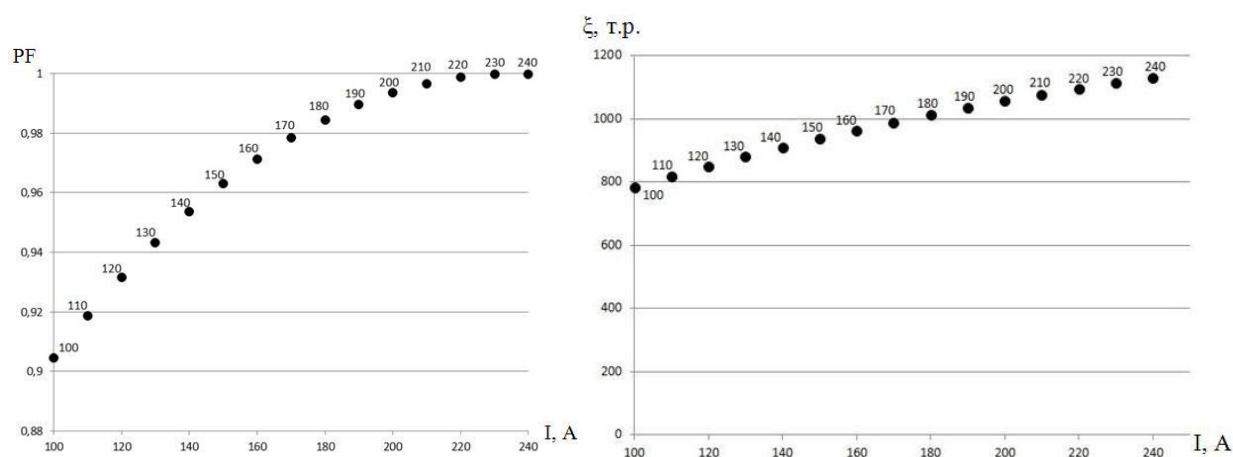


Рисунок 5.11 – PF и $\xi_{АСФ}$ в случае применения только АСФ

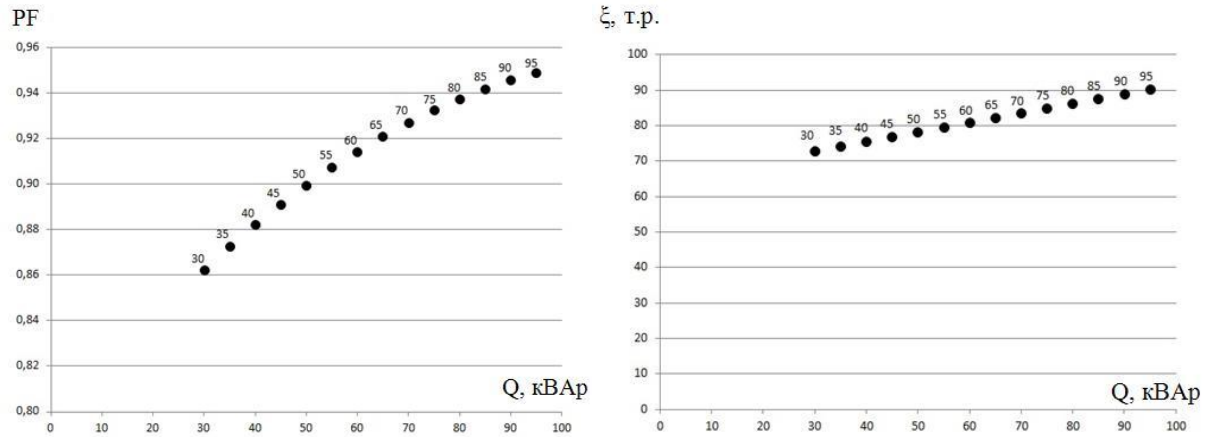


Рисунок 5.12 – PF и $\xi_{ГСФ}$ в случае применения только БК

На рисунке 5.13 представлены результаты исследования стоимости БК и АСФ на плоскости $(\xi; PF)$, где точками представлены ГСФ с определенными параметрами активной и пассивной частей, в данном случае с возможными предельными решениями:

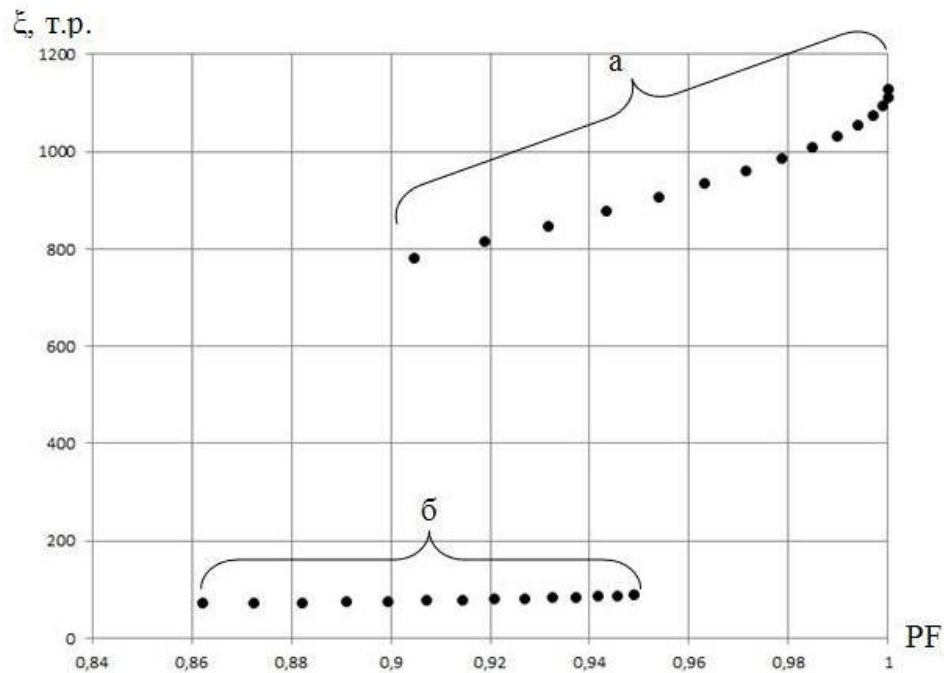


Рисунок 5.13 – Стоимость и коэффициент мощности ГСФ состоящих из только: а – активной части; б – пассивной части

После получения предельных решений необходимо определить все возможные промежуточные решения, так как они будут составлять

комбинацию АСФ и БК различных мощностей в составе гибридного фильтра, предлагается называть данные решения «гибридными».

Коэффициент мощности и стоимость гибридного фильтра рассчитываются для различных комбинаций мощностей составляющих данного фильтра. Результаты расчетов представлены в таблице 5.2.

Таблица 5.2 – Результаты расчета энергетических и экономических показателей при применении ГСФ

S	Q	cos φ	THD	I _l	I _r	Применяемое решение		Cosφ	THD	I _l , А	I _r , А	PF	ξ _{т.р}
						Q _{БК} , кВар	I _{АСФ} , А						
218кВА	95кВАр	0,9	0,3	370А	110А	95	0	0,99	0,3	318	110	0,94	86
						95	10	0,99	0,26	318	101	0,95	470
						95	20	0,99	0,24	318	92	0,95	495
						95	30	0,99	0,21	318	83	0,95	512
						95	40	0,99	0,17	318	73	0,96	554
						95	50	0,99	0,14	318	63	0,96	594
						95	60	0,99	0,11	318	52	0,97	633
						95	70	0,99	0,08	318	42	0,97	670
						95	80	0,99	0,05	318	29	0,98	707
						95	90	0,99	0,02	318	15	0,98	742
						95	100	0,99	0,01	318	4	0,99	775
218кВА	95кВАр	0,9	0,3	370А	110А	90	0	0,99	0,3	319	110	0,94	84
						90	10	0,99	0,26	319	101	0,94	468
						90	20	0,99	0,24	319	92	0,94	493
						90	30	0,99	0,21	319	83	0,95	511
						90	40	0,99	0,17	319	73	0,95	552
						90	50	0,99	0,14	319	63	0,96	593
						90	60	0,99	0,11	319	52	0,96	631
						90	70	0,99	0,08	319	42	0,97	669
						90	80	0,99	0,05	319	29	0,98	705
						90	90	0,99	0,02	319	15	0,98	740
						90	100	0,99	0,01	319	4	0,99	774

:

218кВА	95кВАр	0,9	0,3	370А	110А	0	0	0,9	0,3	370	110	0,86	0
						0	10	0,9	0,26	368	101	0,86	400
						0	20	0,9	0,24	364	92	0,87	427
						0	30	0,9	0,22	362	83	0,87	469
						0	40	0,9	0,19	360	73	0,88	511
						0	50	0,9	0,16	358	63	0,88	551
						0	60	0,9	0,13	357	52	0,88	590
						0	70	0,9	0,1	356	42	0,89	627
						0	80	0,9	0,07	355	29	0,89	664
						0	90	0,9	0,05	354	15	0,89	699
						0	100	0,9	0,02	354	4	0,89	732

Коэффициент мощности и стоимость фильтра при использовании гибридных решений.

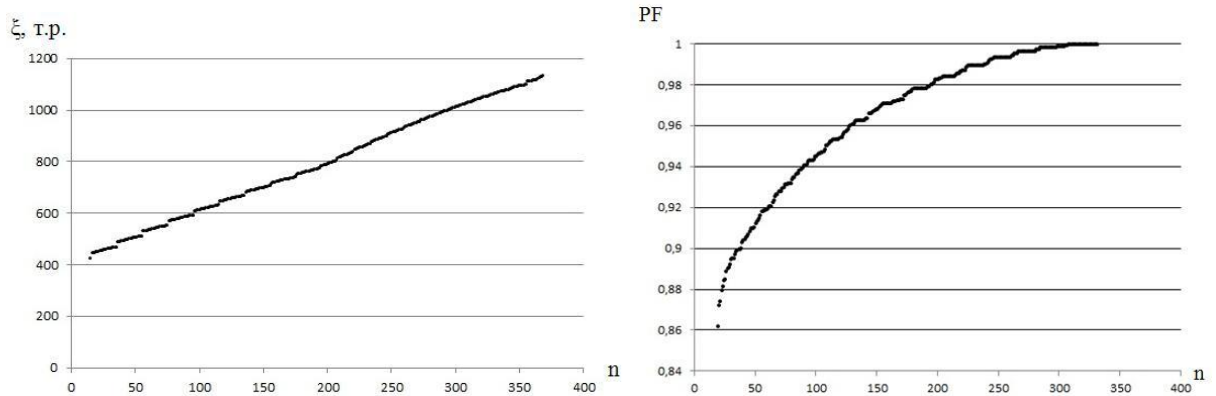


Рисунок 5.14 – PF и $\xi_{ГСФ}$ в случае применения гибридных решений

где n – различные решения с заданными параметрами.

Тогда в осях $(\xi; PF)$, множество гибридных решений будет выглядеть следующим образом:

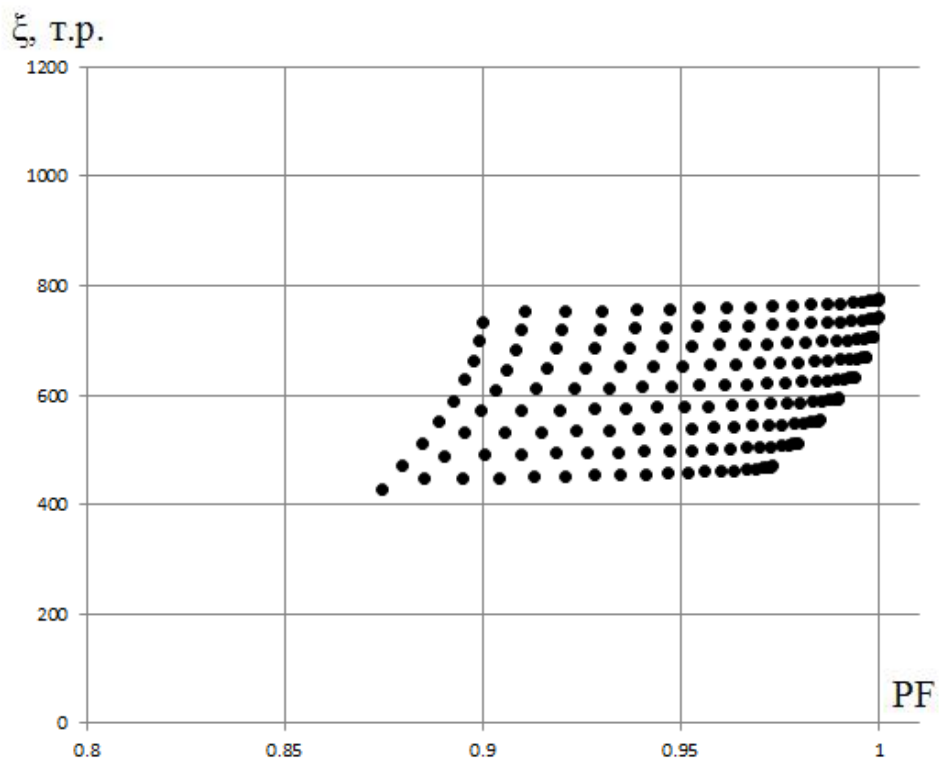


Рисунок 5.15 – Стоимость и коэффициент мощности ГСФ, состоящих из различных комбинаций мощностей активной и пассивной частей

Следовательно, область возможных решений с учетом принятых ограничений и допущений, а также рассчитанных ранее (рисунок 5.13) предельных решений имеет следующий вид (рисунок 5.16):

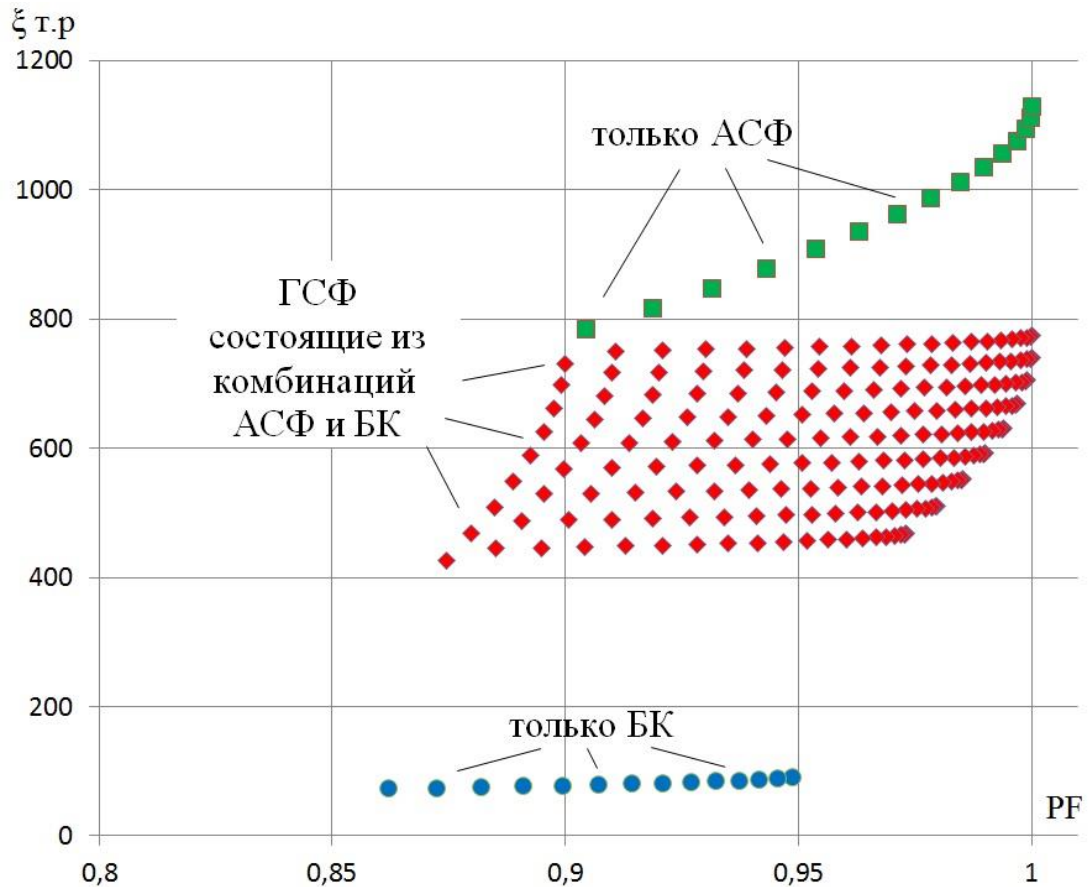


Рисунок 5.16 – Стоимость и коэффициент мощности ГСФ, состоящих из различных комбинаций мощностей активной и пассивной частей, включая предельные решения

Свободное пространство между основной группой решений и решений применения только пассивного фильтра объясняется высокой начальной стоимостью активного силового фильтра.

Основным условием, обеспечивающим заданное качество электроэнергии, является значение коэффициента мощности:

$$PF \geq 0,98.$$

А также условия, накладываемые на его отдельные компоненты:

$$\cos \varphi \geq 0,98,$$

$$THD \leq 0,08.$$

Полученное при отсечении неудовлетворяющих неравенствам решений множество является множеством допустимых решений, изображенное на рисунке 5.17. Следовательно, любое из оставшихся решений является удовлетворительным по качеству электроэнергии.

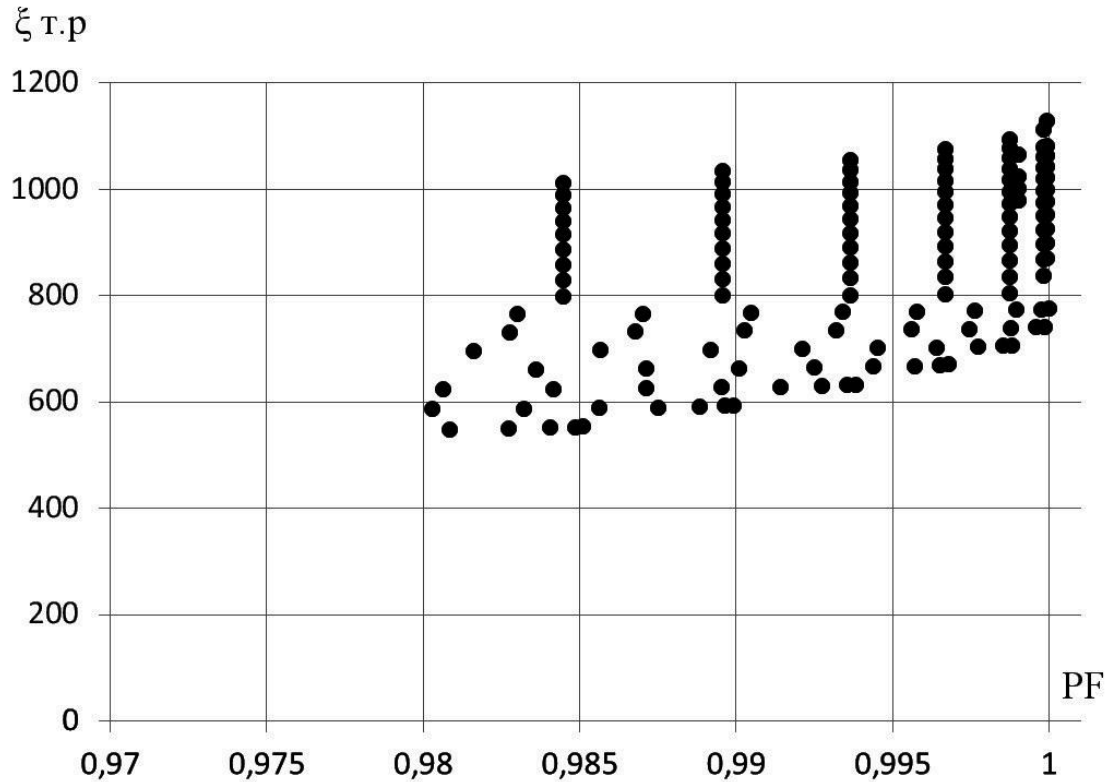


Рисунок 5.17 – Множество допустимых решений

Из представленного рисунка видно, что некоторые решения имеют одинаковое значение коэффициента мощности при различиях в стоимости. В оптимизационных задачах такие решения называют неэффективными по Парето. Если $(x^*; y^*) \in Z \subseteq W$ является множеством парето-оптимальных решений, то не существует других решений, $(x; y) \in Z$ которые превосходят $(x^*; y^*)$ хотя бы по одному критерию при равенстве другого критерия. Множество Z называют эффективным множеством [26, 35]. Выборка Парето-эффективных решений представлена на рисунке 5.18.

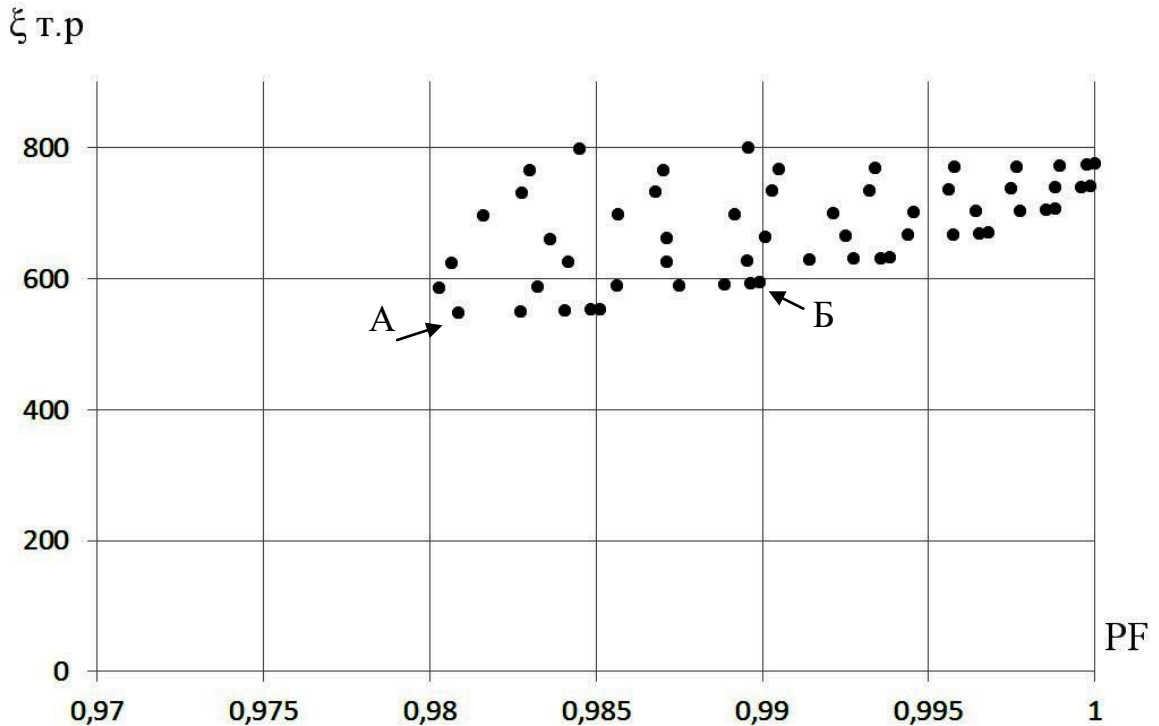


Рисунок 5.18 – Множество Парето-эффективных решений

При выполнении реальных оптимизационных задач крайне редко ставится задача нахождения наилучшего решения, обычно необходимо и достаточно выполнение начальных условий поставленной задачи. При этом довольно часто выбирается решение с менее эффективными параметрами, но обладающее большей устойчивостью или меньшей стоимостью [1]. Также бывает, что количество эффективных решений слишком велико и требует затрат времени и ресурсов на детальный анализ. Во всяком случае, дальнейший выбор наиболее подходящего решения остается за руководством разрабатываемого проекта.

Также необходимо отметить, что существуют различные методы для принятия такого решения. Для сокращения группы эффективных решений и определения единственно правильного решения, называемого оптимальным, воспользуемся одним из первых подходов к принятию решений в двухкритериальных задачах методом «стоимость-результат» (cost-benefit analysis). Данный метод впервые был предложен в середине прошлого века в

США для решения задач военного планирования [65]. В этом случае существует несколько подходов к определению оптимального решения:

- 1) По минимальной стоимости. Точка А (0,981;545т.р.) на рисунке 5.18 обеспечивает заданное качество электроэнергии и имеет минимальную стоимость.
- 2) По заданной стоимости. Определение той стоимости, которую предприятие-заказчик готово заплатить за заданное качество электроэнергии. Например, для 600т.р. это точка Б (0,99;595т.р.) на рисунке 5.18.

И если в первом случае определение решения не составляет труда, то определение заданной стоимости является полностью субъективным решением. Объективное и единственно возможное решение в этом случае не вытекает из условия задачи.

Так как оптимизация по своей сути является способом получения компромиссных решений, существует подход для нахождения такого решения:

- 3) Задание коэффициента веса. Самым распространенным способом задания коэффициентов веса для каждого критерия является способ экспертных оценок, в котором назначаются эксперты – специалисты в данной области, которые независимо друг от друга задают коэффициенты веса каждому критерию. При этом должно выполняться условие:

$$\sum_{i=1}^n \delta_i = 1,$$

где δ – оценка критерия.

Для решения текущей задачи критерии принимаются равноправными:

$$\delta_x = \delta_y = 0,5$$

При получении критериев веса, эффективные решения необходимо сравнить между собой. Для этого используются различные методы, в частности, для целочисленных систем, методы дискретного

программирования. Согласно методу ветвей и границ разобьём множество эффективных решений на подмножества $A, B, \dots, G \in Z$ [65].

Таблица 5.3 – Подмножества эффективных решений

<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	<i>D</i>	<i>E</i>	<i>F</i>	<i>G</i>
(0,981;549)	(0,98;586)	(0,981;624)	(0,984;662)	(0,982;697)	(0,983;732)	(0,983;765)
(0,983;550)	(0,983;588)	(0,984;625)	(0,987;663)	(0,986;698)	(0,987;733)	(0,987;767)
(0,984;552)	(0,986;589)	(0,987;627)	(0,990;664)	(0,989;699)	(0,99;734)	(0,99;768)
(0,985;553)	(0,988;590)	(0,99;628)	(0,992;666)	(0,992;700)	(0,993;735)	(0,993;769)
(0,985;554)	(0,989;592)	(0,991;629)	(0,994;667)	(0,995;702)	(0,996;737)	(0,996;771)
	(0,99;593)	(0,993;631)	(0,996;668)	(0,996;703)	(0,997;738)	(0,998;772)
	(0,99;594)	(0,994;632)	(0,997;669)	(0,998;704)	(0,999;739)	(0,999;773)
		(0,994;633)	(0,997;671)	(0,999;706)	(1;741)	(1;774)
				(0,999;707)	(1;742)	(1;776)

Для сравнения представленных решений между собой их необходимо привести к единой системе счисления, умножить на коэффициенты веса и между собой. В этом случае для каждого решения будет получен условный единый критерий, с помощью которого и можно провести сравнение.

$$(x^*; y^*) \Rightarrow (x'; y'),$$

$$0 \leq x' \leq 1$$

$$0 \leq y' \leq 1'$$

(5.8)

$$\delta_x \cdot x' + \delta_y \cdot y' = \theta,$$

где: θ – обобщённый условный критерий, δ_x, δ_y – коэффициенты веса критериев x, y .

Для каждого подмножества необходимо определить решение, которое получило наибольшее значение обобщенного критерия. Сравнив данные решения между различными подмножествами, можно точно выделить оптимальное решение поставленной задачи, результаты вычислений обобщенного критерия для каждого подмножества представлены в таблице 5.4:

Таблица 5.4 – Результаты вычисления обобщённого условного критерия

	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	<i>D</i>	<i>E</i>	<i>F</i>	<i>G</i>
θ	0,25	0,41	0,46	0,43	0,35	0,23	0,1
x, y	(0,985;554)	(0,99;594)	(0,994;633)	(0,997;707)	(0,999;742)	(1;742)	(1;776)

Графическая интерпретация полученных результатов показана на рисунке 5.19:

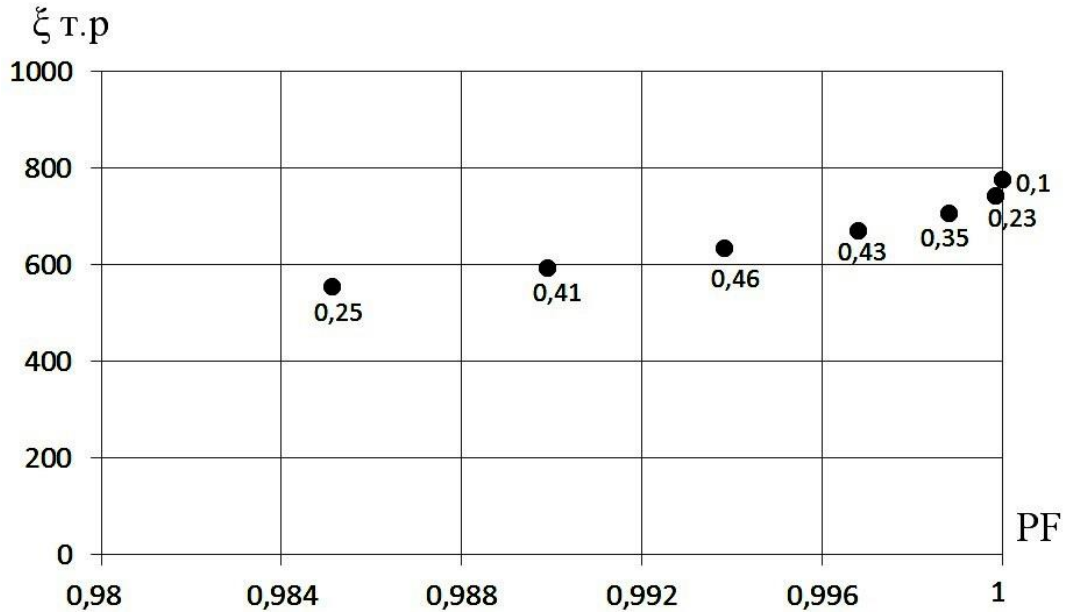


Рисунок 5.19 – Группа решений с максимальным условным обобщенным критерием для каждого подмножества $A, B, \dots, G \in Z$

Наивысший обобщенный критерий среди данного множества решений равен 0,46. Это решение соответствует гибричному силовому фильтру, который имеет следующие параметры:

Таблица 5.5 – Технические параметры оптимального ГСФ

параметр	$Q_{\text{БК}}$, кВАр	$I_{\text{АСФ}}$, А	$\cos\varphi$	THD	I_1 , А	I_r , А	PF	ξ т.р
значение	95	60	0.99	0.07	320	15	0.994	633

Также необходимо отметить некоторые закономерности полученных результатов:

1. Во всех решениях, обобщенный критерий которых выше 0,3, мощность БК равнялась математическому ожиданию реактивной мощности сети, а именно 95кВАр.
2. Все решения с $Q_{БК} = 95кВАр$ и удовлетворяющие условию $THD \leq 0,08$ вошли в группу эффективных, с наилучшими показателями по обобщенному критерию.

С помощью полученных в ходе решения оптимизационной задачи зависимостей можно сравнить между собой по эффективности и стоимости ГСФ и отдельно используемый в качестве самостоятельного компенсатора реактивной мощности и мощности нелинейных колебаний – АСФ.

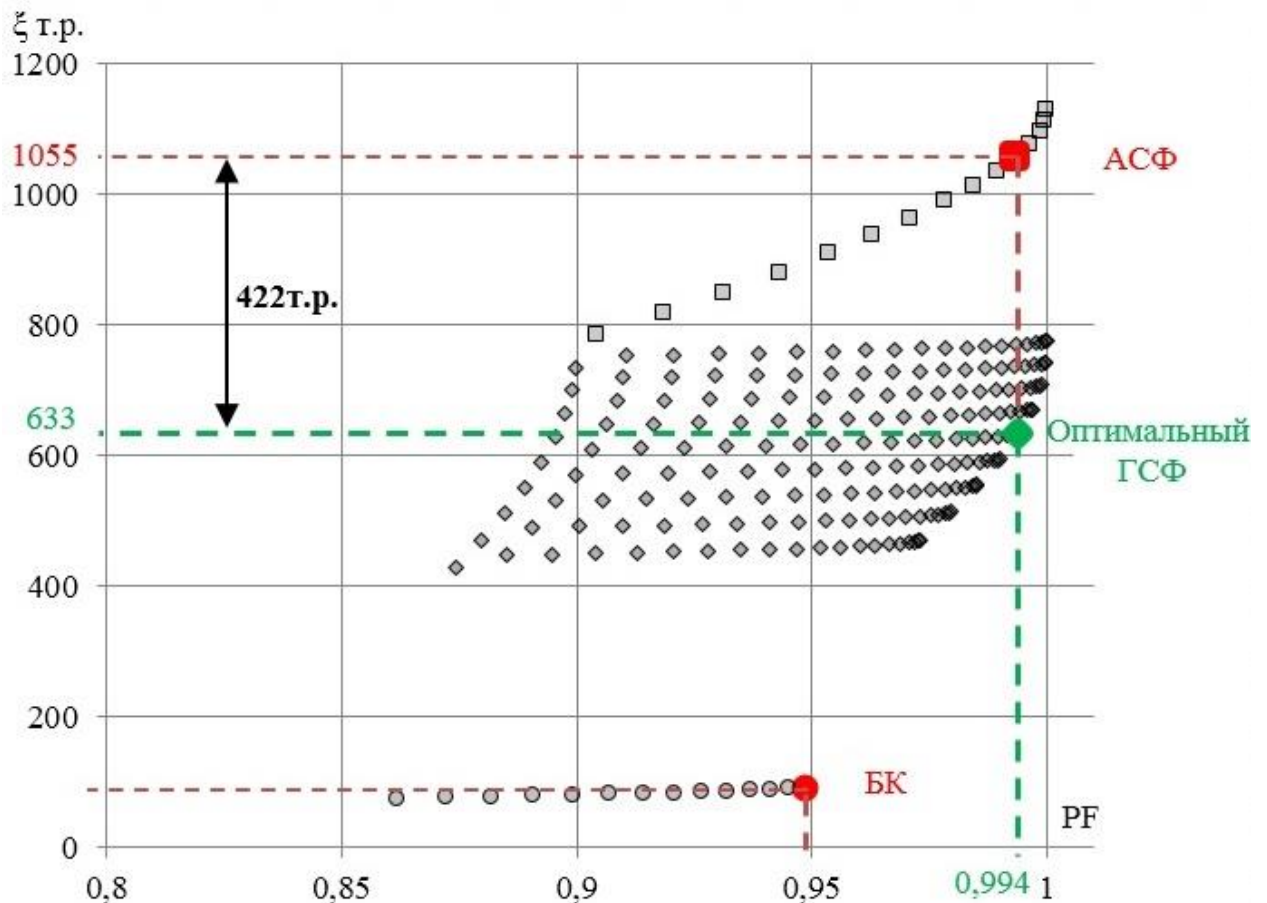


Рисунок 5.20 – Сравнение использования АСФ, БК и ГСФ для коррекции коэффициента мощности подстанции метрополитена

Гибридный силовой фильтр с оптимальными параметрами сможет повысить коэффициент мощности до теоретического значения 0,994. Такой

же коэффициент мощности можно достичь, применяя только АСФ. При равенстве критерия качества электроэнергии стоимость ГСФ на 40% (422т.р.) ниже стоимости АСФ, что неоспоримо доказывает экономическую эффективность применения данного гибридного решения.

Сравнение применения ГСФ и БК некорректно в силу того, что применение БК не удовлетворяет по требуемому качеству электроэнергии текущей задачи.

Выводы по главе 5

1. Обоснована возможность применения гибридного силового фильтра для коррекции качества электроэнергии тяговых подстанций метрополитена.

2. Разработана система управления ГСФ, в которой организовано взаимодействие активного фильтра с пассивным, а также реализована возможность устранения эффектов недо- и перекомпенсации реактивной мощности активным фильтром.

3. На основе сравнительного анализа определена наилучшая конфигурация размещения ГСФ на тяговой подстанции метрополитена.

4. Разработана аналитическая методика расчета оптимальных значений мощностей активного силового фильтра и блока конденсаторов в составе ГСФ.

5. С использованием разработанной методики проведена оптимизация мощностей активной и пассивной частей ГСФ по критерию максимизации коэффициента мощности при минимизации стоимости фильтра.

6. Установлено, что в рамках решаемой задачи при заданном коэффициенте мощности стоимость гибридного фильтра ниже стоимости активного фильтра на 40%.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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%.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Арзамасцев Д. А., Липес А. В., Мызин А. Л. Модели оптимизации развития энергосистем. М.: Высшая школа, 1987. 272 с.
2. Белецкий, А. Ф. Теория линейных электрических цепей : учеб. для вузов / А. Ф. Белецкий. – Москва : Радио и связь, 1986. – 544 с.
3. Барковский, Б.С. Двенадцатипульсовые полупроводниковые выпрямители тяговых подстанций / Барковский Б.С., Магай Г.С., Маценко В.П. [и др.]; / под ред. М.Г. Шалимова. – М.: Транспорт. 1990. – 127 с.
4. Бессонов, Л. А. Теоретические основы электротехники / Л. А. Бессонов. – Москва : Высш. шк., 1967. – 776 с.
5. Вентцель, Е.С. Теория вероятности. – М.: Наука, 1969 – 576 с.
6. Вероятностная оценка величины потерь энергии в распределительных электрических сетях / Г. Е. Поспелов, С. К. Гурский, Н. М. Сыч и др. // Известия АН СССР. Энергетика и транспорт. 1973. № 5. С. 131-135.
7. Волков, А. В. Снижение потерь мощности в трехпроводной сети переменного напряжения посредством симметрирования сетевых фазных токов активным фильтром / А. В. Волков, В. А. Волков // Электротехника. – 2011. – № 10. – С. 34–43.
8. Герасименко, А. А. Оптимальная компенсация реактивной мощности в системах распределения электрической энергии [Электронный ресурс]: монография / А. А. Герасименко, В. Б. Нешатаев. - Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2012. - 218 с. - ISBN 978-5-7638-2630-2. - Режим доступа: <http://znanium.com/catalog/product/492442>
9. ГОСТ Р 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – Введ. 2014–07–01. – Москва : Стандартинформ, 2014. – 16 с.

10. Долингер, С. Ю. Проблемы активной фильтрации кривой тока в четырех-проводной трехфазной сети / С. Ю. Долингер, С. В. Бирюков, Р. К. Романовский // Омский научный вестник. – 2012. – № 2. – С. 215–218.

11. Евдокимов, С.А. Анализ и синтез вентильных преобразователей для электрического транспорта: дис. ... канд. техн. наук: 05.09.03 / Евдокимов Сергей Александрович. – Новосибирск, 2008. – 246 с.

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

13. Железко Ю. С. О нормативных документах в области качества электроэнергии и условий потребления реактивной мощности // Электрические станции. 2002. № 6. С. 18-24.

14. Железко Ю. С. Новые нормативные документы, определяющие взаимоотношения сетевых организаций и покупателей электроэнергии в части условий потребления реактивной мощности // Электрические станции. 2008. №5. С. 27-31.

15. Жемеров, Г. Г. Расчет параметров емкостного накопителя энергии компенсатора пульсаций мгновенной активной мощности / Г. Г. Жемеров, О. В. Ильина // Электричество. – 2008. – № 1. – С. 54–59.

16. Жемеров, Г. Г. Теория мощности Фризе и современные теории мощности / Г. Г. Жемеров, О. В. Ильина // Електротехніка і Електромеханіка. – 2007. – № 7. – С. 63–66.

17. Зайцев, А.И. Средства компенсации реактивной мощности общепромышленных систем энергетики / А.И. Зайцев, А.С. Плехов // Электротехнические комплексы и системы управления, 2008. №3. – С. 2-7.

18. Зиновьев, Г. С. Вентильные компенсаторы реактивной мощности, мощности искажений и мощности несимметрии на базе инвертора напряжения / Г. С. Зиновьев // Современные задачи преобразовательной техники. – Киев : Изд-во ИЭД АН УССР, 1975. – Ч. 2. – С. 247–252.

19. Зиновьев, Г. С. Основы силовой электроники : учеб. пособие / Г. С. Зиновьев. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2009. – 672 с. – (Учебники НГТУ).
20. Ивакин, В. Н. Перспективы применения силовой преобразовательной техники в электроэнергетике / В. Н. Ивакин // Электротехника. – 2005. – № 12. – С. 10–19.
21. Карташев, И.И. Статические компенсаторы реактивной мощности в энергосистемах / И.И. Карташев, В. И. Чехов. – М.: Изд-во МЭИ, 1990. – 68с.
22. Касаткин, А. С. Электротехника : учеб. пособие для вузов / А. С. Касаткин, М. В. Немов. – Москва : Энергоатомиздат, 1983. – 440 с.
23. Кирюхин, А. Ю. Гибридный фильтр высших гармоник для трехфазных сетей переменного тока 0,4 кВ / А. Ю. Кирюхин, И. Г. Буре // Электротехника. – 2008. – № 5. – С. 37–41.
24. Киселев, М. Г. Анализ режимов работы статического компенсатора реактивной мощности в режиме симметрирования нагрузки / М. Г. Киселев, Ю. К. Розанов // Электричество. – 2012. – № 3. – С. 63–69.
25. Коваль, А. А. Система управления активным параллельным фильтром электроэнергии, адаптированная к электроприводу постоянного тока Система управления активным параллельным фильтром электроэнергии, адаптированная к электроприводу постоянного тока : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.09.03 / А. А. Коваль ; Липецк. гос. техн. ун-т. – Липецк, 2006. – 18 с.
26. Костин, В. Н. Оптимизационные задачи электроэнергетики: Учеб. пособие. – СПб.: СЗТУ, 2003. – 120 с.
27. Кошелев, К. С. Выбор параметров статического компенсатора реактивной мощности СТАТКОМ / К. С. Кошелев, М. В. Пешков // Электротехника. – 2008. – № 7. – С. 34–37.
28. Кувшинов, А. А. Гармонический анализ мгновенной мощности пассивного двухполюсника / А. А. Кувшинов // Электричество. – 2013. – № 3. – С. 54–59.

29. Кудрин, Б. И. Электроснабжение промышленных предприятий [Текст] : учеб. для студентов высших учебных заведений / Б. И. Кудрин. – М. : Интермет Инжиниринг, 2006. – 672 с

30. Кузнецов А. В., Евстифеев И. В. О государственном управлении процессом компенсации реактивной мощности // Электрика. 2008. № 3. С. 912.

31. Лотов А.В., Поспелова И.И. Многокритериальные задачи принятия решений: Учебное пособие. – М.: МАКС Пресс, 2008.–197 с.

32. Люতারевич, А. Г. Оценка эффективности использования активного фильтра гармоник в системах электроснабжения / А. Г. Люতারевич, С. Ю. Долингер // Омский научный вестник. – 2010. – № 1. – С. 133–136.

33. Математические основы теории автоматического регулирования : учеб. пособие : в 3 т. / В. А. Иванов, В. С. Медведев, Б. К. Чемоданов, А. С. Ющенко ; под ред. Б. К. Чемоданова. – Москва : Изд-во МГТУ им. Баумана, 2006. – Т. 1. – 552 с.

34. Мельников М.А. Электроснабжение промышленных предприятий: Учеб. пособие. – Томск: Изд-во ТПУ, 2000. – 144с.

35. Методы оптимизации режимов энергосистем / В. М. Горнштейн, Б. П. Мирошниченко, А. В. Пономарев и др.; под ред. В. М. Горнштейна. М.: Энергия, 1981. 336 с.

36. Мещеряков, В. Н. Компенсация гармонических искажений и реактивной мощности в однофазных электрических сетях посредством параллельного активного фильтра электроэнергии на базе релейного регулятора / В. Н. Мещеряков, М. М. Хабибулин // Известия вузов. Электромеханика. – 2013. – № 4. – С. 54–57.

37. Нос, О. В. Методы анализа и синтеза трехфазных систем с активными силовыми фильтрами в гиперкомплексном пространстве: дис. ... докт. техн. наук: 05.09.03 [текст] / Нос Олег Викторович. – Новосибирск, 2015. – 385 с.

38. Нос, О. В. Алгоритм управления выходными токами активного силового фильтра с использованием гиперкомплексных чисел / О. В. Нос, В. В. Панкратов // Известия вузов. Электромеханика. – 2012. – № 6. – С. 33–39.

39. Нос, О. В. Алгоритм управления напряжением звена постоянного тока активного силового фильтра / О. В. Нос, В. В. Панкратов, К. А. Шалыгин // Электротехника. – 2013. – № 12. – С. 36–40.

40. Нос, О. В. Алгоритмы компенсации мгновенной неактивной мощности с использованием p - q и p - q - r теорий / О. В. Нос // Актуальные проблемы электронного приборостроения (АПЭП-2014) = Actual problems of electronic instrument engineering (APEIE-2014) : тр. 12 междунар. конф. АПЭП-2014, Новоси-бирск, 2–4 окт. 2014 г. : в 7 т. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2014. – Т. 7. – С. 166–170.

41. Нос, О. В. Алгоритмы управления последовательно-параллельными активными силовыми фильтрами / О. В. Нос, Е. С. Кучер, А. В. Бакляк // Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации. – 2015. – №2 (27). – С. 77–87.

42. Нос, О. В. Система управления силовыми токами компенсации мгновенной неэффективной мощности / О. В. Нос, С. А. Харитонов // Электротехника. – 2015. – № 2. – С. 28–34.

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

44. Петров А.А., Логутенко Н.С. Компенсация реактивной мощности на метрополитене // материалы 54-й Международной научной студенческой конференции МНСК-2016: Электротехнические комплексы и системы. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2016.–с. 24.

45. 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.

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

47. Петров А.А., Щуров Н.И., Штанг А.А. Повышение качества электроэнергии метрополитена // Доклады академии наук высшей школы Российской Федерации. – Новосибирск: Новосибирский государственный технический университет. – 2016, № 4 (33). – С. 80-87

48. Поднебесная, С. К. Силовой параллельный активный фильтр с повышенной эффективностью / С. К. Поднебесная, Бурлака В. В., Гулаков С. В. // Электротехника. – 2013. – № 6. – С. 15–20.

49. Поспелов, Г. Е. Компенсирующие и регулирующие устройства в электрических системах [Текст] / Г. Е. Поспелов, Н. М. Сыч, В. Т. Федин. – Л. : Энергоатомиздат, 1983. – 112 с

50. Правила устройства электроустановок [Текст] : утв. М-вом энергетики Рос. Федерации 08.07.02. – 6-е и 7-е изд. (все действующие разделы). – Новосибирск : Сиб. унив. изд-во, 2009. – 853 с.

51. Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей [Текст] : утв. М-вом энергетики Рос. Федерации 13.01.03. – Новосибирск : Сиб. унив. изд-во, 2008. – 252 с.

52. Применение гибридных фильтров для улучшения качества электроэнергии / Г. М. Мустафа, А. Ю. Кутейникова, Ю. К. Розанов, И. В. Иванов // Электричество. – 1995. – № 10. – С. 33–39.

53. Птицина, Е. В. Влияние на электрическую сеть электротехнологических установок с питанием током сложной формы / Е. В. Птицина // Электротехника. – 2008. – № 1. – С. 11–15.

54. Радкевич В.Н. Расчет компенсации реактивной мощности в электротехнических сетях промышленных предприятий: Учебно-метод. пособие / В.Н. Радкевич .– Мн.: БНТУ, 2004.–40с.

55. Регулируемые источники реактивной мощности с управляемыми подмагничиванием шунтирующими реакторами и батареями конденсаторов / А. М. Брянцев, М. А. Брянцев, С. В. Дягилева, Р. Р. Карымов, А. И. Лурье, Е. Е. Маклецова, А. А. Негрышев // Электротехника. – 2010. – № 4. – С. 11–19.

56. Розанов, Ю. К. Гибридные фильтры для снижения несинусоидальности тока и напряжения в системах электроснабжения / Ю. К. Розанов, Р. П. Гринберг // Электротехника. – 2006. – № 10. – С. 55–60.

57. Розанов, Ю. К. Современные методы регулирования качество электроэнергии средствами силовой электроники / Ю. К. Розанов, М. В. Рябчицкий, А. А. Кваснюк // Электротехника. – 1999. – № 4. – С. 28–32.

58. Сазонов, В. В. Кондиционеры сети на основе активных фильтров / В. В. Сазонов // Электротехника. – 2007. – № 5. – С. 28–34.

59. Ситников, В. Ф. Силовая электроника в системах электроснабжения переменного тока / В. Ф. Ситников // Электричество. – 2008. – № 2. – С. 33–38.

60. Сопов, В.И. Моделирование электротранспортных систем – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2004 – 43с.

61. Справочник по энергоснабжению и электрооборудованию промышленных предприятий и общественных зданий [Текст] / Под общ. ред. С. И. Гамазина, Б. И. Кудрина, С. А. Цырука. – М. : Издательский дом МЭИ, 2010. – 745 с.

62. Стрикос, Д. Анализ и исследование нового класса силовых фильтров для трехфазных промышленных сетей 380 В : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.09.03 / Д. Стрикос. – Москва : Изд-во МЭИ, 2000. – 20 с.

63. Темербаев, С. А. Гибридные фильтрокомпенсирующие устройства для управления качеством электроэнергии в распределительных сетях : автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.14.02 / С. А. Темербаев. – Красноярск : Изд-во СФУ, 2013. – 20 с.

64. Троицкий, А. И. Применение конденсаторов для компенсации реактивной мощности и улучшения качества электроэнергии / А. И.

Троицкий, А. Ю. Афанасьев // Известия вузов. Электромеханика. – 2005. – № 5. – С. 33–37.

65. Тюхтина А.А. Методы дискретной оптимизации: Часть 1: Учебно-методическое пособие. – Нижний Новгород: Нижегородский госуниверситет, 2014. – 62 с.

66. Федеральный закон от 23.11.2009 N 261-ФЗ (ред. от 13.07.2015) "Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации"

67. Цицикян, Г. Н. Об оценке несимметрии напряжений в трехфазных системах электроснабжения / Г. Н. Цицикян, Г. З. Зайцев // Электричество. – 1999. – № 5. – С. 13–17.

68. Шакарян, Ю. Г. Управляемые (гибкие) системы передачи переменного тока [Текст] / Ю. Г. Шакарян. – М. : ВНИИЭ, 2005. – 41 с.

69. Щербак, Я. В. Анализ работы комбинированного активного фильтра последовательного типа с селективными звеньями для тяговой подстанции постоянного тока / Я. В. Щербак, Ю. А. Семенов // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. Т. 59, № 5 (2016), с. 418–426.

70. Электроснабжение метрополитенов. Устройство, эксплуатация и проектирование. Под ред. Е. И. Быкова. М., «Транспорт», 1977. 431 с.

71. Электроснабжение метрополитенов. Под ред. Туманова В.А. М.: 1957. - 100 с.

72. Энергетика XXI века: системы энергетики и управление ими / С. В. Подковальников, С. М. Сендеров, В. А. Стенников и др.; под ред. Н. И. Воропая. Новосибирск: Наука, 2004. 364 с.

73. Энергетика России: проблемы и перспективы. Труды научной сессии Российской академии наук / под ред. В. Е. Фортова, Ю. Г. Леонова; РАН. М.: Наука, 2006. 499 с.

74. Энергетическая стратегия России на период до 2030 года [Электронный ресурс]. Утверждена 13.11.2009 г. URL: <https://minenergo.gov.ru/node/1026> (дата обращения: 06.03.2019).

75. A new control strategy of UPQC in three-phase four-wire system / T. Zhili, L. Xun, C. Jian, K. Yong, Z. Yang // IEEE 38 annual power electronics specialists conference, PESC07 : [proc.], USA, Orlando, 17–21 June 2007. – IEEE Press, 2007. – P. 1060–1065.

76. A novel control algorithm for static series compensators by use of pqr instantaneous power theory / S.-J. Lee, H. Kim, S.-K. Sul, F. Blaabjerg // IEEE Transactions on Power Electronics. – 2004. – Vol. 19, № 3. – P. 814–827.

77. A practical comparative evaluation of different active harmonic filter [Electronic resource] / P. Salmerón, S. P. Litrán, R. S. Herrera, J. R. Vázquez // International conference on renewable energy and power quality (ICREPQ'11), Spain, Las Palmas de Gran Canaria 13–15 Apr. 2011. – [Spain], 2011. – 6 p. – Mode of access: <http://icrepq.com/icrepq'11/230-salmeron.pdf>. – Title from screen.

78. Active power filter: review of converter topologies and control strategies / L. Saribulut, A. Teke, M. E. Meral, M. Tumay // Gazi University Journal of Science. – 2011. – Vol. 24, № 2. – P. 283–289.

79. Afonso, J. L. P-q theory power components calculations / J. L. Afonso, M. J. Sepulveda Freitas, J. S. Martins // IEEE international symposium on industrial electronics, ISIE 2003, Brazil, Rio de Janeiro, 9–11 June 2003 : [proceedings]. – IEEE Press, 2003. – Vol. 1. – P. 385–390.

80. Akagi, H. Active harmonic filters / H. Akagi // Proceedings of the IEEE. – 2005. – Vol. 93, № 12. – P. 2128–2141.

81. Akagi, H. Control strategy of active power filters using multiple voltage-source PWM converters / H. Akagi, A. Nabae, S. Atoh // IEEE Transactions on Industry Applications. – 1986. – Vol. IA-22, № 3. – P. 460–465.

82. Akagi, H. Generalized theory of the instantaneous reactive power and its application / H. Akagi, Y. Kanazawa, A. Nabae // Transactions of the Institute of Electrical Engineers of Japan. – 1983. – Vol. 103-B, № 7. – P. 483–490.

83. Akagi, H. Instantaneous power theory and applications to power conditioning / H. Akagi, E. H. Watanabe, M. Aredes. – 2 ed. – Wiley : IEEE Press, 2007. – 379 p.

84. Akagi, H. Instantaneous reactive power compensator comprising switching devices without energy storage components / H. Akagi, Y. Kanazawa, A. Nabae // IEEE Transactions on Industry Applications. – 1984. – Vol. IA-20, № 3. – P. 625–630.

85. Akagi, H. New trends in active power filters for power conditioning / H. Akagi // IEEE Transactions on Industry Applications. – 1996. – Vol. 32, № 6. – P. 1312–1322.

86. Akagi, H. The theory of instantaneous power in three-phase four-wire systems: a comprehensive approach / H. Akagi, S. Ogasawara, H. Kim // IEEE industry applications conference : Thirty-fourth IAS annual meeting, USA, 3–7 Oct. 1999 : [proc.]. – Piscataway : IEEE Press, 1999. – Vol. 1. – P. 431–439.

87. Aredes, M. New control algorithms for series and shunt three phase four-wire active power filters / M. Aredes, E. H. Watanabe // IEEE Transactions on Power Delivery. – 1995. – Vol. 10, № 3. – P. 1649–1656.

88. Cividino, L. Power factor, harmonics distortion; causes, effects and considerations / L. Cividino // Fourteenth international telecommunications energy conference, INTELEC '92 : [proc.], USA, Washington, 4–8 Oct. 1992. – IEEE Press, 1992. – P. 506–513.

89. Czarnecki, L. S. On some misinterpretations of the instantaneous reactive power p-q theory / L. S. Czarnecki // IEEE Transactions on Power Electronics. – 2004. – Vol. 19, № 3. – P. 828–836.

90. Diseño y realización de un acondicionador activo de potencia para compensación estática de cargas no lineales [Electronic resource] / A. Pérez, J. Prieto, P. Salmerón, J. R. Vázquez // 12 Reunión de Grupos de Investigación en Ingeniería Eléctrica, 12 RGIIE, Córdoba, España, 2002. – [España], 2002. – 5 p. – Mode of access: http://www.uhu.es/geyer/Congresos_nac/congresos%20nacionales/CN_13.pdf. – Title from screen.

91. Duesterhoeft, W. C. Determination of instantaneous currents and voltages by means of alpha, beta, and zero components / W. C. Duesterhoeft, M. W. Schulz, E. Clarke // Transactions of the American Institute of Electrical Engineers. – 1951. – Vol. 70, № 2. – P. 1248–1255.

92. European Norm EN 50160 Voltage characteristics of electricity supplied by public distribution systems // European Committee for Electrotechnical Standardization CENELEC, Brussels, Belgium. – 3 ed. – Belgium, 2003. – 20 p.

93. Ferrero, A. A new approach to the definition of power components in three-phase systems under nonsinusoidal conditions / A. Ferrero, G. Superti Furga // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. – 1991. – Vol. 40, № 3. – P. 568–577.

94. Ferrero, A. Measuring electric power quality: problems and perspectives / A. Ferrero // Measurement. – 2008. – Vol. 41, № 2. – P. 121–129.

95. Fryze, S. Wirk-, blind-, und scheinleistung in elektrischen stromkreisen mit nicht-sinusformigem verlauf von strom und spannung / S. Fryze // Elektrotechnische Zeitschrift. – 1932. – Vol. 53, № 25. – P. 596–599.

96. Fryze, S. Wirk-, blind-, und scheinleistung in elektrischen stromkreisen mit nicht-sinusformigem verlauf von strom und spannung / S. Fryze // Elektrotechnische Zeitschrift. – 1932. – Vol. 53, № 26. – P. 625–627.

97. Fryze, S. Wirk-, blind-, und scheinleistung in elektrischen stromkreisen mit nicht-sinusformigem verlauf von strom und spannung / S. Fryze // Elektrotechnische Zeitschrift. – 1932. – Vol. 53, № 29. – P. 700–702.

98. Herrera, R. S. Instantaneous reactive power theory applied to active power filter compensation: different approaches, assessment, and experimental results / R. S. Herrera, P. Salmerón, H. Kim // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2008. – Vol. 55, № 1. – P. 184–196.

99. Herrera, R. S. Instantaneous reactive power theory: a reference in the nonlinear loads compensation / R. S. Herrera, P. Salmerón // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2009. – Vol. 56, № 6. – P. 2015–2022.

100. Herrera, R. S. Nuevas propuestas en la teoría de la potencia reactiva instantánea: aplicación a la compensación de cargas industriales con filtros activos de potencia : tesis doctoral / R. S. Herrera ; Univ. de Huelva. – Huelva, 2007. – 284 p.

101. Hingorani, N. G. High power electronics and flexible ac transmission systems / N. G. Hingorani // IEEE Power Engineering Review. – 1988. – Vol. 8, № 7. – P. 3–4.

102. Hybrid active filter for reactive and harmonics compensation in a distribution network / V. F. Corasaniti, M. B. Barbieri, P. L. Arnera M. I. Valla // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2009. – Vol. 56, № 3. – P. 670–677.

103. Hybrid filters for power quality improvement / B. Singh, V. Verma, A. Chandra, K. Al-Haddad // IEE Proceedings – Generation, Transmission and Distribution. – 2005. – Vol. 152, № 3. – P. 365–378.

104. Instantaneous power compensation in three-phase systems by using p–q–r theory / H. Kim, F. Blaabjerg, D. Bak-Jensen, J. Choi // The IEEE 32 annual power electronics specialists conference, PESC 2001, Canada, Vancouver, 17–21 Jun. 2001. – Hong Kong : IEEE Press, 2001. – Vol. 2. – P. 478–485.

105. Instantaneous power compensation in three-phase systems by using p–q–r theory / H. Kim, F. Blaabjerg, D. Bak-Jensen, J. Choi // IEEE Transactions on Power Electronics. – 2002. – Vol. 17, № 5. – P. 701–710.

106. Kim, H. The instantaneous power theory on the rotating p-q-r reference frames // H. Kim, H. Akagi // Proceedings of the IEEE 1999 international conference on power electronics and drive systems, PEDS'99, Hong Kong, 27–29 July 1999. – Hong Kong : IEEE Press, 1999. – Vol. 1. – P. 422–427.

107. Montañó, J. C. Analysis of power losses for instantaneous compensation of three-phase four-wire systems / J. C. Montañó, P. Salmerón, J. Prieto // IEEE Transactions on Power Electronics. – 2005. – Vol. 20, № 4. – P. 901–904.

108. Nabae, A. An instantaneous distortion current compensator without any coordinate transformation / A. Nabae, H. Nakano, S. Togasawa // International Power Electronic Conference, IPEC'95 : proc., Japan, Yokohama, 3–7 Apr. 1995. – Yokohama, 1995. – P. 1651–1655.

109. Nasiri, A. Series-parallel active filter/uninterruptible power supply system / A. Nasiri, A. E. Amac, A. Emadi // Electric power components and systems. – 2004. – Vol. 32, № 11. – P. 1151–1163.

110. Ng, F. Analysis and control of UPQC and its DC-link power by use of p-q-r instantaneous power theory / F. Ng, M.-C. Wong, Y.-D. Han // The 1 international conference on power electronics systems and applications: proc., Hong Kong, 9–11 Nov., 2004. – Hong Kong, 2004. – P. 43–53.

111. On the meaning of the park power components in three-phase systems under non-sinusoidal conditions / A. Ferrero, A. P. Morando, R. Ottoboni, G. Superti Furga // European Transactions on Electrical Power. – 1993. – Vol. 3, № 1. – P. 33–43.

112. Park, R. H. Two-reaction theory of synchronous machines / R. H. Park // Transactions of the American Institute of Electrical Engineers. – 1929. – Vol. 48, № 3. – P. 716–727.

113. Peng, F. Z. Harmonic and reactive power compensation based on the generalized instantaneous reactive power theory for three-phase four-wire systems / F. Z. Peng, G. W. Ott, Jr., D. J. Adams // IEEE Transactions on Power Electronics. – 1998. – Vol. 13, № 6. – P. 1174–1181.

114. 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.

115. 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

116. 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

117. 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

118. PI controlled three-phase shunt active power filter for power quality improvement / A. Chaoui, J. P. Gaubert, F. Krim, G. Champenois // Electric Power Components and Systems. – 2007. – Vol. 35, № 12. – P. 1331–1344.

119. Practical application of the instantaneous power theory in the compensation of four-wire three-phase systems / P. Salmerón, J. C. Montaña, J. R. Vázquez, J. Prieto, A. Pérez // The 28 annual conference of the IEEE industrial electronics society IECON – 2002, Spain, Sevilla, 5–8 Nov. 2002. – IEEE Press, 2002. – Vol. 1. – P. 650–655.

120. Salmerón, P. A new approach for three-phase loads compensation based on the instantaneous reactive power theory / P. Salmerón, R. S. Herrera, J. R. Vázquez // Electric Power Systems Research. – 2008. – Vol. 78, № 4. – P. 605–617.

121. Salmerón, P. Instantaneous power components in polyphase systems under nonsinusoidal conditions / P. Salmerón, J. C. Montaña // IEE Proceedings – Science, Measurement and Technology. – 1996. – Vol. 143, № 2. – P. 151–155.

122. Shunt active filter for power quality improvement / J. L. Afonso, M. Aredes, E. H. Watanabe, J. S. Martins // Electricity for a sustainable urban development : proc., the intern. conf., UIE 2000, Portugal, Lisboa, 1–4 Nov. 2000. – Lisboa, 2000. – P. 683–691.

123. Soares, V. Active power filter control circuit based on the instantaneous active and reactive current i_d - i_q method / V. Soares, P. Verdelho, G. D. Marques // The 28 annual IEEE power electronics specialists conference, PESC'97 Record, USA, 1997. – IEEE Press, 1997. – Vol. 2. – P. 1096–1101.

124. Soares, V. An instantaneous active and reactive current component method for active filters / V. Soares, P. Verdelho, G. D. Marques // IEEE Transactions on Power Electronics. – 2000. – Vol. 15, № 4. – P. 660–669.

125. Three-phase active power filter with integrator-proportional control / M. Sarra, K. Djazia, A. Chaoui, F. Krim // Journal of electrical systems. – 2009. – Vol. 5, № 1 suppl. – P. 79–84.

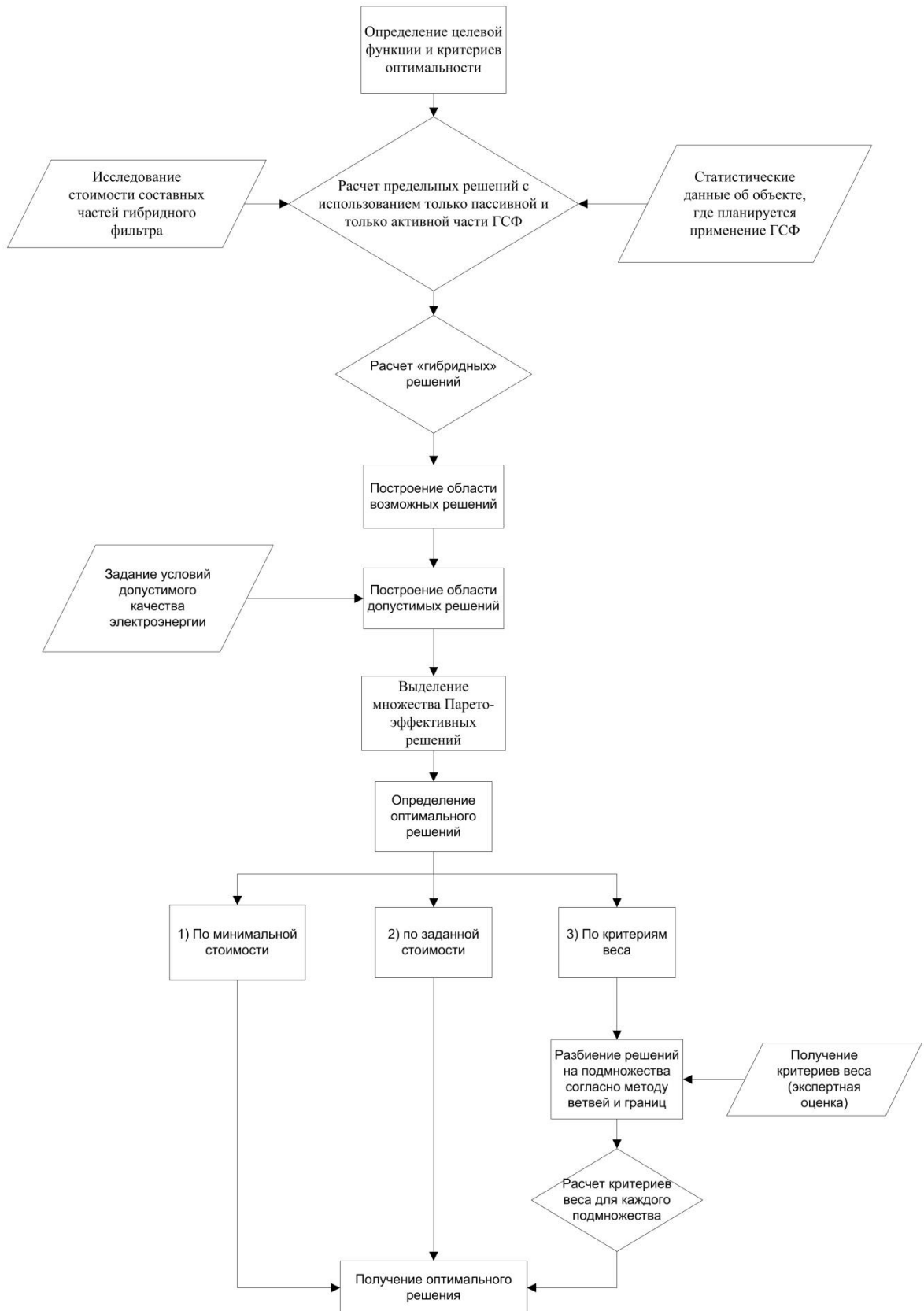
126. Watanabe, E. H. New concepts of instantaneous active and reactive powers in electrical systems with generic loads / E. H. Watanabe, R. M. Stephan, M. Aredes // IEEE Transactions on Power Delivery. – 1993. – Vol. 8, № 2. – P. 697–703.

127. Руководство пользователя анализатора Iovato [Электронный ресурс]. URL: http://www.iovatoelectric.com/Download/I104GBRU06_02.pdf (дата обращения: 06.03.2019).

128. Разработка микропроцессорной системы управления усовершенствованным зонным выпрямителем лестничного типа / А.В. Капустин, И.К. Алексеева, В.В. Иванов, С.В. Мятеж // Доклады АН ВШ РФ. – 2017. – № 4 (37). – С. 70–79. doi: 10.17212/1727-2769-2017-4-70-79

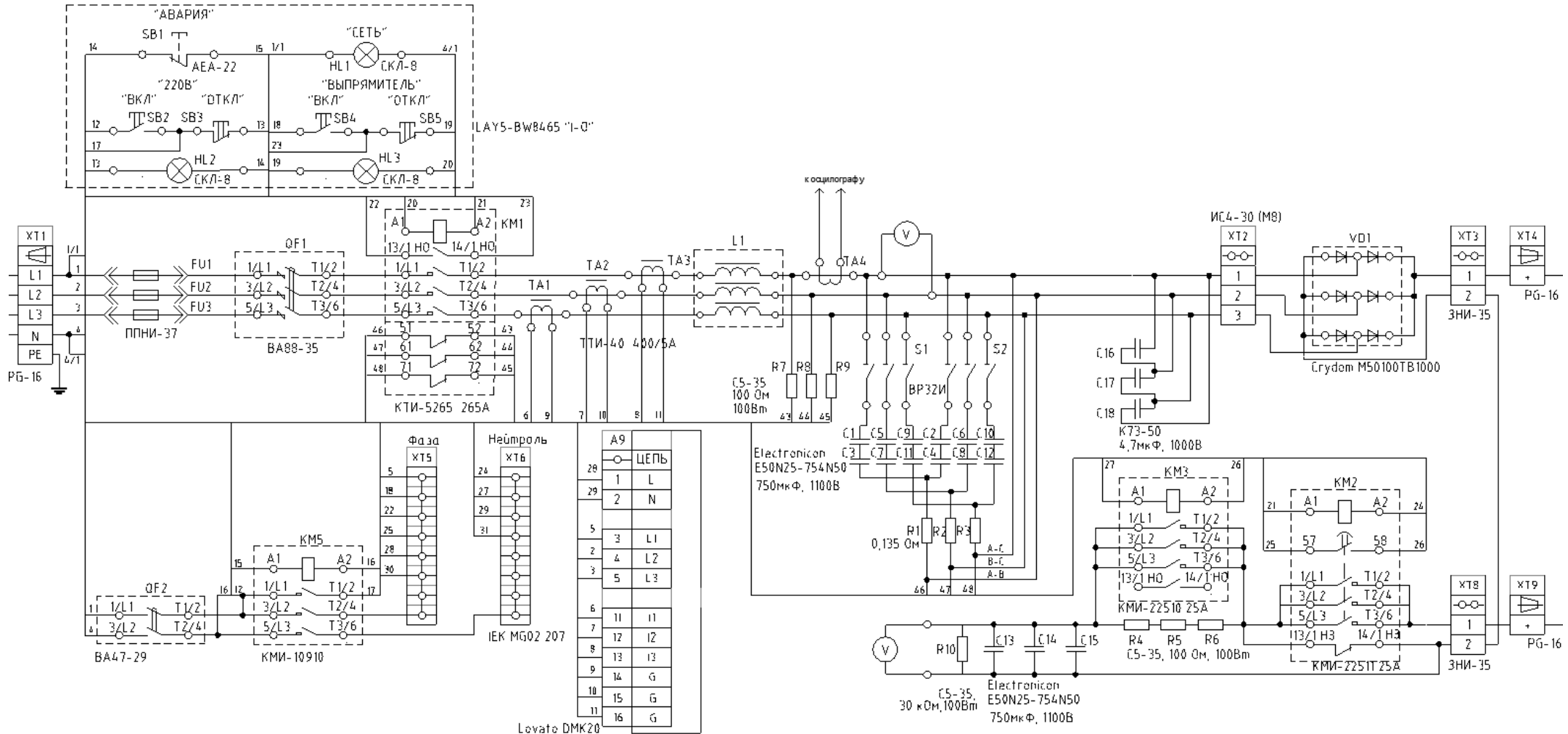
ПРИЛОЖЕНИЕ А

Блок-схема методики расчёта мощностей активной и пассивной частей
гибридного силового фильтра



ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Принципиальная электрическая схема нагрузочной установки



ПРИЛОЖЕНИЕ В

Акты внедрения научных результатов диссертации



Российская Федерация
Мэрия города Новосибирска
Муниципальное унитарное
предприятие
города Новосибирска
"Новосибирская энергосетевая
компания"
МУП «НЭСКО»
юр. адрес: 630004, г. Новосибирск,
ул. Планетная, 55
т/факс.279-07-84
ИНН 5406018054
e-mail: info-nesk@mail.ru

180719 № 444

На _____ от _____

АКТ

**об использовании результатов диссертационной работы Петрова А.А.
«Методы и средства повышения качества электроэнергии в системе
метрополитена» в энергохозяйстве МУП «НЭСКО»**

Настоящим актом подтверждается, что основные результаты диссертационного исследования, выполненного Петровым Андреем Александровичем, используются в МУП «НЭСКО» (Новосибирская энергосетевая компания) для расчетов оптимальной компенсации реактивной мощности и мощности нелинейных искажений.

В частности, по результатам анализа методов и средств повышения качества электроэнергии, для подстанций МКП «ГЭТ» (ГорЭлектроТранспорт) рассчитаны энергетические показатели устройств компенсации реактивной мощности.

При этом установлено, что оптимизация работы устройств повышения качества электроэнергии, поспособствовала не только повышению коэффициента мощности подстанций, но и снижению начальной стоимости фильтрокомпенсирующих устройств.

И.о. директора МУП «НЭСКО»

С.В. Куклин



Муниципальное
унитарное
предприятие
г.Новосибирска

«НОВОСИБИРСКИЙ
МЕТРОПОЛИТЕН»

Служба
электроснабжения

22.07.19 № 21-09/229.

На № _____

от _____

630099 г.Новосибирск,
ул. Серебрянижковская, 34

АКТ

об использовании результатов диссертационной работы Петрова А.А.
«Методы и средства повышения качества электроэнергии в системе
метрополитена» в энергохозяйстве МУП «Новосибирский метрополитен»

Настоящим актом подтверждается, что основные результаты диссертационного исследования, выполненного Петровым Андреем Александровичем в ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет», использованы в электроустановках МУП «Новосибирский метрополитен».

Предложены методики определения мощностей активной и пассивной частей гибридного силового фильтра, выполнены расчеты фильтрокомпенсирующих устройств для подстанций СТП-4 (Площадь Ленина), СТП-8 (Студенческая).

Использование активных силовых фильтров позволит снизить потребляемую мощность электроустановок вследствие компенсации реактивной мощности и нелинейных искажений в системе электроснабжения метрополитена, и повысить надежность работы систем автоматики, управления и контроля пассажирских перевозок.

Начальник службы электроснабжения



А.В. Ридный