

На правах рукописи



КАРАБАЕВ Артём Александрович

**ТРЕХФАЗНЫЙ КОМПЕНСАТОР
РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ
С ИНДУКТИВНЫМ НАКОПИТЕЛЕМ ЭНЕРГИИ
(РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ)**

Специальность:

05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

АВТОРЕФЕРАТ

**диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук**

Уфа – 2011

Работа выполнена в ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный авиационный технический университет» на кафедре электромеханики.

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Рогинская Любовь Эммануиловна
профессор кафедры электромеханики
Уфимского государственного авиационного технического университета.

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Шапиро Семён Валентинович
профессор, заведующий кафедрой физики
Уфимской государственной академии
экономики и сервиса,

кандидат технических наук, доцент
Фаттахов Касым Мубинович
доцент кафедры электротехники и
электрооборудования предприятий
Уфимского государственного нефтяного
технического университета

Ведущее предприятие: **ФГУП НКТБ «Вихрь»**

Защита состоится 20 декабря 2011 года в 10 часов на заседании диссертационного совета Д-212.288.02 при Уфимском государственном авиационном техническом университете по адресу: 450000, г. Уфа, ул. К. Маркса, 12, актовЫй зал 1-го корпуса.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Уфимского государственного авиационного технического университета.

Автореферат разослан 14 ноября 2011 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета
доктор технических наук, доцент



А.В. Месропян

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертационного исследования. Развитие экономики страны характеризуется ростом потребления различных видов энергии. Доля вложений в энергетический комплекс составляет более 1/3 капитальных вложений, и в нём занята 1/6 часть трудящихся. Поэтому рациональное развитие энергетического хозяйства и повышение степени полезного использования энергетических ресурсов является актуальной проблемой.

Ещё одной задачей является передача и использование больших количеств электрической энергии с минимальными потерями. Анализ этих потерь показывает, что одной из основных причин является недостаточный уровень компенсации реактивной мощности в сетях и установках потребителей.

Рациональное проектирование и эксплуатация электрических установок с точки зрения компенсации реактивной мощности в значительной степени определяют уровень экономичности режимов электрических сетей, так как способствуют уменьшению потерь активной мощности и снижению затрат на повышение пропускной способности систем (воздушных и кабельных линий передач, трансформаторов, реакторов и т.д.). От правильного решения вопросов компенсации реактивной мощности зависят также качественные показатели и технический уровень регулирования напряжения, поддержание рациональных режимов работы сети, устойчивости и надёжности электроснабжения.

Потребители электрической энергии, например асинхронные двигатели, для нормальной работы нуждаются как в активной, так и в реактивной мощностях, вырабатываемых, например, синхронными генераторами и передающихся по системе электроснабжения трёхфазного переменного тока от электростанций к потребителю. Реактивная мощность ухудшает показатели работы энергосистемы, то есть загрузка реактивными токами генераторов электростанций увеличивает расход топлива, растут потери в подводящих сетях и приёмниках, увеличивается падение напряжения в сетях.

Основными потребителями реактивной мощности являются асинхронные электродвигатели (40%), трансформаторы всех ступеней трансформации (35%), преобразователи (10%) и электрические печи (8%). Таким образом, существуют приемники электроэнергии, нуждающиеся в реактивной мощности.

Компенсация реактивной мощности для промышленных предприятий и сетей, где имеется резкое изменение нагрузки, особенно при «слабых сетях» (с низкой мощностью короткого замыкания) является одной из самых актуальных задач развития энергохозяйства промышленных предприятий нашей страны на настоящий момент.

Наличие резко переменной нагрузки и высших гармоник ограничивает применение источников реактивной мощности на базе синхронных компенсаторов и конденсаторных установок, так как в первом случае имеет место инерционность, а во втором перегрузка оборудования высшими гармониками (возможен перегрев и взрыв конденсаторов). Поэтому необходим источник реактивной мощности, который обладает достаточным

быстродействием и не перегружается высшими гармониками. Этим требованиям полностью удовлетворяет трёхфазный компенсатор реактивной мощности с индуктивным накопителем энергии (далее трёхфазный компенсатор реактивной мощности).

Вопросам влияния реактивной мощности на качество электроэнергии и вопросам компенсации реактивной мощности посвящено много работ. Большой вклад в развитие компенсаторов реактивной мощности с индуктивным накопителем энергии внесли такие учёные как: Толстов Ю.Г., Зиновьев Г.С., Маевский О.А., Розанов Ю.К., Волков И.В., Hoft R.G. и Han В.М. Однако, ряд вопросов освещён недостаточно или плохо изучен. К ним можно отнести: сравнение динамических характеристик различных компенсаторов реактивной мощности, оценку эффективности применения современной элементной базы для улучшения характеристик компенсирующих устройств. В основном работы посвящены статическим компенсаторам с емкостным накопителем энергии, а работ, посвящённых компенсаторам с индуктивным накопителем энергии, не столь много.

Таким образом, проведение исследований, направленных на разработку новых компенсаторов реактивной мощности с индуктивным накопителем энергии в настоящее время является актуальным.

Целью диссертационной работы является разработка принципов построения и управления трёхфазного компенсатора реактивной мощности с индуктивным накопителем энергии, создание его имитационной модели и методики расчёта его элементов.

Задачами диссертации являются:

1. Разработка принципиальной схемы трёхфазного компенсатора реактивной мощности с индуктивным накопителем энергии и способа управления им.
2. Создание имитационной модели трёхфазного компенсатора реактивной мощности с индуктивным накопителем энергии.
3. Разработка методики расчёта модулей трёхфазного компенсатора реактивной мощности с индуктивным накопителем энергии.

Методы исследований. При выполнении работы для решения поставленных задач проводилось сравнение различных способов определения реактивной мощности и выбор наиболее рационального её определения; использовались положения теории нелинейных цепей с импульсным воздействием; численные методы расчёта; метод имитационного моделирования с помощью пакета прикладных программ Matlab и Simulink.

На защиту выносятся:

1. Принципиальная схема трёхфазного компенсатора реактивной мощности с индуктивным накопителем энергии и способ управления им.
2. Имитационная модель трёхфазного компенсатора реактивной мощности с индуктивным накопителем энергии и результаты исследований, проведённых на её основе.
3. Методика расчёта модулей трёхфазного компенсатора реактивной мощности с индуктивным накопителем энергии.

Научная новизна:

1. Разработана принципиальная схема трёхфазного компенсатора реактивной мощности с индуктивным накопителем энергии и алгоритм управления им на основе широтно-импульсной модуляции тока по пропорциональному закону.

2. Создана имитационная модель трёхфазного компенсатора реактивной мощности с индуктивным накопителем энергии. На её основе проведены исследования и выявлены основные характеристики компенсатора, а также подтверждена эффективность разработанного алгоритма управления.

3. Разработана методика по расчёту и выбору элементов трёхфазного компенсатора реактивной мощности с индуктивным накопителем энергии, в том числе учитывающая наличие постоянной и нескольких сильно различающихся переменных составляющих тока в дросселе с зазором.

Практическую значимость имеют:

1. Алгоритм управления (и программа для управляющего микроконтроллера на его основе) трёхфазным компенсатором реактивной мощности с индуктивным накопителем энергии (защищён патентом Российской Федерации № 2368992) реализующий широтно-импульсную модуляцию тока по пропорциональному закону с целью облегчения фильтрации высших гармоник тока и обеспечивающий принудительное завершение переходного процесса (время регулирования мощности компенсатора составляет не более 0,005 с при любом изменении реактивной мощности нагрузки), не требующий сложного анализа сети для синхронизации управляющих сигналов транзисторов с сетевым напряжением и учитывающий реактивную мощность высших гармоник, что повышает точность компенсации реактивной мощности.

2. Имитационная модель трёхфазного компенсатора реактивной мощности с индуктивным накопителем энергии, дающая представление о протекающих в элементах компенсатора электромагнитных процессах (изменение во времени тока и напряжения) для дальнейшего расчёта их параметров и позволяющая адаптировать алгоритм регулирования мощности компенсатора к конкретным условиям эксплуатации.

3. Методика расчёта дросселя с зазором, учитывающая постоянную и три переменных составляющих тока с частотами: 300, 12600 и 12900 Гц.

Реализация результатов работы. Результаты исследования внедрены в ООО НПП «Курай» и в учебный процесс ФГБОУ ВПО УГАТУ по направлению подготовки бакалавров 140400 «Электроэнергетика и электротехника». По данной работе выигран грант «УМНИК» на 2010 год и его продолжение на 2011 год.

Апробация работы.

Основные положения и результаты диссертационной работы представлялись на следующих научно-технических конференциях:

1. Мавлютовские чтения: Всероссийская молодежная научная конференция, посвящённая 75-летию УГАТУ. г. Уфа, УГАТУ, 2007 г.

2. Актуальные проблемы в науке и технике: Четвёртая всероссийская зимняя школа-семинар аспирантов и молодых учёных. г. Уфа, УГАТУ, 2009 г.

3. Мавлютовские чтения: Всероссийская молодежная научная конференция. г. Уфа, УГАТУ, 2009 г.

4. Актуальные проблемы в науке и технике: Пятая всероссийская зимняя школа-семинар аспирантов и молодых учёных. г. Уфа, УГАТУ, 2010 г.

5. Мавлютовские чтения: Всероссийская молодежная научная конференция. г. Уфа, УГАТУ, 2010 г.

6. Научно-исследовательские проблемы в области энергетики и энергосбережения: Всероссийская конференция с элементами научной школы для молодежи. г. Уфа, УГАТУ, 2010 г.

Публикации по теме диссертации. По результатам исследований опубликовано 14 печатных работ, из них 1 патент РФ, 13 статей и тезисов докладов, в том числе 2 статьи в изданиях, рекомендованных ВАК Рособнадзора.

Объём и структура работы. Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка литературы из 108 источников и приложений общим объёмом 144 страницы. Основная часть содержит 136 страниц, 64 рисунка, 6 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении к диссертации обосновывается актуальность решаемых задач, приводятся основные положения и результаты, выносимые на защиту, отмечается их новизна и практическая значимость.

В первой главе проведён анализ состояния проблемы и поставлены научно-технические задачи исследования. Рассматриваются негативные проявления реактивной мощности для сети и для потребителей. Обосновывается необходимость компенсации реактивной мощности.

Рассматриваются современные компенсаторы реактивной мощности и отмечается области их использования и присущие им недостатки. Отмечаются ограничения традиционных компенсаторов реактивной мощности – конденсаторных батарей. Обосновывается необходимость разработки новых трёхфазных компенсаторов реактивной мощности с индуктивным накопителем энергии, обладающих рядом преимуществ, в частности возможностью быстро и бесступенчато регулировать реактивную мощность.

Рассматриваются способы определения реактивной мощности, и выбирается наиболее рациональный способ её определения:

$$Q = -\frac{1}{4\pi_0} \int_0^T \frac{dr(t)}{dt} i^2 dt,$$

где $r(t)$ – мгновенное сопротивление участка цепи, i – мгновенный ток на этом участке цепи.

Проведённый анализ подтвердил актуальность проблемы, позволил обосновать возможность дальнейшего совершенствования трёхфазных

компенсаторов реактивной мощности с индуктивным накопителем энергии и сформулировать основные задачи работы.

Во второй главе разрабатывается принципиальная схема и способ управления новым трёхфазным компенсатором реактивной мощности с индуктивным накопителем энергии (защищён патентом РФ № 2368992), который должен обладать лучшими регулировочными характеристиками по сравнению с известными компенсаторами реактивной мощности.

Трёхфазный компенсатор реактивной мощности с индуктивным накопителем энергии состоит из трёхфазного мостового полупроводникового преобразователя (конвертера) с индуктивностью на стороне постоянного тока и последовательно подключенного Г-образного LC фильтра нижних частот на стороне переменного тока. Принципиальная схема трёхфазного компенсатора реактивной мощности приведена на рисунке 1. Конвертер образуют шесть полностью управляемых ключей с односторонней проводимостью – шесть IGBT-транзисторов (или GTO-тиристоров).

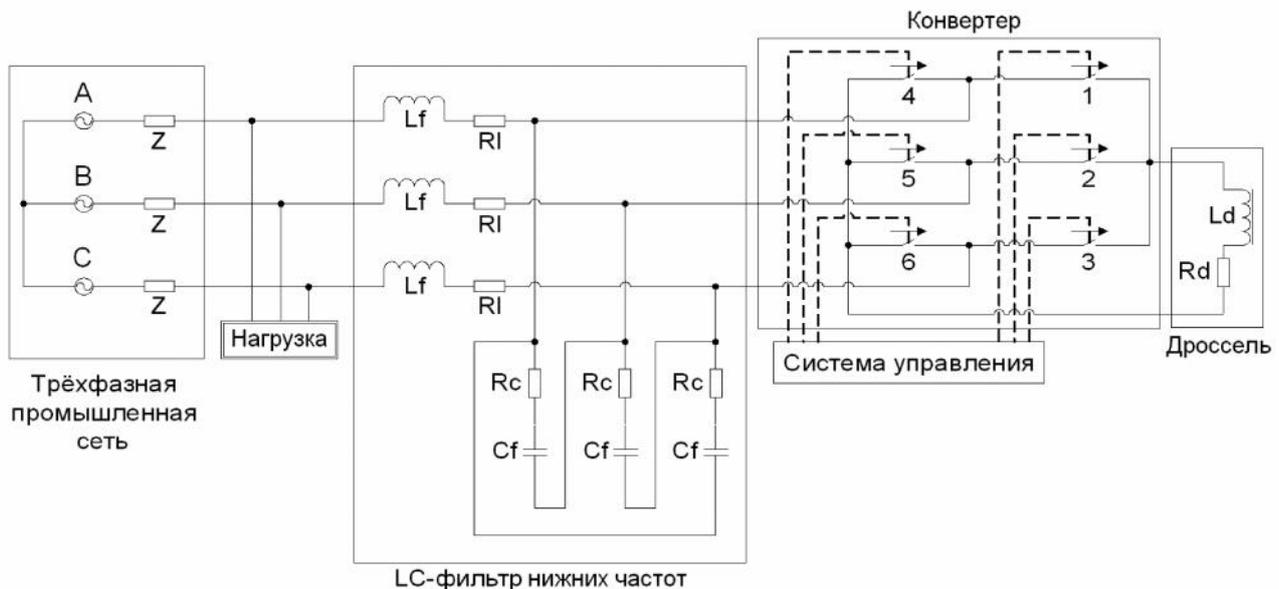


Рисунок 1 – Принципиальная схема трёхфазного компенсатора реактивной мощности с индуктивным накопителем энергии

Мостовой преобразователь служит для осуществления энергообмена между сетью и накопителем энергии – дросселем с зазором. Природа реактивной мощности заключается в том, что в одни моменты времени мощность потребляется из сети, а в другие – отдаётся. Таким образом, управляя потоком энергии между дросселем и сетью, можно производить компенсацию реактивной мощности.

Способ управления трёхфазным компенсатором реактивной мощности основан на том факте, что в любой момент времени в трёхфазной трёхпроводной системе сумма токов всегда равна нулю, поэтому один из токов всегда равен сумме двух других с обратным знаком. Возможные случаи соотношения знаков токов приводятся в таблице 1.

Таблица 1 – Возможные случаи соотношения токов

№	1	2	3	4	5	6
Ia	+ (> 0)	+ (> 0)	- (< 0)	- (< 0)	- (< 0)	+ (> 0)
Ib	- (< 0)	+ (> 0)	+ (> 0)	+ (> 0)	- (< 0)	- (< 0)
Ic	- (< 0)	- (< 0)	- (< 0)	+ (> 0)	+ (> 0)	+ (> 0)

Например, происходит потребление тока из фазы А (открыт транзистор в положительной ветви моста фазы А) и отдача тока в фазы В и С (отрицательной ветви моста фаз В и С), причём время поочерёдной работы этих транзисторов находится из соотношения: $|I_b| / |I_c| = T_b / T_c$, где I_b и I_c – токи фаз В и С за промежуток времени $T_b + T_c$, а T_b и T_c – время нахождения в открытом состоянии транзисторов в фазах В и С.

Минимальная частота переключения транзисторов, как видно из таблицы 1, составляет 300 Гц (6×50 Гц), но для облегчения фильтрации высших гармоник и уменьшения требуемой мощности фильтра целесообразно повысить несущую частоту, причём кратно 300 Гц. Максимальная частота переключения зависит только от характеристик транзисторов (время включения и выключения) а также определяется величиной тепловых потерь в них (зависимость частоты переключения от протекающего тока).

Таким образом, алгоритм управления транзисторами основан на широтно-импульсном модулировании тока с несущей частотой от 9 до 15 кГц и организован таким образом, чтобы ток через дроссель не прерывался.

Регулирование реактивной мощности компенсатора осуществляется за счёт изменения угла отпирания транзисторов относительно напряжения сети. Величина реактивной мощности компенсатора в диапазоне регулирования обратно пропорциональна углу отпирания транзисторов. Т.е. если увеличивать угол между компенсирующим током и сетевым напряжением, то мощность будет падать и наоборот. При уменьшении угла трёхфазный компенсатор реактивной мощности будет постепенно переходить в режим выпрямителя. Зона регулирования угла составляет примерно половину электрического градуса. Регулировать реактивную мощность можно как вниз до 25 % от номинальной мощности компенсатора, так и вверх на 5-10 % в зависимости от характеристик используемых транзисторов и диодов и возможности их охлаждения.

Определяется технологическая база для реализации трёхфазного компенсатора реактивной мощности с индуктивным накопителем энергии.

В третьей главе разрабатывается имитационная модель трёхфазного компенсатора реактивной мощности с индуктивным накопителем энергии и проводятся исследования с её помощью. Имитационное моделирование производится средствами пакета Matlab и подсистемы Simulink.

На рисунке 2 представлена общая схема имитационной модели трёхфазного компенсатора реактивной мощности с индуктивным накопителем

энергии, где: блок Source имитирует работу трёхфазной сети промышленной частоты (имеется внутреннее активное сопротивление), блок Filter – трёхфазного Г-образного фильтра нижних частот, блок IGBT – трёхфазного мостового преобразователя, блок RL – активно-индуктивной нагрузки (дроссель с зазором), блок Control – системы переключения транзисторов (представлена на рисунках 3 и 4), блоки Load 1-3 – трёхфазной активно-индуктивной нагрузки, блоки Breaker 1-4 – трёхфазных выключателей, остальные блоки носят вспомогательный характер и необходимы для измерения различных величин и включения и отключения компенсатора.

Данная модель позволяет проводить измерения всех необходимых величин (токи, напряжения, мощности и уровни высших гармоник) и осуществлять ступенчатое изменение реактивной мощности нагрузки с целью проверки динамических характеристик трёхфазного компенсатора реактивной мощности и работы его системы переключения транзисторов.

Часть модели системы переключения транзисторов, представленная на рисунке 3, на основе управляющих синусоидальных сигналов вырабатывает сигналы переключения транзисторами, причём с высокой частотой и различным временем включения каждого транзистора (по таблице 1 и описанному выше алгоритму). На рисунке 3 функции блоков следуют из их названия, блок RS – источник высокочастотного пилообразного сигнала.

Поскольку порядок переключения транзисторов детерминирован во времени, то сигналы разработанной системы переключения транзисторов возможно преобразовать в таблицу и производить переключения в соответствии с табличным алгоритмом. Регулирование реактивной мощности можно осуществлять смещением счётчика с активных ячеек таблицы.

На рисунке 4 представлена часть модели системы переключения транзисторов реализующая вычисление реактивной мощности по интегральному методу согласно рациональному определению реактивной мощности (верхняя часть рисунка 4). Далее значения реактивной мощности поступает в блоки Delay 1 и 2, где задерживаются на 1 мкс и поступают далее в блоки интегрирования Integr 3 и 4, которые служат только для хранения во времени последних значений реактивных мощностей. Реактивная мощность вычисляется за период времени равный 2 мс – с такой частотой поступают сбрасывающие импульсы с блока Pulse.

Регулирование времени задержки в макромодели на рисунке 4 осуществляется согласно уравнению вида $y = kx + b$, где $k = 5,5 \cdot 10^{-8}$ (блок умножения на константу – Gain 3), $b = 0,014995$ (блок сложения с константой – Bias), x – величина реактивной мощности нагрузки, увеличенная на одну треть от разности реактивной нагрузки и реактивной мощности трёхфазного компенсатора реактивной мощности, y – величина времени задержки. Дополнительное увеличение величины реактивной мощности и, как следствие, изменение времени задержки ускоряет переходный процесс при регулировании мощности трёхфазного компенсатора реактивной мощности, хотя при этом и происходит незначительное перерегулирование.

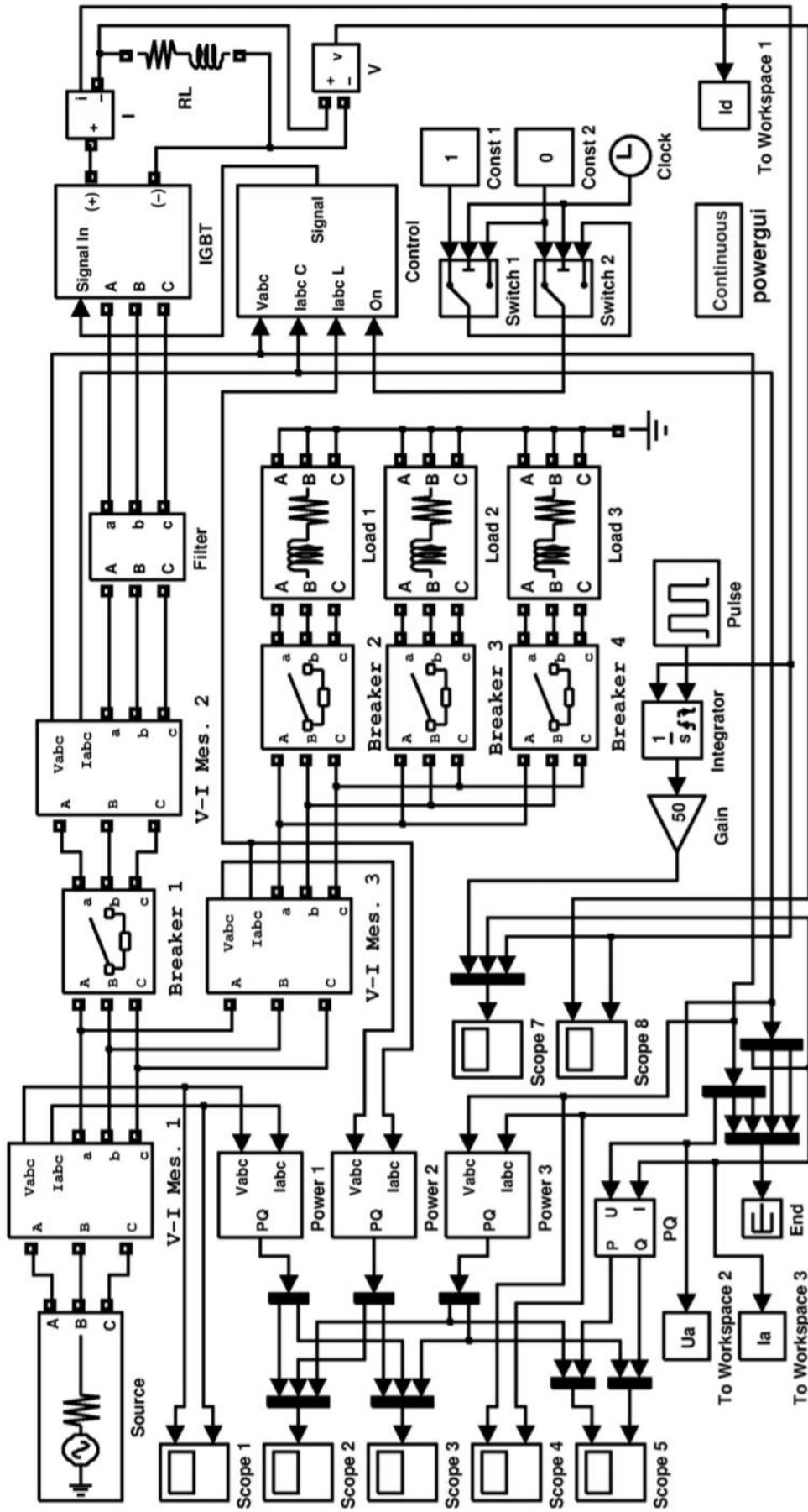


Рисунок 2 – Общая схема макромоделли компенсатора

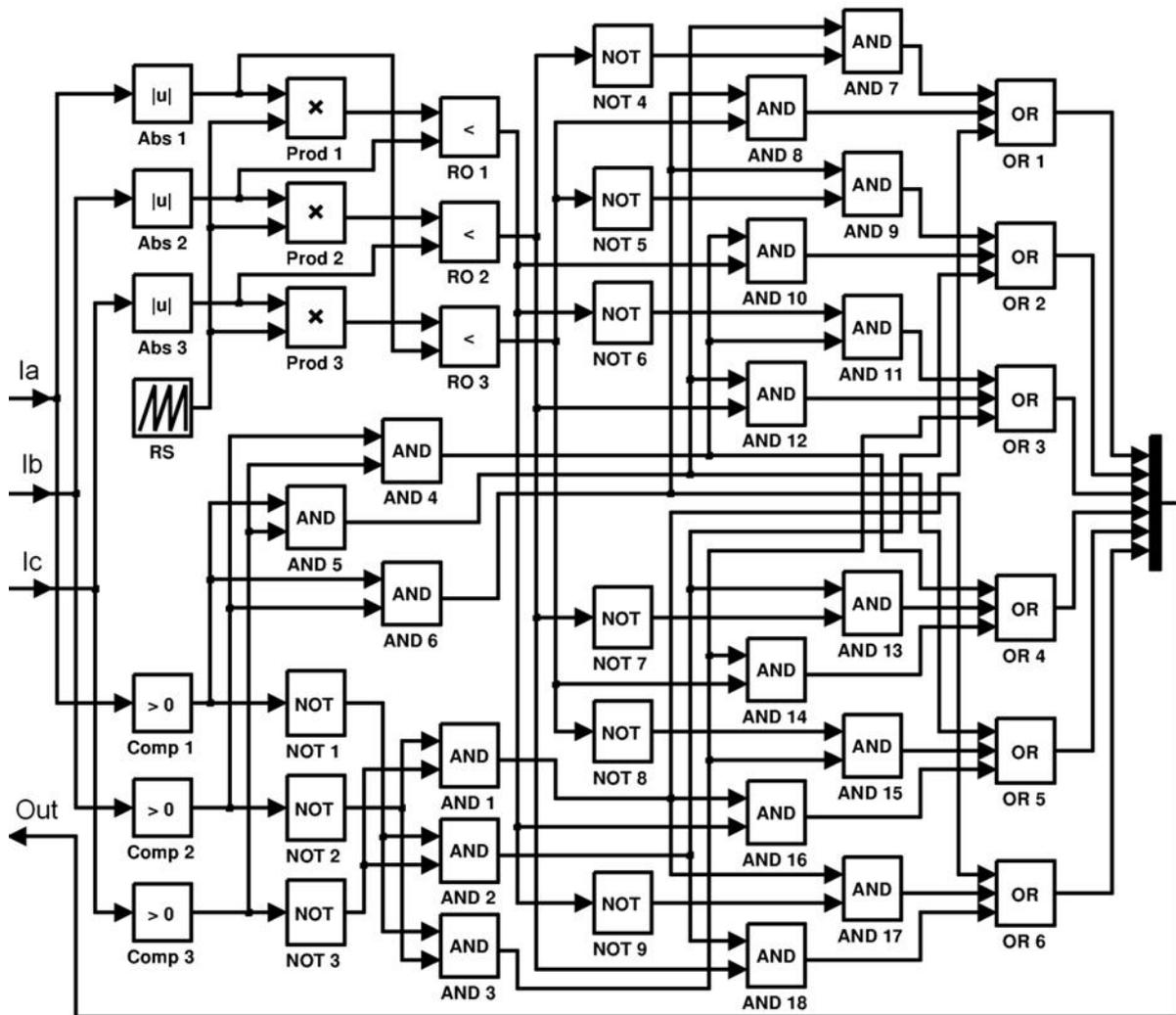


Рисунок 3 – Часть модели системы переключения транзисторов, определяющая моменты переключения транзисторов

У представленной на рисунке 4 части системы переключения транзисторов границы регулирования заданы реальными значениями реактивной мощности – блоки Const 3 и 4 и им сопутствующие.

Границы регулирования реактивной мощности можно задавать как для коэффициентов (время задержки) так и непосредственно для реактивной мощности. Во втором случае не требуется точной настройки коэффициентов и, соответственно, нет чувствительности к случайным их изменениям.

Модель системы переключения транзисторов имеет блоки для включения и выключения трёхфазного компенсатора реактивной мощности с включением чоппера – это блоки Const 5, AND 19, Switch 2, Not 10 и соединитель сигналов (рисунок 4).

При построении системы переключения транзисторов необходимо отойти от осуществления регулирования реактивной мощности компенсатора с помощью изменения тех или иных коэффициентов. Единственными настраиваемыми коэффициентами должны быть коэффициенты, отвечающие за скорость регулирования компенсатора реактивной мощности (время протекания переходного процесса). При этом возможно линейное изменение

этих коэффициентов, введение добавочных коэффициентов и скачкообразное изменение коэффициентов для ускорения переходных процессов. Линейное (плавное) изменение коэффициентов возможно в случае без точной настройки трёхфазного компенсатора реактивной мощности, а скачкообразное изменение коэффициентов требует более точной настройки ввиду большой скорости изменения и опасности сильного перерегулирования.

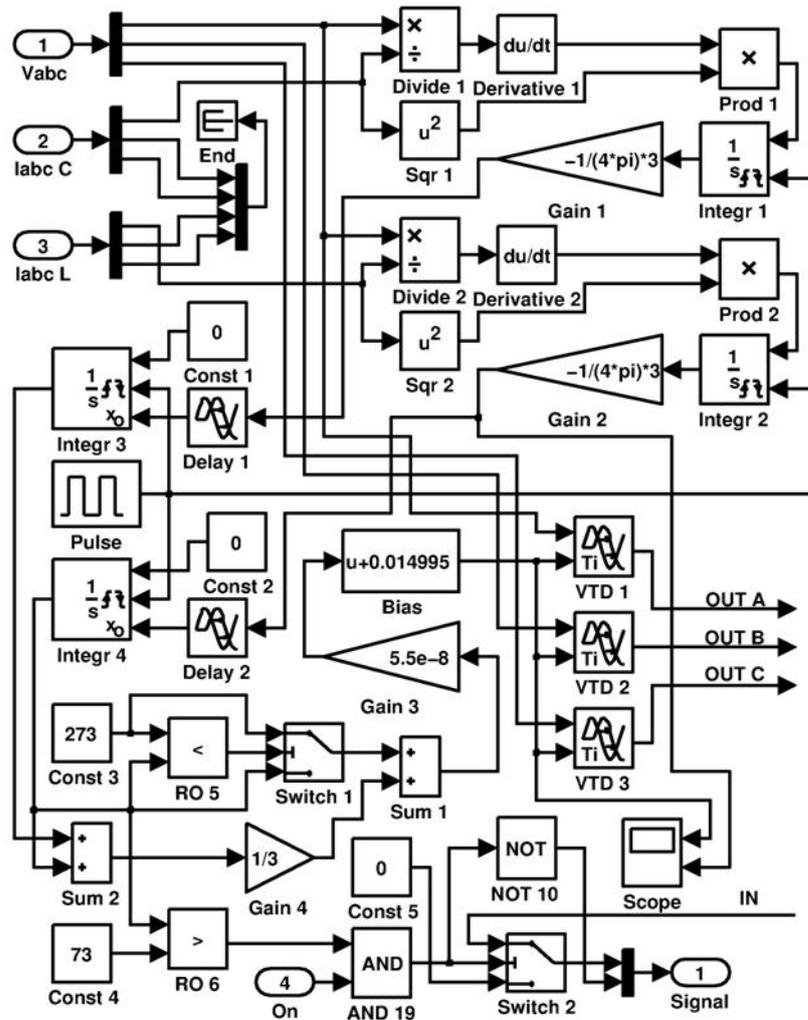


Рисунок 4 - Часть модели системы переключения транзисторов, вычисляющая реактивную мощность и задающая эталонные синусоиды

При исследовании трёхфазного компенсатора реактивной мощности интерес представляют осциллограммы тока и напряжения дросселя с зазором (рисунок 5).

Кривую тока дросселя можно подвергнуть гармоническому анализу при помощи средств Simulink: кроме частоты модуляции – 300 Гц (обусловлено выпрямлением напряжения) и частоты коммутации – 12 600 Гц (обусловлено широтно-импульсной модуляцией тока) присутствует комбинационная частота равная 12 900 Гц. На основе полученного гармонического анализа можно получить уравнение для тока дросселя:

$$i_D = i_{Dconst} + i_{Dvar} [\cos(2\pi 300t) + \cos(2\pi 12600t) + \cos(2\pi 12900t)].$$

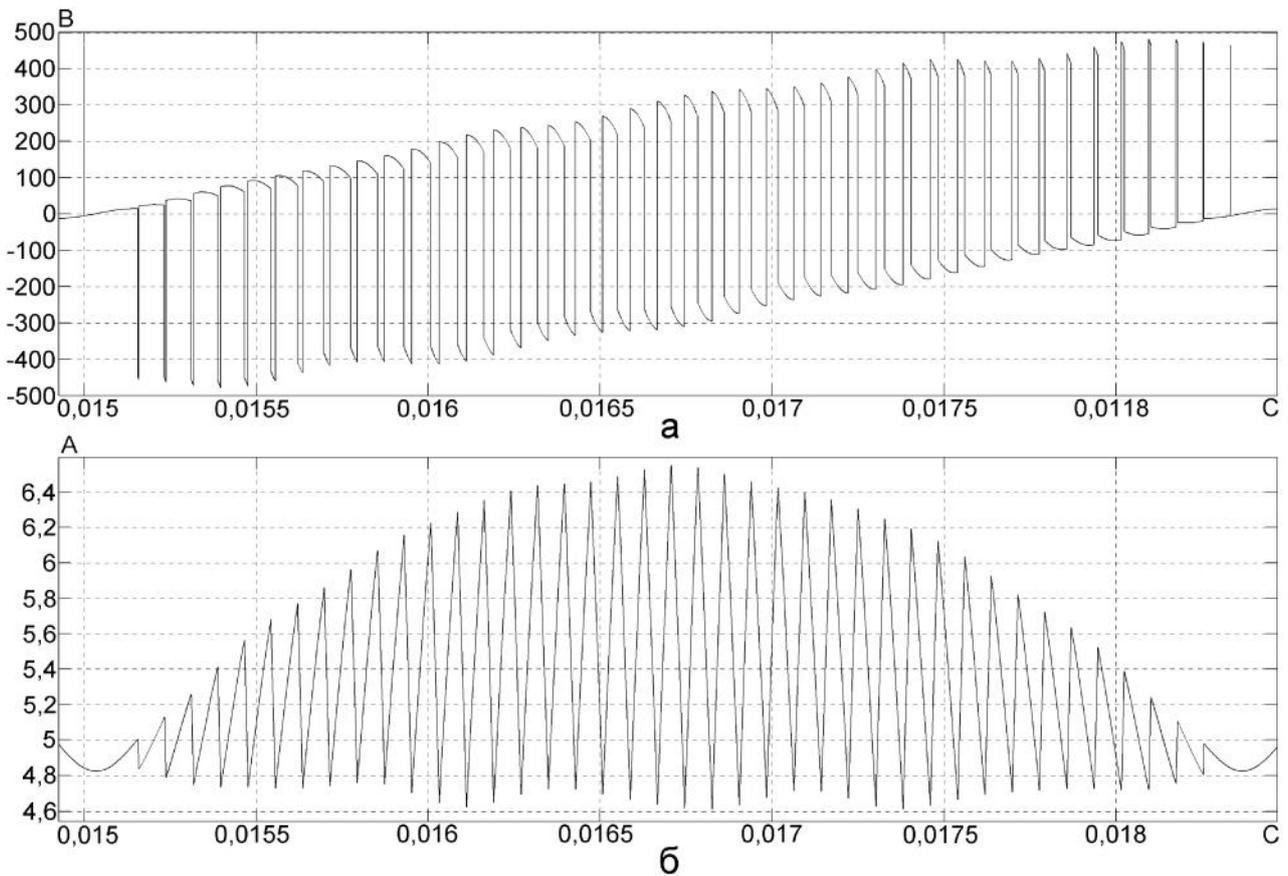


Рисунок 5 – Осциллограммы напряжения (а) и тока (б) дросселя с зазором

Выбор индуктивности дросселя необходимо осуществлять исходя из соотношения амплитуд переменной и постоянной составляющих. Величина постоянной составляющей определяется мощностью трёхфазного компенсатора реактивной мощности, а переменная задаётся индуктивностью дросселя. Чем больше индуктивность дросселя, тем меньше переменная составляющая и наоборот. Наличие большой переменной составляющей ведёт к невозможности регулирования мощности компенсатора вниз от номинальной мощности, поскольку ток, протекающий через дроссель должен быть строго однонаправленным (ввиду односторонней проводимости полупроводниковых ключей конвертера).

В четвёртой главе приводятся полученные на основе имитационного моделирования регулировочные характеристики трёхфазного компенсатора реактивной мощности – рисунок 6 (с линиями трендов и аппроксимирующими уравнениями) и график зависимости коэффициента высших гармоник тока от параметров фильтра.

Приводится методика по выбору: силовых IGBT-транзисторов и сопутствующих им диодов, драйверов для управления транзисторами, управляющего микроконтроллера (с реализованной программой на языке Си).

Проводится анализ способов измерения токов и напряжений, и приводится пример практической реализации датчиков тока и напряжения на основе изолированных (опторазвязанных) усилителей.

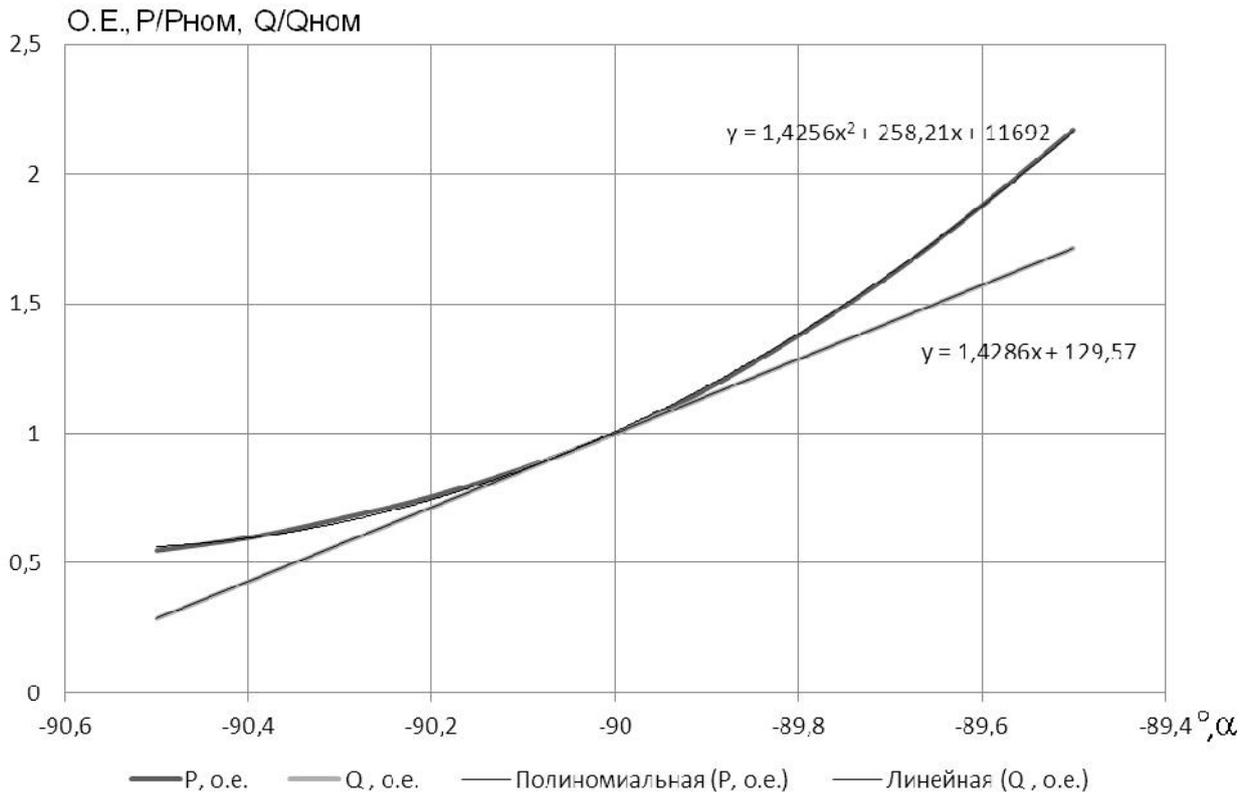


Рисунок 6 – Зависимость активной и реактивной мощностей от угла регулирования α в градусах

Ввиду сложного характера тока, протекающего через дроссель с зазором, возникла необходимость в разработке методики его расчёта. Через накопительный элемент протекают две составляющие тока, постоянная и переменная. Первая составляющая, постоянная, равная среднему значению протекающего через дроссель тока I_d , пропорциональна мощности компенсатора и не зависит от величины индуктивности L_d . Так как форма тока в сети практически синусоидальна, то реактивная мощность определяется первой гармоникой тока I_d :

$$I_{1m} = \frac{4}{\pi} \int_0^{\pi/2} I_d \cos \omega t d\omega t = \frac{4}{\pi} I_d.$$

Действующее значение реактивного тока равно: $I_1 = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} I_d$. Данный ток от величины индуктивности не зависит.

Вторая составляющая – чисто переменная, вызываемая колебанием напряжения на зажимах дросселя. Для облегчения фильтрации выходных токов применяется широтно-импульсная модуляция, с помощью которой два тока, знаки которых одинаковы, а модули не превышают величины $\frac{\sqrt{3}}{2} I_{1m}$, постоянно переключаются так, чтобы $|I_1|/|I_2| = T_1/T_2$. Во время переключения токов переключаются и линейные напряжения, приложенные к дросселю, причём высокочастотные напряжения, максимальные величины которых равны $\pm 1,5$

$U_{\text{фm}}$, а минимальные нулю, близки друг другу. В данном случае фазное напряжение равно 220 В, а амплитуда огибающей равна 470 В. Максимальное значение напряжения соответствует минимальному значению тока, то есть минимальному времени открытого состояния соответствующего вентиля. Следовательно, усреднённое значение напряжения мало. Когда переключающиеся токи близки по величине, максимальные значения линейных напряжений приблизительно равны между собой и составляют $(0,5 \div 0,6) U_{1m}$, а средние значения – $(0,3 \div 0,35) U_{1m}$.

Наряду с высокочастотной составляющей переменного тока, через индуктивный модуль протекает переменный ток, частота которого равна частоте переменного линейного напряжения, то есть в данном случае 300 Гц.

$$U_d = -\sqrt{3}U_m \frac{3}{\pi} \int_0^{\pi/3} \sin \omega t d\omega t = -\sqrt{3}U_m \frac{3}{2\pi} = -\sqrt{3}U_m \frac{3}{\pi} \int_0^{\pi/3} \cos\left(\omega t + \frac{\pi}{6}\right) d\omega t.$$

Напряжение, изменяющееся с частотой 3ω , можно определить как полуразность переменных составляющих линейных напряжений, которая приближённо может быть определена так:

$$u_- = [\pm 2U_d \pm (u_a - u_b) \mp (u_a - u_c)]/2 \approx \pm 0,085 U_m \sin 3\omega t.$$

Первая гармоника этого напряжения равна:

$$U_{1-} = 0,085 U_m \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} \sin \omega t \cdot \sin\left(\frac{\omega t}{2}\right) d\omega t \approx 0,067 U_m.$$

Так как одновременно оба напряжения не могут быть приложены к накопительному элементу, а подключаются они в одинаковое время, то $U_{1-} = 0,0335 U_{1m}$.

Заключение

1. Разработана принципиальная схема трёхфазного компенсатора реактивной мощности с индуктивным накопителем энергии и способ управления им, учитывающий изменение сетевого напряжения в реальном времени, с возможностью принудительного завершения переходного процесса, не требующий дополнительной синхронизации с сетью и учитывающий реактивную мощность первых (50 Гц) и высших гармоник тока и напряжения в реальном времени. Способ управления может быть реализовать на микроконтроллере.

Данный компенсатор реактивной мощности обладает бесступенчатым регулированием реактивной мощности, нечувствительностью к высшим гармоникам напряжения и более простой конструкцией по сравнению с системами типа СТАТКОМ.

2. Создана имитационная модель трёхфазного компенсатора реактивной мощности с индуктивным накопителем энергии с различными вариантами исполнения силовой части (с идеальными ключами, GTO-тиристорами, IGBT-транзисторами без диодов и IGBT-транзисторами с последовательными и параллельными диодами) и системы переключения

транзисторов (с обратной связью и без неё, а также с различными способами изменения регулировочных коэффициентов).

На основе созданной имитационной модели можно утверждать о правильности разработанного способа управления компенсатором.

С помощью моделирования удалось выявить характер протекающих электромагнитных процессов в элементах компенсатора (получить спектральный анализ тока дросселя), а также выбрать наиболее удачную топологию его силовой части и алгоритма управления.

По результатам имитационного моделирования, можно сделать вывод о том, что трёхфазный компенсатор реактивной мощности с индуктивным накопителем энергии обеспечивает: компенсацию реактивной мощности до значения $\cos \varphi = 1$, причём имеет возможность бесступенчатого регулирования реактивной мощности вниз до 25% от номинальной и высокое быстродействие (не более 5 мс или одной четвёртой периода колебания сетевого напряжения), а также синусоидальность потребляемого тока с коэффициентом высших гармоник не более 3%, что достигается применением пассивного Г-образного LC-фильтра нижних частот с установленной мощностью не более 4% от мощности компенсатора при применении широтно-импульсной модуляции тока по пропорциональному закону с несущей частотой выше 12 кГц.

3. Разработана методика расчёта и выбора элементов трёхфазного компенсатора реактивной мощности с индуктивным накопителем энергии: силовых транзисторов и диодов, драйверов для транзисторов, фильтра нижних частот, микроконтроллера, датчиков измерения токов и напряжений (с примером практической реализации), а также дросселя с зазором.

Расчёт силовых транзисторов и диодов учитывает обратное напряжение на них и сложный характер протекающего тока (постоянный и импульсный ток). Расчёт параметров фильтра учитывает нелинейное влияние на коэффициент высших гармоник тока установленной ёмкости и индуктивности элементов фильтра. Выбор микроконтроллера производится из условия обеспечения скорости измерения токов и напряжений аналого-цифровыми преобразователями. Для микроконтроллера разработана программа, сочетающая в себе все достоинства предложенного алгоритма управления компенсатором реактивной мощности. Для дросселя с зазором приведена оригинальная методика выбора наиболее рациональных параметров, учитывающая наличие в его токе следующих частот: 0, 300, 12600 и 12900 Гц.

Основные результаты диссертации опубликованы в работах:

В изданиях из перечня ВАК:

1. Компьютерное моделирование компенсатора реактивной мощности с индуктивным накопителем энергии. / А.А. Карavaев, Л.Э. Рогинская. // Вестник УГАТУ: науч. журнал Уфимск. гос. авиац. техн. ун-та. УГАТУ 2011. Т. 15.№3 (43). С. 80-87.

2. Особенности работы транзисторного преобразователя в составе компенсатора реактивной мощности с индуктивным накопителем энергии. /

А.А. Караваев, Л.Э. Рогинская. // Вестник СГТУ: науч. журнал Саратовск. гос. техн. ун-та. СГТУ 2011. №2(55). Выпуск 1. С. 90-95.

Авторские свидетельства и патенты:

3. Патент на изобретение РФ № 2368992. МПК H02J3/18. Трёхфазный компенсатор реактивной мощности и способ управления им. / А.А. Караваев, Л.Э. Рогинская, А.В. Стыскин. // Опубл. 27.09.09., БИ № 27.

В других изданиях:

4. Компенсатор реактивной мощности. / Караваев А.А., А.В. Стыскин. // Инновационные технологии в управл., образовании, пром. «АСТИНТЕХ-2007»: материалы Всерос. научн. конф. Астрахань: Астраханский университет 2007. С. 246-249.

5. Повышение коэффициента мощности электрооборудования статическими компенсаторами. / А.А. Караваев, А.В. Стыскин. // Электротехнологии, электропривод и электрооборудование предприятий: сб. научн. тр. всерос. научн. техн. конф. Т1. Уфа: УГНТУ 2007. С. 43-49.

6. Повышение коэффициента мощности электрооборудования статическими компенсаторами реактивной мощности. / Караваев А.А., А.В. Стыскин. // Мавлютовские чтения: Всероссийская молодежная научная конференция, посвящённая 75-летию УГАТУ: том 2 / Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т. Уфа: УГАТУ 2007. С. 16-17.

7. Методы компенсации реактивной мощности. / А.А. Караваев. // Актуальные проблемы в науке и технике. Том 2. Машиностроение, приборостроение, экономика и гуманитарные науки: сб. тр. четвёртой всерос. зимней школы-семинара аспирантов и молодых учёных. Уфа: «Диалог» 2009. С. 198-201.

8. Управляемый трёхфазный компенсатор реактивной мощности с индуктивным накопителем. / А.А. Караваев. // Электротехнологии, электропривод и электрооборудование предприятий: сб. научн. тр. всерос. научн. техн. конф. в 2 т. Том 2. Уфа: УГНТУ 2009. С. 26-28.

9. Управляемое фазосдвигающее устройство на базе автономного инвертора / А.А. Караваев. // Электротехнические комплексы и системы: Межвуз. научн. сб. УГАТУ. Уфа: УГАТУ 2009. С. 199-201.

10. Компенсатор реактивной мощности с индуктивным накопителем энергии. / А.А. Караваев. // Мавлютовские чтения: Всероссийская молодежная научная конференция: сб. тр. в 5 т. Том 2 / УГАТУ. Уфа: УГАТУ 2009. С. 39-40.

11. Компьютерное моделирование трёхфазного компенсатора реактивной мощности с индуктивным накопителем энергии. / А.А. Караваев, Л.Э. Рогинская. // Повышение надёжности и энергоэффективности электротехнических систем и комплексов: межвуз. сб. научн. тр. Уфа: УГНТУ 2010. С. 117-121.

12. Анализ электромагнитных процессов в дросселе – накопителе энергии трёхфазного компенсатора реактивной мощности. / А.А. Караваев. //

Мавлютовские чтения: Всероссийская молодежная научная конференция: сб. тр. в 5 т. Том 2 / Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т. Уфа: УГАТУ 2010. С 63.

13. Компенсатор реактивной мощности с индуктивным накопителем энергии и микропроцессорным управлением. / А.А. Караваев. // Научно-исследовательские проблемы в области энергетики и энергосбережения: сб. тр. / Уфа: УГАТУ 2010. С. 180-181.

14. Управляемые компенсаторы неактивной мощности. / А.А. Караваев. // Актуальные проблемы в науке и технике. Том 4. Машиностроение, электроника, приборостроение. Сб. тр. пятой всерос. зимней школы-семинара аспирантов и молодых учёных, 17-20 февраля 2010 г. / УГАТУ. Уфа: УГАТУ 2011. С. 158-161.

Диссертант



А.А. Караваев

КАРАВАЕВ Артём Александрович

ТРЕХФАЗНЫЙ КОМПЕНСАТОР РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ
С ИНДУКТИВНЫМ НАКОПИТЕЛЕМ ЭНЕРГИИ
(РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ)

Специальность:

05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Подписано в печать 09.11.2011. Формат 60×80 1/16
Бумага офисная. Печать плоская. Гарнитура Таймс.
Усл. печ. л.1,0 Уч. – изд. л. 1,0.
Тираж 100 экз. Заказ № 359.

ФГБОУ ВПО Уфимский государственный авиационный
технический университет
Центр оперативной полиграфии
450000, г. Уфа, ул. К. Маркса, 12