

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования

«Южно-Уральский государственный университет»
(национальный исследовательский университет)

Политехнический институт
Факультет «Энергетический»

Кафедра «Электрические станции, сети и системы электроснабжения»

РАБОТА ПРОВЕРЕНА
Рецензент

_____ Сагаконь А.В.
«___» _____ 2019 г.

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ
Заведующая кафедрой ЭССиСЭ

_____ И.М. Кирпичникова
«___» _____ 2019 г.

ОПТИМИЗАЦИЯ РАЗМЕЩЕНИЯ АКТИВНЫХ ФИЛЬТРОВ В СИСТЕМЕ
ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА
К ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЕ
ЮУрГУ – 13.04.02.2019.178.00.00 ПЗ ВКР

Руководитель ВКР
Доцент, к.т.н

_____ М.А. Дзюба
«___» _____ 2019 г.

Автор ВКР
Студент группы П–285

_____ А.Д. Карташов
«___» _____ 2019 г.

Нормоконтролер

_____ М.А. Дзюба
«___» _____ 2019 г.

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«Южно-Уральский государственный университет»
(национальный исследовательский университет)
Политехнический институт
Факультет «Энергетический»
Кафедра «Электрические станции, сети и системы электроснабжения»
Направление 13.04.02 – «Электроэнергетика и электротехника»
Магистерская программа «Оптимизация развивающихся систем электроснабжения»

УТВЕРЖДАЮ
Заведующий кафедрой ЭССиСЭ
д.н.т., профессор

_____ И.М. Кирпичникова
« 15 » декабря 2018 г.

ЗАДАНИЕ

На выпускную квалификационную работу студента
Карташова Андрея Дмитриевича
Группы П-285

1. Тема работы: «Оптимизация размещения активных фильтров в системе электроснабжения потребителей»

Утверждена приказом ректора ЮУрГУ от _____

Срок сдачи студентом законченной работы 01.06.2019 г.

2 Исходные данные к работе – модель трехфазного активного фильтра

3 Перечень вопросов, подлежащих разработке

1 Введение

2 Потери электроэнергии и проблемы, возникающие из-за гармоник

3 Разработка моделей СЭС с активным фильтром

4 Оценка эффективности работы СЭС с активным фильтром в различных точках

5 Анализ результатов

6 Заключение

4 Дата выдачи задания _____

Научный руководитель _____ / М.А. Дзюба /

Задание принял к исполнению _____ / А.Д. Карташов /

КАЛЕНДАРНЫЙ ПЛАН

Наименование этапов выпускной квалификационной работы (проекта)	Срок выполнения этапов работы (проекта)	Отметка о выполнении руководителя
Сбор исходных данных.	13.03.2018	
Постановка задачи работы	22.05.2018	
Обзор моделей, необходимых для разработки	15.10.2018	
Расчет параметров активного фильтра	10.11.2018	
Выбор трансформатора для СЭС	15.12.2018	
Выбор КЛ для СЭС	10.03.2019	
Оформление пояснительной записки. Оформление графической части	18.05.2019	
Сдача готовой работы на кафедру, предоставление работы на рецензию	01.06.2019	

Заведующая кафедрой ЭССиСЭ _____ / И.М. Кирпичникова /

Научный руководитель работы _____ / М.А. Дзюба /

Магистрант _____ / А.Д. Карташов /

АННОТАЦИЯ

Карташов А.Д. Оптимизация размещения активных фильтров в системе электроснабжения. – Челябинск: ЮУрГУ, Энергетический, 2019, 46 страниц, 12 иллюстраций, 19 таблиц; библиогр.список – 11 наименований, 3 приложения, 4 листа чертежей ф. А1.

В выпускной квалификационной работе предложены несколько вариантов размещения активного фильтра в системе электроснабжения.

Целью проекта является выбор оптимальной точки размещения активного фильтра, путем сравнения коэффициента нелинейных искажений для каждого из вариантов.

Актуальностью работы является изучение пользы работы активного фильтра в зависимости от его размещения в СЭС.

Выпускная квалификационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, библиографического списка и графической части.

Областью применения данной задачи является СЭС с нелинейными электроприемниками, которые выделяют гармоники в сеть.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
1 ПОТЕРИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ И ПРОБЛЕМЫ, ВОЗНИКАЮЩИЕ ИЗ-ЗА ВЫСШИХ ГАРМОНИК	5
1.1 Обзор литературы и актуальность работы	5
1.2 Выбор направления исследования	6
1.3 Классификация шунтирующих активных фильтров	8
1.4 Преимущества и недостатки активных фильтров	14
1.5 Параметры и стоимость активных фильтров	14
Выводы по разделу 1	16
2 РАЗРАБОТКА МОДЕЛЕЙ СЭС С АКТИВНЫМ ФИЛЬТРОМ	17
2.1 Описание трехфазного активного фильтра с релейно-векторной системой управления	17
2.2 Исходные данные для исследуемой модели с активным фильтром	20
2.3 Расчет составляющих мощностей и силовых элементов трехфазной активно-индуктивной нагрузки	22
2.4 Расчет составляющих мощностей и силовых элементов реверсивного электропривода постоянного тока	22
2.5 Расчет составляющих мощностей и силовых элементов частотно-регулируемого асинхронного электропривода	24
2.6 Расчет суммарной пассивной мощности всех нагрузок переменного тока	27
2.7 Расчет параметров источника электроснабжения	27
2.8 Расчет параметров и выбор реактора на входе активного фильтра	28
2.8.1 Расчет параметров активного фильтра на стороне 0,4 кВ	28
2.8.2 Расчет параметров активного фильтра на стороне 6 кВ трансформатора	30
2.9 Выбор конденсаторов постоянного тока и силовых ключей активного фильтра	31
2.9.1 Расчет конденсаторов постоянного тока для напряжения 0,4 кВ	31
2.9.2 Расчет конденсаторов постоянного тока для напряжения 6 кВ	33

2.10 Расчет параметров пассивного фильтра высших гармоник на входе активного фильтра	33
2.10.1 Расчет параметров пассивного фильтра на стороне 0,4 кВ	33
2.10.2 Расчет параметров пассивного фильтра на стороне 6 кВ	35
2.11 Расчет основных параметров системы управления активного фильтра	35
2.11.1 Расчет основных параметров системы управления активного фильтра на стороне 0,4 кВ	35
2.11.2 Расчет основных параметров системы управления активного фильтра на стороне 6 кВ	36
Выводы по разделу 2	37
3 ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ СЭС С АКТИВНЫМ ФИЛЬТРОМ В РАЗЛИЧНЫХ ТОЧКАХ	38
3.1 Расчет кабельных линий и трансформатора для СЭС	38
3.2 Работа активного фильтра только с тиристорным преобразователем	40
3.3 Работа активного фильтра совместно со всеми нагрузками при работе преобразователей в номинальных условиях	41
3.4 Работа активного фильтра на шинах ВН трансформатора	42
Выводы по разделу 3	43
4 АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ	44
4.1 Рекомендации по определению места подключения активного фильтра	44
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	45
Библиографический список	46

ВВЕДЕНИЕ

С каждым днем электрические сети совершенствуются и развиваются. Электрическое оборудование заменяется на более современное, обеспечивающие меньшие потери электроэнергии, повышая качество электроэнергии в сети, но в сети продолжают присутствовать гармонические составляющие, оказывающие влияние на сеть, вызывающие резонансы и выход из строя оборудования.

В современной энергетике используются «гибкие» (управляемые) линии электропередач переменного тока (FACTS), и в качестве основных устройств данной технологии используются активные и гибридные фильтры высших гармоник. [1]

Актуальной проблемой не только для российских электрических сетей, но и для мировой энергетике является проблема повышения качества электроэнергии. Исходя из этого разрабатываются планы, способы внедрения устройств силовой электроники, которыми в частности и являются активные фильтры.

Так как в сети присутствуют гармоники токов и напряжения то применяются все более новые типы устройств наряду с пассивным фильтром, в комплексе работа устройств обеспечивает сглаживание возмущений в системе.

С увеличением нелинейных нагрузок в сетях, таких как: схемы на основе силовых диодов и тиристоров, циклоконвертеров, регулируемых электроприводов, стала возникать все большая потребность в применении фильтров в СЭС. Требования повышения качества электроэнергии растут вместе с масштабом применения электронных и микроэлектронных устройств в схемах управления и защиты сетей. Нормы на гармоники тока и напряжения заданы стандартами IEEE 5619-1992 и МЭК 61000.

Актуальность работы заключается в применении активного фильтра для СЭС, в качестве устройства, подавляющего высшие гармоники и компенсации реактивной мощности.

1 ПОТЕРИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ И ПРОБЛЕМЫ, ВОЗНИКАЮЩИЕ ИЗ-ЗА ВЫСШИХ ГАРМОНИК

1.1 Обзор литературы и актуальность работы

Некоторое время назад, в большинстве случаев нагрузки были линейными, к ним относились асинхронные двигатели, нагреватели, лампы накаливания. При подключении этих устройств к сети с синусоидальным напряжением, ток, который будет протекать через сами устройства, также и останется синусоидальным. С истечением времени большинство нагрузок сменилось с линейных на нелинейные (силовая электроника, выпрямители, частотные преобразователи, [2] импульсные источники питания, электронные лампы и т.д.), таким образом при подключении подобных устройств к синусоидальному напряжению, ток, протекающий через эти устройства будет несинусоидальным (рисунок 1.1). Такие токи содержат в себе не только ток основной частоты, но и токи с более высокими частотами, которые влияют на результирующую форму синусоиды. Гармоники напряжения искажаются посредством возникновения гармоник тока. До тех пор, пока нелинейная нагрузка не начала потреблять энергию, она не вызывает появление гармоник напряжения.

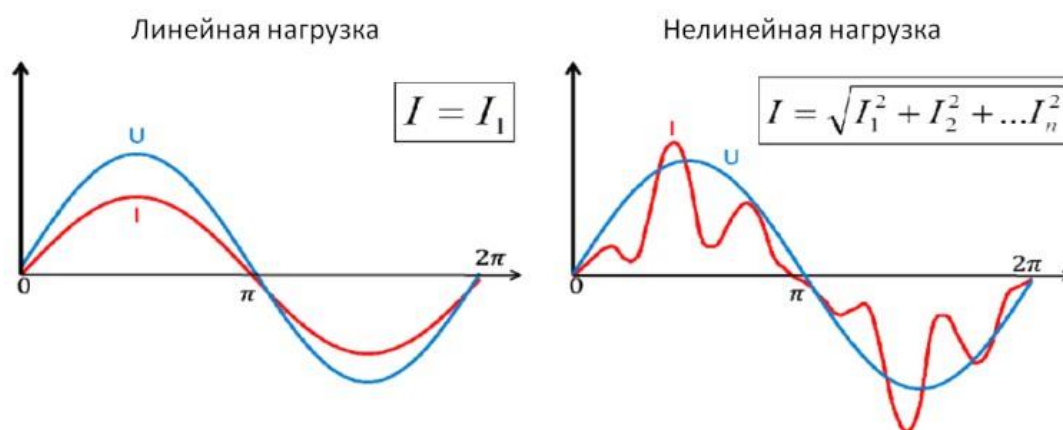


Рисунок 1.1 – Диаграммы линейной и нелинейной нагрузки от сравнения.

Из-за присутствия импеданса источника напряжение его будет искажаться гармониками тока. Гармоники тока создают гармонические искажения напряжения в зависимости от величины импеданса источника напряжения. Мерой определения величины гармонических составляющих является коэффициент нелинейных искажений (THD), который можно найти как отношение суммы всех гармонических составляющих к значению показателя на основной частоте сети. [3] Значение гармонической составляющей рассчитано для тока, но и для остальных показателей, такие как напряжение, мощность и некоторых других параметров расчет идентичен.

$$THD_i = \frac{I_{\text{гармоник}}}{I_{\text{наосн.частоте}}} \cdot 100 \quad (1.1)$$

Выражение, приведенное выше, можно переписать как:

$$THD_i = \frac{\sqrt{\sum_{j=2}^{\infty} I_j^2}}{I_1} = \frac{\sqrt{I_2^2 + I_3^2 + I_4^2 + \dots + I_n^2}}{I_1} \quad (1.2)$$

В выражении I_j – действующее значение тока j -й гармоники, $j = 1$ подразумевает основную частоту. Поэтому THD может быть уменьшен путём уменьшения $I_{\text{гармоник}}$ или увеличения $I_{\text{на осн. частоте}}$.

1.2 Выбор направления исследования

К проблемам, возникающим из-за гармоник можно отнести, к примеру, перегрев трансформаторов, вращающихся машин, перегрузку нейтрали, повышение напряжения между нейтральным проводом и главной заземляющей шиной, выходом из строя батареи конденсаторов, срабатывания автоматических выключателей и предохранителей, некорректная и неэффективная работа электрического оборудования, а также генераторов, потери энергии, некачественной и неэффективной передачи электроэнергии в сеть. Данные проблемы могут привести к дополнительным расходам, например, недоучет и излишнее потребление электроэнергии, расходы из-за использования старого оборудования, простои оборудования, повышение расходов из-за некорректного обслуживания электрооборудования, а также его ремонт, также дополнительные расходы могут появиться из-за некачественного производства электрооборудования, брака при производстве, что сказывается на понижении качества передаваемой электроэнергии.

В настоящее время все больше внедряются альтернативные источники электроэнергии, это энергия ветра, солнечные батареи, которые в свою очередь также генерируют гармоники в сеть, и соответственно вопрос о применении фильтров гармоник становится более существенным и одним из важных для обеспечения качественного энергоснабжения и стабильной электроэнергии в сетях. В развивающихся ветряных, а также солнечных электроустановках используются технологии преобразования, в результате работы которых, в сеть попадают гармоники, и для устранения их, требуется установка активного фильтра. Ветроэлектростанции обладают большой чувствительностью к слабо уменьшающимся резонансам, в результате которых могут усилиться гармонические составляющие в сети и увеличится генерация гармонических составляющих в ветроэнергетической установке. Существуют критерии, необходимые для моделирования гармоник, но они не всегда могут подойти для ветроэлектростанций, по причине того, что преобразователь напряжения не может являться идеальным источником тока и весомое значение начинает придавать импеданс сети.

К способам ослабления гармоник можно отнести, к примеру, увеличение тока короткого замыкания сети (снижение импеданса сети), сокращение числа источников гармоник, которые работают одновременно друг с другом, их

производительности, баланс однофазных нагрузок во всех трех фазах, а также применение оборудования с большей пульсностью (к примеру, использование 12– или 18-пульсного частотного преобразователя вместо 6-пульсного). [8] Но наиболее распространенным решением многих вопросов является использование активного фильтра, которые с каждым днем становятся более распространены. В то же время, кроме активного фильтра можно применить гибридное решение (комбинация активного и пассивного фильтра).

Основное назначение активного фильтра – уменьшение уровня гармонических составляющих нелинейных нагрузок и обеспечение высокого изменения реактивной мощности в соответствии с необходимой потребностью. Существует несколько основных структур активного фильтра гармоник: последовательное подключение, параллельное подключение и их комбинация. При параллельном подключении фильтр представляет собой источник тока; искажения уменьшаются путём непосредственного введения тока.

Основным преимуществом параллельного включения активного фильтра гармоник является простота улучшения уже функционирующих систем и обеспечивающий для стандартных измерительных трансформаторов тока. Основной проблемой является то, что фильтр влияет на гармоническую составляющую напряжения исключительно косвенно, а также то, что нет возможности буферизации напряжения. [11] В случае последовательного подключения активного фильтра гармоник к сети, устройство подключается, используя обмотку трансформатора. Преимущество этого решения состоит в том, что можно непосредственно воздействовать на напряжение гармоник и уменьшать падения напряжения, так как в такой структуре фильтр действует как источник напряжения. Недостатками являются значительно более высокая стоимость по сравнению с параллельным (шунтирующим) подключением, затруднённая модернизация имеющихся систем из-за необходимости последовательного трансформатора и затратность масштабирования из-за наличия трансформатора.

Исходя из того, что последовательно подключаемые фильтры гармоник имеют технические преимущества перед параллельными фильтрами, использование параллельных фильтров является наиболее распространенным решением, из-за простоты модернизации уже существующих систем, а также экономических систем.

Рассмотрим более подробно параллельные активные фильтры. Принцип работы активного фильтра состоит в том, что он генерирует компенсирующий ток (I_{AHF}) в противофазе с током гармонических искажений нагрузки (I_{Load}), происходит взаимная компенсация этих токов и в результате получаем ток синусоидальной формы (I_{Grid}).

$$I_{Grid} = I_{AHF} + I_{Load} \quad (1.3)$$

Основным преимуществом активных фильтров является быстрая подстройка на изменения гармонических нагрузок, то есть высокая динамика, несмотря на то, что устройства хорошо фильтруют сеть, и избавляют от гармоник.

Динамические характеристики активных фильтров ограничены частотными

свойствами силовых ключей. [4] Для самых быстродействующих схем время отработки номинального тока компенсации составляет (0,5...1,0) мс или (9...18) эл. град.

1.3 Классификация шунтирующих активных фильтров

Активные фильтры гармоник могут быть разделены на 2 класса в соответствии с конфигурацией сети.

3Р3W (3 фазы/3 провода). Предназначены для устранения гармоник в 3 фазах, например, 5-й, 7-й, 11-й, 13-й и так далее до 50-й. Такие фильтры не будут корректировать в нейтрали 3-ю гармонику и гармоники, кратные трём, но во многих промышленных приложениях этого не требуется.

3Р4W (3 фазы/4 провода). Предназначены для устранения гармоник в 3 фазах и нейтрали, включая 3-ю гармонику и гармоники, кратные трём, к примеру, 3-ю, 5-ю, 7-ю, 9-ю, 11-ю, 13-ю и так далее до 50-й. Такой тип фильтра используется, если проводники нейтрали нагружены гармониками, например, в клиниках, центрах обработки данных, офисных и административных зданиях.

В большинстве случаев для снижения искажений напряжения сети применяют резонансные LC-фильтры, а также RC-цепи. Современные полупроводниковые системы в целях улучшения качества позволяют использовать активные фильтры, построенные в основном на устройствах IGBT (биполярный транзистор с изолированным затвором). Такие устройства могут выполнять множество различных задач, к примеру: компенсация реактивной мощности электросетей и восстановление симметрии напряжения. В качестве мощных активных фильтров рассматривается применение многоуровневых, многотактных и каскадных полупроводниковых преобразователей. Разрабатываются также преобразователи других типов.

Существует два основных типа активных фильтров в соответствии с исполнением и конфигурацией силовой электроники: двухуровневая и трехуровневая топология. [5] Исходя из схемы, изображенной на рисунке 1.2 в обычной двухуровневой конфигурации имеется 6 IGBT (3 плеча по 2 устройства на фазу). В случае, когда используется трехуровневая топология, используется 12 IGBT (по 4 IGBT-устройства на плечо фазы и токовую цепь)

Трёхуровневая схема может вырабатывать 3 уровня напряжения на выходе: плюсовое напряжение шины постоянного тока, нулевое напряжение и минусовое напряжение шины постоянного тока. [6] Двухуровневая топология может только подключать выход или к плюсовой, или к минусовой шине. Также обеспечивается более высокое качество и лучший уровень гармоник межфазного выходного напряжения, при этом снижаются требования к выходному фильтру и, соответственно, стоимость устройства.

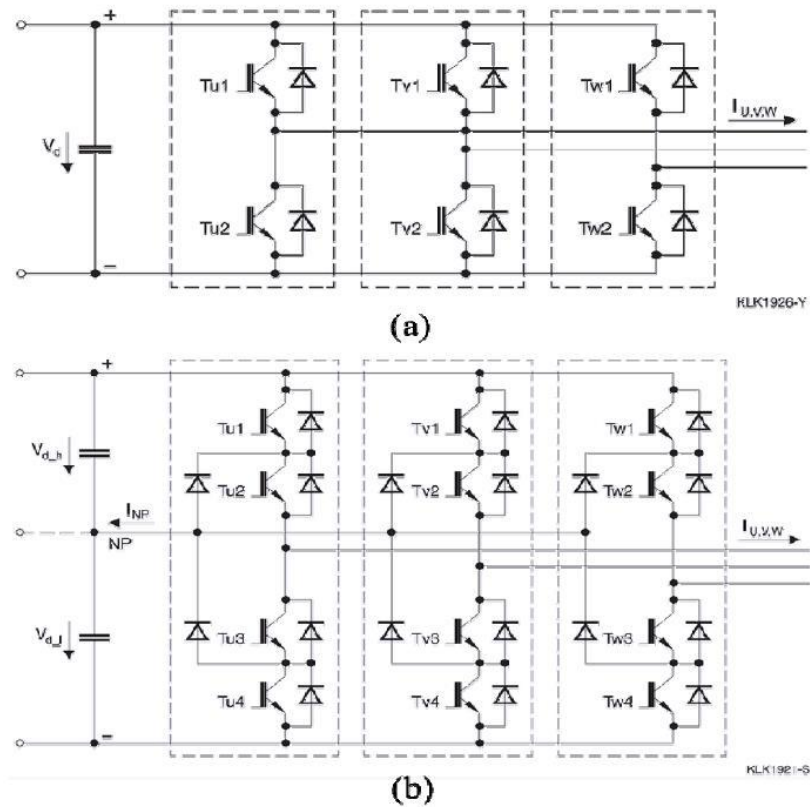


Рисунок 1.2. Двухуровневая (а) и трехуровневая топология схемы (б).

Многотактные фильтры

Схема активного фильтра с многотактным преобразователем представлена на рисунке 1.3.

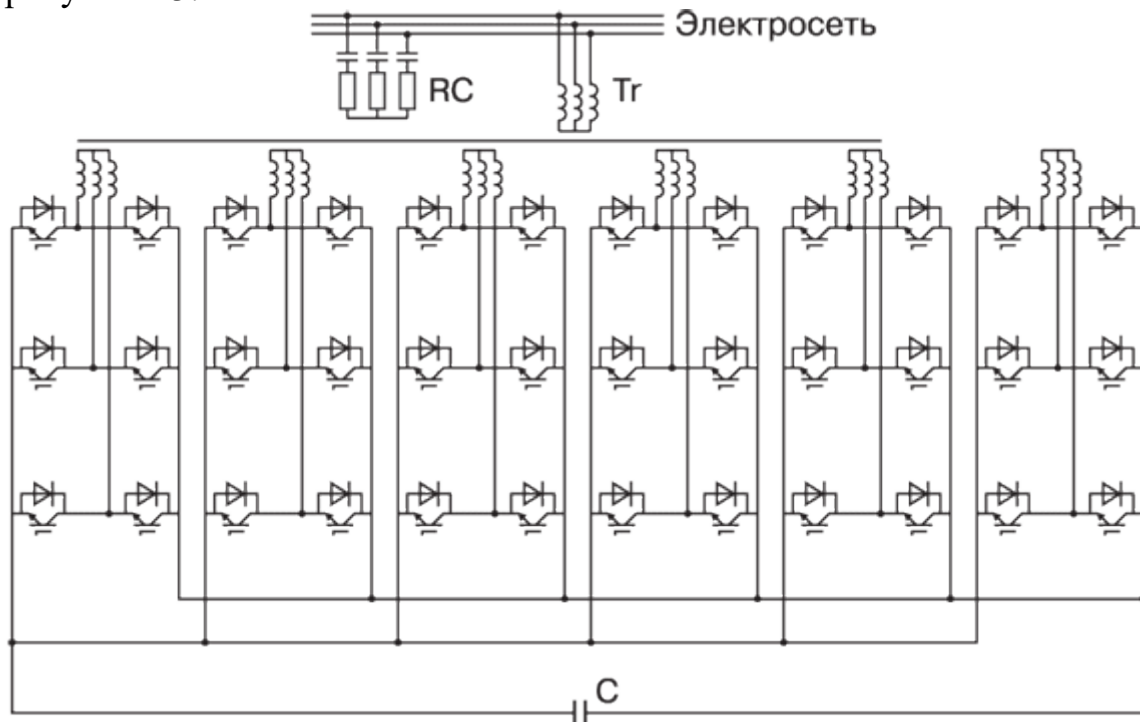


Рисунок 1.3. Схема многотактного активного фильтра

В состав активного фильтра входит многообмоточный трансформатор Tr , некоторое количество транзисторных мостовых выпрямительных мостов, которые

подключаются параллельно и работающих совместно с конденсаторной батареей C , трехфазную RC -цепь, подключенную к электросети. Исполнение вторичных обмоток в трансформаторе может быть выполнено без сдвига по фазе, что оказывает влияние на упрощение конструкции трансформатора. Транзисторные мосты управляются в режиме широтно-импульсной модуляции (ШИМ) осуществляется путем сравнения пилообразных опорных напряжений с трехфазной системой напряжений управления. Опорные напряжения различных мостов взаимно сдвинуты по фазе на углы, равные отношению 2π к количеству мостов. Для всех мостов используется одна и та же трехфазная система напряжений управления, которая формируется регуляторами, обеспечивающими поддержание заданного напряжения конденсатора C , подавление неосновных составляющих токов и напряжений сети, компенсацию реактивной мощности сети и т. д. Для улучшения качества фильтрации токов и напряжений сети каждый транзисторный мост работает на повышенной частоте ШИМ, например 4–10 кГц. При шести параллельно включенных мостах эквивалентная частота ШИМ по отношению к сети составляет 24–60 кГц. На этих частотах обеспечивается достаточно точная фильтрация высших гармонических токов сетей в диапазоне частот, определенном ГОСТ 32144-2013. [6] Фильтруются также составляющие более высоких частот. Вместе с тем на частотах 24–60 кГц и выше активный фильтр является генератором гармонических составляющих и для их подавления используются RC -цепи.

К особенностям многотактных систем относится то, что преобразовательная часть систем сравнительно низковольтна. Среди достоинств таких фильтров можно отметить, что в них ток нагрузки конденсатора в звене постоянного напряжения существенно уменьшается при увеличении количества параллельно работающих мостов.

Многоуровневые фильтры

Другое направление развития силовой преобразовательной техники – разработка активных фильтров с многоуровневыми полупроводниковыми преобразователями. На рисунке 1.4 представлена одна из возможных схем активного фильтра с 5-уровневым преобразователем.

Активный фильтр содержит транзисторный мост, подключенный к электросети через фазные дроссели L , и RC -цепи. В каждом плече моста содержатся несколько последовательно включенных транзисторов. Напряжения между ними делятся при использовании последовательно включенных конденсаторов в звене выпрямленного напряжения и дополнительных диодов. «Гладкая» составляющая напряжения фазы сети формируется при работе в режиме ШИМ сначала одного транзистора в плече моста, потом другого и т. д. В каждый момент времени в каждом плече моста в режиме ШИМ работает только один транзистор. За счет этого в 5-уровневом преобразователе, по сравнению с двухуровневым, амплитуда пульсаций напряжений фаз на частотах ШИМ меньше в 4 раза (в 7-уровневом мосте амплитуда пульсаций меньше в 6 раз), в несколько раз меньше динамические потери энергии в полупроводниковых элементах. При этом обеспечиваются возможности повышения частоты ШИМ, например, до 20 кГц.

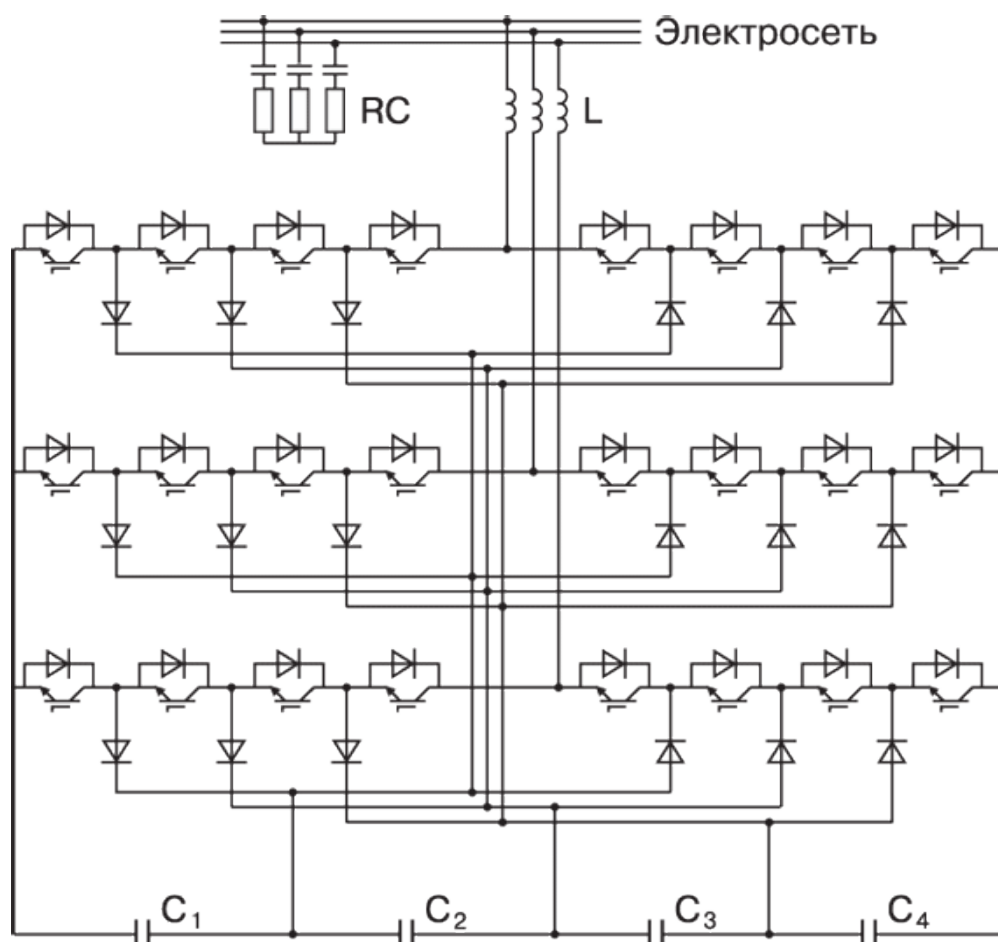


Рисунок 1.4. Схема многоуровневого активного фильтра

Частоты пульсаций напряжений сети соответствуют частотам переключения транзисторов. На частотах ШИМ и выше активный фильтр является генератором гармоник, и для их подавления используются RC-цепи. [7]

Достоинством многоуровневых преобразователей является возможность их выполнения высоковольтными без трансформаторов. Токвые нагрузки конденсаторов в многоуровневом преобразователе выше, чем в многотактном. При практическом применении должен быть решен вопрос равномерного распределения напряжений между последовательно включенными конденсаторами.

Каскадные фильтры

Еще одно направление разработки активных фильтров – системы с каскадными преобразователями, или так называемые системы с «плавающими» конденсаторами. Одна из возможных схем такого фильтра представлена на рисунке 1.5.

Активный фильтр содержит полупроводниковый преобразователь, в каждой фазе которого несколько низковольтных однофазных преобразователей соединены последовательно, образуя высоковольтный преобразователь, который может быть подключен непосредственно к электросети. Каждый однофазный преобразователь работает в режиме ШИМ и обеспечивает поддержание заданного напряжения на своей конденсаторной батарее. Кроме этого, путем регулирования напряжений

управления обеспечивается фильтрация токов и напряжений сети. По свойствам активные фильтры с «плавающими» конденсаторами близки к фильтрам с многоуровневыми преобразователями.

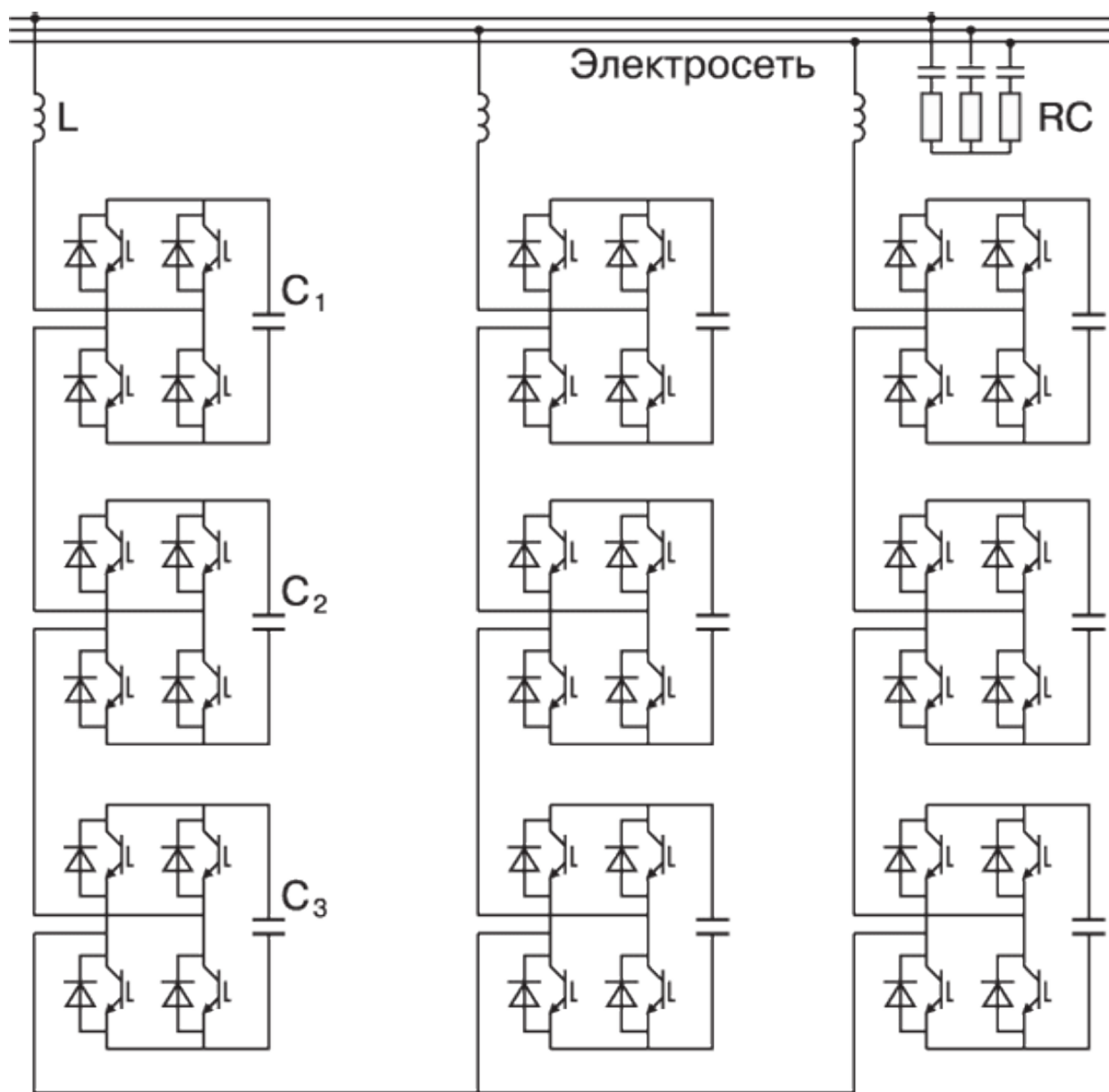


Рисунок 1.5. Схема активного фильтра с «плавающими» конденсаторами

Практические примеры фильтрации

В качестве примера рассмотрим возможности фильтрации токов, потребляемых из сети 12-пульсным тиристорным преобразователем ТПЧ2-6-03 привода вентилятора главного проветривания рудника «Северный Глубокий». Мощность привода 3,7 МВт, напряжение сети 6 кВ, частота 50 Гц. Схема фильтрации представлена на рисунке 1.6.

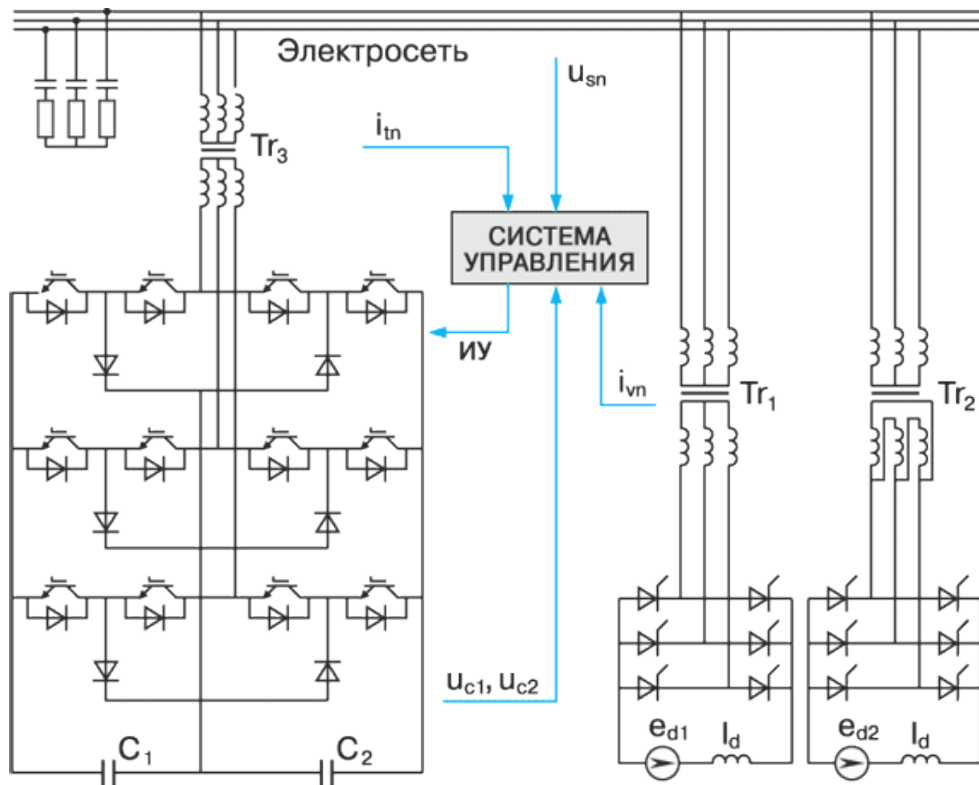


Рисунок 1.6. Схема активной фильтрации токов сети в приводе вентилятора

Выпрямительные мосты преобразователя вентилятора подключены к электросети через трансформаторы Tr_1 и Tr_2 , через которые привод вентилятора потребляет из сети токи I_{v1} , I_{v2} , I_{v3} . (см. рисунок 1.7).

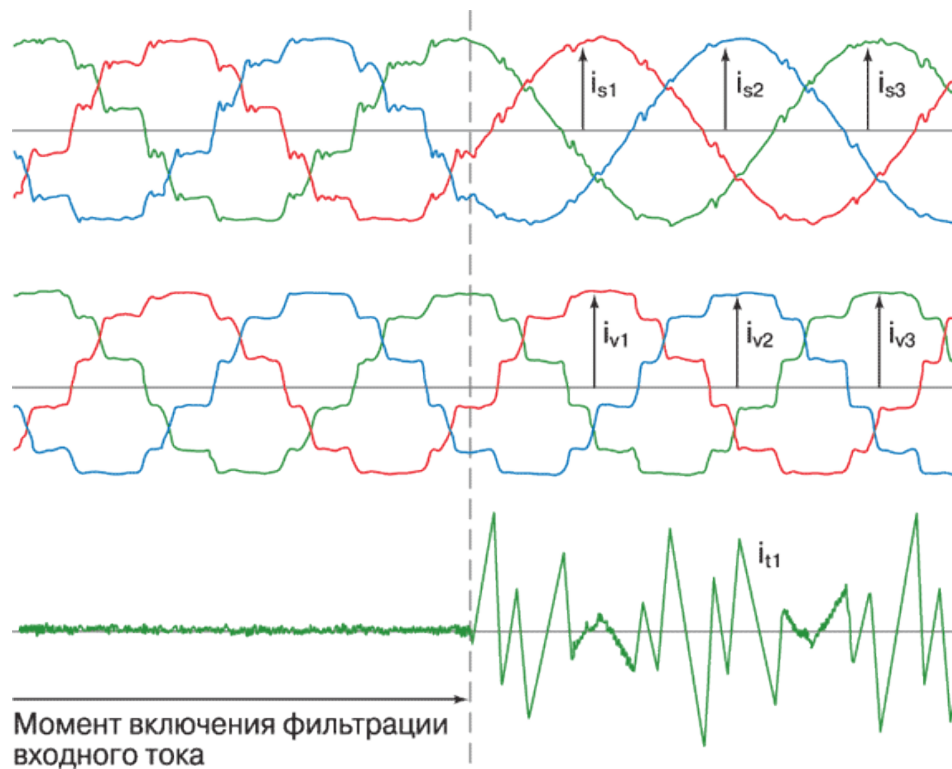


Рисунок 1.7. Токи преобразователя вентилятора и активного фильтра

Для фильтрации токов сети использован активный фильтр, который содержит трехуровневый транзисторный мост, подключенный к сети через трансформатор Tr3. Система управления выделяет из токов i_{vn} привода вентилятора неосновные гармонические составляющие и обеспечивает формирование активным выпрямителем таких же гармонических составляющих токов i_{in} ($n = 1, 2, 3$), но в противофазе.

В результате в сети осуществляется взаимная компенсация высших гармонических составляющих токов привода вентилятора и активного фильтра и токи сети i_{sn} приближаются по форме к синусоиде. [4]

В рассматриваемом случае мощность активного фильтра 550 кВА (15% от мощности привода вентилятора). Частота ШИМ активного фильтра 8 кГц. После включения фильтра коэффициент искажения синусоидальности токов сети уменьшился в 4,5 раза. В модели системы учтены особенности привода вентилятора. В том числе учтены неточности регулирования выпрямленных напряжений тиристорных мостов, неточности распределения токов между мостами. Указанные погрешности системы отражаются на неполной компенсации в токах, потребляемых 12-пульсным выпрямителем, 5-й, 7-й, а также ряда других гармонических составляющих.

Активные фильтры, в отличие от резонансных, подавляют все неосновные составляющие токов в определенном диапазоне частот, в том числе указанные канонические, а также неканонические и низкочастотные составляющие.

1.4 Преимущества и недостатки активных фильтров

Преимуществом активных фильтров является то, что они могут фильтровать гармоники одновременно. При использовании устройства 3P4W (3 фазы, 4 провода) могут быть уменьшены токи проводника нейтрали (3-я гармоника и гармоники, кратные трём). Также нет обязательной необходимости тщательного гармонического анализа перед проектированием фильтра. Новая тенденция применения модульных фильтров даёт возможность простой модернизации без выполнения монтажных и слесарных работ. Главный недостаток активных фильтров по сравнению с пассивными – это стоимость. Однако в наше время IGBT (биполярные транзисторы с изолированным затвором) и ЦСП (цифровые сигнальные процессоры) имеют доступные цены, и разница в стоимости между активными и пассивными фильтрами не так велика, как в прошлом.

1.5 Параметры и стоимость АФ

Активный фильтр АФГ 0,4 25 А анализирует ток основной частоты и токи высших гармоник, после чего генерирует ток компенсации в противоположной фазе, который позволяет снизить уровень искажений и получить почти синусоидальную форму волны.

По отдельному требованию заказчика возможно изготовление активных фильтров на другие номинальные токи и напряжения, благодаря расширяемой модульной системе устройств до 1000 А.

Таблица 1.1 – Технические характеристики активного фильтра

Технические характеристики АФ	
Модель	АФГ-0,4-25 (1000) УХЛ4
Схема подключения	3-х или 4-х проводная
Токи гармонических составляющих фаз, А	25 (1000)
Токи гармонических составляющих нейтрали, А	75 (3000)
Пиковые токи гармонических составляющих, А	50 (3000)
Потребляемая мощность, кВт	до 1,0 (до 28,5)
Номинальное напряжение, В	340-460
Частота сети, Гц	50/60±10%
Номера компенсируемых гармоник	2...50
Быстродействие	менее 1 мс
Размеры (ДхВхГ), мм	500x800x450
Вес, кг	70
Ввод кабеля	снизу
Коммуникационный интерфейс	RS485
Степень защиты	IP20...54
Климатическое исполнение	УХЛ4 (+1...+40°C)

Основные функции АФГ:

- компенсация нелинейных искажений (фильтрация гармоник) для трехпроводной или четырехпроводной сети;
- балансировка токов фаз;
- снижение тока в нейтрали;
- коррекция коэффициента мощности;
- осуществление текущего мониторинга сети в активном режиме;
- полная компенсация нелинейных искажений сети до 50 гармоники включительно;
- возможность воздействия на «неканонические» и чётные гармоники;
- индивидуальная настройка уровня воздействия на каждую гармонику (0-100%);
- возможность динамической компенсации колебания реактивной мощности; панель управления с возможностью удалённого доступа и ЖК сенсорным дисплеем;
- комплексное применение в схеме с пассивными фильтрами и другими устройствами компенсации реактивной мощности;
- возможность независимого регулирования в каждой фазе;
- уменьшение эффекта фликера;
- частота переключения менее 1 мс.

Цены на АФГ зависят от токов гармонических составляющих фаз, выделяемых в сеть, а также от выбора производителя устройств. К примеру стоимость АФГ на

ток 25 Ампер составляет около 1250000 рублей, а на ток 1000 Ампер около 2500000 рублей.

Выводы по разделу 1.

Главной задачей активного фильтра является подавление гармоник в сети. Кроме устранения гармоник активные фильтры могут также использоваться для балансирования нагрузок, коррекции коэффициента мощности и даже в некоторой степени для компенсации мерцаний.

2 РАЗРАБОТКА МОДЕЛЕЙ СЭС С АКТИВНЫМ ФИЛЬТРОМ

2.1 Описание трехфазного активного фильтра с релейно-векторной системой управления

Силовой блок (СБ) трехфазного активного фильтра-компенсатора (АФК) представляет собой трехфазный транзисторно-диодный мост $T1-T6$, с реакторами $L_{АФК1}-L_{АФК3}$ на входе и емкостным накопителем энергии на выходе на основе двух конденсаторов постоянного тока C_{d1}, C_{d2} , средняя точка которых соединена с нейтралью N трехфазной системы напряжений A, B, C (рисунок 2.1). Силовой блок АФК также может быть выполнен и без нулевой точки. На входе АФК установлен трехфазный $R_{Ф1}C_{Ф1}-R_{Ф3}C_{Ф3}$ пассивный (сетевой) фильтр ПФ, обеспечивающий подавление высокочастотных гармоник вследствие работы силового блока в импульсном режиме работы. Трехфазные нагрузки переменного тока подключаются к выводам $A1, B1, C1$.

Методами импульсной модуляции на зажимах трехфазного моста a, b, c при помощи ключей $T1-T6$ формируются импульсы напряжения u_{aN}, u_{bN}, u_{cN} в соответствии с требуемым законом регулирования. После фильтрации этого напряжения реакторами $L_{АФК1}-L_{АФК3}$ в сеть переменного напряжения A, B, C поступает компенсирующий ток i_k , мгновенное значение которого изменяется в соответствии с функцией модуляции напряжения U_d , которое на выходе преобразователя поддерживается постоянным за счет его системы управления. Изменяя функцию модуляции, можно получить компенсирующий ток с различными мгновенными значениями во времени.

Система управления СУ трехфазного активного фильтра-компенсатора построена по релейно-векторному принципу и состоит из блока синхронизации БС, блока вычисления задания тока компенсации БВЗТ, блока релейных регуляторов тока БРРТ, распределителя импульсов РИ, драйверов силовых ключей, датчиков напряжения ДН1–ДН2 и тока ДТ1–ДТ6 (рисунок 2.1).

Синхронизация системы управления АФК с сетью осуществляется при помощи блока синхронизации БС, который обеспечивает генерацию опорных единичных сигналов $\sin(\omega t)$ и $\cos(\omega t)$, синхронизированных с напряжением сети через датчик напряжения ДН1.

Блок вычисления задания тока компенсации БВЗТ (рисунок 2.1) построен по векторному принципу с ориентацией по вектору напряжения сети. Это позволяет в системе управления выделить активную и реактивную составляющие токов и по каждой из них вести отдельное управление.

В блоке синхронного преобразования координат abc/dq выделяются амплитудные значения активной $I_{dн}$ и реактивной $I_{qн}$ составляющих токов нагрузки в системе dq -координат, вращающейся относительно неподвижной системы координат $\alpha\beta$ с угловой скоростью ωt напряжения сети. Вычисление токов $I_{dн}$ и $I_{qн}$ осуществляется с использованием единичных сигналов $\sin(\omega t)$ и $\cos(\omega t)$ блока синхронизации и мгновенных значений $i_{aн}, i_{bн}, i_{cн}$, поступающих с выхода датчиков тока нагрузки ДТ4–ДТ6, по следующим законам:

$$\begin{cases} I_{dH} = \frac{2}{3} \cdot [i_{aH} \cdot \sin(\omega t) + i_{bH} \cdot \sin(\omega t - 2\pi/3) + i_{cH} \cdot \sin(\omega t + 2\pi/3)] \\ I_{qH} = \frac{2}{3} \cdot [i_{aH} \cdot \cos(\omega t) + i_{bH} \cdot \cos(\omega t - 2\pi/3) + i_{cH} \cdot \cos(\omega t + 2\pi/3)] \end{cases} \quad (2.1)$$

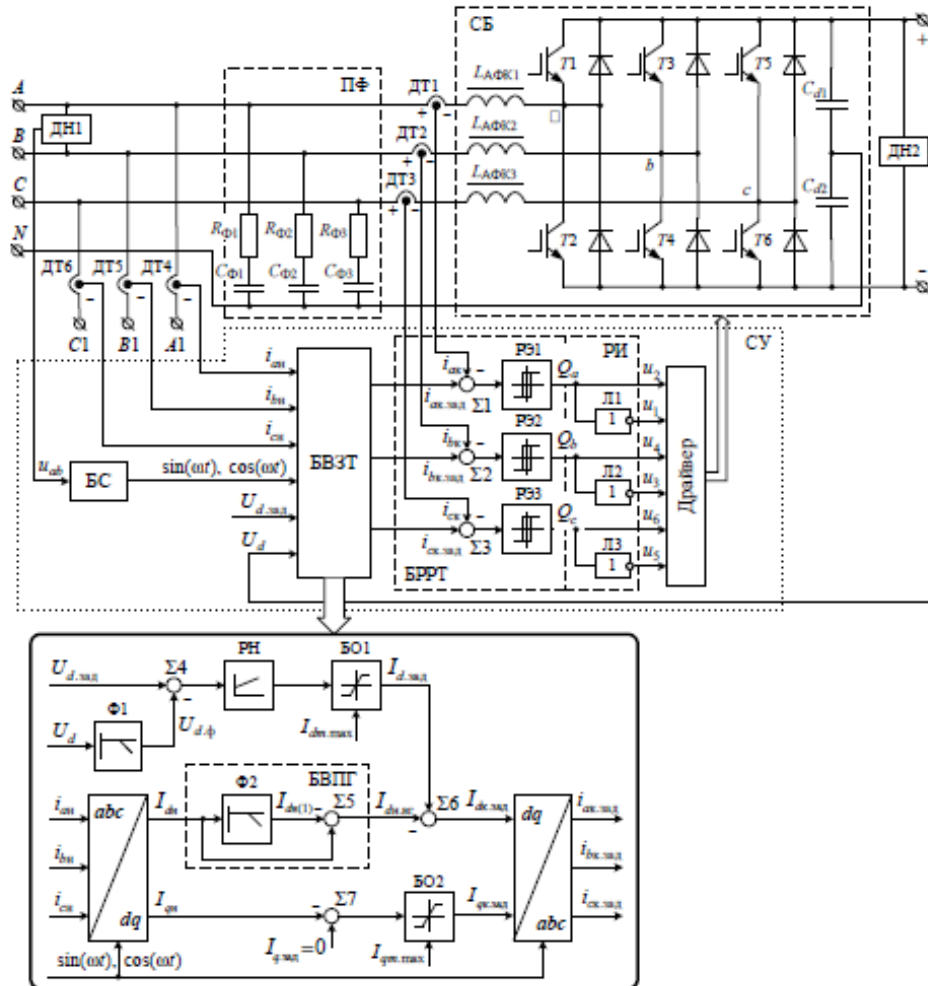


Рисунок 2.1. Функциональные схемы трехфазного активного фильтра-компенсатора с релейно-векторной системой управления.

Поскольку активную составляющую первой гармоники тока нагрузки компенсировать не нужно (она является полезной), в систему управления СУ введен блок выделения первой гармоники БВПГ. Теоретически доказано, что первые гармоники тока в синхронных dq -координатах имеют постоянные во времени значения. Поэтому их выделяют в виде среднего значения, используя самые простые апериодические фильтры, например, первого порядка $\Phi 2$ с передаточной функцией $W(p) = 1 / (T_{\Phi 2} p + 1)$. Далее при помощи простейшей операции вычитания на выходе БВПГ формируется сигнал $I_{dH.BГ} = I_{dH} - I_{dH(1)}$, активной составляющей тока нагрузки, содержащей только высшие гармоники.

Для компенсации потерь мощности в преобразователе и, следовательно, стабилизации выпрямленного напряжения U_d на емкостном накопителе C_{d1}, C_{d2} в систему управления АФК введен внешний контур напряжения, состоящий из

датчика напряжения ДН2, сглаживающего фильтра Ф1, сумматора Σ4 с источником сигнала задания $U_{d.зад}$ и пропорционально-интегрального регулятора напряжения РН. Таким образом, внешний контур напряжения обеспечивает расчет активной составляющей заданного тока $I_{d.зад}$, идущей на покрытие потерь мощности в силовых цепях АФК.

Ограничения амплитуды активной $I_{dm.маx}$ и реактивной $I_{qm.маx}$ составляющих токов АФК осуществляется при помощи блоков ограничения БО1 и БО2 соответственно.

Принцип работы любого компенсатора основан на введении в сеть источника пассивной мощности в противофазе с неактивной мощностью, создаваемой всеми нелинейными нагрузками переменного тока. Поэтому в синхронных dq -координатах заданный ток компенсации равен:

$$\begin{cases} I_{dk.зад} = -I_{dn.вг} + I_{d.зад} \\ I_{qk.зад} = -I_{qn} + I_{q.зад} \end{cases} \quad (2.2)$$

Одной из основных задач АФК является компенсация реактивной мощности, поэтому $I_{q.зад}$ принимается равным нулю. В блоке вычисления задания тока компенсации БВЗТ система уравнений реализуется при помощи сумматоров Σ6 и Σ7.

Обратный переход к трехфазной системе координат осуществляется блоком синхронного преобразования координат dq/abc в соответствии с выражениями:

$$\begin{cases} i_{ak.зад} = I_{dk.зад} \cdot \sin(\omega t) + I_{qk.зад} \cdot \cos(\omega t) \\ i_{bk.зад} = I_{dk.зад} \cdot \sin(\omega t - 2\pi/3) + I_{qk.зад} \cdot \cos(\omega t - 2\pi/3) \\ i_{ck.зад} = I_{dk.зад} \cdot \sin(\omega t + 2\pi/3) + I_{qk.зад} \cdot \cos(\omega t + 2\pi/3) \end{cases} \quad (2.3)$$

Блок релейных регуляторов тока БРРТ состоит из трех релейных элементов РЭ1–РЭ3, которые осуществляют непосредственное «слежение» реальных токов компенсации i_{ak} , i_{bk} , i_{ck} , поступающих с выходов датчиков ДТ1–ДТ3 за их заданными значениями $i_{ak.зад}$, $i_{bk.зад}$, $i_{ck.зад}$ в пределах зоны неоднозначности порогов переключения $\pm b$ релейных элементов, которые принимаются равными (5–10)% от амплитуды номинального тока компенсатора.

Сумматоры Σ1–Σ3 вычисляют разницу Δi_{ak} , Δi_{bk} , Δi_{ck} между заданными и фактическими значениями мгновенных токов компенсации:

$$\begin{cases} \Delta i_{ak} = i_{ak.зад} - i_{ak} \\ \Delta i_{bk} = i_{bk.зад} - i_{bk} \\ \Delta i_{ck} = i_{ck.зад} - i_{ck} \end{cases} \quad (2.4)$$

Состояние выходов релейных регуляторов Q_a , Q_b , Q_c определяются по алгоритму:

$$\begin{cases} Q_a = 1, \text{ если } \Delta i_{ak} \geq b; Q_a = 0, \text{ если } \Delta i_{ak} \leq -b \\ Q_b = 1, \text{ если } \Delta i_{bk} \geq b; Q_b = 0, \text{ если } \Delta i_{bk} \leq -b \\ Q_c = 1, \text{ если } \Delta i_{ck} \geq b; Q_c = 0, \text{ если } \Delta i_{ck} \leq -b \end{cases} \quad (2.5)$$

Релейное управление с обратной связью по току широко применяется в активных фильтрах-компенсаторах вследствие своей простоты и позволяет повысить не только быстродействие, но и точность управления при возмущениях со стороны нагрузки, обеспечив тем самым эффективную защиту АФК от перегрузок по току. Известным недостатком этих систем является изменение

частоты модуляции в процессе их работы.

Распределитель импульсов РИ состоит из трех логических элементов Л1–Л3 типа «НЕ» (рисунок 2.1) и распределяет импульсы управления в соответствии с системой логических уравнений:

$$\begin{cases} u_2 = Q_a; u_1 = \overline{Q_a} \\ u_4 = Q_b; u_3 = \overline{Q_b} \\ u_6 = Q_c; u_5 = \overline{Q_c} \end{cases} \quad (2.6)$$

Здесь $u_1–u_6$ – импульсы управления для силовых ключей Т1–Т6 соответственно.

Драйверы в системе управления АФК обеспечивают потенциальную развязку и усиление управляющих импульсов для силовых ключей Т1–Т6.

2.2 Исходные данные для исследуемой модели с активным фильтром

АФК подключается параллельно трехфазной сети 0,4 кВ. В качестве нагрузок переменного тока используются:

- активно-индуктивная нагрузка с параметрами, указанными в таблице 2.1. К нагрузкам с индуктивным характером относятся стандартные асинхронные электродвигатели, подключенные напрямую к сети, печи индукционного нагрева, сварочное оборудование и т.д.

- реверсивный электропривод постоянного тока, выполненный по трехфазной мостовой схеме выпрямления на тиристорах с отдельным управлением групп комплектов вентиля «Вперед» и «Назад».

К выходу преобразователя подключен двигатель постоянного тока М с независимым возбуждением, технические данные которого приведены в таблице 2.2. При расчетах КПД тиристорного выпрямителя принимаем равным 0,98.

- частотно-регулируемый асинхронный электропривод. Силовая часть преобразователя частоты состоит из неуправляемого мостового диодного выпрямителя с емкостным фильтром на выходе и трехфазного автономного инвертора напряжения (АИН), к выходу которого подключается асинхронный двигатель АД с параметрами, указанными в таблице 2.3. При расчетах КПД неуправляемого выпрямителя следует принять равным 0,98, а КПД инвертора 0,96.

Таблица 2.1 - Нагрузки переменного тока в системе электроснабжения 0,4 кВ

Активно – индуктивные нагрузки		Реверсивный электропривод постоянного тока		Частотно – регулируемый асинхронный электропривод	
P_{RL} , кВт	$\cos\varphi_{RL}$	Тип двигателя	Мощность двигателя, кВт	Тип двигателя	Мощность двигателя, кВт
150	0,8	2ПФ280L	132	5AM280S4e	110

Таблица 2.2 - Технические данные двигателя постоянного тока серии Д для продолжительного режима работы (ПВ=100%)

Тип двигателя	P_H , кВт	$U_{д.н.}$, В	$I_{д.н.}$, А	$gя$, Ом	n_H , об/мин	$J_{дв.}$, кг·м ²
2ПФ280L	132	440	330	0,0370	1500	–

Таблица 2.3 - Технические данные короткозамкнутого двигателя основного исполнения серии 5А, степень защиты IP54

Тип двигателя	P_H , кВт	$U_{ф.н.}$, В	n_H , об/мин	η_H	$\cos\phi_H$	$M_{п.}/M_H$	$I_{п.}/I_H$	M_{max}/M_H	$J_{дв.}$, кг·м ²
5АМ280S4	110	220	1485	95,1	0,87	2,3	7,5	2,2	2,19

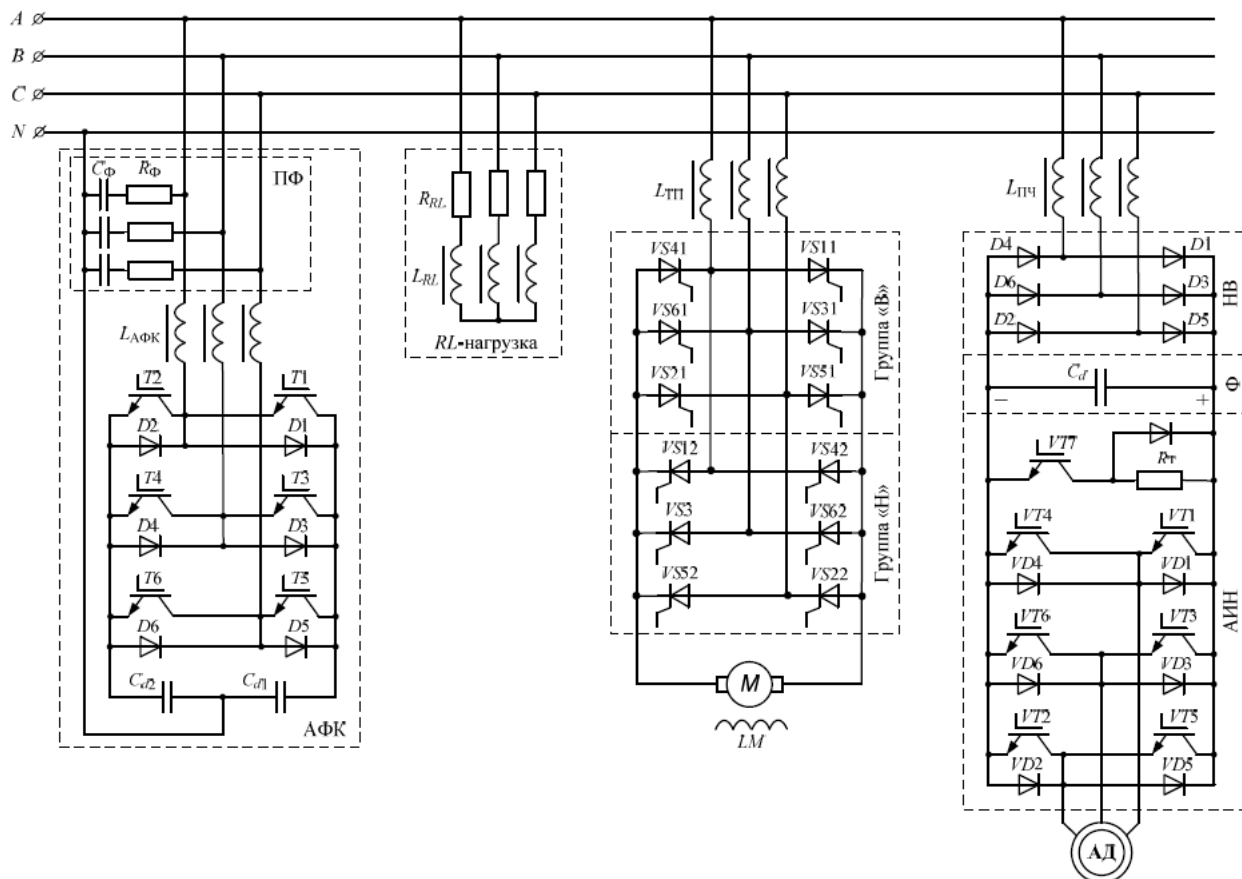


Рисунок 2.2 - Принципиальная схема трехфазного активного фильтра – компенсатора с нагрузками переменного тока

2.3 Расчет составляющих мощностей и силовых элементов трехфазной активно – индуктивной нагрузки

Найдем полную мощность трехфазной активно – индуктивной нагрузки:

$$S_{RL} = \frac{P_{RL}}{\cos\varphi_{RL}} = 187,5 \text{ (кВА)}, \quad (2.7)$$

где P_{RL} , $\cos\varphi_{RL}$ – активная мощность и косинус фи активно – индуктивной нагрузки.

Реактивная мощность активно – индуктивной нагрузки:

$$Q_{RL} = \sqrt{S_{RL}^2 - P_{RL}^2} = 112,5 \text{ (кВар)}. \quad (2.8)$$

Действующее значение тока активно – индуктивной нагрузки:

$$I_{RL} = \frac{S_{RL}}{3 \cdot U_{\text{ф.н.}}} = 284,091 \text{ (А)}. \quad (2.9)$$

Здесь $U_{\text{ф.н.}}$ – фазное номинальное напряжение сети ($U_{\text{ф.н.}}=220 \text{ В}$).

Полное, активное и реактивное сопротивление активно – индуктивной нагрузки:

$$Z_{RL} = \frac{U_{\text{ф.н.}}}{I_{RL}} = 0,774 \text{ (Ом)}; R_{RL} = Z_{RL} \cdot \cos\varphi_{RL} = 0,62 \text{ (Ом)}; \quad (2.10)$$

$$X_{RL} = \sqrt{Z_{RL}^2 - R_{RL}^2} = 0,465 \text{ (Ом)}. \quad (2.11)$$

Индуктивность активно – индуктивной нагрузки:

$$L_{RL} = \frac{X_{RL}}{2 \cdot \pi \cdot f_c} = 1,479 \text{ (мГн)}, \quad (2.12)$$

где f_c – частота питающей сети ($f_c = 50 \text{ Гц}$).

2.4 Расчет составляющих мощностей и силовых элементов реверсивного электропривода постоянного тока

Активная мощность, потребляемая электродвигателем в номинальном режиме работы:

$$P_{d.н} = U_{d.н} \cdot I_{d.н} = 145,2 \text{ (кВт)}, \quad (2.13)$$

и в режиме перегрузки:

$$P_{d.п} = (2 \dots 2.5) \cdot P_{d.н} = 363 \text{ (кВт)}. \quad (2.14)$$

Здесь $U_{d.н}$, $I_{d.н}$ – номинальные значения напряжения и тока электродвигателя постоянного тока согласно таблице 1.2.

Активная мощность, потребляемая тиристорным преобразователем в номинальном и перегрузочном режимах работы:

$$P_{\text{ТП.н}} = \frac{P_{d.н}}{\eta_{\text{ТП.н}}} = 148,2 \text{ (кВт)}; P_{\text{ТП.п}} = (2 \dots 2.5) \cdot P_{\text{ТП.н}} = 370,4 \text{ (кВт)}, \quad (2.15)$$

где $\eta_{\text{ТП.н}}$ – коэффициент полезного действия тиристорного преобразователя в номинальном режиме. В соответствии с заданием $\eta_{\text{ТП.н}} = 0,98$.

Полная мощность, потребляемая тиристорным преобразователем из сети в номинальном режиме и перегрузочном режимах работы электропривода:

$$\begin{aligned} S_{\text{ТП.Н}} &= 3 \cdot U_{\text{Ф.Н}} \cdot I_{\text{ТП.Н}} = 177,8 \text{ (кВА)}; \\ S_{\text{ТП.П}} &= (2 \dots 2,5) \cdot S_{\text{ТП.Н}} = 444,6 \text{ (кВА)}. \end{aligned} \quad (2.16)$$

Здесь $I_{\text{ТП.Н}} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot I_{d.Н} = 363,87 \text{ (А)}$ – действующее значение номинального тока тиристорного преобразователя, выполненного по трехфазной мостовой схеме выпрямления.

Реактивная мощность, потребляемая тиристорным преобразователем из сети:

$$Q_{\text{ТП}} = 3 \cdot U_{\text{Ф}} \cdot I_{\text{ТП}(1)} \cdot \sin\varphi, \quad (2.17)$$

где $I_{\text{ТП}(1)} = I_{\text{ТП.м}(1)}/\sqrt{2}$ – действующее значение тока первой гармоники на входе тиристорного преобразователя;

$I_{\text{ТП.м}(1)} = 2\sqrt{3} \cdot I_d/\pi$ – амплитуда первой гармоники тока на входе тиристорного преобразователя, выполненного по трехфазной мостовой схеме выпрямления; I_d – ток нагрузки электродвигателя; φ – угол сдвига между первыми гармониками напряжения сети и входного тока ТП.

При $\varphi = 90$ эл. град, когда электропривод работает на низких скоростях, тиристорный преобразователь из сети потребляет максимальное значение реактивной мощности. Тогда для номинального режима:

$$Q_{\text{ТП.Н.маx}} = 3 \cdot U_{\text{Ф.Н}} \cdot \frac{2\sqrt{3}}{\pi\sqrt{2}} \cdot I_{d.Н} \cdot \sin 90^\circ = 169,8 \text{ (кВАр)}, \quad (2.18)$$

и режима перегрузки привода:

$$Q_{\text{ТП.П.маx}} = (2 \dots 2,5) \cdot Q_{\text{ТП.Н.маx}} = 424,5 \text{ (кВАр)}. \quad (2.19)$$

Угол сдвига φ между первыми гармониками напряжения и тока $\varphi \approx \alpha + (\gamma/2)$, отсюда угол управления тиристорного преобразователя, соответствующий работе электропривода в точке с максимальной реактивной мощностью:

$$\alpha_{Q_{\text{маx}}} = 90^\circ - \frac{\gamma}{2} = 85^\circ. \quad (2.20)$$

Из-за несинусоидального характера ток на входе тиристорного преобразователя кроме основной гармоники $I_{\text{ТП.м}(1)} = 2\sqrt{3} \cdot I_d/\pi = 363,877 \text{ (А)}$ содержит ряд нечетных высших гармоник с номерами $n = 6k \pm 1$, то есть $n = 5, 7, 11, 13, 17, 19$ и т.д. Здесь $k = 1, 2, 3, \dots$ – целые числа.

При бесконечно большой индуктивности нагрузки ($X_d = \infty$) и угле коммутации $\gamma = 0$ мощность искажений тиристорного преобразователя для номинального режима:

$$T_{\text{ТП.Н}} = 3 \cdot U_{\text{Ф.Н}} \cdot \frac{2\sqrt{3}}{\pi\sqrt{2}} \cdot I_{d.Н} \cdot \sqrt{\sum_{k=1}^3 \left(\frac{1}{6k \pm 1}\right)^2} = 48,28 \text{ (кВА)}, \quad (2.21)$$

и для режима перегрузки электропривода:

$$T_{\text{ТП.П}} = (2 \dots 2,5) \cdot T_{\text{ТП.Н}} = 120,7 \text{ (кВА)}. \quad (2.22)$$

Динамические характеристики активных фильтров ограничены частотными свойствами силовых ключей. Для самых быстродействующих схем время отработки номинального тока компенсации составляет (0,5...1,0) мс или (9...18) эл. град. С учетом этого рассчитаем индуктивность токоограничивающих (линейных) реакторов $L_{ТП}$ на входе тиристорного преобразователя так, чтобы угол коммутации γ_H тиристоров в номинальном режиме работы электропривода был не меньше вышеуказанных значений. Примем $\gamma_H = 10$ эл. град, тогда требуемая индуктивность токоограничивающих реакторов:

$$L_{ТП} = \frac{\sqrt{6} \cdot U_{\Phi,Н}}{4 \cdot \pi \cdot f_c \cdot I_{d,Н}} \cdot [\cos \alpha_H - \cos(\alpha_H + \gamma_H)] = 0,2339 \text{ (мГн)}. \quad (2.23)$$

Здесь $\alpha_H = U_{d,Н}/k_U \cdot k_R \cdot U_{\Phi,Н}$ – косинус угла управления ТП, соответствующий работе электропривода в номинальной точке; $k_U = 2.34$ – коэффициент трехфазной мостовой схемы выпрямления; $k_R = 0.95$ – коэффициент, учитывающий падение напряжения на выходе тиристорного преобразователя за счет коммутации и активных сопротивлений силовых цепей.

Исходя из отсутствия величины индуктивности якорной обмотки двигателя, рассчитаем эту величину исходя из допустимого уровня пульсаций выпрямленного тока $q = (2...5) \%$ при работе электропривода в номинальной точке.

Необходимая индуктивность цепи выпрямленного тока может быть определена по значению первой гармоники выпрямленного напряжения $U_{d,m(1)}$ и заданному коэффициенту пульсаций q :

$$L_d = \frac{U_{d,m(1)}}{2 \cdot \pi \cdot f_c \cdot q \cdot m \cdot I_{d,Н}} = 2,615 \text{ (мГн)}, \quad (2.24)$$

где $m = 6$ – пульсность трехфазной мостовой схемы выпрямления.

В трехфазной мостовой схеме амплитудное значение первой гармоники выпрямленного напряжения для номинального угла управления α_H :

$$U_{d,m(1)} = \frac{2 \cdot \cos \alpha_H}{m^2 - 1} \cdot \sqrt{1 + m^2 \cdot \text{tg}^2 \alpha_H} \cdot 2.34 \cdot U_{\Phi,Н} = 81,235 \text{ (В)}. \quad (2.25)$$

2.5 Расчет составляющих мощностей и силовых элементов частотно – регулируемого асинхронного электропривода

Активная мощность, потребляемая преобразователем частоты (ПЧ) в номинальном и перегрузочном режимах работы:

$$P_{ПЧ,Н} = \frac{P_{АД,Н}}{\eta_{АД,Н} \cdot \eta_{НВ,Н} \cdot \eta_{АИН,Н}} = 122,9 \text{ (кВт)}, \quad (2.26)$$

$$P_{ПЧ,П} = (2 \dots 2.5) \cdot P_{ПЧ,Н} = 307,4 \text{ (кВт)}.$$

Здесь $P_{АД,Н}$, $\eta_{АД,Н}$ – мощность на валу и коэффициент полезного действия асинхронного электродвигателя в номинальном режиме; $\eta_{НВ,Н}$, $\eta_{АИН,Н}$ – коэффициент полезного действия неуправляемого выпрямителя и автономного инвертора напряжения в номинальном режиме работы. В соответствии с заданием $\eta_{НВ,Н} = 0,98$ и $\eta_{АИН,Н} = 0,96$.

Номинальная мощность звена постоянного тока ПЧ:

$$P_{dПЧ.н} = \frac{P_{АД.н}}{\eta_{АД.н} \cdot \eta_{АИН.н}} = 120,5 \text{ (кВт)}. \quad (2.27)$$

С целью упрощения расчетов и компьютерной модели, позволяющей исследовать трехфазный активный фильтр-компенсатор совместно с нагрузками переменного тока, асинхронный электродвигатель и трехфазный АИН заменяется активным сопротивлением R_d ПЧ, который выполняет роль нагрузки для неуправляемого выпрямителя НВ с емкостным фильтром C_d . Величина активного сопротивления нагрузки:

$$R_{dПЧ.н} = \frac{U_{dПЧ.н}^2}{P_{dПЧ.н}} = 2,244 \text{ (Ом)}, \quad (2.28)$$

где $U_{dПЧ.н}$ – напряжение в звене постоянного тока ПЧ в номинальном режиме (для трехфазной сети 380 В $U_{dПЧ.н} = 510...520$ В). Для напряжения звена постоянного тока $U_{dПЧ.н} = 500...550$ В, которое необходимо для питания двигателя с номинальным линейным напряжением 380 В, емкость конденсатора C_d выбирается из расчёта 100–200 мкФ на 1 кВт мощности двигателя или:

$$C_d = C_{уд} \cdot P_{АД.н} = (100 \dots 200) \cdot P_{АД.н}^{кВт} = 16500 \text{ (мкФ)}. \quad (2.29)$$

Номинальный ток в звене постоянного тока преобразователя частоты:

$$I_{dПЧ.н} = \frac{P_{dПЧ.н}}{U_{dПЧ.н}} = 231,709 \text{ (А)}. \quad (2.30)$$

Номинальное действующее значение тока первой гармоники на входе преобразователя частоты:

$$I_{ПЧ(1).н} = \frac{P_{ПЧ.н}}{3 \cdot U_{Ф.н} \cdot \cos\varphi_{НВ.н}} = 186,282 \text{ (А)}. \quad (2.31)$$

Здесь $\cos\varphi_{НВ.н}$ – косинус фи неуправляемого выпрямителя в номинальном режиме. При расчете примем равным $\cos\varphi_{НВ.н} = 0,97...0,99$.

Действующее значение номинального входного тока ПЧ найдем пользуясь выражением для коэффициента мощности $\chi_{ПЧ.н} = P_{ПЧ.н}/S_{ПЧ.н}$, который в большинстве случаев для неуправляемых выпрямителей с фильтром находится в районе 0,7...0,8, тогда:

$$I_{ПЧ.н} = \frac{I_{ПЧ(1).н} \cdot \cos\varphi_{НВ.н}}{\chi_{ПЧ.н}} = 250,077 \text{ (А)}. \quad (2.32)$$

Для ограничения скорости нарастания токов короткого замыкания и уменьшения искажений напряжения сети рекомендуется соединять неуправляемый выпрямитель с сетью через токоограничивающий реактор $L_{ПЧ}$ с индуктивностью:

$$L_{ТП} = \frac{X_{L\%}}{100\%} \cdot \frac{U_{Ф.н}}{2 \cdot \pi \cdot f_c \cdot I_{ПЧ.н}} = 24,43 \text{ (мкГн)}, \quad (2.33)$$

где $X_{L\%}$ – реактивное сопротивление токоограничивающего реактора в процентах, которое рекомендуется выбирать в районе (0,5...1,0) %.

Полная мощность, потребляемая преобразователем частоты из сети в номинальном режиме и перегрузочном режимах работы электропривода:

$$\begin{aligned} S_{\text{ПЧ.Н}} &= 3 \cdot U_{\text{Ф.Н}} \cdot I_{\text{ПЧ.Н}} = 165,1 \text{ (кВА)}, \\ S_{\text{ПЧ.П}} &= (2 \dots 2.5) \cdot S_{\text{ПЧ.Н}} = 412,6 \text{ (кВА)}. \end{aligned} \quad (2.34)$$

Поскольку косинус фи неуправляемого выпрямителя с емкостным фильтром достигает значений 0,97...0,99, то реактивная мощность, потребляемая ПЧ из сети, весьма мала и стремится к нулю, поэтому в данной работе ею можно пренебречь.

Преобразователь частоты с трехфазным неуправляемым выпрямителем на входе и емкостным фильтром также, как и управляемый тиристорный преобразователь ввиду несинусоидального характера тока генерирует в сеть нечетные высшие гармоники с номерами $n = 6k \pm 1$, то есть $n = 5, 7, 11, 13, 17, 19$ и т.д.

Так как реактивная мощность преобразователя частоты принята равной нулю, мощность искажений для номинального и перегрузочного режимов работы могут быть найдены в соответствии с выражениями:

$$\begin{aligned} T_{\text{ПЧ.Н}} &= \sqrt{S_{\text{ПЧ.Н}}^2 - P_{\text{ПЧ.Н}}^2} = 110,1 \text{ (кВА)}, \\ T_{\text{ПЧ.П}} &= \sqrt{S_{\text{ПЧ.П}}^2 - P_{\text{ПЧ.П}}^2} = 275,3 \text{ (кВА)}. \end{aligned} \quad (2.34)$$

Для более точного расчёта мощности искажений преобразователя частоты при помощи компьютерной модели в программе *MatLab+Simulink* определены для номинального режима работы относительные значения амплитуд высших гармоник тока $I_{\text{ПЧ.}m(n).\text{Н}}$ по отношению к основной $I_{\text{ПЧ.}m(1).\text{Н}}$ и занесем их в таблицу 2.4.

С учетом таблицы 2.3, рассчитаем мощность искажений преобразователя частоты для номинального режима:

$$T_{\text{ТП.Н}} = 3 \cdot U_{\text{Ф.Н}} \cdot I_{\text{ПЧ}(1).\text{Н}} \cdot \sqrt{\sum_{n=5}^{19} \left(\frac{I_{\text{ПЧ.}m(n).\text{Н}}}{I_{\text{ПЧ.}m(1).\text{Н}}} \right)^2} = 109,366 \text{ (кВА)}, \quad (2.35)$$

и режима перегрузки:

$$T_{\text{ТП.П}} = (2 \dots 2.5) \cdot T_{\text{ТП.Н}} = 273,34 \text{ (кВА)}. \quad (2.36)$$

Таблица 2.4 - Относительные значения амплитуд высших гармоник тока по отношению к основной в преобразователе частоты с неуправляемым выпрямителем и емкостным фильтром на входе для номинального режима

Номер гармоники	5	7	11	13	17	19
$\frac{I_{\text{ПЧ.}m(n).\text{Н}}}{I_{\text{ПЧ.}m(1).\text{Н}}}$	0,688	0,378	0,112	0,039	0,025	0,018

2.6 Расчет суммарной пассивной мощности всех нагрузок переменного тока

Основная задача трехфазного активного фильтра заключается в компенсации пассивной мощности, генерируемой в сеть нелинейными нагрузками переменного тока. Зная пассивную мощность всех нагрузок, можно рассчитать ток нагрузки компенсатора и по нему выбрать все элементы силовой цепи фильтра.

Пассивная (неактивная) мощность N состоит из реактивной Q и мощности искажения T :

$$N = \sqrt{Q^2 + T^2}. \quad (2.37)$$

Суммарная максимальная реактивная мощность всех нагрузок в номинальном режиме:

$$Q_{\Sigma H.max} = Q_{RL} + Q_{ТП.Н.max} = 282,3 \text{ (кВА)}, \quad (2.38)$$

и режима перегрузки:

$$Q_{\Sigma П.max} = Q_{RL} + Q_{ТП.П.max} = 537 \text{ (кВА)}. \quad (2.39)$$

Суммарная максимальная мощность искажений всех нагрузок в номинальном режиме:

$$T_{\Sigma H} = T_{ТП.Н} + T_{Пч.Н} = 136,6 \text{ (кВА)}, \quad (2.40)$$

и режима перегрузки:

$$T_{\Sigma П} = T_{ТП.П} + T_{Пч.П} = 341,4 \text{ (кВА)}. \quad (2.41)$$

Суммарная максимальная пассивная мощность всех нагрузок в номинальном режиме:

$$N_{\Sigma H.max} = \sqrt{Q_{\Sigma H.max}^2 + T_{\Sigma H}^2} = 323,7 \text{ (кВА)}, \quad (2.42)$$

и в режиме перегрузки:

$$N_{\Sigma П.max} = \sqrt{Q_{\Sigma П.max}^2 + T_{\Sigma П}^2} = 667,3 \text{ (кВА)}. \quad (2.43)$$

2.7 Расчет параметров источника электроснабжения

Суммарная активная мощность всех нагрузок в номинальном режиме:

$$P_{\Sigma H} = P_{RL} + P_{Пч.Н} + P_{ТП.Н} = 421,1 \text{ (кВт)}. \quad (2.44)$$

Суммарная полная мощность всех нагрузок в номинальном режиме:

$$S_{\Sigma H} = S_{RL} + S_{Пч.Н} + S_{ТП.Н} = 530,4 \text{ (кВА)}. \quad (2.45)$$

Номинальную мощность трехфазного источника переменного напряжения (сети) выберем из условия:

$$S_{С.Н} \geq S_{\Sigma H}. \quad (2.46)$$

Для сетей большой мощности короткого замыкания:

$$S_{КЗ} = 4 \cdot S_{С.Н} = 2,121 \text{ (МВА)}. \quad (2.47)$$

Индуктивное сопротивление сети:

$$X_C = \frac{3 \cdot U_{\Phi H}^2}{S_{КЗ}} = 68,5 \text{ (МОм)}. \quad (2.48)$$

Индуктивность сети:

$$L_C = \frac{X_C}{2 \cdot \pi \cdot f_c} = 0,218 \text{ (мкГн)}. \quad (2.49)$$

Для воздушных линий соотношение между индуктивным и активным сопротивлением сети находится в диапазоне $X_C/R_C = 2 \dots 10$, тогда:

$$R_C = \frac{X_C}{4} = 8,56 \text{ (мОм)}. \quad (2.50)$$

2.8 Расчет параметров и выбор реактора на входе активного фильтра

2.8.1 Расчет параметров активного фильтра на стороне 0,4 кВ

Реактор на входе активного фильтра-компенсатора выполняет следующие основные функции: ограничивает скорость нарастания тока преобразователя при переключении силовых ключей, сглаживает входной ток и выполняет роль индуктивного накопителя электрической энергии.

Индуктивность входного реактора сильно влияет на быстродействие АФК, т.е. его способность компенсировать нелинейные токи нагрузок при резких их изменениях (набросах и сбросах). Поэтому с целью достижения высоких динамических характеристик активного фильтра индуктивность входного реактора следует выбирать по величине как можно меньшей.

АФК с релейно-токовым способом управления относится к системам с частотно-широотно-импульсной модуляцией (ЧШИМ), когда частота переключения силовых ключей f_K снижается по мере увеличения напряжения сети u_C в соответствии с выражением

$$f_K = f_{K.max} \cdot (1 - \overline{u_C^2}) \quad (2.51)$$

где $\overline{u_C} = |u_C/U_{K.m.max}|$ - нормированное значение фазного напряжения сети по отношению к максимальной амплитуде фазного напряжения на входе компенсатора $U_{K.m.max}$.

В соответствии с вышеуказанным уравнением максимальная частота переключения силовых ключей $f_{K.max}$ наблюдается при $\overline{u_C} = 0$, а минимальная частота $f_{K.min}$ при амплитудном значении фазного напряжения сети $U_{C.m}$.

$$f_{K.min} = f_{K.max} \cdot \left[1 - \left(\frac{1}{k_{ПОВ}} \right)^2 \right] = 7,5 \text{ (кГц)}. \quad (2.52)$$

Здесь

$$k_{ПОВ} = \frac{U_{K.m.max}}{U_{C.m}} \quad (2.53)$$

$k_{ПОВ}$ - коэффициент повышения активного фильтра компенсатора.

С целью снижения массогабаритных показателей входного пассивного фильтра ПФ высших гармоник и расширения спектрального диапазона частот активного фильтра-компенсатора рекомендуется выбирать нормированное значение минимальной частоты переключения силовых ключей $\overline{f_{K.min}} = f_{K.min}/f_{K.max}$ в районе 0,4...0,5, тогда в соответствии с требуемым

коэффициентом повышения АФК

$$k_{\text{пов}} = \sqrt{\frac{1}{1 - f_{K.min}}} = 1,41.$$

В трехфазном мостовом инверторе со средней нулевой точкой, образованной конденсаторами C_{d1} , C_{d2} и подключенной к ней нейтрали сети, максимальная амплитуда инвертора $U_{K.m.max} = U_d / 2$. Тогда требуемое постоянное напряжение на выходе АФК

$$U_d = k_{\text{пов}} \cdot 2\sqrt{2} \cdot U_{\text{Ф.Н}} = 880 \text{ (В)},$$

где $U_{\text{Ф.Н}}$ – номинальное фазное значение напряжение сети, равное 220 В.

Номинальное действующее значение тока компенсатора:

$$I_{K.H} = \frac{N_{\Sigma H.max}}{3 \cdot U_{\text{Ф.Н}}} = 490,48 \text{ (А)}. \quad (2.54)$$

Здесь $N_{\Sigma H.max}$ – суммарная максимальная пассивная мощность всех нагрузок переменного тока в номинальном режиме.

Ввиду несинусоидального характера тока компенсатора оценим его приближенное значение номинальной амплитуды по первой гармонике:

$$I_{K.m(1).H} = \sqrt{2} \cdot I_{K.H} = 693,644 \text{ (А)}. \quad (2.55)$$

Требуемая индуктивность реактора на входе АФК:

$$L_{\text{АФК}} = \frac{U_d}{8 \cdot \Delta I_K \cdot f_{K.max}} = 0,1057 \text{ (мГн)}, \quad (2.56)$$

где $\Delta I_K = (0.06 \dots 0.1) \cdot I_{K.m(1).H}$ – амплитуда пульсаций компенсирующего тока АФК; $f_{K.max}$ – максимальная частота коммутации, зависящая от динамических характеристик силовых ключей активного фильтра. Для достижения наибольшего быстродействия АФК $f_{K.max}$ рекомендуется выбирать в диапазоне 12...18 кГц.

Реактор выбираем из условий:

$$L_p \geq L_{\text{АФК}}; I_{p.H} \geq I_{K.H}.$$

Здесь L_p , $I_{p.H}$ – индуктивность и номинальный ток реактора из каталога.

Таблица 2.5 - Каталожные данные реактора

Тип	L_p , мГн	$I_{p.H}$, А
IM0126332	0,063	650

Требуемое значение индуктивности реактора будет достигнуто при использовании двух реакторов, соединенных последовательно.

Реактор необходимо проверить на допустимую перегрузку по следующим условиям:

$$I_{K.п} < 2.5 \cdot I_{p.H}; t_{п} < t_{p.п}; \\ 964,226 < 2,5 \cdot 650; 2 < 10.$$

В соответствии с требованиями на обмоточные элементы трансформаторы и реакторы для электропривода должны выдерживать следующие перегрузки: 75% –

1 мин, 100% – 15 с, 150% – 10 с. При циклических нагрузках среднеквадратичное значение тока не должно превышать номинальный ток. Время усреднения 10 мин.

Действующее значение тока компенсатора в режиме перегрузки:

$$I_{К.П} = \frac{N_{\Sigma П. max}}{3 \cdot U_{\Phi.Н}} = 964,226(A) \quad (2.57)$$

где $N_{\Sigma П. max}$ – суммарная максимальная пассивная мощность всех нагрузок переменного тока в режиме перегрузки.

Поскольку активное сопротивление реактора не указано, оценим его приближенное значение, считая, что активная составляющая напряжения на реакторе $U_{R.P}$ находится в диапазоне 0,2...1,0 В. При этом меньшим значениям $U_{R.P}$ соответствуют реакторы, рассчитанные на большие

номинальные токи $I_{P.Н}$. Тогда активное сопротивление реактора:

$$R_P = \frac{U_{R.P}}{I_{P.Н}} = 0,001538 (Ом). \quad (2.58)$$

2.8.2 Расчет параметров активного фильтра на стороне ВН трансформатора

Для работы фильтра на стороне 6 кВ необходимо провести повторный расчет некоторых величин

Требуемое постоянное напряжение на выходе АФК

$$U_d = k_{ПОВ} \cdot 2\sqrt{2} \cdot U_{\Phi.Н} = 14500 (В),$$

Номинальное действующее значение тока компенсатора:

$$I_{К.Н} = \frac{N_{\Sigma Н. max}}{3 \cdot U_{\Phi.Н}} = 29,66 (А).$$

Здесь $N_{\Sigma Н. max}$ – суммарная максимальная пассивная мощность всех нагрузок переменного тока в номинальном режиме.

Ввиду несинусоидального характера тока компенсатора оценим его приближенное значение номинальной амплитуды по первой гармонике:

$$I_{К.m(1).Н} = \sqrt{2} \cdot I_{К.Н} = 41,952 (А).$$

Требуемая индуктивность реактора на входе АФК:

$$L_{АФК} = \frac{U_d}{8 \cdot \Delta I_K \cdot f_{К. max}} = 24 (мГн),$$

где $\Delta I_K = (0.06 \dots 0.1) \cdot I_{К.m(1).Н}$ – амплитуда пульсаций компенсирующего тока АФК; $f_{К. max}$ – максимальная частота коммутации, зависящая от динамических характеристик силовых ключей активного фильтра. Для достижения наибольшего быстродействия АФК $f_{К. max}$ рекомендуется выбирать в диапазоне 12...18 кГц.

Поскольку активное сопротивление реактора не указано, оценим его приближенное значение, считая, что активная составляющая напряжения на реакторе $U_{R.P}$ находится в диапазоне 0,2...1,0 В. При этом меньшим значениям $U_{R.P}$ соответствуют реакторы, рассчитанные на большие

номинальные токи $I_{P.Н}$. Тогда активное сопротивление реактора:

$$R_p = \frac{U_{R.P}}{I_{P.H}} = 6,6 \text{ (МОм)}.$$

2.9 Выбор конденсаторов постоянного тока и силовых ключей активного фильтра

2.9.1 Расчет конденсаторов постоянного тока для напряжения 0,4 кВ

Конденсаторы постоянного тока, включенные на выходе активного фильтра, играют роль накопителя электрической энергии, которая расходуется на компенсацию пассивной мощности нагрузок переменного тока и на потери мощности в самом преобразователе. Напряжение на выходе преобразователя поддерживается постоянным за счет системы управления и изменяется только в переходных режимах при резких набросах (сбросах) тока нагрузки.

Выбор количества электролитических (пленочных) конденсаторов в звене постоянного тока осуществляется выбором коэффициента загрузки единичного конденсатора по току из условий желаемого срока службы.

При этом для активного фильтра удельная емкость конденсатора реально получается в диапазоне $C_{уд} = (50 \dots 100)$ мкФ/кВА, тогда требуемая емкость звена постоянного тока АФК

$$C_d = C_{уд} \cdot N_{\Sigma H.max} = 31360 \text{ (мкФ)}. \quad (2.59)$$

В силовой схеме АФК используются два последовательно включенных конденсатора C_{d1} , C_{d2} с одинаковой емкостью, поэтому

$$C_{d1} = C_{d2} = 2C_d = 62720 \text{ (мкФ)}. \quad (2.60)$$

Максимальное напряжение, которое прикладывается к каждому конденсатору в звене постоянного тока

$$U_{Cd.max} = k_{зп} \cdot \frac{U_d}{2} = 572 \text{ (В)}. \quad (2.61)$$

Здесь $k_{зп} = 1,3 \dots 1,4$ – коэффициент запаса, учитывающий превышение напряжения на выходе активного фильтра в переходных режимах работы.

По номинальному рабочему напряжению $U_{Cd.H}$, которое должно быть больше $U_{Cd.max}$, выбираем марку конденсатора постоянного тока.

Таблица 2.6 - Каталожные данные конденсатора

U_N , В	C_N , мФ	U_s , В	R_s , МОм	R_{th} , град/Вт	I_{max} , А	\hat{I} , кА	I_s , кА	W_N , Вт·с	L_s , нГн	Тип
600	7	900	0,66	0,9	120	29	87	1260	70	E50.S34–705NT0

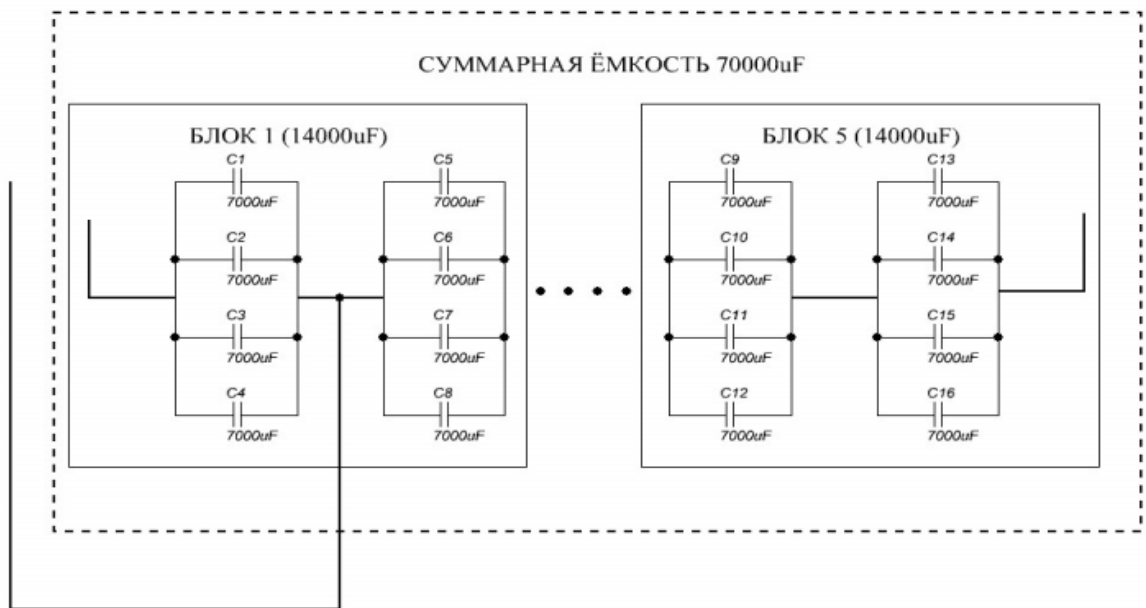


Рисунок 2.3 - Схема батарей конденсаторов АФК в звене постоянного тока

Т. к. расчетная емкость составляет 62720 мкФ, необходимо собрать батарею конденсаторов. На рисунке 2.3 приведена блочная схема конденсаторной батареи.

Среди силовых ключей на среднее напряжение наибольшее применение получили *IGBT*-транзисторы со встречно включенными диодами, которые обладают невысокими потерями мощности и хорошими динамическими характеристиками. Параметры транзисторов приведены в таблице 2.7.

При выборе силовых приборов обязательно должны выполняться следующие условия:

$$U_{K.max} \geq U_{d.max}; I_{K.max} \geq I_{K.m(1).П},$$

где $U_{K.max}$, $I_{K.max}$ – максимальные значения напряжения и тока на коллекторе *IGBT* транзистора, которые указываются в справочной литературе.

Максимально возможное напряжение в звене постоянного тока АФК:

$$U_{d.max} = (1.3 \dots 1.4) \cdot U_d = 1144 \text{ (В)}. \quad (2.62)$$

Амплитуда первой гармоники компенсационного тока в режиме перегрузки для синусоидальной формы:

$$I_{K.m(1).П} = \sqrt{2} \cdot I_{K.П} = 1430 \text{ (А)}. \quad (2.63)$$

При этом расчётное значение амплитуды всегда будет меньше фактической, т.к. в компенсационном токе обязательно содержатся высшие гармоники, которые уже учтены в действующем значении тока компенсатора в режиме перегрузки $I_{K.П}$. Поэтому выбор силовых транзисторов по току произведен с запасом.

Таблица 2.7 - Параметры IGBT – транзисторов (FF1400R12IP4)

Параметр	Значение	Параметр	Значение
1. Максимально допустимое напряжение коллектора $U_{K.max}$, В	1200	5. Напряжение коллектор-эмиттер в насыщенном состоянии $U_{KЭ.НАС}$, В	1,75
2. Максимально допустимый ток коллектора $I_{K.max}$, А	1600	6. Дифференциальное сопротивление $R_D \approx U_{KЭ.НАС}/I_{K.max}$, МОм	1,25
3. Максимально допустимый импульсный ток коллектора в течении 1 мс $I_{K.имп.max}$, А	2800	7. Время задержки включения $t_{d.on}$, мкс	0,21
4. Максимально допустимая рассеиваемая мощность коллектора $P_{K.max}$, кВт	7,65	8. Время нарастания t_r , мкс	0,13
9. Время задержки выключения $t_{d.off}$, мкс	0,95	10. Время спада t_f , мкс	0,23

2.9.1 Расчет конденсаторов постоянного тока для напряжения 6 кВ

Так как активный фильтр подключается в данном случае на сторону 6 кВ вместо 0,4 кВ, то при той же передаваемой мощности, запасенная в конденсаторе энергия будет одинакова. Рассчитаем энергию в конденсаторе:

$$W = \frac{C \cdot U_{НОМ}^2}{2} \quad (2.64)$$

Зная емкость конденсатора, которая была рассчитана выше, и напряжение на стороне НН, можно найти энергию, запасенную в нем. Далее, зная напряжение на высокой стороне находим емкость конденсатора активного фильтра для стороны 6 кВ.

Итоговое значение емкости составит:

$$C_d = \frac{C_d \cdot U_{НОМ0,4}^2}{U_{НОМ6}^2} = 139,4 \text{ (мкФ)}.$$

2.10 Расчет параметров пассивного фильтра высших гармоник на входе активного фильтра

2.10.1 Расчет параметров пассивного фильтра на стороне 0,4 кВ.

Для подавления высокочастотных гармоник, возникающих вследствие работы силовых ключей, на входе АФК установлен трехфазный емкостной $R_{Ф1}C_{Ф1}-R_{Ф3}C_{Ф3}$ пассивный (сетевой) фильтр ПФ.

На рисунке 2.4 а представлена схема замещения одной фазы системы «АФК–фильтр–сеть» без учета активных сопротивлений сети R_c и фильтра $R_{Ф}$. На рисунке через e_c и L_c обозначены ЭДС и индуктивность сети.

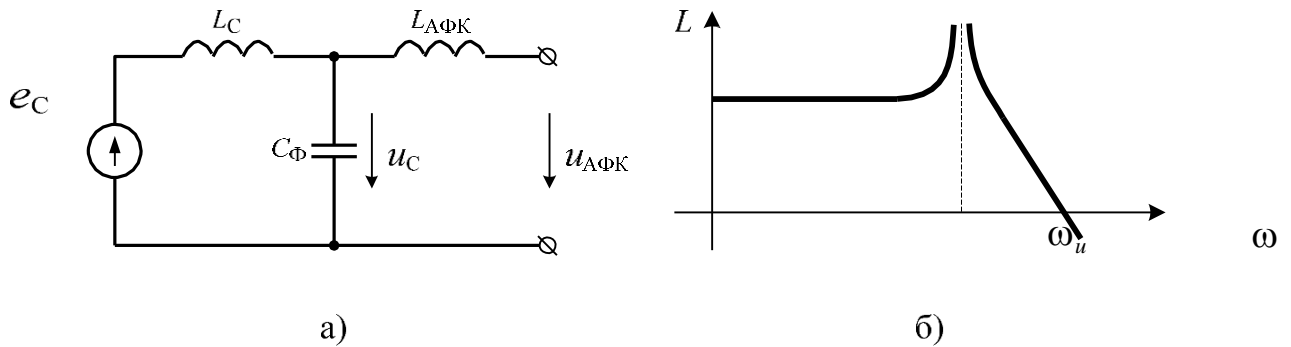


Рисунок 2.4 - Схема замещения одной фазы системы «АФК–фильтр–сеть» (а) и логарифмическая амплитудно-частотная характеристика фильтра по напряжению (б)

Фильтрующие свойства $LAФКСФ$ -фильтра определяются передаточной функцией $W_u(p)$, как отношение напряжение на выходе фильтра $u_C(t)$ к напряжению на выходе АФК $u_{АФК}(t)$

$$W_u(p) = \frac{u_C(t)}{u_{АФК}(t)} = \frac{L_C}{(L_{АФК} + L_C) \cdot \left(\frac{1}{\omega_u^2} \cdot p^2 + 1\right)}. \quad (2.65)$$

Здесь

$$\omega_u = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{L_{АФК} \cdot L_C}{L_{АФК} + L_C}\right) \cdot C_Ф}}. \quad (2.66)$$

частота резонанса напряжений.

Логарифмическая амплитудно-частотная характеристика $LAФКСФ$ – фильтра, построенная в соответствии с передаточной характеристикой, представлена на рисунке 2.4 б.

Для эффективного проявления фильтрующих свойств высокочастотного пассивного фильтра ПФ его частота резонанса напряжений ω_u должна быть не менее чем в 3...4 раза меньше минимальной частоты ω_{min} переключения силовых ключей АФК.

$$\omega_u = \frac{2 \cdot \pi \cdot f_{к.min}}{3 \dots 4} = 11,78 \cdot 10^3 \left(\frac{\text{рад}}{\text{с}}\right), \quad (2.67)$$

где $f_{к.min}$ – минимальная частота переключения силовых ключей АФК.

Емкость пассивного фильтра:

$$C_Ф = \left(\frac{L_{АФК} + L_C}{L_{АФК} \cdot L_C}\right) \cdot \frac{1}{\omega_u^2} = 714,5 \text{ (мкФ)}. \quad (2.68)$$

Следует отметить, что значение частоты резонанса напряжений ω_u , однозначно определяет стоимостные и массогабаритные показатели фильтра высших гармоник на входе АФК.

При включении пассивного фильтра в сеть с источником большой мощности, т.е. малым значением индуктивности сети L_C , в системе возможно проявление

резонанса тока, когда частота «антирезонанса» $\omega_i = 1/\sqrt{L_c \cdot C_\Phi}$ приближается к резонансной частоте фильтра ω_u . В результате возникает возможность резкого возрастания соответствующей гармоники напряжения и тока в сети и фильтре, которые приводят к аварийным ситуациям из-за выхода из строя конденсаторов СФ1–СФ3 пассивный фильтра ПФ, пробоя изоляции и пр.

Для исключения этих явлений последовательно с конденсаторами фильтра СФ1–СФ3 дополнительно включают активные сопротивления $R_{\Phi 1}$ – $R_{\Phi 3}$, снижающие добротность ПФ и эффективность его фильтрации.

Удельное активное сопротивление фильтра рекомендуется выбирать в диапазоне 0,05...0,07 на 1 кВА компенсируемой мощности, тогда активное сопротивление фильтра:

$$R_\Phi = \frac{1}{(0.05 \dots 0.07) \cdot N_{\Sigma H.max}} = 0,05314 \text{ (Ом)}. \quad (2.69)$$

Здесь $N_{\Sigma H.max}$ – суммарная максимальная пассивная мощность, компенсируемая АФК, в номинальном режиме работы.

2.10.2 Расчет параметров пассивного фильтра на стороне 6 кВ

Учитывая, что резонансная частота остается неизменной, рассчитаем емкость пассивного фильтра на стороне 6 кВ.

Емкость пассивного фильтра:

$$C_\Phi = \left(\frac{L_{\text{АФК}} + L_c}{L_{\text{АФК}} \cdot L_c} \right) \cdot \frac{1}{\omega_u^2} = 2,7 \text{ (мкФ)}.$$

2.11 Расчет основных параметров системы управления активного фильтра

2.11.1 Расчет основных параметров системы управления активного фильтра на стороне 0,4 кВ.

Коэффициент передачи всех датчиков тока ДТ1–ДТ6 выбираем таким образом, чтобы четырем вольтам на их выходе соответствовала номинальная амплитуда компенсационного тока по первой гармонике $I_{K.m(1).H}$

$$k_{\text{ДТ}} = \frac{4}{I_{K.m(1).H}} = 0,005952. \quad (2.70)$$

Пороги переключения (гистерезис) релейных элементов РЭ1–РЭ3 внутреннего контура тока АФК зависят от выбранного коэффициента датчиков $k_{\text{ДТ}}$ и амплитуды пульсаций компенсирующего тока ΔI_K

$$\pm b = k_{\text{ДТ}} \cdot \Delta I_K = 0,4. \quad (2.71)$$

Для удобства коэффициент датчика напряжения $k_{\text{ДН}}$ ДН2 цепи обратной связи АФК примем равным 0,01 В/В, тогда уровень сигнала задания внешнего контура напряжения

$$U_{d.зад} = k_{дн} \cdot U_d = 8,8 \text{ (В)}. \quad (2.72)$$

Здесь U_d – постоянное напряжение на выходе АФК, рассчитанное из выражения.

Ограничения амплитуды активной $I_{dm.max}$ и реактивной $I_{qm.max}$ составляющих токов АФК осуществляется при помощи блоков ограничения БО1 и БО2. Уровень напряжения для ограничения активной составляющей тока БО1

$$U_{dm.max} = k_{дт} \cdot I_{К.m(1).н} = 4 \text{ (В)}, \quad (2.74)$$

и реактивной составляющей БО2

$$U_{qm.max} = k_{дт} \cdot I_{К.m(1).п} = 8,245 \text{ (В)}, \quad (2.73)$$

где $I_{К.m(1).п}$ амплитуда компенсационного тока по первой гармонике в режиме перегрузки.

Напряжение на выходе АФК кроме постоянной составляющей содержит небольшую переменную составляющую с частотой выпрямленного сетевого напряжения $f_{п} = 6f_c$. Для ее подавления в цепи обратной связи внешнего контура включен фильтр нижних частот Ф1 с передаточной функцией $W(p) = 1/(T_{ф1}p + 1)$. В противном случае наблюдается искажение формы компенсационного тока. С целью достижения высокого быстродействия АФК в сочетании с наименьшим искажением тока постоянную времени фильтра рекомендуется выбирать равной

$$T_{ф1} = \frac{1}{6f_c} = 3,3 \text{ (мс)}. \quad (2.74)$$

Пассивный фильтр высших гармоник на входе АФК за счет конденсаторов СФ1–СФ3 осуществляет дополнительную компенсацию реактивной мощности в сети, поэтому для поддержания коэффициента мощности, близкого к единице, особенно при малых токах нагрузки, требуется коррекция напряжения задания по реактивной составляющей тока в системе управления АФК

$$U_{q.зад} = -k_{дт} \cdot \sqrt{2} \cdot I_{пф} = -0,425 \text{ (В)}. \quad (2.75)$$

Здесь

$$I_{пф} = U_{фн} \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_c \cdot C_{ф} = 52,118 \text{ (А)} - \quad (2.76)$$

действующее значение тока, протекающего через конденсатор СФ.

Напряжение задания по реактивной составляющей тока $U_{q.зад}$ берется со знаком «минус», т.к. конденсаторы СФ1–СФ3 ПФ создают опережающий фазовый сдвиг в результирующем сетевом токе.

2.11.2 Расчет основных параметров системы управления активного фильтра на стороне 6 кВ.

Коэффициент передачи всех датчиков тока ДТ1–ДТ6 выбираем таким образом, чтобы четырем вольтам на их выходе соответствовала номинальная амплитуда компенсационного тока по первой гармонике $I_{К.m(1).н}$

$$k_{дт} = \frac{4}{I_{К.m(1).н}} = 0,095.$$

Для удобства коэффициент датчика напряжения $k_{ДН}$ ДН2 цепи обратной связи АФК примем равным 0,001 В/В, тогда уровень сигнала задания внешнего контура напряжения

$$U_{d.зад} = k_{ДН} \cdot U_d = 14,5 \text{ (В)}.$$

Выводы по главе 2.

На основании данного описания модели, а также проделанных расчетов можно построить модель в программе MatLab и посмотреть, каким образом будут меняться показатели сети, в зависимости от точки подключения активного фильтра к ней.

3 ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ СЭС С АКТИВНЫМ ФИЛЬТРОМ В РАЗЛИЧНЫХ ТОЧКАХ

3.1 Расчет кабельных линий и трансформатора для СЭС

Для корректной работы системы, а также для приближения данной модели к реальным условиям, сделаем дополнительные расчеты. Для этого рассчитаем кабельные линии на стороне 0,4 кВ, стороне 6 кВ, а также расчет параметров трансформатора.

Рассчитаем сечение кабельных линий к каждой из нагрузок:

$$F_{\text{расч}} = \frac{I_{\text{расч}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{ном}}}$$

Расчетное сечение кабельной линии для каждой из нагрузок выбирается по максимально допустимому току. Ток нагрузки составляет 284 Ампер, тогда по таблице 3.1, сечение кабеля выберем 120 мм². Далее сведем в таблицу значение токов, потребляемых каждой из нагрузок, и соответствующее сечение кабеля.

Таблица 3.1 – Параметры выбранных кабельных линий

Вид нагрузки	$I_{\text{расч}}$, А	$I_{\text{доп}}$, А	$F_{\text{кл}}$, мм ²	Активное сопротивление, Ом/км	Индуктивное сопротивление, Ом/км
RL – нагрузка	284	295	120	0,15	0,107
ДПТ	363,87	385	185	0,1	0,101
АД	250	295	120	0,15	0,107

Примем, что каждая из нагрузок находится на расстоянии 300 метров от шин 0,4 кВ, тогда с учетом длины кабельной линии сопротивления будут равны:

Таблица 3.2 – Параметры выбранных кабельных линий, с учетом их длины

Вид нагрузки	$I_{\text{расч}}$, А	$I_{\text{доп}}$, А	$F_{\text{кл}}$, мм ²	Активное сопротивление, Ом	Индуктивное сопротивление, Ом
RL – нагрузка	284	295	120	0,045	0,0321
ДПТ	363,87	385	185	0,03	0,0303
АД	250	295	120	0,045	0,0321

Для более полного представления СЭС рассчитаем кабельную линию от шин трансформатора 0,4 кВ до шин ТП, длину которой примем равной 150 метров.

Для определения сечения данной кабельной линии просуммируем токи каждой из нагрузок.

$$\sum I_{\text{расч.НН}} = I_{RL} + I_{\text{ДПТ}} + I_{\text{АД}} = 284 + 363,87 + 250 = 897,87 \text{ А}$$

Так как расчетный ток в несколько раз превышает допустимое значение тока для максимального сечения кабеля, то возьмем три кабельные линии, сечением 150 мм² с максимально допустимым током 335 Ампер, тогда данные для кабеля сведем в таблицу.

Таблица 3.3 – Параметры выбранной кабельной линии

$I_{\text{расч.НН}}$, А	Количество кабелей, п	$I_{\text{доп}}$, А	$F_{\text{кл}}$, мм ²	Активное сопротивление, Ом	Индуктивное сопротивление, Ом
897,87	3	335	150	0,12	0,079

Сведем в таблицу данные о кабельной линии, с учетом ее длины

Таблица 3.4 – Параметры выбранной кабельной линии с учетом ее длины

$F_{\text{кл}}$, мм ²	Активное сопротивление, Ом	Индуктивное сопротивление, Ом	Полное сопротивление, Ом
150	0,018	0,01185	0,022

Для определения кабельной линии на стороне ВН определим ток:

$$I_{\text{расч.ВН}} = \frac{I_{\text{расч.НН}}}{K_{\text{T}}} = \frac{897,87}{15,75} = 57 \text{ А}$$

Исходя из расчетного значения тока, выберем кабельную линию по максимально допустимому значению. Также примем, что длина линии от источника до трансформатора составляет 200 метров, тогда с учетом длины, эквивалентное сопротивление составит:

Таблица 3.5 – Параметры выбранной кабельной линии на стороне 6 кВ

$F_{\text{кл}}$, мм ²	Активное сопротивление, Ом	Индуктивное сопротивление, Ом	Полное сопротивление, Ом
16	0,224	0,0204	0,225

Рассчитаем мощность трансформатора:

$$S_{\text{т.расч}} = \frac{\sum S_{\text{нагр}}}{K_3}$$

Для начала примем коэффициент загрузки трансформатора равным 0,7, тогда:

$$S_{т.расч} = \frac{530,4}{0,7} = 757,714 \text{ кВА}$$

Фактическая мощность трансформатора выбирается больше расчетной:

$$S_{т} \geq S_{т.расч}$$

Таблица 3.5 - Мощность и параметры трансформатора:

St, кВА	ΔРхх, кВт	ΔРкз, кВт	Iхх, %	Uк, %	Цена, тыс.руб/шт
1000	1,55	10,8	1,2	5,5	739

Рассчитаем фактический коэффициент загрузки:

$$K_3 = \frac{\sum S_{нагр}}{S_{т}}$$

Тогда с учетом выбранной мощности трансформатора:

$$K_3 = \frac{530,4}{1000} = 0,53$$

3.2 Работа АФ только с тиристорным преобразователем

Данный вариант модели представляет собой подключение активного фильтра к одной из нагрузок системы электроснабжения. В ходе работы были проведены несколько внутренних вариантов подключения активного фильтра к системе электроснабжения. Итоговым вариантом подключения активного фильтра стала нагрузка с тиристорным преобразователем. При отключенном активном фильтре коэффициент нелинейных искажений по напряжению сети составляет 15,48. Так как итоговое значение больше нормируемого, была определена необходимость установки активного фильтра. Итоговым результатом после установки фильтра стал коэффициент нелинейных искажений, равный 11,41. Далее в таблицах представлены потоки мощностей, при включенном и отключенном вариантах активного фильтра.

Таблица 3.6 – Потоки мощностей при отключенном активном фильтре

	ВН трансформатора	НН трансформатора	Кабельная линия	RL нагрузка	Тиристорный преобразователь	3-фазный ЭП
PPS P	306000	288100	280000	101500	83300	81530
PPS Q	211600	198400	198400	76040	112900	9459
P 3ph P	337300	326300	317800	114800	93380	96090
P 3ph Q	140700	114700	114700	32330	79490	2907

Таблица 3.7 – Потoki мощностей при включенном активном фильтре

	ВН трансформатора	НН трансформатора	Кабельная линия	RL нагрузка	Тиристорный преобразователь	3-фазный ЭП
PPS P	371500	350300	343900	130000	99470	96420
PPS Q	51990	41410	41410	97300	124200	20350
P 3ph P	396700	374800	367400	112800	5451	113500
P 3ph Q	150700	148700	148700	123600	176000	62920

Исходя из полученных данных по таблицам, можно сделать вывод, что активный фильтр при его подключении к одной из нагрузок, потребляет большую активную мощность из системы, но в то же время компенсирует поток реактивной мощности по первой гармонике, но увеличивает гармоническую составляющую по 7 гармонике.

Модель данной системы представлена в приложении 1.

3.3 Работа АФ совместно со всеми нагрузками при работе преобразователей в номинальных условиях

При работе в номинальных условиях системы электроснабжения значение коэффициента нелинейных искажений на источнике составляет 15,48. Так как значение коэффициента нелинейных искажений больше нормируемого, необходимо установить активный фильтр. После установки активного фильтра на стороне НН, коэффициент нелинейных искажений уменьшился до значения 1,14. Исходя из данных, полученных в результате исследования данной модели можно сделать вывод, что при подключении активного фильтра к шинам РП 0,4 кВ, где подключены нагрузки сети, в системе уменьшаются гармонические составляющие и тем самым, повышается качество сети. Далее представлены потоки мощностей при отключенном и включенном активным фильтром.

Таблица 3.8 – Потoki мощностей при отключенном активном фильтре

	ВН трансформатора	НН трансформатора	Кабельная линия	RL нагрузка	Тиристорный преобразователь	3-фазный ЭП
PPS P	306000	288100	280000	101500	83300	81530
PPS Q	211600	198400	198400	76040	112900	9459
P 3ph P	337300	326300	317800	114800	93380	96090
P 3ph Q	140700	114700	114700	32330	79490	2907

Таблица 3.9 – Поток мощности при включенном активном фильтре

	ВН трансформатора	НН трансформатора	Кабельная линия	RL нагрузка	Тиристорный преобразователь	3-фазный ЭП
PPS P	500300	471500	460400	154300	164200	124800
PPS Q	16070	170600	170600	115600	48700	6307
P 3ph P	510100	406100	396800	153900	162500	64430
P 3ph Q	11520	223600	223600	115400	78090	30120

Исходя из полученных данных по таблицам, можно сделать вывод, что активный фильтр при его подключении к системе, увеличивает потоки мощности активной составляющей, но активный фильтр компенсирует гармоническую составляющую реактивной мощности по первой гармонике, а также частично компенсирует реактивную мощность высших гармоник.

Модель данной системы представлена в приложении 2.

3.4 Работа АФ на шинах 6 кВ трансформатора

В данной модели системы электроснабжения, активный фильтр подключается на стороне 6 кВ, на шинах трансформатора. Модель системы представлена в приложении 3.

При работе в номинальных условиях системы, коэффициент нелинейных искажений составляет 15,48%, что больше нормируемого значения, в то время, как при подключении активного фильтра к системе, коэффициент нелинейных искажений снижается до значения 2,25.

Ниже в таблицах представлены потоки мощности системы при отключенном и включенном варианте активного фильтра.

Таблица 3.10 – Поток мощности при отключенном активном фильтре

	ВН трансформатора	НН трансформатора	Кабельная линия	RL нагрузка	Тиристорный преобразователь	3-фазный ЭП
PPS P	306000	288100	280000	101500	83300	81530
PPS Q	211600	198400	198400	76040	112900	9459
P 3ph P	337300	326300	317800	114800	93380	96090
P 3ph Q	140700	114700	114700	32330	79490	2907

Таблица 3.11 – Поток мощности при включенном активном фильтре

	ВН трансформатора	НН трансформатора	Кабельная линия	RL нагрузка	Тиристорный преобразователь	3-фазный ЭП
PPS P	435400	412400	402200	127300	146100	112900
PPS Q	179300	162500	162500	95640	49840	16990
P 3ph P	329600	372900	363300	115000	149000	83660
P 3ph Q	196200	197700	197700	107100	58470	32110

По данным таблиц, представленных выше, можно сделать вывод, что при подключении активного фильтра к стороне ВН системы, потоки активной мощности, проходящие по системе, возросли, но гармоническая составляющая реактивной мощности по первой гармонике стала значительно меньше, несмотря на то, что полная реактивная мощность стала выше.

Выводы по разделу 3.

В ходе проведенных экспериментов были получены данные о каждой из исследуемых моделей, благодаря которым был получен результат и выбрано оптимальное расположение активного фильтра в системе электроснабжения.

4 АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

В данной работе были исследованы модели на оптимальное размещение активного фильтра по двум критериям: коэффициент нелинейных искажений, а также потоки мощности, протекающие по системе.

Сравнивая все три модели, по тому, как изменялся коэффициент нелинейных искажений, можно отметить два наиболее выгодных варианта: активный фильтр на стороне НН трансформатора, а также на высшей стороне трансформатора. Сравнивая эти два варианта по тому, как изменился коэффициент нелинейных искажений, а также сравнивая потоки мощностей, протекающих по системам, наиболее выгодным и оптимальным является подключение активного фильтра на шинах РП 0,4 кВ.

4.1 Рекомендации по определению места подключения активного фильтра

Для выбора оптимального расположения активного фильтра необходимо располагать следующими данными:

- прежде всего необходимо понимать какая нагрузка присутствует в системе, и располагать данными по ней
- необходимо учитывать величину коэффициента нелинейных искажений, и в случае его превышения над нормативными данными появляется целесообразность установки активного фильтра
- для корректной работы фильтра, и влияния его на систему электроснабжения необходимо проводить очень точные расчеты нагрузок, а также выбор самих параметров активного фильтра, в противном случае, его влияние только усугубит искажения синусоиды и коэффициент нелинейных искажений увеличится

Следуя этим рекомендациям, можно выбрать наиболее оптимальное расположение активного фильтра, тем самым уменьшить влияние гармоник на систему электроснабжения, и повысить качество передаваемой электроэнергии.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для всё большего и большего количества приложений по всему миру становится необходимой фильтрация гармоник, а не только коррекция коэффициента мощности, как это было в прошлом. Изменения структуры нагрузки и сети делают фильтрацию гармоник всё более и более важной. Во многих случаях используются гибридные решения, когда устанавливается нерезонансная система.

Наличие различного рода электроприемников с нелинейными характеристиками, которые все чаще начинают использоваться на производстве, промышленности, транспорте и бытовых нуждах, становится одной из важных причин возникновения несинусоидальности токов и напряжения. [9] Одной из самых распространенных нелинейных нагрузок является силовая электроника, в частности различного рода тиристорные преобразователи, мощность которых, с истечением времени постоянно увеличивается. Искажение напряжения происходит из-за несинусоидальности тока (похожей на трапецию), зависящее от угла управления и угла коммутации. [10]

При установке активного фильтра в систему электроснабжения происходит процесс компенсации гармонических составляющих в системе. Кроме компенсации гармонических составляющих активный фильтр может компенсировать реактивную мощность основной гармоники тока в систему, тем самым уменьшая потери мощности и напряжения в системе электроснабжения. Также необходимо учитывать, что максимальное значение мощности активного фильтра будет определяться максимальными значениями суммы компенсируемого и фильтруемого токов. [11]

Исходя из полученных данных в ходе работы, можно сделать вывод, что оптимальным размещением активного фильтра является точка подключения его непосредственно

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1 Бурман А.П., Розанов Ю.К., Шакарян Ю.Г. Перспективы применения в ЕЭС России гибких (управляемых) систем электропередачи переменного тока. — Электротехника, 2004, № 8.
- 2 Кронгауз Д.Э. Повышение качества электроэнергии в городских распределительных сетях посредством управления режимами реактивной мощности / Д.Э. Кронгауз // Промышленная энергетика. – 2010. – № 10
- 3 Hirofumi Akagi. Активные фильтры гармоник. Proc.of the IEEE, 2005, 93, No 12, 2128-2141.
- 4 Розанов Ю.К. Основные этапы развития и современное состояние силовой электроники. — Электричество, 2005, № 7.
- 5 Rudnick H., Dixon J., Moran L. Поставка чистой электроэнергии. IEEE Power & Energy Magazine, 2003, 1, No 5, 32-40.
- 6 Бренков С. Н. Повышение эффективности работы системы тягового электроснабжения переменного тока регулируемые устройства поперечной компенсации реактивной мощности, адаптированными к режиму тяги : диссертация ... кандидата технических наук : 05.22.07 / Бренков Сергей Николаевич; - Омск, 2011. - 116 с. : ил.
- 7 Лозина Н.Г., Мазуров М.И., Николаев А.В. Подавление высших гармоник в схемах передач постоянного тока с применением активных фильтров. Электрические станции, 2005, № 12. РГ 14.28 СИГРЭ Активные фильтры для ВЛПТ. Electra 2005, April, No 207, 45-49.
- 8 Дудкин, М.М. Проектирование трехфазного активного фильтра – компенсатора для улучшения качества электроэнергии в системах электроснабжения/ М.М. Дудкин, А.Н. Шишков, О.Г. Брылина – Челябинск: «Издательский центр ЮУрГУ», 2017. – 48 с.
- 9 Бурман А.П. Управление потоками электроэнергии и повышение эффективности электроэнергетических систем: учебное пособие/ А.П. Бурман, Ю.К. Розанов, Ю.Г. Шакарян – М. Издательский дом МЭИ, 2012 – 336 с, ил.
- 10 Бохмат И.С. Воротницкий В.Э. Татаринев Е.П. Снижение коммерческих потерь в электроэнергетических системах. Электрические станции 1998, №9.
- 11 Инструкция по снижению технологического расхода электрической энергии на передачу по электрическим сетям энергосистем и энергообъединений, СПО Союзтехэнерго, М.1987.