

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования

**«ЮЖНО-УРАЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)»**

Институт «Политехнический», факультет «Энергетический»

Кафедра «Автоматизированный электропривод»

**ПРОЕКТ ПРОВЕРЕН**

Зам. начальника Инженерного цеха ПАО «ЧТПЗ»

\_\_\_\_\_ /Д.А. Ромин/

“ \_\_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2018 г.

**ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ**

Заведующий кафедрой, к.т.н., доцент

\_\_\_\_\_ /А.Н. Шишков/

“ \_\_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2018 г.

Трехфазный активный фильтр-компенсатор для улучшения показателей качества  
электроэнергии в системах электроснабжения 0,4 кВ

## **ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА К ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЕ**

**ЮУрГУ-13.04.02.2018.254 ВКР**

*Руководитель проекта:*

Профессор, д.т.н.

\_\_\_\_\_ /М.М. Дудкин/

“ \_\_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2018 г.

*Автор проекта*

*студент группы П-286*

\_\_\_\_\_ /С.В. Киричук/

“ \_\_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2018 г.

*Нормоконтролер*

Доцент, к.т.н.

\_\_\_\_\_ /А.Е. Бычков/

“ \_\_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2018 г.

Челябинск  
2018 г.

## АННОТАЦИЯ

Киричук С.В. Трехфазный активный фильтр-компенсатор для улучшения показателей качества электроэнергии в системах электроснабжения 0,4 кВ. – Челябинск: ЮУрГУ, Э; 2018, 113 с., 52 ил., 14 табл., библиографический список – 11 наим.

Важным вопросом, связанным с повышением качества электроэнергии в промышленных сетях, является вопрос компенсации высших гармоник и реактивной энергии, который включает в себя выбор источников компенсации, их наилучшее расположение в системах электроснабжения. Главная проблема в компенсации реактивной энергии в энергосистемах нашей страны – в промышленности наблюдается опережающий рост потребления реактивной энергии по сравнению с активной. Этой тенденции сопутствует внедрение мощных вентильных преобразователей, сварочных установок.

Цели и задачи работы: исследование статических и динамических характеристик активного фильтра-компенсатора (АФК) совместно с силовыми вентильными преобразователями, широко применяемых в электроприводах постоянного и переменного тока.

Основной объект изучения – трехфазный активный фильтр-компенсатор.

Применение АФК, в качестве источника компенсации реактивной энергии и высших гармоник тока, является самым современным и перспективным. Исследование эффективности компенсации пассивной мощности посредством АФК вызывает большой практический интерес.

					<i>ЮУрГУ-13.04.02.2018.254.01ПЗ</i>			
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>				
<i>Разраб.</i>		<i>Киричук С.В.</i>			<i>Трехфазный активный фильтр-компенсатор для улучшения показателей качества электроэнергии в системах электроснабжения 0,4 кВ</i>	<i>Лит.</i>	<i>Лист</i>	<i>Листов</i>
<i>Провер.</i>		<i>Дудкин М.М.</i>					4	
<i>Реценз.</i>		<i>Ромин Д.А.</i>				<i>ЮУрГУ</i>		
<i>Н. Контр.</i>		<i>Бычков А.Е.</i>				<i>Кафедра «АЭП»</i>		
<i>Утверд.</i>		<i>Шишков А.Н.</i>						

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	7
1 ПРОБЛЕМА ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ НЕЛИНЕЙНЫХ НАГРУЗОК С ПИТАЮЩЕЙ СЕТЬЮ.....	9
1.1 Влияние преобразовательных установок на сети промышленного электроснабжения.....	12
1.2 Устройства, улучшающие энергетические показатели и качество электрической энергии в системе электроснабжения.....	17
1.2.1 Конденсаторные батареи.....	19
1.2.2 Конденсаторно-реакторные компенсаторы.....	21
1.2.3 Пассивные (резонансные) фильтры.....	22
1.2.4 Вентильные компенсаторы реактивной мощности на запираемых тиристорах.....	24
1.2.5 Активные силовые фильтры и фильтры-компенсаторы.....	25
1.3 Цель, задачи и задание исследовательской работы.....	32
2 РАСЧЕТ МОЩНОСТИ СЕТИ И НАГРУЗОК ПЕРЕМЕННОГО ТОКА.....	35
2.1 Расчет составляющих мощностей и силовых элементов трехфазной активно-индуктивной нагрузки.....	35
2.2 Расчет составляющих мощностей и силовых элементов реверсивного ЭП постоянного тока.....	36
2.3 Расчет составляющих мощностей и силовых элементов частотно-регулируемого электропривода.....	40
2.4 Расчет суммарной пассивной мощности всех нагрузок переменного тока...	44
2.5 Расчет параметров источника электроснабжения 0,4 кВ.....	45
3 РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ И ВЫБОР СИЛОВЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ТРЕХФАЗНОГО АКТИВНОГО ФИЛЬТРА-КОМПЕНСАТОРА.....	47
3.1 Описание трехфазного активного фильтра-компенсатора с релейно-векторной системой управления.....	47
3.2 Динамические характеристики трехфазного активного фильтра-компенсатора.....	52

					<b>ЮУрГУ-13.04.02.2018.254.01ПЗ</b>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		5

3.3 Расчет параметров и выбор реактора на входе активного фильтра-компенсатора .....	57
3.4 Выбор конденсаторов постоянного тока и силовых ключей активного фильтра-компенсатора .....	59
3.5 Расчет параметров пассивного фильтра высших гармоник на входе активного фильтра-компенсатора .....	62
3.6 Расчет основных параметров системы управления активного фильтра-компенсатора .....	64
<b>4 КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРЕХФАЗНОГО АКТИВНОГО ФИЛЬТРА-КОМПЕНСАТОРА СОВМЕСТНО С НАГРУЗКАМИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА .....</b>	<b>67</b>
4.1 Компьютерная модель трехфазного активного фильтра-компенсатора совместно с нагрузками переменного тока в программе <i>MatLab+Simulink</i> .....	67
4.2 Исследование статических характеристик трехфазного активного фильтра-компенсатора совместно с активно-индуктивной нагрузкой.....	76
4.4 Исследование статических характеристик трехфазного активного фильтра-компенсатора совместно с преобразователем частоты.....	87
4.5. Исследование статических характеристик трехфазного активного фильтра-компенсатора совместно со всеми нагрузками переменного тока .....	93
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....</b>	<b>109</b>
<b>БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК .....</b>	<b>112</b>

## ВВЕДЕНИЕ

Основная проблема, исследование которой ведется в выпускной квалификационной работе – это улучшение качества электрической энергии. Так что такое качество электрической энергии?

Качество электрической энергии (согласно ГОСТ 32144-2013 «Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения») – это степень соответствия характеристик электрической энергии в данной точке электрической системы совокупности нормированных показателей КЭ (КЭ – качество электрической энергии) [10].

В понятие качество электроэнергии входят характеристики, которые могут оценивать пригодность электрической энергии в различных производственных процессах. В последние годы повышению качества электроэнергии уделяют особое внимание, т.к. качество может влиять на расход электроэнергии, на технологический производственный процесс, на срок службы электро-технологического оборудования.

При постоянно растущих требованиях к оптимизации и модернизации производства на заводах, комбинатах и фабриках устанавливаются современные автоматизированные электропривода, которые строятся на базе полупроводниковых преобразователей. Так для электроприводов переменного тока используют преобразователи частоты, а для регулируемых приводов постоянного тока – тиристорные преобразователи, мощность которых находится в диапазоне от 100 Вт до нескольких МВт.

Поэтому предприятия черной и цветной металлургии, машиностроения, легкой промышленности и пр. заинтересованы в вопросах улучшения качества электроэнергии.

Заводы и фабрики, на территории которых установлены понизительные подстанции 110/35 кВ, 35/6 кВ, отчитываются энергоснабжающим компаниям как по расходу активной энергии, так и реактивной энергии за отчетный период (месяц, квартал).

					<b>ЮУрГУ-13.04.02.2018.254.01ПЗ</b>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		7

В основном, большинство поставщиков электрической энергии выдвигают предприятиям условие поддержания среднего коэффициента мощности  $\cos \varphi$  в течение расчётного периода выше 0,8. Если потребление реактивной энергии становится больше 50% потребления активной энергии, то дополнительная реактивная энергия будет тарифицироваться. Как говорилось выше, реактивная энергия будет измеряться отдельным счётчиком квар·ч. Обычно дополнительная реактивная энергия (квар·ч) оценивается в диапазоне от 10 до 15% стоимости активной энергии (кВт·ч).

Также некоторые поставщики электроэнергии предоставляют льготу крупным предприятиям при условии, что  $\cos \varphi$  за отчетный период будет близок к 1 (выше 0,94). При выполнении этого условия предприятию предоставляется скидка в размере 5-10% на стоимость активной энергии.

Крупные заводы и комбинаты постоянно планируют свое производство так, чтобы не было перерасхода реактивной энергии и заинтересованы в современных и перспективных устройствах, применение которых направлено на улучшение энергетических показателей электроэнергии.

Так, главным объектом исследования в работе будет активный фильтр-компенсатор (АФК). В настоящее время АФК является самым перспективным. Основные достоинства активного фильтра-компенсатора.

1. Быстродействие. Силовая часть АФК создана на базе *IGBT*-транзисторов.
2. Закон управления, который обеспечивает компенсацию не только реактивной мощности, но и мощности искажения.

В работе будут рассмотрены как статические характеристики АФК, так и динамические, которые на данный момент являются малоизученными. В работе будет разработана математическая модель трехфазного АФК. А для приближения к вопросам практического использования фильтра-компенсатора в качестве нагрузок будут использоваться активно-индуктивная нагрузка, тиристорный преобразователь и преобразователь частоты, которые повсеместно используются в цехах заводов и комбинатов.

					<b>ЮУрГУ-13.04.02.2018.254.01ПЗ</b>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		8

# 1 ПРОБЛЕМА ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ НЕЛИНЕЙНЫХ НАГРУЗОК С ПИТАЮЩЕЙ СЕТЬЮ

Вопросы экономного использования всех видов энергии, в том числе электрической, и повышения экономичности работы электроустановок являются важной проблемой.

Электроэнергия, как особый вид продукции, обладает определенными характеристиками, позволяющими судить о ее пригодности в различных производственных процессах. Совокупность таких характеристик, при которых приемники электроэнергии способны выполнять заложенные в них функции, объединены под общим понятием качества электроэнергии.

В последние годы повышению качества электроэнергии уделяют большое внимание, т.к. качество электроэнергии может существенно влиять на расход электроэнергии, надежность систем электроснабжения, технологический процесс производства.

При решении задачи повышения качества электроэнергии выделяют экономические, математические и технические аспекты.

Экономические аспекты включают в себя методы расчета убытков от некачественной электроэнергии в системах промышленного электроснабжения. Математические аспекты представляют собой обоснование тех или иных методов расчета показателей качества электроэнергии. Технические аспекты включают в себя разработку технических средств и мероприятий, улучшающих качество электроэнергии, а также организацию системы контроля и управления ее качеством.

Качество электроэнергии можно улучшить средствами питающей сети или применением соответствующего дополнительного оборудования на основе имеющегося опыта проектных и эксплуатационных организаций.

Часть решений, в основном обусловленных техническими требованиями, является общей и должна приниматься на основе имеющихся указаний.

					<b>ЮУрГУ-13.04.02.2018.254.01ПЗ</b>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		9

Стремление повысить производительность труда на современных промышленных предприятиях, а также интенсификация и усложнение технологических процессов обусловили то, что все большую долю в общем объеме суммарных нагрузок занимают резкопеременные и нелинейные нагрузки с повышенным потреблением реактивной мощности. Это, прежде всего, вентильные преобразователи, нашедшие широкое применение на заводах черной и цветной металлургии и предприятиях химической промышленности, а также мощные дуговые печи, сварочные установки, регулируемый электропривод и т. п.

Характерной особенностью работы этих потребителей является влияние их на качество электроэнергии питающих сетей. В свою очередь нормальная работа электрооборудования зависит от качества электроэнергии питающей системы. Такое взаимное влияние электрооборудования и питающей системы определяют термином "электромагнитная совместимость".

Решение проблемы электромагнитной совместимости связано с определением и поддержанием оптимальных показателей качества электроэнергии, при которых выполняются технические требования с минимальными затратами.

Проблема электромагнитной совместимости электроприемников с питающей сетью остро возникла в последнее время в связи с широким внедрением мощных вентильных преобразователей, дуговых сталеплавильных печей, сварочных установок и других устройств, которые при всей своей экономичности и технологической эффективности оказывают отрицательное влияние на качество электрической энергии в питающих электрических сетях.

При разработке новых приемников электроэнергии необходимо учитывать то отрицательное влияние, которое они могут оказывать на питающую электрическую сеть. При оценке должны приниматься во внимание дополнительные устройства, предотвращающие ухудшение качества электрической энергии. Необходимые нормы качества электрической энергии могут быть достигнуты уже на стадии проектирования электроснабжения промышленных предприятий путем соответствующих расчетов.

					<b>ЮУрГУ-13.04.02.2018.254.01ПЗ</b>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		10



Одним из основных вопросов, связанных с повышением качества электроэнергии в сетях, решаемых как на стадии проектирования, так и на стадии эксплуатации систем промышленного электроснабжения, является вопрос о компенсации реактивной мощности, включающий выбор целесообразных источников, расчет и регулирование их мощности, размещение источников в системе электроснабжения.

Проблема компенсации реактивной мощности в электрических системах страны имеет большое значение по следующим причинам:

- 1) в промышленном производстве наблюдается опережающий рост потребления реактивной мощности по сравнению с активной;
- 2) в городских электрических сетях возросло потребление реактивной мощности, обусловленное ростом бытовых нагрузок;
- 3) увеличивается потребление реактивной мощности в сельских электрических сетях.

Количественные и качественные изменения, происходящие в промышленном электроснабжении за последние годы, придают этому вопросу особую значимость. В настоящее время прирост потребления реактивной мощности существенно превосходит прирост потребления активной мощности. Интенсификация производственных процессов, повышение производительности труда связаны с совершенствованием существующей и внедрением новой, передовой технологии. Этому процессу сопутствует широкое внедрение мощных вентильных преобразователей, электродуговых печей, сварочных установок и других устройств, которые при всей технологической эффективности оказывают отрицательное влияние на качество электроэнергии в электрических сетях.

Следует отметить, что практически все показатели качества электроэнергии по напряжению зависят от потребляемой промышленными электроприемниками реактивной мощности. Поэтому вопросы качества электроэнергии необходимо рассматривать в непосредственной связи с вопросами компенсации реактивной мощности.

					<b>ЮУрГУ-13.04.02.2018.254.01ПЗ</b>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		11

Проблема электромагнитной совместимости электроприемников с питающей сетью, которую в последнее время сравнивают с проблемой загрязнения окружающей среды, порождает новые научные и технические проблемы при проектировании и эксплуатации промышленных электрических сетей. В настоящее время принимаются меры для того, чтобы уменьшить влияние потребителей на качество электроэнергии в промышленных сетях.

Проблема может быть решена путем создания и промышленного освоения быстродействующих многофункциональных средств компенсации реактивной мощности, улучшающих качество электроэнергии сразу по нескольким параметрам. Внедрение этих устройств приведет также к уменьшению потерь электроэнергии.

### 1.1 Влияние преобразовательных установок на сети промышленного электроснабжения

Интенсивное развитие силовой полупроводниковой преобразовательной техники и ее использование в тиристорных электроприводах переменного и постоянного тока, преобразователях частоты, вентильных преобразователях для электротермических и электротехнологических установок различного назначения привело к ухудшению показателей качества электроэнергии, предусмотренных ГОСТ, а также к снижению естественного коэффициента мощности в сетях промышленного электроснабжения.

При всей своей прогрессивности и технологической эффективности тиристорные преобразователи являются одними из главных нарушителей качества электроэнергии в питающей сети, т.е. существует проблема электромагнитной совместимости их с питающей сетью. Это объясняется тем, что все изменения режима работы преобразовательных установок прямо передаются в питающую электрическую сеть.

Особенно заметно это проявляется в колебаниях напряжения (они могут достигать величины более 20 % в сети 10 кВ) и частоты питающей сети.

					<b>ЮУрГУ-13.04.02.2018.254.01ПЗ</b>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		12

Это обуславливается резким изменением как активной (колебания частоты), так и реактивной (колебания напряжения) мощности. Кроме того, работа установок сопровождается большими искажениями напряжения, происходящими из-за коммутации вентиля и потребления из сети несинусоидальных токов.

Вентильные преобразователи оказывают все более сильное отрицательное воздействие на качество напряжения в питающей сети в связи с расширением их применения и увеличением единичной мощности.

Как известно, это объясняется тем, что преобразователи, в особенности регулируемые, за счет сдвига первой гармоники тока относительно напряжения потребляют значительную реактивную мощность, зачастую с весьма неравномерным временным графиком, а за счет высших гармоник потребляемого тока являются источниками сильных искажений кривой напряжения сети. Оба этих фактора, кроме того, вызывают дополнительные потери мощности в питающей сети. Поэтому проблема улучшения коэффициента мощности преобразователей относится к числу одной из наиболее актуальных в современной преобразовательной технике и электроэнергетике.

Наряду с широко известными достоинствами (сравнительная простота регулирования, удобство эксплуатации, а также небольшие потери мощности) управляемые вентильные выпрямители имеют ряд серьезных недостатков, основным из которых является низкий коэффициент мощности при глубоком регулировании выпрямленного напряжения.

Потребление реактивной мощности преобразовательными агрегатами обусловлено в основном двумя причинами: естественным коммутационным процессом и искусственной задержкой момента открытия вентиля в целях регулирования выпрямленного напряжения. Именно эти факторы создают сдвиг тока в цепях вентиля относительно напряжения, понижают коэффициент мощности в сетях, питающих выпрямители, и повышают потребление реактивной мощности.

					<b>ЮУрГУ-13.04.02.2018.254.01ПЗ</b>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		13

При работе трехфазного преобразовательного агрегата переход тока с фазы  $A$  на фазу  $B$  происходит не в момент равенства напряжений:  $U_A=U_B$ , а занимает некоторое время коммутации и происходит с запаздыванием на соответствующий этому времени угол коммутации  $\gamma$ , в течение которого напряжение  $U_B$  превысит  $U_A$  на достаточное для перехода тока значение.

В управляемых вентилях искусственно создается задержка открытия вентиля для снижения выпрямленного напряжения. При этом возникает сдвиг анодного тока  $i_2$  относительно кривой напряжения на время, измеряемое углом  $\alpha$ . Угол сдвига по фазе тока  $i_2$  относительно амплитуды напряжения  $U_2$  равен:

$$\varphi_2 = \alpha + \frac{\gamma}{2}. \quad (1.1)$$

Приблизительно на такой же угол  $\varphi$  сдвинут в сторону отставания от напряжения  $U_1$  и первичный ток  $I_1$  трансформатора, чем и определяется реактивная нагрузка сети от преобразовательного агрегата.

$\cos \varphi$  – коэффициент сдвига тока  $I_1$  относительно напряжения  $U_1$  можно представить так:

$$\cos \varphi \approx \cos\left(\alpha + \frac{\gamma}{2}\right). \quad (1.2)$$

При работе в выпрямительном режиме вентильный преобразователь потребляет из сети переменного тока активную и реактивную мощность. При работе в инверторном режиме – отдает в сеть переменного тока активную мощность, потребляя реактивную. При  $\alpha=90^\circ$  вентильный преобразователь потребляет из сети переменного тока только реактивную мощность.

В наибольшей мере этот фактор проявляется при работе выпрямителя на против ЭДС и постоянстве тока нагрузки, например, в электроприводе с двигателем постоянного тока. Здесь при выпрямленном напряжении, близком к нулю, реактивная мощность максимальна. Таким образом, с уменьшением выпрямленного напряжения реактивная мощность выпрямителя растет, увеличивая загрузку электрических сетей реактивным током, что в свою очередь сопровождается значительными потерями активной энергии и напряжения в сети.

					<b>ЮУрГУ-13.04.02.2018.254.01ПЗ</b>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		14

Жесткая связь между переменным током на входе выпрямителя и его выпрямленным током имеет своим следствием то, что, несмотря на уменьшение выпрямленного напряжения и соответствующее уменьшение мощности на выходе выпрямителя потребляемый им из сети ток сохраняет значение, пропорциональное выпрямленному току. При включении выпрямителя и малом значении его выпрямленного напряжения или при резком уменьшении этого напряжения происходит наброс реактивной мощности на сеть, что в случае значительной мощности нагрузки сопровождается провалом напряжения в сети и вредно отражается на остальных ее потребителях. В ряде случаев это нередко влечет за собой необходимость реконструкции сети.

Также на производстве увеличивается применение двухзвенных преобразователей частоты разной мощности. Преобразователь частоты состоит из неуправляемого выпрямителя на входе, звена постоянного тока (конденсаторы), автономный инвертор напряжения на выходе.

Неуправляемый выпрямитель работает на емкостную нагрузку. Форма входного тока представлена на рисунке 1.1.

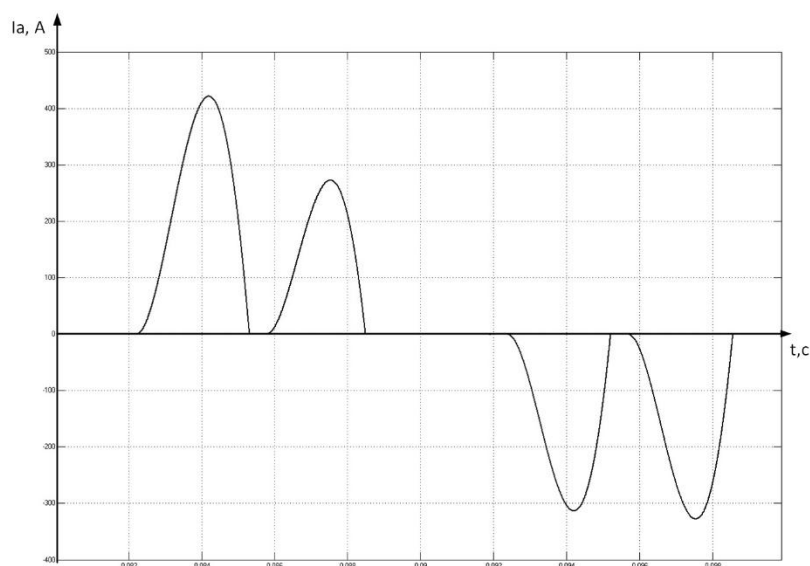


Рисунок 1.1 – Форма входного тока преобразователя частоты

Преобразователь частоты все чаще используют на производстве. Происходит вытеснение двигателей постоянного тока из различных технологических объектов. Преобразователь частоты прост в настройке, неприхотлив в эксплуатации.

Множество моделей преобразователей частоты могут работать как с асинхронными двигателями, так и с синхронным двигателем с постоянными магнитами, которые в свою очередь все чаще используют на производстве. Также частотные преобразователи получили широкое применение в станках с ЧПУ.

Но на сколько бы не был преобразователь частоты эффективен, он вызывает искажения в питающей сети из-за способа, с помощью которого получается из переменного постоянный ток. Ток не может протекать из сети через выпрямитель в шину постоянного тока пока входное напряжение выше, чем напряжение на звене постоянного тока.

Форма входного тока преобразователя частоты представлена на рисунке 1.1. Из рисунка видно, что ток несинусоидален. В каждом полупериоде тока наблюдаются по два импульса. Первый импульс полупериода возникает при максимальной разнице напряжения между фазами *A* и *B*, а второй импульс – при максимальной разнице напряжений между фазами *A* и *C*. Импульсы тока большой амплитуды создают ряд проблем для питающей сети, а также для других электрических устройств этой сети.

Основная проблема – это искажение формы напряжения сети. Напряжение, которое подается на вход 6-ти пульсного выпрямителя искажает свою форму, т.к. в момент протекания импульса тока увеличивается падение напряжения на внутреннем сопротивлении сети.

Спектр гармоник напряжения питающей сети, где нагрузкой выступает выпрямитель, выполненный по 6-ти пульсной схеме, при симметричном режиме работы содержит нечетные гармоники.

Еще одна проблема связана с силовыми трансформаторами, которые питают преобразователи частоты. Короткие импульсы тока за один полупериод (показано на рисунке 1.1) вызывают дополнительный нагрев трансформатора.

					<b>ЮУрГУ-13.04.02.2018.254.01ПЗ</b>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		16

Без защиты от гармонических искажений может потребоваться увеличение допустимой нагрузки трансформатора по току, что приведет к большому нерациональному увеличению затрат.

Таким образом, полупроводниковые преобразователи являются мощным источником искажения напряжения сети, а также потребителями реактивной мощности, режим потребления которых имеет особенности, связанные с нелинейностью и нестабильностью параметров нагрузки.

В условиях возрастающего использования вентильных преобразователей отмеченные их недостатки сопровождаются ощутимым технико-экономическим ущербом. Для их устранения существует два пути: внешняя и внутренняя компенсация.

Внешняя компенсация основана на применении различных компенсирующих устройств, генерирующих реактивную мощность в сеть – конденсаторных батарей, синхронных компенсаторов, регулируемых и нерегулируемых источников реактивной мощности (фильтрокомпенсирующие устройства, выполненные на базе реакторов и конденсаторов), силовых активных фильтров, активных фильтров-компенсаторов и т.д.

Внутренняя компенсация предполагает уменьшение как потребления реактивной мощности, так и генерации высших гармоник тока посредством изменений в самом выпрямителе.

## 1.2 Устройства, улучшающие энергетические показатели и качество электрической энергии в системе электроснабжения

На рисунке 1.2 приведена классификация устройств, обеспечивающих повышение энергетических показателей и качества напряжения в сети.

					<b>ЮУрГУ-13.04.02.2018.254.01ПЗ</b>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		17



Рисунок 1.2 – Классификация устройств, повышающих энергетические показатели и качество электроэнергии

Согласно данной классификации все устройства, повышающие коэффициент мощности и качество напряжения в сети, разбиты на два типа:

1) устройства, предназначенные только для компенсации реактивной мощности или мощности искажений (уменьшения несинусоидальности кривой напряжения сети). Назовем такие устройства компенсаторами (компенсаторами реактивной мощности или мощности искажений). Они могут управляться в функции дефицита реактивной мощности в сети;



2) устройства, обеспечивающие электроснабжение каких-либо потребителей, удовлетворяя требования технологии и одновременно повышающие собственные энергетические показатели. Назовем такие устройства компенсированными преобразователями. Они могут выдавать реактивную мощность в сеть, но не управляются в функции дефицита реактивной мощности в сети.

В зависимости от управления некоторые устройства могут переходить из одного типа в другой.

Таким образом, согласно вышеприведенной классификации устройства делятся на собственно компенсирующие (только улучшающие показатели сети, но не выполняющие полезной технологической функции), устройства, повышающие свои энергетические показатели и частично улучшающие показатели сети. Все устройства компенсации могут быть с неуправляемой компенсацией и с компенсацией, управляемой в функции общего энергопотребления из сети.

### 1.2.1 Конденсаторные батареи

Самым простым и дешевым способом компенсации реактивной мощности и повышения  $\cos\varphi$  в системах электроснабжения является применение батарей конденсаторов (БК) [2], которые создают опережающий фазовый сдвиг тока на 90 эл. град. относительно напряжения питающей сети.

На напряжениях до 1000 В в основном применяется параллельное включение БК, чаще всего сочетающееся со ступенчатым регулированием посредством включения или отключения части батареи при помощи контакторов или встречно - включенных тиристоров (рисунок 1.3).

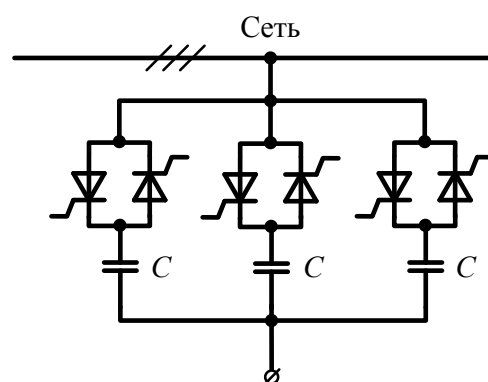


Рисунок 1.3 – Схема для управления БК тиристорами

Разбиение БК на секции с подключением их к общим шинам напряжения сети делает невозможным плавное регулирование выдачи реактивной мощности, а также снижает надежность установки в целом из-за трудностей коммутации. Параллельное подключение секции БК к уже работающей вызывает пусковые токи, значительно превосходящие токи включения обособленной батареи. Происходит разряд находящейся под напряжением секции БК на вновь подключаемую через небольшое сопротивление соединительных шин или через дополнительный резистор (двухступенчатое переключение).

Эти недостатки в определенной степени устраняются при применении для управления БК симисторов или тиристоров, включенных встречно параллельно. В установившемся режиме ток в конденсаторе опережает напряжение на четверть периода.

Если включать тиристоры в моменты переходов тока емкости через нуль, т.е. в максимумы положительной и отрицательной полуволн, то не будет никакого искажения синусоидальности тока емкости.

Но для ликвидации броска тока при первом включении необходим предварительный заряд конденсаторов до максимума напряжения сети, например, с помощью маломощного выпрямителя.

К числу недостатков БК следует отнести низкие динамические характеристики комплекса при резких набросах и сбросах реактивной мощности, связанные с включением или выключением секций БК. Кроме этого, при питании от сети вентильных нагрузок, ухудшающих синусоидальность напряжения сети, и включении БК возникают опасные высокочастотные колебания или резонансные явления, возникающие между БК и индуктивностью сети. Вследствие этого БК быстро выходят из строя по причине тепловых перегрузок, которые могут достигать (400–500) % от предельно допустимых значений. Поэтому применение БК совместно с нелинейными нагрузками (вентильными преобразователями) весьма затруднительно.

					<b>ЮУрГУ-13.04.02.2018.254.01ПЗ</b>	Лист
						20
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

### 1.2.2 Конденсаторно-реакторные компенсаторы

В конденсаторно-реакторных компенсаторах используют встречно-параллельно соединенные тиристоры (или симисторы) с последовательно включенной индуктивностью. Они обеспечивают плавное регулирование выдачи реактивной мощности, но вносят свои искажения в ток и ухудшают синусоидальность напряжения сети. Обычно они подключаются к сети через отдельные трансформаторы для уменьшения вредного влияния на сеть [3].

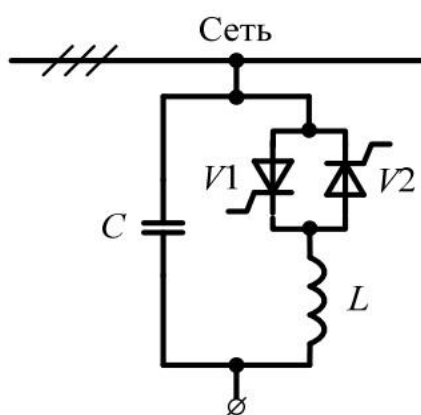


Рисунок 1.4 – Схема конденсаторно-реакторного компенсатора

Конденсаторно-реактивные компенсаторы (КРК) могут компенсировать отстающий ток сети, но также и опережающий емкостной ток сети. Это достигается за счет параллельного включения конденсатора и катушки индуктивности. Регулирование величины и вида реактивной мощности обеспечивается выполнением регулирования реакторной части компенсатора (также возможно регулирование и конденсаторной части компенсатора). В данной схеме, которая изображена на рисунке 1.4, для регулирования компенсации емкостных токов сети реактор подключен через встречно-параллельно включенные тиристоры.

Принцип работы конденсаторно-реактивного компенсатора рассмотрим на основе векторной диаграммы токов, изображенной на рисунке 1.5.

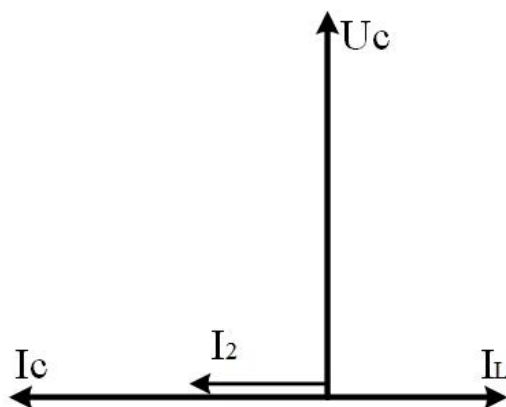


Рисунок 1.5 – Векторная диаграмма токов

Ток  $I_2$  – векторная сумма токов  $I_C$  и  $I_L$ :

$$I_2 = I_C - I_L. \quad (1.3)$$

Реактивная мощность, которую компенсирует КРК:

$$Q_{\text{КРК}} = I_2 \cdot U_2 \cdot \sin \varphi. \quad (1.4)$$

Следовательно, изменяя значение тока  $I_L$  с помощью тиристорного регулятора, можно изменять величину скомпенсированной реактивной энергии.

Недостатки: конденсаторно-реактивный компенсатор объединяет некоторые минусы конденсаторных батарей и индуктивного компенсатора реактивной энергии. Но также стоит отметить, что тиристорный регулятор напряжения, который установлен либо перед реактором, либо перед конденсатором, оказывает негативное влияние на форму тока питающей сети, искажая его нечетными высшими гармониками с номерами  $n = 3, 5, 7, 9, \dots$  за счет фазового управления тиристорами.

### 1.2.3 Пассивные (резонансные) фильтры

Фильтры, выполненные только на реактивных элементах (индуктивностях и емкостях), называют пассивными. Часто в состав этих фильтров входят и резисторы, демпфирующие колебания, возникающие в высокодобротных контурах (рисунок 1.6). Пассивные (сетевые) фильтры являются неотъемлемой частью любых компенсирующих и преобразовательных устройств [7].

Сетевые фильтры служат для уменьшения вредного влияния преобразователей на питающую сеть. Кроме того, они защищают преобразователь от электромагнитных помех, передающихся из сети [2].

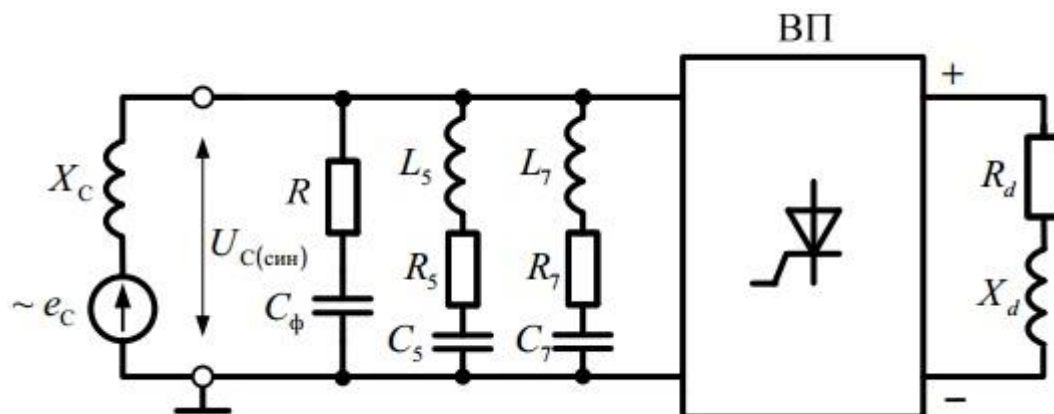


Рисунок 1.6 – Схема подключения ведомого преобразователя к сети через сетевой фильтр

Пассивные фильтры классифицируются по способу подключения к сети на последовательные и параллельные. Но последние получили широчайшее применение на практике.

Применение пассивных фильтров является основным методом для уменьшения степени негативного влияния высших гармоник, а также их применение позволяет частично или полностью скомпенсировать реактивную мощность.

Обладая минимальным сопротивлением на частоте настройки, пассивный фильтр шунтирует высшие гармоники токов нагрузки, в результате исключается попадание данных составляющих в сеть [7].

На практике свое применение широко получили однорезонансные схемы, которые применяются для фильтрации нечетных гармоник ( $n=5, 7, 11, 13$ ) путем объединения их в группы (рисунок 1.6).

Настройка пассивного фильтра на резонансную частоту  $n$ -ой гармоники определяется, исходя из формулы:

$$\omega_n = \frac{1}{\sqrt{L_n \cdot C_n}}, \quad (1.5)$$

где  $C_n$  – емкость конденсатора,  $L_n$  – индуктивность катушки.

Но, несмотря на свою простоту и малую стоимость, пассивные фильтры имеют ряд недостатков:

- существует вероятность возникновения резонанса между пассивным фильтром и индуктивностью нагрузки;
- отсутствует возможность изменения параметров пассивного фильтра в зависимости от режима работы системы «источник-потребитель».

#### 1.2.4 Вентильные компенсаторы реактивной мощности на запираемых тиристорах

Постоянное развитие преобразовательной техники дает возможность заменить синхронный компенсатор на автономный инвертор тока, который выполнен на запираемых тиристорах (*GTO*-тиристоры).

Схема компенсатора реактивной мощности на основе инвертора тока представлена на рисунке 1.7. Инвертор тока работает в режиме источника реактивного напряжения. В звене постоянного тока источник питания не нужен. Потери активной мощности в инверторе покрываются потреблением небольшой активной мощности из сети за счет сдвига фазы тока относительно напряжения инвертора на угол меньший 90 эл.град. [3]. Исходя из этих условий задаются требуемые уровни постоянного тока в сглаживающем реакторе  $L_d$ , определяющий реактивную мощность компенсатора.

					<b>ЮУрГУ-13.04.02.2018.254.01ПЗ</b>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		24

На вторичной обмотке трансформатора обязательно требуется подключение конденсаторов  $C_{\Phi}$ , выполняющих роль устройства сброса энергии (УСЭ), накопленной в индуктивностях рассеяния трансформатора при коммутации запираемых тиристоров.

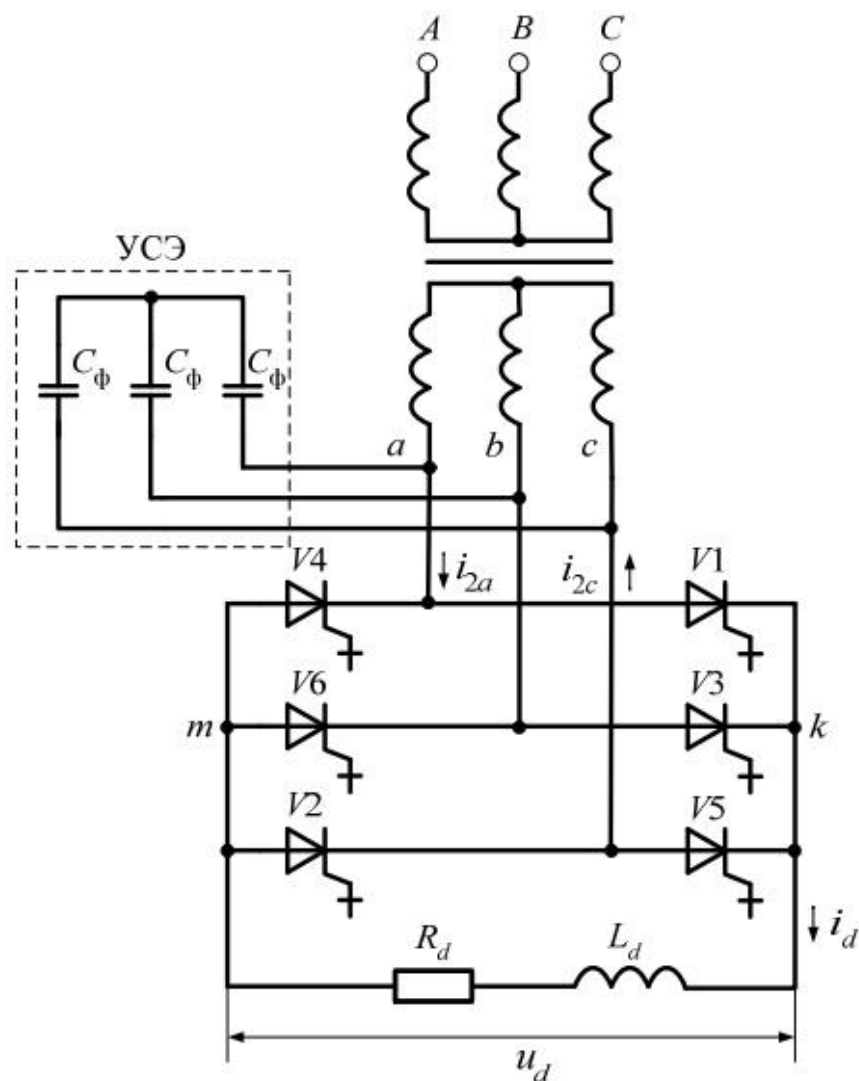


Рисунок 1.7 – Компенсатор реактивной мощности на основе инвертора тока

### 1.2.5 Активные силовые фильтры и фильтры-компенсаторы

Активный фильтр представляет собой полупроводниковое преобразовательное устройство, выполняющее компенсацию сигнальных и параметрических возмущений со стороны несимметричной и нелинейной нагрузки [7].

Принцип действия активного силового фильтра (АСФ), а также алгоритм управления устройством фильтрации были сформулированы в 70-е года 20 века. Но широкое распространение АСФ получил недавно, после появления новых силовых полупроводниковых приборов и методов высокочастотной модуляции.

Существуют несколько схем подключения активного фильтра к сети: последовательный, параллельный, комбинированный.

Параллельные АСФ позволяют исключить высшие гармоники и реактивную мощность, потребляемые различными трехфазными нагрузками. Основной принцип работы – формирование на своем выходе компенсационных воздействий с противоположным знаком. В состав этих воздействий входят высшие гармоники нагрузки. Вследствие чего форма потребляемых токов стремится к синусоидальной. Схема параллельного АСФ изображена на рисунке 1.8.

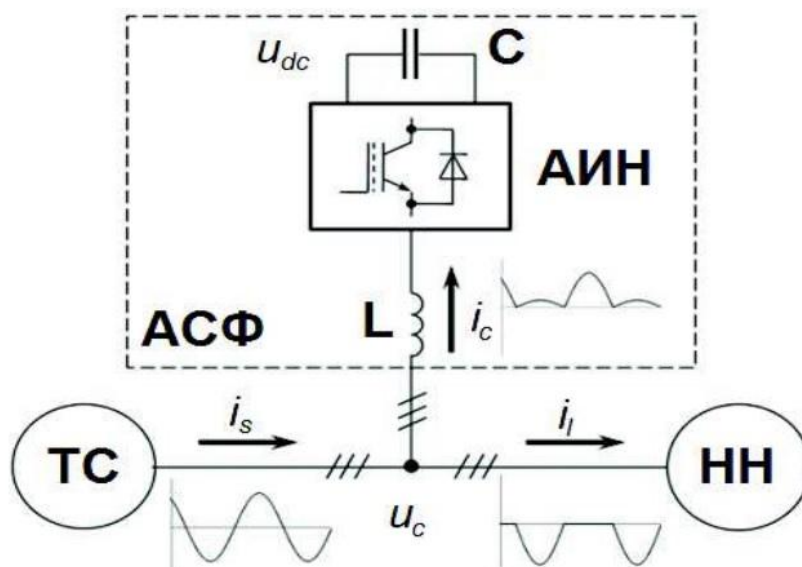


Рисунок 1.8 – Схема параллельного активного фильтра

Последовательный активный фильтр, который изображен на рисунке 1.9, представляет собой автономный инвертор напряжения с широтно-импульсной модуляцией, который включен через согласующий трансформатор последовательно с сетью.



Силовые сигналы компенсируемых гармоник генерируются фильтром в 3-х фазную сеть с противоположным знаком, вследствие чего сумма напряжений сети и активного фильтра на входе нагрузки принимает форму, приближенной к синусоидальной. Подключается со стороны источника и служит для фильтрации напряжения на нагрузке и демпфирует колебания в сети.

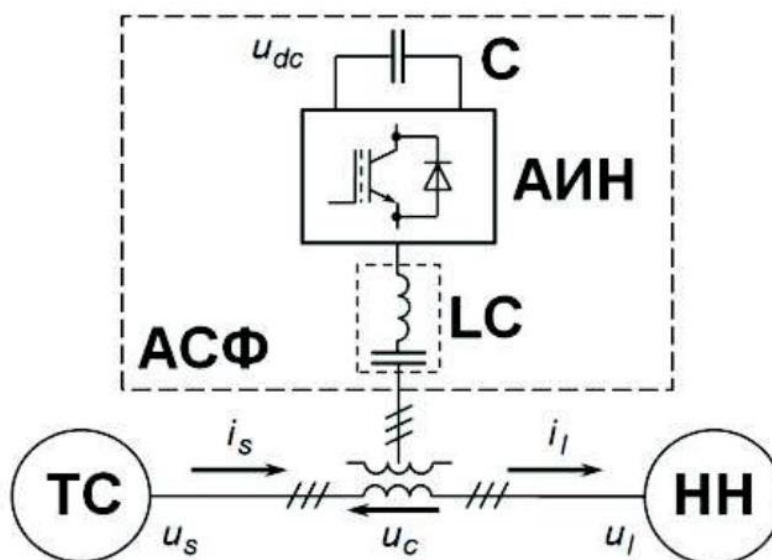


Рисунок 1.9 – Схема последовательного активного фильтра

Комбинированный (последовательно-параллельный) активный фильтр, который изображен на рисунке 1.10, представляет собой смесь параллельного и последовательного АСФ и является самым перспективным направлением в развитии полупроводниковых компенсирующих устройств.

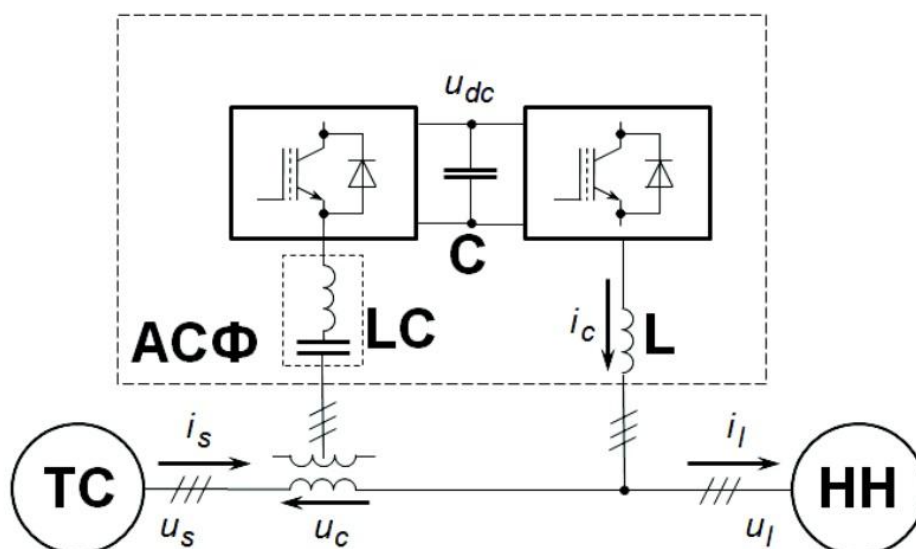


Рисунок 1.10 – Схема комбинированного активного фильтра

Комбинированный АСФ подключается в близости от потребителя и выступает в качестве гармонических токов сети и реактивной мощности.

Последовательная часть содержит согласующий трансформатор, который функционирует как в инверторном, так и выпрямительном режимах. Выходная цепь с широтно-импульсной модуляцией содержит пассивный фильтр в виде  $LC$  цепей, которые служат для подавления высокочастотных пульсаций.

Параллельная часть представлена устройством, которое схоже с параллельным АСФ, но главное отличие – в ее состав входит несколько бесконтактных выключателей, которые обеспечивают частичное или полное отключение нагрузки.

Комбинированный АСФ может работать в нескольких режимах работы:

- компенсационный режим. Напряжения в пределах нормы, бесконтактные ключи замкнуты, и последовательный и параллельный АСФ работают в режимах трехфазного источника напряжения и тока;

- режим резервного источника. Напряжение за пределами нормы, ключи разомкнуты, сеть отключена, нагрузка питается от параллельного АСФ, который благодаря запасенной электромагнитной энергии выступает как источник синусоидального напряжения.

Таблица 1.1 – Достоинства и недостатки АСФ

Вид АСФ	Достоинства	Недостатки
Параллельный	Возможность одновременной фильтрации нескольких высших гармоник; Эффективное подавление мультигармонических составляющих независимо от типа нагрузки.	Из-за импульсного режима АИН в фазных переменных источника появляются дополнительные высокочастотные гармоники.
Последовательный		
Комбинированный	Работа в нескольких режимах; Эффективное подавление мультигармонических составляющих независимо от типа нагрузки.	Силовая часть выбирается на высокие значения мощности, превышающие параметр нагрузки; Потребляемые токи имеют негармоническую форму, если напряжение сети искажается.

Главным достоинством активного сетевого фильтра перед всеми другими компенсирующими устройствами является его высокое быстродействие, достигающее значений 0,5-1,0 мс.

Более перспективным, с учетом быстродействия вентильных компенсаторов, создаваемых на *IGBT*- транзисторах, является управление, обеспечивающее компенсацию не только мощности искажения, но и реактивной мощности, т.е. компенсацию пассивной мощности. Иными словами, управление должно осуществляться так, чтобы суммарный ток, потребляемый из сети, приближался к оптимальному, т.е. чтобы ток был синусоидальным и имел заданный угол сдвига  $\varphi$  относительно напряжения. При этом постоянное напряжение на выходе должно поддерживаться стабильным [2].

Устройства, которые могут компенсировать пассивную мощность, называются активными фильтрами-компенсаторами (АФК).

Компенсация пассивной мощности – отличительная особенность между активным фильтром-компенсатором и активным сетевым фильтром.

Основным недостатком АФК является большая мощность компенсации, следовательно, построение устройства на большую мощность, которая соизмерима с активной мощностью всех нагрузок переменного тока.

Рисунок 1.11 иллюстрирует, каким должен быть ток АФК  $i_k$ , чтобы при потреблении всеми нагрузками несинусоидального тока  $i_n$ , сдвинутого относительно сетевого напряжения на угол  $\varphi > 0$ , из сети потреблялся синусоидальный ток  $i_c$ , передающий необходимую активную мощность и сдвинутый относительно напряжения сети  $U_c$  на угол  $\varphi = 0$ .

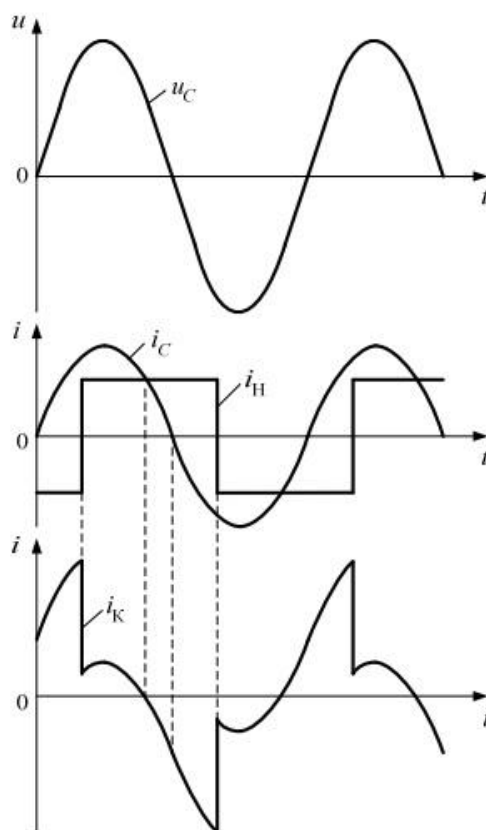


Рисунок 1.11 – Пояснение к принципу работы активного фильтра-компенсатора

Из выше сказанного следует, что активные фильтры-компенсаторы обеспечивают автоматическую подстройку ко всем изменениям нагрузки таким образом, чтобы из сети потреблялся синусоидальный ток, совпадающий по фазе с напряжением сети. Сегодня активные фильтры-компенсаторы широко применяются в таких странах, как США, Япония, Южная Корея.

Самым актуальным и малоизученным направлением в развитии компенсирующих устройств является активный фильтр-компенсатор. Он сочетает в себе все достоинства АСФ, а также способен компенсировать пассивную мощность.

На современном производстве регулируемые электропривода переменного и постоянного тока выполняют множество функций и решают не один десяток задач. Мощность преобразователей частоты и тиристорных преобразователей на производстве достигает нескольких МВт, поэтому компенсация пассивной мощности в современном мире – главная задача.

В последние годы к повышению качества электроэнергии уделяют особое внимание, т.к. качество может влиять на расход электроэнергии, на технологический процесс, на срок службы электротехнического оборудования.

Малоизученными вопросами относительно АФК являются:

- динамика активных фильтров-компенсаторов;
- статика совместно с электроприводами переменного тока.

Тема, которую я выбрал для выпускной квалификационной работы, является актуальной на сегодняшний день. В современном мире серьезно относятся к качеству электрической энергии, потому что в понятие качество электроэнергии входят характеристики, которые могут оценивать пригодность электрической энергии в различных производственных процессах. Важным вопросом, связанным с повышением качества электроэнергии в промышленных сетях, является вопрос компенсации высших гармоник и реактивной энергии, который включает в себя выбор источников компенсации, наилучшее расположение данных источников компенсации в системах электроснабжения. Главная проблема в компенсации реактивной энергии в энергосистемах нашей страны – в промышленности наблюдается опережающий рост потребления реактивной энергии по сравнению с активной. Этой тенденции сопутствует внедрение мощных вентильных преобразователей, сварочных установок, которые оказывают сильное влияние на качество электрической энергии.

Основные результаты работы, которые необходимы достичь при изучении АФК:

- достижение высоких энергетических показателей в системе электроснабжения – коэффициента мощности и  $\cos\varphi$ , близкого к единице, как в статических, так и динамических режимах работы электроприводов;
- снижение действующего значения тока, потребляемого из сети, в среднем на 30–40% а, значит, и потерь мощности в системе электроснабжения.

					<b>ЮУрГУ-13.04.02.2018.254.01ПЗ</b>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		31

### 1.3 Цель, задачи и задание исследовательской работы

С учетом вышесказанного целью работы является исследование статических и динамических характеристик активного фильтра-компенсатора (АФК) совместно с силовыми вентильными преобразователями, широко применяемых в электроприводах постоянного и переменного тока.

Для решения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Произвести расчет суммарной активной, полной и пассивной мощностей всех нагрузок переменного тока в номинальном и перегрузочных режимах работы.

2. Выполнить расчет токоограничивающих реакторов на входе силовых преобразователей в электроприводах постоянного и переменного тока.

3. Произвести расчет параметров источника электроснабжения 0,4 кВ.

4. Спроектировать активный фильтр-компенсатор:

– расчет параметров и выбор трехфазного реактора  $L_{АФК}$  на входе преобразователя;

– выбор конденсаторов постоянного тока  $C_{d1}$ ,  $C_{d2}$  и силовых ключей активного фильтра-компенсатора;

– расчет параметров пассивного фильтра высших гармоник на входе активного фильтра-компенсатора;

– расчет параметров системы управления АФК (коэффициенты датчиков, пороги переключения релейных элементов внутреннего контура тока АФК, уставок в блоках ограничения активной и реактивной составляющих токов и т.д.).

5. Исследование статических характеристик трехфазного активного фильтра-компенсатора совместно с нелинейными нагрузками переменного тока, включая вентильные преобразователи постоянного и переменного тока.

6. Исследование динамических характеристик трехфазного активного фильтра-компенсатора совместно с регулируемыми электроприводами постоянного и переменного тока.

					<b>ЮУрГУ-13.04.02.2018.254.01ПЗ</b>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		32

Принципиальная схема подключения трехфазного активного фильтра-компенсатора к сети совместно с нагрузками переменного тока приведена на рисунке 1.12. В качестве нагрузок переменного тока в работе используются:

- активно-индуктивная нагрузка. 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 вентилях «Вперед» и «Назад». К выходу преобразователя подключен двигатель постоянного тока  $M$  с независимым возбуждением. При расчетах КПД тиристорного выпрямителя принять 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. При расчетах КПД неуправляемого выпрямителя принять равным 0,98, а КПД инвертора 0,96.

Исходные данные нагрузок переменного тока приведены в табл. 1.2, 1.3, 1.4.

Таблица 1.2 – Исходные данные нагрузок переменного тока

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
105	0,63	Д814	110	5AM250S4	75

Таблица 1.3 – Технические данные двигателя постоянного тока Д814

Тип двигателя	$P_H$ , кВт	$U_{д.н.}$ , В	$I_{д.н.}$ , А	$r_я$ , Ом	$n_H$ , об/мин	$J_{дв.}$ , кг·м <sup>2</sup>
Д814	110	440	274	0,0572	490	10,2

Таблица 1.4 – Технические данные короткозамкнутого асинхронного двигателя 5AM250S4

Тип двигателя	$P_H$ , кВт	$U_{Ф.Н.}$ , В	$n_H$ , об/мин	$\eta_H$	$\cos\varphi_H$	$M_{П}/M_H$	$I_{П}/I_H$	$M_{max}/M_H$	$J_{ДВ}$ , кг·м <sup>2</sup>
5AM250S4	75	220	1485	94,3	0,85	2,2	7,2	2,3	1,00

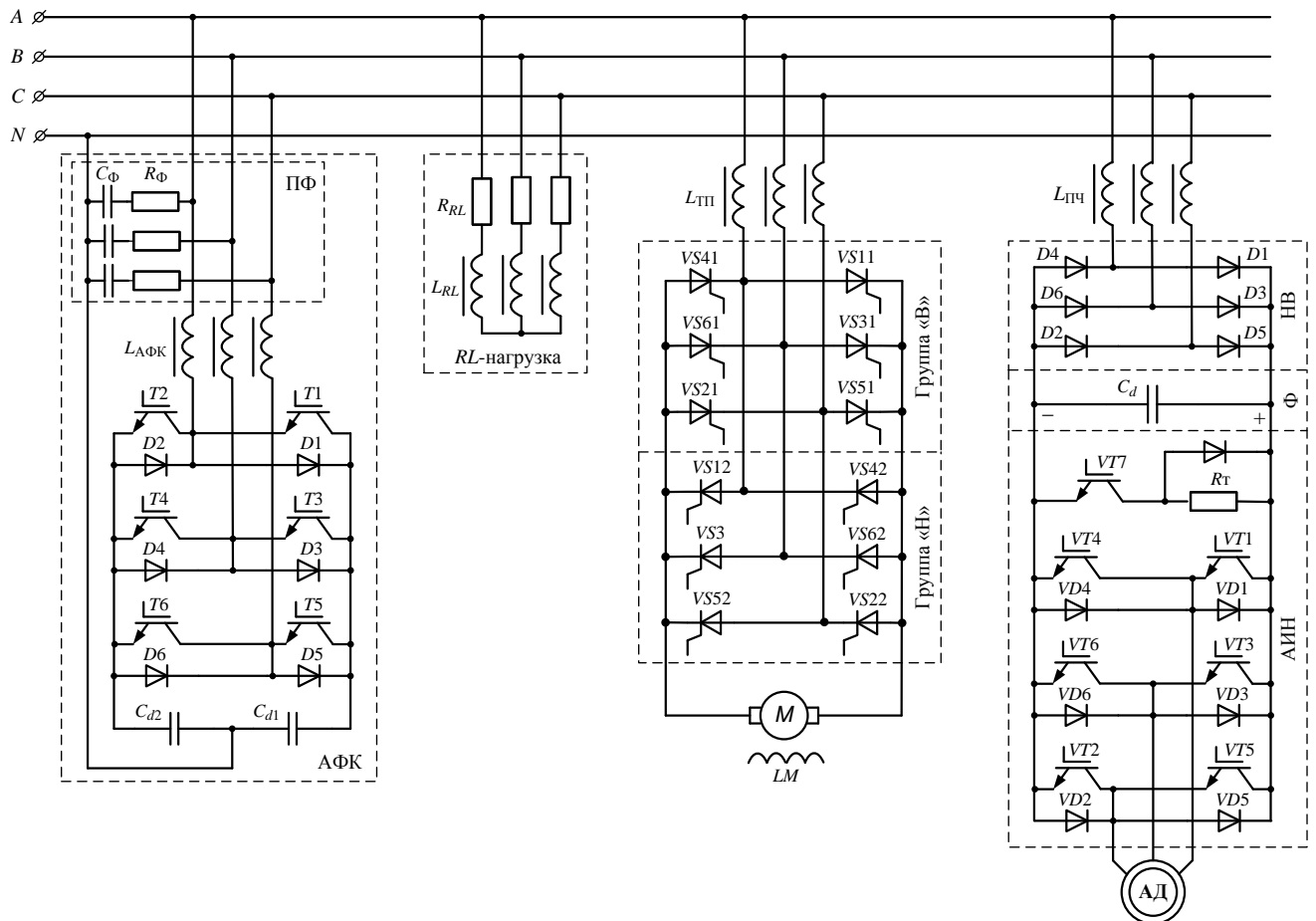


Рисунок 1.12 – Принципиальная схема трехфазного активного фильтра-компенсатора с нагрузками переменного тока

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата
------	------	----------	---------	------

ЮУрГУ-13.04.02.2018.254.01ПЗ

Лист

34



## 2 РАСЧЕТ МОЩНОСТИ СЕТИ И НАГРУЗОК ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

### 2.1 Расчет составляющих мощностей и силовых элементов трехфазной активно-индуктивной нагрузки

Согласно заданию полная мощность трехфазной активно-индуктивной нагрузки:

$$S_{RL} = \frac{P_{RL}}{\cos \varphi_{RL}}, \quad (2.1)$$

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

$$S_{RL} = \frac{105 \cdot 10^3}{0,63} = 166,6 \text{ кВА.}$$

Реактивная мощность активно-индуктивной нагрузки:

$$Q_{RL} = \sqrt{S_{RL}^2 - P_{RL}^2}. \quad (2.2)$$

$$Q_{RL} = \sqrt{166666,6^2 - 105000^2} = 129,4 \text{ квар.}$$

Действующее значение тока активно-индуктивной нагрузки:

$$I_{RL} = \frac{S_{RL}}{3U_{\Phi.H}}. \quad (2.3)$$

Здесь  $U_{\Phi.H}$  – фазное номинальное значение напряжения сети ( $U_{\Phi.H} = 220 \text{ В}$ ).

$$I_{RL} = \frac{166,6 \cdot 10^3}{3 \cdot 220} = 252,42 \text{ А.}$$

Полное, активное и реактивное сопротивления активно-индуктивной нагрузки:

$$Z_{RL} = \frac{U_{\Phi.H}}{I_{RL}}; R_{RL} = Z_{RL} \cdot \cos \varphi_{RL}; X_{RL} = \sqrt{Z_{RL}^2 - R_{RL}^2}. \quad (2.4)$$

$$Z_{RL} = \frac{220}{252,42} = 0,87;$$

$$R_{RL} = 0,87 \cdot 0,63 = 0,548;$$

$$X_{RL} = \sqrt{0,87^2 - 0,548^2} = 0,675.$$

					<b>ЮУрГУ-13.04.02.2018.254.01ПЗ</b>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		35

Индуктивность активно-индуктивной нагрузки:

$$L_{RL} = \frac{X_{RL}}{2\pi f_C}, \quad (2.5)$$

где  $f_C$  – частота питающей сети ( $f_C = 50$  Гц).

$$L_{RL} = \frac{0,675}{2\pi \cdot 50} = 2,15 \text{ мГн.}$$

## 2.2 Расчет составляющих мощностей и силовых элементов реверсивного ЭП постоянного тока

Активная мощность, потребляемая электродвигателем в номинальном режиме работы:

$$P_{d.H} = U_{d.H} \cdot I_{d.H}; \quad (2.6)$$

В режиме перегрузки:

$$P_{d.П} = (2...2,5) \cdot P_{d.H}. \quad (2.7)$$

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

$$P_{d.H} = 440 \cdot 274 = 120,56 \text{ кВт};$$

$$P_{d.П} = (2...2,5) \cdot 120560 = (241,12...301,4) \text{ кВт.}$$

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

$$P_{ТП.H} = \frac{P_{d.H}}{\eta_{ТП.H}}; \quad P_{ТП.П} \approx (2...2,5) \cdot P_{ТП.H}, \quad (2.8)$$

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

$$P_{ТП.H} = \frac{120,56 \cdot 10^3}{0,98} = 123,02 \text{ кВт};$$

$$P_{ТП.П} \approx (2...2,5) \cdot 123,02 \cdot 10^3 = (246,04...307,55) \text{ кВт.}$$

									Лист
									36
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	ЮУрГУ-13.04.02.2018.254.01ПЗ				

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

$$S_{\text{ТП.Н}} = 3U_{\text{Ф.Н}} \cdot I_{\text{ТП.Н}}; S_{\text{ТП.П}} = (2 \dots 2,5) \cdot S_{\text{ТП.Н}}. \quad (2.9)$$

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

$$I_{\text{ТП.Н}} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot 274 = 223,7 \text{ А};$$

$$S_{\text{ТП.Н}} = 3 \cdot 220 \cdot 223,7 = 147,64 \text{ кВА};$$

$$S_{\text{ТП.П}} = (2 \dots 2,5) \cdot 147,64 \cdot 10^3 = (295,28 \dots 369,1) \text{ кВА}.$$

Реактивная мощность, потребляемая тиристорным преобразователем из сети:

$$Q_{\text{ТП}} = 3U_{\text{Ф}} \cdot I_{\text{ТП(1)}} \cdot \sin\varphi, \quad (2.10)$$

где  $I_{\text{ТП(1)}} = I_{\text{ТП.m(1)}} / \sqrt{2}$  – действующее значение тока первой гармоники на входе тиристорного преобразователя;  $I_{\text{ТП.m(1)}} = 2\sqrt{3} \cdot I_d / \pi$  – амплитуда первой гармоники тока на входе тиристорного преобразователя, выполненного по трехфазной мостовой схеме выпрямления;  $I_d$  – ток нагрузки электродвигателя;  $\varphi$  – 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:

$$Q_{\text{ТП.Н.max}} = 3U_{\text{Ф.Н}} \cdot \frac{2\sqrt{3}}{\pi\sqrt{2}} I_{d.\text{Н}} \cdot \sin 90^\circ; \quad (2.11)$$

и режима перегрузки электропривода:

$$Q_{\text{ТП.П.max}} = (2 \dots 2,5) \cdot Q_{\text{ТП.Н.max}}. \quad (2.12)$$

$$Q_{\text{ТП.Н.max}} = 3 \cdot 220 \cdot \frac{2\sqrt{3}}{\pi\sqrt{2}} \cdot 274 \cdot \sin 90^\circ = 141 \text{ квар};$$

$$Q_{\text{ТП.П.max}} = (2 \dots 2,5) \cdot 141 \cdot 10^3 = (282 \dots 352,5) \text{ квар}.$$

Согласно угол сдвига  $\varphi$  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:

$$\alpha_{Q_{\max}} \approx 90^\circ - \frac{\gamma}{2}. \quad (2.13)$$

Здесь  $\gamma$  – угол коммутации тиристорного преобразователя, который на стадии предварительных расчетов рекомендуется принять равным 10 эл. град.

$$\alpha_{Q_{\max}} \approx 90^\circ - \frac{10}{2} = 85^\circ.$$

Из-за несинусоидального характера ток на входе тиристорного преобразователя кроме основной гармоники  $I_{\text{ТП.м}(1)} = 2\sqrt{3} \cdot I_d / \pi$  содержит ряд нечетных высших гармоник с номерами  $n = 6k \pm 1$ , то есть  $n = 5, 7, 11, 13$  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:

$$T_{\text{ТП.Н}} = 3U_{\text{Ф.Н}} \cdot \frac{2\sqrt{3}}{\pi\sqrt{2}} I_{d.\text{Н}} \cdot \sqrt{\sum_{k=1}^3 \left( \frac{1}{6k \pm 1} \right)^2}; \quad (2.14)$$

и режима перегрузки электропривода:

$$T_{\text{ТП.П}} = (2 \dots 2,5) \cdot T_{\text{ТП.Н}}. \quad (2.15)$$

$$T_{\text{ТП.Н}} = 3 \cdot 220 \cdot \frac{2\sqrt{3}}{\pi\sqrt{2}} \cdot 274 \cdot \sqrt{\sum_{k=1}^3 \left( \frac{1}{6k \pm 1} \right)^2} = 40,09 \text{ кВА};$$

$$T_{\text{ТП.П}} = (2 \dots 2,5) \cdot 40,09 \cdot 10^3 = (80,18 \dots 100,225) \text{ кВА}.$$

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.

					<b>ЮУрГУ-13.04.02.2018.254.01ПЗ</b>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		38

С учетом этого необходимо рассчитать индуктивность токоограничивающих (линейных) реакторов  $L_{ТП}$  на входе тиристорного преобразователя так, чтобы угол коммутации  $\gamma_H$  тиристорov в номинальном режиме работы электропривода был не меньше вышеуказанных значений. Примем  $\gamma_H = 10$  эл. град, тогда требуемая индуктивность токоограничивающих реакторов:

$$L_{ТП} = \frac{\sqrt{6} \cdot U_{\Phi.H}}{4\pi f_C I_{d.H}} \cdot [\cos \alpha_H - \cos(\alpha_H + \gamma_H)]. \quad (2.16)$$

Здесь  $\cos \alpha_H = \frac{U_{d.H}}{k_U k_R U_{\Phi.H}}$  – 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.

Согласно заданию на курсовой проект индуктивность якорной обмотки двигателя не задана, поэтому необходимо выполнить расчет требуемой индуктивности нагрузки исходя из допустимого уровня пульсаций выпрямленного тока  $q = (2...5)$  % при работе электропривода в номинальной точке.

$$\cos \alpha_H = \frac{440}{2,34 \cdot 0,95 \cdot 220} = 0,899;$$

$$L_{ТП} = \frac{\sqrt{6} \cdot 220}{4\pi \cdot 50 \cdot 274} \cdot [\cos 25,97 - \cos(25,97 + 10)] = 0,28 \text{ мГн.}$$

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

$$L_d = \frac{U_{d.m(1)}}{2\pi f_C q m I_{d.H}}, \quad (2.17)$$

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

					<b>ЮУрГУ-13.04.02.2018.254.01ПЗ</b>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		39

В трехфазной мостовой схеме амплитудное значение первой гармоники выпрямленного напряжения для номинального угла управления  $\alpha_H$ :

$$U_{d.m(1)} = \frac{2 \cos \alpha_H}{m^2 - 1} \cdot \sqrt{1 + m^2 \operatorname{tg}^2 \alpha_H} \cdot 2,34 U_{\text{Ф.Н.}} \quad (2.18)$$

$$U_{d.m(1)} = \frac{2 \cdot \cos(25,97)}{6^2 - 1} \cdot \sqrt{1 + 6^2 \cdot \operatorname{tg}^2(25,97)} \cdot 2,34 \cdot 220 = 81,7 \text{ В.}$$

$$L_d = \frac{81,7}{2\pi \cdot 50 \cdot 0,02 \cdot 6 \cdot 274} = 7,91 \text{ мГн.}$$

### 2.3 Расчет составляющих мощностей и силовых элементов частотно-регулируемого электропривода

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

$$P_{\text{ПЧ.Н}} = \frac{P_{\text{АДН}}}{\eta_{\text{АДН}} \cdot \eta_{\text{НВ.Н}} \cdot \eta_{\text{АИН.Н}}}; \quad P_{\text{ПЧ.П}} \approx (2 \dots 2,5) \cdot P_{\text{ПЧ.Н}} \quad (2.19)$$

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

$$P_{\text{ПЧ.Н}} = \frac{75000}{0,943 \cdot 0,98 \cdot 0,96} = 84,54 \text{ кВт};$$

$$P_{\text{ПЧ.П}} \approx (2 \dots 2,5) \cdot 84,54 \cdot 10^3 = (169,08 \dots 211,35) \text{ кВт.}$$

Номинальная мощность звена постоянного тока ПЧ:

$$P_{d \text{ ПЧ.Н}} = \frac{P_{\text{АДН}}}{\eta_{\text{АДН}} \cdot \eta_{\text{АИН.Н}}} \quad (2.20)$$

$$P_{d \text{ ПЧ.Н}} = \frac{75000}{0,943 \cdot 0,96} = 82,847 \text{ кВт.}$$

					<b>ЮУрГУ-13.04.02.2018.254.01ПЗ</b>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		40

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:

$$R_{d.ПЧ} = \frac{U_{d.ПЧ.Н}^2}{P_{d.ПЧ.Н}}, \quad (2.21)$$

где  $U_{d.ПЧ.Н}$  – напряжение в звене постоянного тока ПЧ в номинальном режиме (для трехфазной сети 380 В  $U_{d.ПЧ.Н} = 510 \dots 520$  В).

$$R_{d.ПЧ} = \frac{520^2}{82847,3} = 3,26 \text{ Ом.}$$

Для напряжения звена постоянного тока  $U_{d.ПЧ} = 500 \dots 550$  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:

$$C_d = C_{уд} \cdot P_{АДН} = (100 \dots 200) \cdot P_{АДН}^{кВт}, \text{ мкФ}; \quad (2.22)$$

$$C_d = (100 \dots 200) \cdot 75 = (7500 \dots 15000) \text{ мкФ.}$$

Номинальный ток в звене постоянного тока преобразователя частоты:

$$I_{d.ПЧ.Н} = \frac{P_{d.ПЧ.Н}}{U_{d.ПЧ.Н}}. \quad (2.23)$$

$$I_{d.ПЧ.Н} = \frac{82,847 \cdot 10^3}{520} = 159,32 \text{ А.}$$

Номинальное действующее значение тока первой гармоники на входе преобразователя частоты:

$$I_{ПЧ(1).Н} = \frac{P_{ПЧ.Н}}{3U_{\Phi.Н} \cdot \cos \varphi_{НВ.Н}}. \quad (2.24)$$

					<b>ЮУрГУ-13.04.02.2018.254.01ПЗ</b>	Лист
						41
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

При расчете принять равным  $\cos\varphi_{НВ.Н} = 0,97 \dots 0,99$ .

$$I_{ПЧ(1),Н} = \frac{84,54 \cdot 10^3}{3 \cdot 220 \cdot 0,99} = 129,38 \text{ А.}$$

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  $0,7 \dots 0,8$ , тогда:

$$I_{ПЧ.Н} = \frac{I_{ПЧ(1),Н} \cdot \cos\varphi_{НВ.Н}}{\chi_{ПЧ.Н}}. \quad (2.25)$$

$$I_{ПЧ.Н} = \frac{129,38 \cdot 0,99}{0,8} = 160,1 \text{ А.}$$

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:

$$L_{ПЧ} = \frac{X_{L\%}}{100\%} \cdot \frac{U_{Ф.Н}}{2\pi f_c I_{ПЧ.Н}}, \quad (2.26)$$

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

$$L_{ПЧ} = \frac{1\%}{100\%} \cdot \frac{220}{2\pi \cdot 50 \cdot 160,1} = 0,043 \text{ мГн.}$$

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

$$S_{ПЧ.Н} = 3U_{Ф.Н} \cdot I_{ПЧ.Н}; \quad S_{ПЧ.П} = (2 \dots 2,5) \cdot S_{ПЧ.Н}. \quad (2.27)$$

$$S_{ПЧ.Н} = 3 \cdot 220 \cdot 160,1 = 105,67 \text{ кВА};$$

$$S_{ПЧ.П} = (2 \dots 2,5) \cdot 105,67 \cdot 10^3 = (211,34 \dots 264,17) \text{ кВА.}$$

Поскольку  $\cos\varphi$  неуправляемого выпрямителя с емкостным фильтром достигает значений  $0,97 \dots 0,99$ , то реактивная мощность, потребляемая ПЧ из сети, весьма мала и стремится к нулю. Поэтому в рамках курсового проекта ею можно пренебречь.

					<b>ЮУрГУ-13.04.02.2018.254.01ПЗ</b>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		42



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:

$$T_{ПЧ.Н} = \sqrt{S_{ПЧ.Н}^2 - P_{ПЧ.Н}^2}; T_{ПЧ.П} = \sqrt{S_{ПЧ.П}^2 - P_{ПЧ.П}^2}. \quad (2.28)$$

$$T_{ПЧ.Н} = \sqrt{105666^2 - 84538,1^2} = 63,4 \text{ кВА};$$

$$T_{ПЧ.П} = \sqrt{264165^2 - 211345,2^2} = 158,48 \text{ кВА}.$$

Для более точного расчёта мощности искажений преобразователя частоты студентам предлагается при помощи компьютерной модели в программе *MatLab+Simulink* определить для номинального режима работы относительные значения амплитуд высших гармоник тока  $I_{ПЧ.m(n).Н}$  по отношению к основной  $I_{ПЧ.m(1).Н}$  и занести их в табл. 2.1.

С учетом табл. 1, рассчитать мощность искажений преобразователя частоты для номинального режима:

$$T_{ПЧ.Н} = 3U_{Ф.Н} \cdot \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_{ПЧ(n).Н}^2} = 3U_{Ф.Н} \cdot I_{ПЧ(1).Н} \cdot \sqrt{\sum_{n=5}^{19} \left( \frac{I_{ПЧ.m(n).Н}}{I_{ПЧ.m(1).Н}} \right)^2} = 67,54 \text{ кВА}; \quad (2.29)$$

и режима перегрузки электропривода:

$$T_{ПЧ.П} \approx (2 \dots 2,5) \cdot 67,54 \cdot 10^3 = (135,1 \dots 168,85) \text{ кВА}. \quad (2.30)$$

Таблица 2.1 – Процентное содержание гармоник по отношению к первой

Номер гармоники	5	7	11	13	17	19
$\frac{I_{ПЧ.m(n).Н}}{I_{ПЧ.m(1).Н}}$	0,6596	0,4164	0,0896	0,0778	0,0458	0,0321

Сравнить результаты расчетов, полученных из выражений (2.28) – (2.30).

## 2.4 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 будет рассчитать ток нагрузки компенсатора и по нему выбрать все элементы силовой цепи фильтра.

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

$$N = \sqrt{Q^2 + T^2}. \quad (2.31)$$

Суммарная максимальная реактивная мощность всех нагрузок в номинальном режиме:

$$Q_{\Sigma H.\max} = Q_{RL} + Q_{\text{ТП.Н.}\max} \quad (2.32)$$

и в режиме перегрузки:

$$Q_{\Sigma\Pi.\max} = Q_{RL} + Q_{\text{ТП.П.}\max}. \quad (2.33)$$

$$Q_{\Sigma H.\max} = 129,4 \cdot 10^3 + 141 \cdot 10^3 = 270,4 \text{ квар};$$

$$Q_{\Sigma\Pi.\max} = 129,4 \cdot 10^3 + 352,5 \cdot 10^3 = 482 \text{ квар}.$$

Суммарная максимальная мощность искажений всех нагрузок в номинальном режиме:

$$T_{\Sigma H} = T_{\text{ТП.Н}} + T_{\text{ПЧ.Н}} \quad (2.34)$$

В режиме перегрузки:

$$T_{\Sigma\Pi} = T_{\text{ТП.П}} + T_{\text{ПЧ.П}}. \quad (2.35)$$

$$T_{\Sigma H} = 40,09 \cdot 10^3 + 67,54 \cdot 10^3 = 107,63 \text{ кВА};$$

$$T_{\Sigma\Pi} = 100,23 \cdot 10^3 + 168,85 \cdot 10^3 = 269,08 \text{ кВА}.$$

Суммарная максимальная пассивная мощность всех нагрузок в номинальном режиме:

$$N_{\Sigma H.\max} = \sqrt{Q_{\Sigma H.\max}^2 + T_{\Sigma H}^2} \quad (2.36)$$

и в режиме перегрузки:

$$N_{\Sigma\Pi.\max} = \sqrt{Q_{\Sigma\Pi.\max}^2 + T_{\Sigma\Pi}^2}. \quad (2.37)$$

					<b>ЮУрГУ-13.04.02.2018.254.01ПЗ</b>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		44

$$N_{\Sigma H, \max} = \sqrt{270400^2 + 107630^2} = 291,03 \text{ кВА};$$

$$N_{\Sigma П, \max} = \sqrt{482000^2 + 269080^2} = 552,02 \text{ кВА}$$

## 2.5 Расчет параметров источника электроснабжения 0,4 кВ

Суммарная активная мощность всех нагрузок в номинальном режиме:

$$P_{\Sigma H} = P_{RL} + P_{ТП, H} + T_{ПЧ, H} \cdot \quad (2.38)$$

$$P_{\Sigma H} = 105000 + 123020 + 67540 = 295,56 \text{ кВт.}$$

Суммарная полная мощность всех нагрузок в номинальном режиме:

$$S_{\Sigma H} = S_{RL} + S_{ТП, H} + S_{ПЧ, H} \cdot \quad (2.39)$$

$$S_{\Sigma H} = 166600 + 147640 + 105670 = 419,9 \text{ кВА.}$$

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

$$S_{С, H} \geq S_{\Sigma H} \cdot \quad (2.40)$$

$$S_{С, H} = 420 \text{ кВА.}$$

Для сетей большой мощности мощность короткого замыкания:

$$S_{КЗ} = (70 \dots 100) \cdot S_{С, H} \cdot \quad (2.41)$$

$$S_{КЗ} = (70 \dots 100) \cdot 420000 = (29400 \dots 42000) \text{ кВА.}$$

					<b>ЮУрГУ-13.04.02.2018.254.01ПЗ</b>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		45

Индуктивное сопротивление сети:

$$X_C = \frac{3U_{\text{ФН}}^2}{S_{\text{КЗ}}}. \quad (2.42)$$

$$X_C = \frac{3 \cdot 220^2}{(29400000 \dots 42000000)} = (4,94 \dots 3,46) \text{ мОм}.$$

Индуктивность сети:

$$L_C = \frac{(3,46 \dots 4,94)}{2\pi \cdot 50} = (0,011 \dots 0,016) \text{ мГн}. \quad (2.43)$$

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

$$R_C = \frac{X_C}{2 \dots 10}. \quad (2.44)$$

$$R_C = \frac{3,46 \cdot 10^{-3}}{2 \dots 10} = (1,73 \dots 0,346) \text{ мОм}.$$

					<b>ЮУрГУ-13.04.02.2018.254.01ПЗ</b>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		46

### 3 РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ И ВЫБОР СИЛОВЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ТРЕХФАЗНОГО АКТИВНОГО ФИЛЬТРА-КОМПЕНСАТОРА

#### 3.1 Описание трехфазного активного фильтра-компенсатора 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  $A, B, C$  (см. рисунок 3.1). 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 3.1).

					<b>ЮУрГУ-13.04.02.2018.254.01ПЗ</b>	Лист
						47
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

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 3.1) 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  $\omega t$  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:

$$\begin{cases} I_{dн} = \frac{2}{3} \cdot [i_{aн} \sin(\omega t) + i_{bн} \sin(\omega t - 2\pi/3) + i_{cн} \sin(\omega t + 2\pi/3)] \\ I_{qн} = \frac{2}{3} \cdot [i_{aн} \cos(\omega t) + i_{bн} \cos(\omega t - 2\pi/3) + i_{cн} \cos(\omega t + 2\pi/3)] \end{cases} \quad (3.1)$$

Поскольку активную составляющую первой гармоники тока нагрузки компенсировать не нужно (она является полезной), в систему управления СУ введен блок выделения первой гармоники БВПГ (рисунок 3.1). 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 Ф2 с передаточной функцией  $W(p) = 1/(T_{\Phi 2} p + 1)$ . Далее при помощи простейшей операции вычитания на выходе БВПГ формируется сигнал  $I_{dн.вг} = I_{dн} - I_{dн(1)}$  активной составляющей тока нагрузки, содержащей только высшие гармоники.

					<b>ЮУрГУ-13.04.02.2018.254.01ПЗ</b>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		48

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  $\Sigma 4$  с источником сигнала задания  $U_{d.зад}$  и пропорционально-интегрального регулятора напряжения РИ. 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  $I_{dm.max}$  и реактивной  $I_{qm.max}$  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:

$$\begin{cases} I_{dk.зад} = -I_{дн.вг} + I_{d.зад}; \\ I_{qk.зад} = -I_{qn} + I_{q.зад}. \end{cases} \quad (3.2)$$

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 (3.2) реализуется при помощи сумматоров  $\Sigma 6$  и  $\Sigma 7$  (рисунок 3.1).

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

$$\begin{cases} i_{ak.зад} = I_{dk.зад} \sin(\omega t) + I_{qk.зад} \cos(\omega t); \\ i_{bk.зад} = I_{dk.зад} \sin(\omega t - 2\pi/3) + I_{qk.зад} \cos(\omega t - 2\pi/3); \\ i_{ck.зад} = I_{dk.зад} \sin(\omega t + 2\pi/3) + I_{qk.зад} \cos(\omega t + 2\pi/3). \end{cases} \quad (3.3)$$

Блок релейных регуляторов тока БРРТ состоит из трех релейных элементов РЭ1–РЭ3 (рисунок 3.1), которые осуществляют непосредственное «слежение» реальных токов компенсации  $i_{ак}$ ,  $i_{бк}$ ,  $i_{ск}$ , поступающих с выходов датчиков ДТ1–ДТ3 за их заданными значениями  $i_{ак.зад}$ ,  $i_{бк.зад}$ ,  $i_{ск.зад}$  в пределах зоны неоднозначности порогов переключения  $\pm b$  релейных элементов, которые принимаются равными (5–10)% от амплитуды номинального тока компенсатора.

Сумматоры  $\Sigma 1$ – $\Sigma 3$  вычисляют разницу  $\Delta i_{ак}$ ,  $\Delta i_{бк}$ ,  $\Delta i_{ск}$  между заданными и фактическими значениями мгновенных токов компенсации:

$$\begin{cases} \Delta i_{ак} = i_{ак.зад} - i_{ак}; \\ \Delta i_{бк} = i_{бк.зад} - i_{бк}; \\ \Delta i_{ск} = i_{ск.зад} - i_{ск}. \end{cases} \quad (3.4)$$

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

$$\begin{cases} Q_a = 1, \text{ если } \Delta i_{ак} \geq b; Q_a = 0, \text{ если } \Delta i_{ак} \leq -b; \\ Q_b = 1, \text{ если } \Delta i_{бк} \geq b; Q_b = 0, \text{ если } \Delta i_{бк} \leq -b; \\ Q_c = 1, \text{ если } \Delta i_{ск} \geq b; Q_c = 0, \text{ если } \Delta i_{ск} \leq -b. \end{cases} \quad (3.5)$$

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 3.1) и распределяет импульсы управления в соответствии с системой логических уравнений:

$$\begin{cases} u_2 = Q_a; u_1 = \overline{Q_a}; \\ u_4 = Q_b; u_3 = \overline{Q_b}; \\ u_6 = Q_c; u_5 = \overline{Q_c}. \end{cases} \quad (3.6)$$



Драйверы в системе управления АФК обеспечивают потенциальную развязку и усиление управляющих импульсов для силовых ключей  $T1-T6$ .

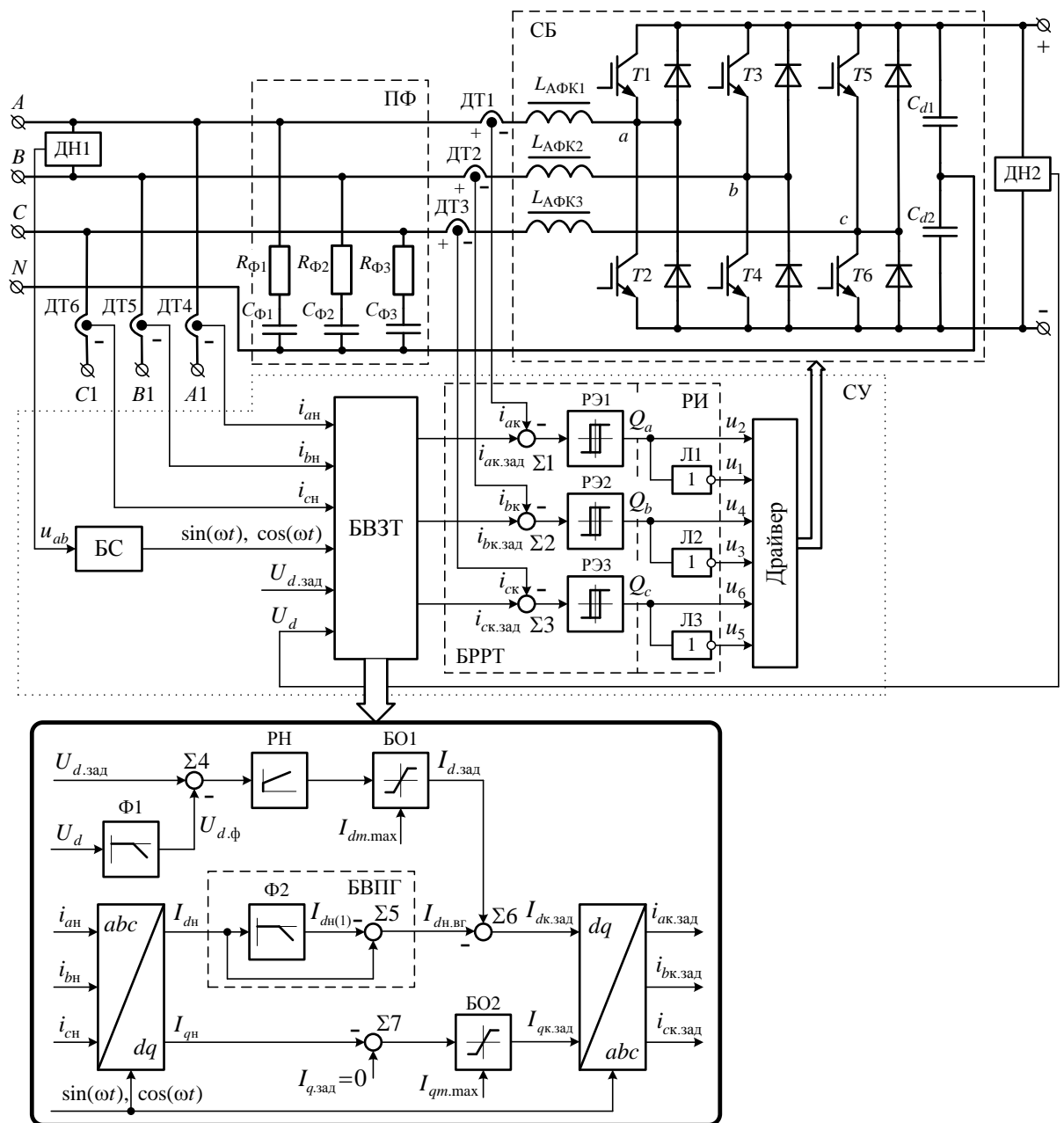


Рисунок 3.1 – Функциональная схема трехфазного активного фильтра-компенсатора с релейно-векторной системой управления

### 3.2 Динамические характеристики трехфазного активного фильтра-компенсатора

Для дальнейшего изучения активного фильтра-компенсатора и выбора его основных элементов необходимо рассмотреть динамические характеристики АФК, работающего в режиме активного фильтра.

Для этого в систему управления активного фильтра-компенсатора (рисунок 3.2) на выходе  $I_{qn}$  блока преобразования координат  $abc/dq$  необходимо установить блок выделения первой гармоники БВПГ, аналогично каналу активной составляющей тока  $I_{dn}$ . В качестве возмущающего воздействия для АФК примем входной ток трехфазного мостового выпрямителя с амплитудой тока  $I_{H.m}$  и временем нарастания  $t_k$ . (рисунок 3.2). На рисунке 3.2 показан каким должен быть ток активного фильтра  $i_k$ , чтобы при токе нагрузки  $i_H$  из сети потреблялся синусоидальный ток  $i_C$ . Полная компенсация всех высших гармоник в токе нагрузки осуществляется, когда амплитуда тока нагрузки  $I_{H.m}$  равна амплитуде тока компенсатора  $I_{K.m}$ .

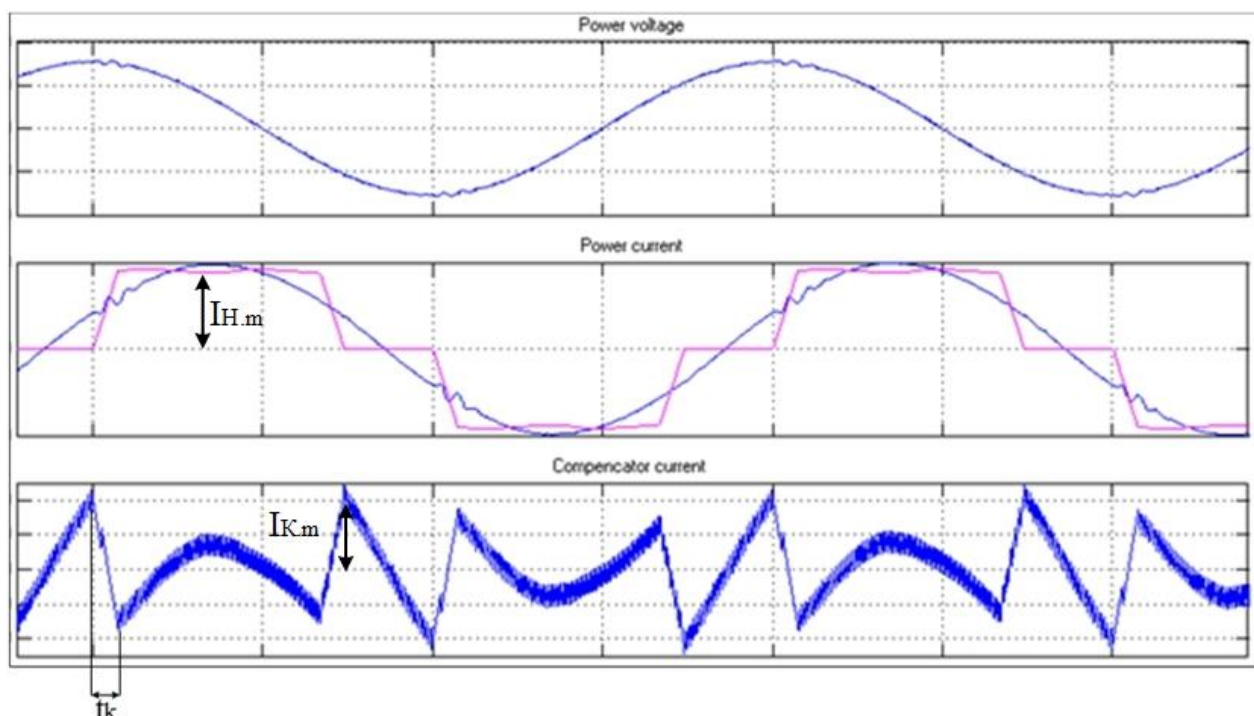


Рисунок 3.2 – Временные диаграммы токов и напряжений, поясняющие динамические свойства АФК

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

ЮУрГУ-13.04.02.2018.254.01ПЗ

Лист

52

В исследуемой системе АФК подключен к сети параллельно. На входе фильтра-компенсатора установлен трехфазный реактор с индуктивностью  $L_{АФК1}-L_{АФК3}$  (см. рисунок 3.1), индуктивность которого 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.

При резком набросе (сбросе) нагрузки АФК стремится скомпенсировать внешнее воздействие. Предельное быстродействие в системе достигается, когда один из транзисторов стойки моста переходит, например, в открытое состояние на всем протяжении нарастания компенсирующего тока  $i_k$ . При этом с одной стороны к входному дросселю АФК прикладывается напряжение одной из фаз сети, а с другой стороны постоянное напряжение с амплитудой  $U_d/2$ . Во всех режимах работы обязательно должно выполняться равенство:

$$(U_d/2) > U_{c.m},$$

где  $U_d$  – постоянное напряжение на выходе АФК,  $U_{c.m}$  – амплитуда напряжения сети.

Напряжение на входном реакторе:

$$U_L = L_{АФК} \cdot \frac{di_k}{dt}. \quad (3.7)$$

Наихудшее быстродействие в системе достигается, когда к входному дросселю АФК прикладывается напряжение  $U_L = (U_d/2) - U_{c.m}$ , что соответствует моменту приложения тока нагрузки, совпадающим с максимальным значением напряжения сети (см. рисунок 3.2). Тогда ток компенсатора с учетом равенства (3.7):

$$i_k = \frac{\left(\frac{U_d}{2} - U_{cm}\right) \cdot t_k}{L_{АФК}}. \quad (3.8)$$

Введем понятие скорости нарастания тока компенсатора  $i_K$ , как отношение амплитудного значения тока компенсатора  $I_{K.m}$  к времени нарастания  $t_K$ :

$$S = \frac{I_{K.m}}{t_K}. \quad (3.9)$$

Подставим (3.8) в (3.9), тогда:

$$S = \frac{\frac{U_d}{2} - U_{C.m}}{L_{АФК}} = \frac{U_d - 2 \cdot U_{C.m}}{2 \cdot L_{АФК}} = \frac{U_d \cdot \left(1 - 2 \cdot \frac{U_{C.m}}{U_d}\right)}{2 \cdot L_{АФК}} = \frac{U_d}{2 \cdot L_{АФК}} \cdot \left(1 - \frac{1}{k_{пов}}\right), \quad (3.10)$$

где  $k_{пов} = \frac{U_d}{2 \cdot \sqrt{2} \cdot U_{ф.н.}}$ .

АФК с релейно-токовым способом управления относится к системам с частотно-широотно-импульсной модуляцией (ЧШИМ) [5], когда частота переключения силовых ключей  $f_K$  снижается по мере увеличения напряжения сети  $u_C$  в соответствии с выражением:

$$f_K = f_{K.max} \cdot (1 - \bar{u}_C^2), \quad (3.11)$$

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

В соответствии с уравнением (3.11) максимальная частота переключения силовых ключей  $f_{K.max}$  наблюдается при  $\bar{u}_C = 0$ , а минимальная частота  $f_{K.min}$  – при амплитудном значении фазного напряжения сети  $U_{C.m}$

$$f_{K.min} = f_{K.max} \cdot \left[1 - \left(\frac{1}{k_{пов}}\right)^2\right]. \quad (3.12)$$

Для АФК с релейно-токовым способом управления индуктивность входного реактора:

$$L_{АФК} = \frac{U_d}{8 \cdot \Delta I_K \cdot f_{K.max}}. \quad (3.13)$$

Здесь  $\Delta I_K = (0,06 \dots 0,1) \cdot I_{K.m(1).H}$  – амплитуда пульсаций компенсирующего тока АФК;  $f_{k.max}$  – максимальная частота коммутации, зависящая от динамических характеристик силовых ключей активного фильтра.

Подставим (3.13) в (3.10) получим:

$$S = 4 \cdot \Delta I_K \cdot f_{k.max} \cdot \left(1 - \frac{1}{k_{нов}}\right). \quad (3.14)$$

Для рассмотрения вопроса динамики активного фильтра-компенсатора необходимо рассмотреть зависимость времени нарастания тока компенсатора от двух переменных коэффициента повышения  $k_{нов}$  и частоты коммутации  $f_{k.max}$ .

Из (3.9) выразим  $t_k$ :

$$t_k = \frac{I_K}{S} = \frac{I_K}{4 \cdot I_{km(1).H} \cdot \Delta \bar{I}_k \cdot f_{k.max} \cdot \left(1 - \frac{1}{k_{нов}}\right)}. \quad (3.15)$$

Здесь  $\Delta \bar{I}_k = \Delta I_K / I_{K.m(1).H}$  – нормированное значение пульсирующей составляющей тока компенсатора по отношению к максимальной амплитуде первой гармоники компенсирующего тока.

Будем считать, что  $I_{H.m} = I_{K.m} = I_{K.m(1).H}$ , тогда:

$$t_k = \frac{1}{4 \cdot \Delta \bar{I}_k \cdot f_{k.max} \cdot \left(1 - \frac{1}{k_{нов}}\right)}. \quad (3.16)$$

На основании (3.16) построено пространство  $t_k = f(k_{нов}, f_{k.max})$  динамического состояния АФК при  $\Delta \bar{I}_k = const$ .

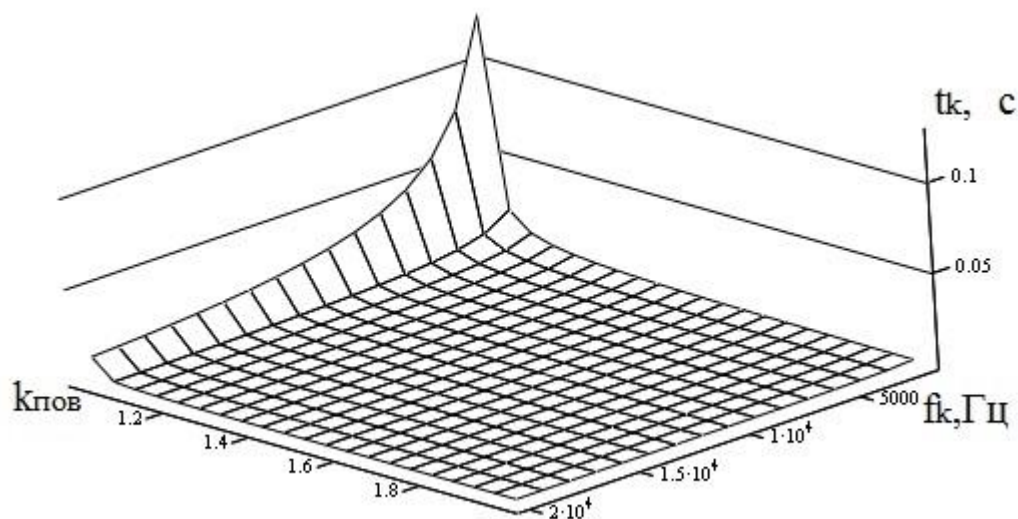


Рисунок 3.3 – Пространство  $t_k = f(k_{пов}, f_{k.max})$  динамического состояния АФК при  $\Delta I_k = 0,1$

Для большей наглядности на рисунке 3.4 построен график зависимости  $t_k = F(f_{k.max})$  при различных значениях  $k_{пов}$ .

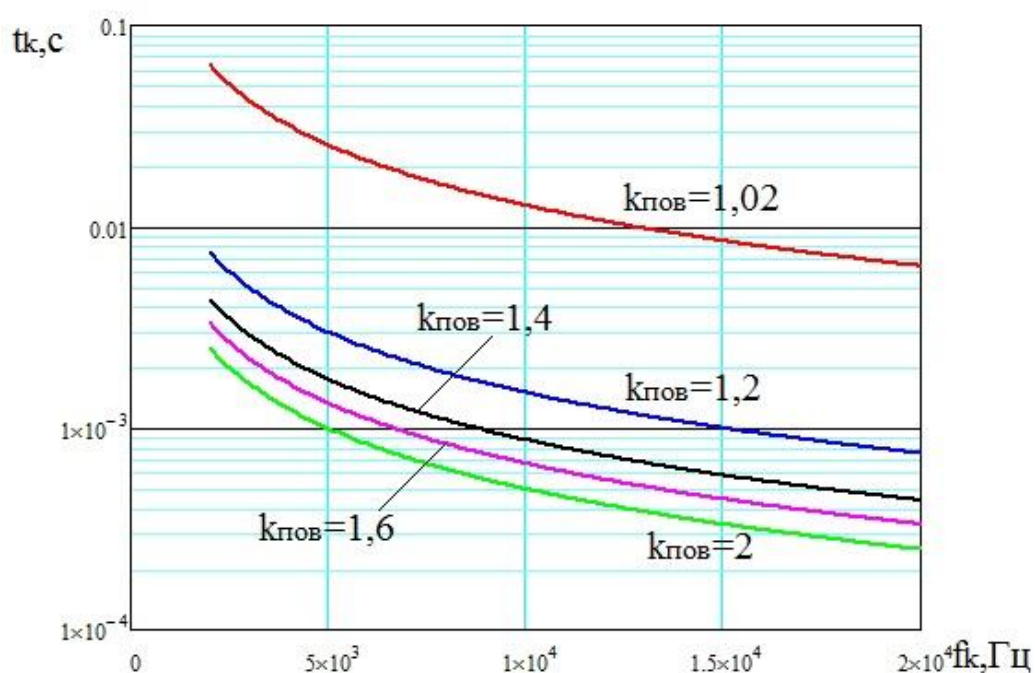


Рисунок 3.4 – Зависимость  $t_k = f(f_{k.max})$  при определенных значениях  $k_{пов}$

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

Анализ зависимостей, приведенных на рисунках 3.3, 3.4, показывает, что время нарастание компенсационного тока  $t_K$  зависят от максимальной частоты коммутации силовых ключей АФК  $f_{k.max}$  и коэффициента повышения преобразователя  $k_{пов}$ . Поэтому с целью достижения максимального быстродействия АФК значения  $f_{k.max}$  и  $k_{пов}$  следует выбирать как можно больше. Однако следует помнить, что их предельные значения ограничены временем включения и выключения *IGBT*-транзисторов и их максимальным напряжением на коллекторе.

### 3.3 Расчет параметров и выбор реактора на входе активного фильтра-компенсатора

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.

Выбор входного реактора АФК выполним из условия, что максимальное значение на выходе АФК  $U_{d.max}$  не должно превышать максимально-допустимого напряжения на коллекторе *IGBT*-транзистора  $U_{K.max} = 1200$  В.

Напряжение в звене постоянного тока АФК:

$$U_d = \frac{U_{d.max}}{k_{зп}}, \quad (3.17)$$

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

Согласно выражению (3.17):

$$U_d = \frac{1200}{1,36} = 877 \text{ В.}$$

Коэффициент повышения АФК  $k_{пов}$ :

$$k_{пов} = \frac{U_d}{2 \cdot \sqrt{2} \cdot U_{ф.н.}} = \frac{877}{2 \cdot \sqrt{2} \cdot 220} = 1,41, \quad (3.18)$$

где  $U_{ф.н.}$  – номинальное фазное значение напряжение сети, равное 220 В.

					<b>ЮУрГУ-13.04.02.2018.254.01ПЗ</b>	Лист
						57
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Номинальное действующее значение тока компенсатора

$$I_{К.Н} = \frac{N_{\Sigma Н. \max}}{3U_{\Phi.Н}} = \frac{291030}{3 \cdot 220} = 440,95 \text{ А.} \quad (3.12)$$

Здесь  $N_{\Sigma Н. \max}$  – суммарная максимальная пассивная мощность всех нагрузок переменного тока в номинальном режиме, рассчитанная в соответствии с (2.36).

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

$$I_{К.m(1).Н} = \sqrt{2} \cdot I_{К.Н} = \sqrt{2} \cdot 440,95 = 623,6 \text{ А.} \quad (3.13)$$

Требуемая индуктивность реактора на входе АФК:

$$L_{\text{АФК}} = \frac{U_d}{8 \cdot \Delta I_K \cdot f_{К. \max}} = \frac{877,34}{8 \cdot 0,1 \cdot 623,6 \cdot 18000} = 0,096 \text{ мГн,} \quad (3.14)$$

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.

Выбор реактора. При этом должны выполняться следующие условия:

$$L_P \geq L_{\text{АФК}}; I_{P.Н} \geq I_{К.Н}, \quad (3.15)$$

здесь  $L_P, I_{P.Н}$  – индуктивность и номинальный ток реактора из каталога.

Реактор необходимо проверить на допустимую перегрузку по следующим условиям:

$$I_{КП} < 2,5 \cdot I_{P.Н}; t_{П} < t_{P.П}. \quad (3.16)$$

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.

					<b>ЮУрГУ-13.04.02.2018.254.01ПЗ</b>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		58



Действующее значение тока компенсатора в режиме перегрузки:

$$I_{к.п} = \frac{N_{\Sigma П. max}}{3U_{\phi.н}} = \frac{552020}{3 \cdot 220} = 836,4 \text{ А}, \quad (3.17)$$

где  $N_{\Sigma П. max}$  – суммарная максимальная пассивная мощность всех нагрузок переменного тока в режиме перегрузки, рассчитанная в соответствии с (2.37).

В рамках выпускного проекта время перегрузки электроприводов  $t_{п}$  считать равным 2 с.

Таблица 3.1 – Номинальные данные реактора

Тип	Индуктивность, мГн	Номинальный ток, А
S42	0,096	450

Поскольку в каталогах реакторов не указано активное сопротивление реактора, оценим его приближенное значение, считая, что активная составляющая напряжения на реакторе  $U_{R,п}$  находится в диапазоне 0,2...1,0 В. При этом меньшим значениям  $U_{R,п}$  соответствуют реакторы, рассчитанные на большие номинальные токи  $I_{р.н}$ . Тогда активное сопротивление реактора:

$$R_p = \frac{U_{R,п}}{I_{р.н}} = \frac{1}{450} = 2,22 \text{ мОм}. \quad (3.18)$$

### 3.4 Выбор конденсаторов постоянного тока и силовых ключей активного фильтра-компенсатора

Конденсаторы постоянного тока, включенные на выходе активного фильтра, выполняют 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  $C_{уд} = (50...100)$  мкФ/кВА, тогда требуемая емкость звена постоянного тока АФК:

$$C_d = C_{уд} \cdot N_{\Sigma H, \max} = (50...100) \cdot 291,03 = 14551,5...29103 \text{ мкФ.} \quad (3.19)$$

В силовой схеме АФК (см. рис. 3.1) используются два последовательно включенных конденсатора  $C_{d1}, C_{d2}$  с одинаковой емкостью, поэтому:

$$C_{d1} = C_{d2} = 2C_d = 44000 \text{ мкФ.} \quad (3.20)$$

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

$$U_{Cd, \max} = k_{зп} \cdot \frac{U_d}{2} = 1,36 \cdot \frac{877}{2} = 596,36 \text{ В.} \quad (3.21)$$

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

По номинальному рабочему напряжению  $U_{Cd,н}$ , которое должно быть больше  $U_{Cd, \max}$ , выбираем марку конденсатора постоянного тока. Если рассчитанная емкость из (3.20) превышает емкость единичного конденсатора, то используем их параллельное включение.

По каталогу выбираем конденсаторы постоянного тока емкостью 7000 мкФ (6 шт. в батарее), также до необходимой емкости батареи нужно добрать емкость, поэтому также выбираем конденсаторы емкостью 2000 мкФ. Данные конденсаторов приведены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Конденсаторы постоянного тока

$U, \text{В}$	$C, \text{мкФ}$	Заказной код	Штук в батарее, шт
600	7000	E50.S34-705NT0	6
600	2000	E50.R16-205NT0	1

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

При выборе силовых приборов обязательно должны выполняться следующие условия:

$$U_{K.max} \geq U_{d.max}; I_{K.max} \geq I_{K.m(1).П}, \quad (3.22)$$

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

Амплитуда первой гармоники компенсационного тока в режиме перегрузки для синусоидальной формы

$$I_{K.m(1).П} = \sqrt{2} \cdot I_{K.П} = \sqrt{2} \cdot 836,4 = 1182,8 \text{ А}, \quad (3.24)$$

При этом расчётное значение амплитуды из (3.24) всегда будет меньше фактической, т.к. в компенсационном токе обязательно содержаться 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.

Выбираем тип силовых ключей для АФК с параметрами, указанными в табл. 3.3

Таблица 3.3 – Параметры *IGBT*-транзисторов

Параметр	Значение	Параметр	Значение
1. Максимально допустимое напряжение коллектора $U_{K.max}$ , В	1200	6. Дифференциальное сопротивление $R_d \approx U_{KЭ.НАС} / I_{K.max}$ , Ом	0,0014
2. Максимально допустимый ток коллектора $I_{K.max}$ , А	1200	7. Время задержки включения $t_{d.on}$ , мкс	0,41
3. Максимально допустимый импульсный ток коллектора в течении 1 мс $I_{k.имп.max}$ , А	2400	8. Время нарастания $t_r$ , мкс	0,2
4. Максимально допустимая рассеиваемая мощность коллектора $P_{K.max}$ , кВт	7,15	9. Время задержки выключения $t_{d.off}$ , мкс	0,92
5. Напряжение коллектор-эмиттер в насыщенном состоянии $U_{KЭ.НАС}$ , В	1,7	10. Время спада $t_f$ , мкс	0,15

### 3.5 Расчет параметров пассивного фильтра высших гармоник на входе активного фильтра-компенсатора

Для подавления высокочастотных гармоник, возникающих вследствие работы силовых ключей, на входе АФК установлен трехфазный емкостной  $R_{\Phi 1}C_{\Phi 1}-R_{\Phi 3}C_{\Phi 3}$  пассивный (сетевой) фильтр ПФ (рисунок 3.1).

На рисунке 3.5 а представлена схема замещения одной фазы системы «АФК–фильтр–сеть» без учета активных сопротивлений сети  $R_C$  и фильтра  $R_{\Phi}$ . На рисунке через  $e_C$  и  $L_C$  обозначены ЭДС и индуктивность сети.

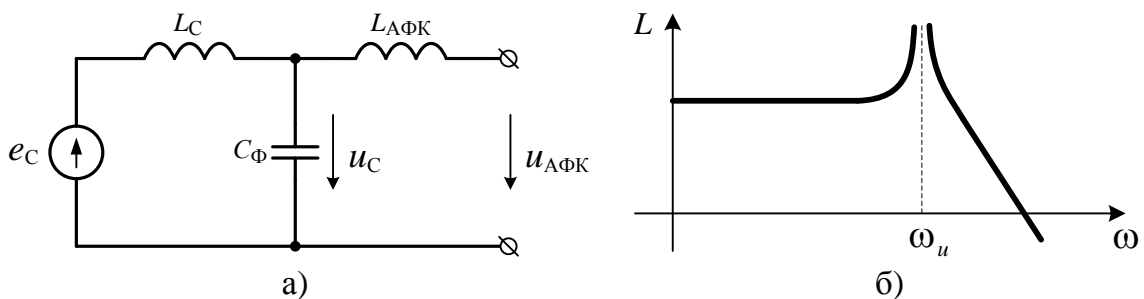


Рисунок 3.5 – Схема замещения одной фазы системы «АФК–фильтр–сеть» (а), логарифмическая амплитудно-частотная характеристика фильтра по напряжению (б)

Фильтрующие свойства  $L_{AFK}C_{\Phi}$ -фильтра определяются передаточной функцией  $W_u(p)$ , как отношение напряжение на выходе фильтра  $u_C(t)$  к напряжению на выходе АФК  $u_{AFK}(t)$ :

$$W_u(p) = \frac{u_C(t)}{u_{AFK}(t)} = \frac{L_C}{(L_{AFK} + L_C) \cdot \left( \frac{1}{\omega_u^2} p^2 + 1 \right)}. \quad (3.25)$$

$$\omega_u = \frac{1}{\sqrt{\left( \frac{L_{AFK} \cdot L_C}{L_{AFK} + L_C} \right) \cdot C_{\Phi}}}, \quad (3.26)$$

где  $\omega_u$  частота резонанса напряжений.

Логарифмическая амплитудно-частотная характеристика  $L_{AFK}C_{\Phi}$ -фильтра, построенная в соответствии с передаточной характеристикой (3.25), представлена на рисунке 3.5 б.

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

$$\omega_u = \frac{2\pi f_{K.\min}}{3...4} = \frac{2 \cdot \pi \cdot 9000}{3...4} = 18849,5...14137,2, \quad (3.27)$$

где  $f_{K.\min}$  – минимальная частота переключения силовых ключей АФК, рассчитанная в соответствии с уравнением (3.8).

Из выражения (3.26) емкость пассивного фильтра:

$$C_\Phi = \left( \frac{L_{\text{АФК}} + L_C}{L_{\text{АФК}} \cdot L_C} \right) \cdot \frac{1}{\omega_u^2} = \left( \frac{0,096 \cdot 10^{-3} + 0,011 \cdot 10^{-3}}{0,096 \cdot 10^{-3} \cdot 0,011 \cdot 10^{-3}} \right) \cdot \frac{1}{14137,2^2} = 506 \text{ мкФ}. \quad (3.28)$$

Заметим, что значение частоты резонанса напряжений  $\omega_u$ , выбранное в соответствии с (3.27), 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»  $\omega_i = 1/\sqrt{L_C C_\Phi}$  приближается к резонансной частоте фильтра  $\omega_u$ . 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  $C_{\Phi 1} - C_{\Phi 3}$  пассивный фильтра ПФ, пробоя изоляции и пр.

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

					<b>ЮУрГУ-13.04.02.2018.254.01ПЗ</b>	Лист
						63
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

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

$$R_{\phi} = \frac{1}{(0,05...0,07) \cdot N_{\Sigma H, \max}} = \frac{1}{(0,05...0,07) \cdot 291,03} = (0,07...0,049) \text{ Ом.} \quad (3.29)$$

Здесь  $N_{\Sigma H, \max}$  – суммарная максимальная пассивная мощность, компенсируемая АФК, в номинальном режиме работы. В выражении (3.29)  $N_{\Sigma H, \max}$  подставляется в кВА.

### 3.6 Расчет основных параметров системы управления активного фильтра-компенсатора

Коэффициент передачи всех датчиков тока ДТ1–ДТ6 (см. рис. 2) выберем таким образом, чтобы четырем вольтам на их выходе соответствовала номинальная амплитуда компенсационного тока по первой гармонике  $I_{K, m(1), H}$ :

$$k_{\text{ДТ}} = \frac{4 \text{ В}}{I_{K, m(1), H}} = \frac{4}{623,6} = 0,006 \text{ В/А.} \quad (3.30)$$

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

$$\pm b = k_{\text{ДТ}} \cdot \Delta I_K = 0,006 \cdot 0,1 \cdot 623,6 = 0,37. \quad (3.31)$$

Для удобства коэффициент датчика напряжения  $k_{\text{ДН}}$  ДН2 (см. рис. 2) цепи обратной связи АФК примем равным 0,1 В/В, тогда уровень сигнала задания внешнего контура напряжения:

$$U_{d, \text{зад}} = k_{\text{ДН}} \cdot U_d = 0,01 \cdot 877,34 = 8,77 \text{ В.} \quad (3.32)$$

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:

$$U_{dm, \max} = k_{\text{ДТ}} \cdot I_{K, m(1), H} = 0,006 \cdot 623,6 = 3,74 \text{ В} \quad (3.33)$$

					<b>ЮУрГУ-13.04.02.2018.254.01ПЗ</b>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		64

Уровень напряжения для ограничения реактивной составляющей тока БО:

$$U_{qm,max} = k_{дТ} \cdot I_{К.м(1),П} = 0,006 \cdot 1182,8 = 7,09 \text{ В}, \quad (3.34)$$

где  $I_{К.м(1),П}$  – амплитуда компенсационного тока по первой гармонике в режиме перегрузки из (3.24).

Напряжение на выходе АФК кроме постоянной составляющей содержит небольшую переменную составляющую с частотой выпрямленного сетевого напряжения  $f_{П} = 6f_{С}$ . 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:

$$T_{Ф1} = \frac{1}{6f_{С}} \approx 3,3 \text{ мс}. \quad (3.35)$$

Ввиду сложности расчета настройку пропорционально-интегрального регулятора внешнего контура напряжения АФК рекомендуется провести экспериментально в программе *MatLab+Simulink*, выполнив сначала настройку П-канала, а затем И-канала. Качество переходного процесса отслеживать по выходному напряжению  $u_d$ . Критерий настройки – минимум колебательности замкнутого контура с перерегулирование до 10 %. Настройку АФК следует проводить при отключении всех нагрузок переменного тока от сети.

Пассивный фильтр высших гармоник на входе АФК за счет конденсаторов  $C_{Ф1}$ – $C_{Ф3}$  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:

$$I_{q.зад} = -k_{ДГ} \cdot \sqrt{2} \cdot I_{ПФ} = -0,006 \cdot \sqrt{2} \cdot 34,9 = -0,3 \text{ А.} \quad (3.36)$$

$$I_{ПФ} = U_{ФН} \cdot 2\pi f_c \cdot C_{Ф} = 220 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 506 \cdot 10^{-6} = 34,9 \text{ А,} \quad (3.37)$$

Где  $I_{ПФ}$  – действующее значение тока, протекающего через конденсатор  $C_{Ф}$ .

В выражении (3.36) напряжение задания по реактивной составляющей тока  $I_{q.зад}$  берется со знаком «минус», т.к. конденсаторы  $C_{Ф1}$ – $C_{Ф3}$  ПФ создают опережающий фазовый сдвиг в результирующем сетевом токе.

					<b>ЮУрГУ-13.04.02.2018.254.01ПЗ</b>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		66



## 4 КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРЕХФАЗНОГО АКТИВНОГО ФИЛЬТРА-КОМПЕНСАТОРА СОВМЕСТНО С НАГРУЗКАМИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

### 4.1 Компьютерная модель трехфазного активного фильтра-компенсатора совместно с нагрузками переменного тока в программе *MatLab+Simulink*

В состав компьютерной модели (рисунок 4.1) входят следующие блоки: источник трехфазного напряжения (*3-phase source*), активный фильтр-компенсатор (*AFC*) с двумя источниками сигнала задания (*Control Ud* и *Control Iqm*) и трехфазным датчиком тока нагрузки (*3-phase current sensor*), трехфазная активно-индуктивная нагрузка (*3-phase RL-load*), трехфазный тиристорный выпрямитель (*3-phase thyristor rectifier*), трехфазный неуправляемый выпрямитель с емкостным фильтром (*3-phase uncontrolled rectifier*), активная нагрузка постоянного тока (*Direct current load*), блок измерения параметров электрической сети (*BM1\_Power grid*), блок измерения параметров нагрузки (*BM2\_Load*), блок измерения параметров активного фильтра-компенсатора (*BM3\_AFC*), блок управления измерительными приборами (*BM\_turn on/off*), осциллографы (*Scope1 – Scope5*), цифровые дисплеи (*Display1 – Display3*), блок «*powergui*».

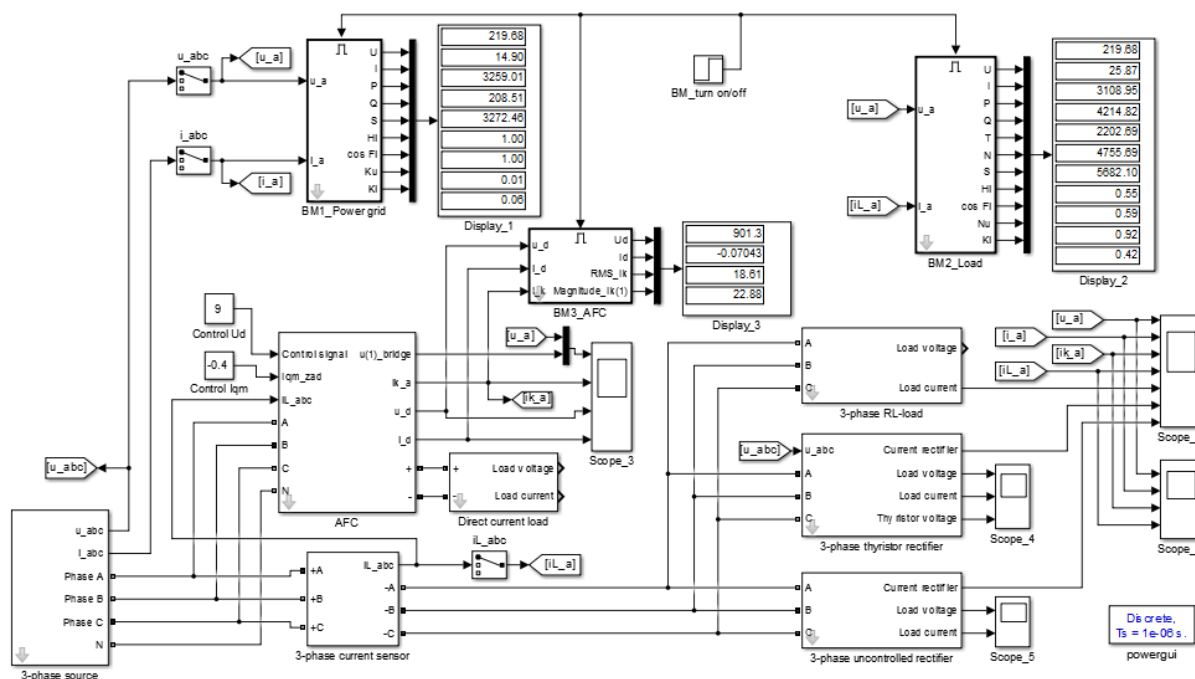


Рисунок 4.1 – Компьютерная модель АФК с нагрузками переменного тока

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

ЮУрГУ-13.04.02.2018.254.01ПЗ

Лист

67

Перечисленные блоки имеют следующие назначения и изменяемые параметры:

1) Источник трехфазного напряжения (*3-phase source*) – блок, состоящий из трех источников синусоидального напряжения с внутренним активным и индуктивным сопротивлениями, имитирует сеть трехфазного напряжения частотой 50 Гц. Напряжения источников сдвинуты относительно друг друга на 120 градусов.

Изменяемые параметры блока:

- действующее значение фазного напряжения сети (*Phase rms voltage, V*) установить равным 220 В;
- частота сети (*Frequency, Hz*) установить 50 Гц;
- номинальная полная мощность сети (*Nominal power, VA*);
- кратность мощности короткого замыкания сети (*Ssc/Sn ratio*);
- соотношение между индуктивным и активным сопротивлением сети (*X/R ratio*).

2) Трехфазный активный фильтр-компенсатор (*AFC*) смоделирован в соответствии с функциональной схемой рис. 3.1 и содержит: пассивный (сетевой) фильтра высших гармоник, трехфазный транзисторно-диодный мост с реакторами на входе и емкостным накопителем энергии на выходе, релейно-векторную систему управления. Уровень сигнала задания выходного напряжения АФК и амплитуды реактивного тока задаются с помощью двух источников управления (*Control Ud* и *Control Iqm*). Вводятся в вольтгах с учетом коэффициентов датчика напряжения и тока системы управления АФК.

Изменяемые параметры блока *AFC*:

- кнопка для подключения АФК к сети (*AFC turn on/off*) и время его включения (*AFC turn-on time, sec*). Галочка, установленная в «квадрате», соответствует включенному режиму;
- индуктивность трехфазного входного реактора (*Reactor inductance, H*) и его активное сопротивление (*Reactor resistance, Ohms*);
- общая емкость звена постоянного тока на выходе АФК (*Capacitor of DC link, F*);

					<b>ЮУрГУ-13.04.02.2018.254.01ПЗ</b>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		68

- емкость пассивный фильтра высших гармоник на входе АФК (*Capacity of passive filter, F*) и его демпфирующее сопротивление (*Damping resistor of passive filter, Ohms*);
- дифференциальное сопротивление *IGBT*-транзистора во включенном состоянии (*IGBT on-state resistance, Ohms*);
- напряжение коллектор-эмиттер в насыщенном состоянии *IGBT*-транзистора (*IGBT forward voltage, V*);
- пороговое напряжение на встречно-включенном диоде (*Diode forward voltage, V*). Принять равным напряжению коллектор-эмиттер в насыщенном состоянии *IGBT*-транзистора;
- время спада  $t_f$  (*IGBT fall time, sec*) и время токового «хвоста» *IGBT*-транзистора (*IGBT tail (hvorst) time, sec*);
- демпфирующая цепь, состоящая из последовательно включенных активного сопротивления  $R_s$  (*IGBT snubber resistance, Ohms*) и конденсатора  $C_s$  (*IGBT snubber capacitance, F*). Эта схема подключается параллельно каждому транзистору в трехфазном мосте. Установить  $R_s = 10^4$  Ом,  $C_s = inf$  (емкость равна бесконечности, что соответствует перемычке в схеме). Ввод таких параметров имитирует ток утечки через транзистор;
- коэффициент передачи всех датчиков тока (*Coefficient of current sensors, V/A*) и датчика напряжения цепи внешней обратной связи АФК (*Coefficient of voltage sensor, V/V*);
- пороги переключения (гистерезис) релейных элементов внутреннего контура тока АФК (*Hysteresis of element relay, V*);
- постоянная времени фильтра нижних частот цепи внешней обратной связи АФК (*Filter time constant, sec*);
- коэффициент пропорционального (*Proportional gain of voltage controller*) и интегрального каналов (*Integrating gain of voltage controller*) ПИ–регулятора внешнего контура напряжения АФК;

– ограничение амплитуды активной (*Limitation of active current, V*) и реактивной (*Limitation of reactive current, V*) составляющих токов АФК. Вводятся в «вольтах» с учетом коэффициента датчиков тока.

3) Трехфазная активно-индуктивная нагрузка (*3-phase RL-load*), состоящая из последовательно соединенных активного и индуктивного сопротивлений в каждой фазе. Концы выводов трехфазной нагрузки подключены в звезду без нулевого провода. Блок имитирует индуктивный характер нагрузок переменного тока, которые создают асинхронные электродвигатели, подключенные напрямую к сети, печи индукционного нагрева, сварочное оборудование и т.д.

Изменяемые параметры блока:

– кнопка для подключения *RL*-нагрузки к сети (*Load turn on/off*) и время ее включения (*Load turn-on time, sec*). Галочка, установленная в «квадрате», соответствует включенному режиму;

– номинальное действующее значение фазного напряжения нагрузки (*Nominal phase rms voltage, V*) установить равным 220 В;

– номинальная частота нагрузки (*Nominal frequency, Hz*) установить 50 Гц;

– активная мощность нагрузки (*Active power, W*);

– косинус  $\phi$  нагрузки ( $\cos\phi$ ).

4) Для упрощения компьютерной модели реверсивного электропривода постоянного тока в курсовом проекте используется трехфазный однокомплектный тиристорный преобразователь (*3-phase thyristor rectifier*), работающий на активно-индуктивную нагрузку с ПЭДС. В состав блока «*3-phase thyristor rectifier*» входят: трехфазный токоограничивающий реактор на входе, трехфазный мостовой тиристорный выпрямитель, система импульсно-фазового управления выпрямителем, построенная по многоканальному синхронному принципу, и активная нагрузка, имитирующая работу двигателя постоянного тока.

					<b>ЮУрГУ-13.04.02.2018.254.01ПЗ</b>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		70

Изменяемые параметры блока:

- кнопка для подключения нагрузки к сети (*Load turn on/off*) и время ее включения (*Load turn-on time, sec*). Галочка, установленная в «квадрате», соответствует включенному режиму;
- угол управления тиристорного выпрямителя (*Angle control, el. grad*), изменяемый в диапазоне от нуля до 150 эл. град;
- индуктивность трехфазного токоограничивающего реактора на входе (*Reactor inductance, H*) и его активное сопротивление (*Reactor resistance, Ohms*). По причине отсутствия полных каталожных данных активное сопротивление реактора считать равным нулю;
- пороговое напряжение тиристора (*Thyristor forward voltage, V*) принять равным 1,0 В;
- дифференциальное сопротивление тиристора во включенном состоянии (*Thyristor on-stste resistance, Ohms*). В рамках курсового проекта выбрать в диапазоне от 1,0 до 10 мОм, учитывая, что при увеличении мощности электропривода дифференциальное сопротивление тиристора уменьшается;
- демпфирующая цепь, состоящая из последовательно включенных активного сопротивления  $R_s$  (*Snubber resistance, Ohms*) и конденсатора  $C_s$  (*Snubber capacitance, F*). Эта схема подключается параллельно каждому тиристорному в трехфазном мосте. Установить  $R_s = 10^4$  Ом,  $C_s = inf$  (емкость равна бесконечности, что соответствует перемычке в схеме). Ввод таких параметров имитирует обратное сопротивление тиристора;
- ток нагрузки (*Load current, A*) установить равным номинальному току якоря двигателя;
- активное сопротивление (*Armature resistance, Ohms*) и индуктивность якоря двигателя (*Armature inductance, H*);
- коэффициент пропорционального  $k_p$  (*Proportional gain of current controller*) и интегрального  $k_i$  каналов (*Integrating gain of current controller*) ПИ–регулятора тока активной нагрузки. Установить  $k_p = 100$ ,  $k_i = 20000$ .

					<b>ЮУрГУ-13.04.02.2018.254.01ПЗ</b>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		71

5) Для упрощения компьютерной модели частотно-регулируемого асинхронного электропривода в курсовом проекте используется трехфазный неуправляемый выпрямитель с емкостным фильтром на выходе (*3-phase uncontrolled rectifier*), нагруженный на активное сопротивление и заменяющий трехфазный автономный инвертор напряжения и асинхронный электродвигатель. В состав блока «*3-phase uncontrolled rectifier*» входят: трехфазный токоограничивающий реактор на входе, трехфазный мостовой диодный выпрямитель с емкостным фильтром на выходе, зарядник и активное сопротивление нагрузки.

Изменяемые параметры блока:

- кнопка для подключения нагрузки к сети (*Load turn on/off*) и время ее включения (*Load turn-on time, sec*). Галочка, установленная в «квадрате», соответствует включенному режиму;
- активное сопротивление нагрузки (*Load resistance, Ohms*);
- индуктивность трехфазного токоограничивающего реактора на входе (*Reactor inductance, H*) и его активное сопротивление (*Reactor resistance, Ohms*). По причине отсутствия полных каталожных данных активное сопротивление реактора считать равным нулю;
- емкость звена постоянного тока на выходе неуправляемого выпрямителя (*Capacitor of DC link, F*);
- постоянное напряжение зарядника (*Battery charger voltage, V*) установить (510 ... 520) В для номинального напряжения сети 220 В;
- пороговое напряжение диода (*Diode forward voltage, V*) принять равным 1,0 В;
- дифференциальное сопротивление диода во включенном состоянии (*Diode on-stste resistance, Ohms*). В рамках курсового проекта выбрать в диапазоне от 1,0 до 10 мОм, учитывая, что при увеличении мощности электропривода дифференциальное сопротивление диода уменьшается;

					<b>ЮУрГУ-13.04.02.2018.254.01ПЗ</b>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		72

– демпфирующая цепь, состоящая из последовательно включенных активного сопротивления  $R_s$  (*Snubber resistance, Ohms*) и конденсатора  $C_s$  (*Snubber capacitance, F*). Эта схема подключается параллельно каждому диоду в трехфазном мосте. Установить  $R_s = 10^4$  Ом,  $C_s = inf$  (емкость равна бесконечности, что соответствует перемычке в схеме). Ввод таких параметров имитирует обратное сопротивление диода.

б) Активная нагрузка постоянного тока (*Direct current load*) на выходе АФК. Нагрузка представляет собой регулируемый источник тока и предназначена для настройки и проверки работоспособности трехфазного АФК как в выпрямительном, так и инверторном режимах.

В состав блока «*Direct current load*» входят: регулируемый источник постоянного напряжения и активно-индуктивная цепь для ограничения тока между входным и регулируемым источниками напряжения.

Изменяемые параметры блока:

– кнопка для подключения нагрузки к выходу АФК (*Load turn on/off*) и время ее включения (*Load turn-on time, sec*). Галочка, установленная в «квадрате», соответствует включенному режиму;

– ток нагрузки (*Load current, A*). Для выпрямительного режима работы АФК номинальный ток нагрузки  $I_{d.H}$  может быть рассчитан из выражения:

$$I_{d.H} = \frac{3U_{\text{Ф.Н}} \cdot I_{\text{К.Н}} \cdot \eta_{\text{АФК.Н}}}{U_d}, \quad (4.1)$$

где  $U_{\text{Ф.Н}}$  – номинальное фазное значение напряжение сети;  $I_{\text{К.Н}}$  – номинальное действующее значение тока компенсатора;  $\eta_{\text{АФК.Н}}$  – номинальное значение КПД активного фильтра (принять равным 0,94 ... 0,97);  $U_d$  – постоянное напряжение на выходе АФК. Для инверторного режима работы АФК следует поменять знак тока нагрузки  $I_{d.H}$ ;

– активное сопротивление  $R_d$  (*RL-circuit resistance, Ohms*) и индуктивность  $L_d$  *RL*–цепи (*RL-circuit inductance, H*). Установить  $R_d = 1,0$  Ом,  $L_d = 1,0$  мГн;

					<b>ЮУрГУ-13.04.02.2018.254.01ПЗ</b>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		73

– коэффициент пропорционального  $k_p$  (*Proportional gain of voltage controller*) и интегрального  $k_i$  каналов (*Integrating gain of voltage controller*) ПИ–регулятора тока активной нагрузки. Установить  $k_p = 1000$ ,  $k_i = 10000$ . При необходимости допускается их подстройка.

7) Блок измерения параметров электрической сети (*BM1\_Power grid*) – блок, позволяющий измерять следующие параметры:

- действующее значение напряжения ( $U$ ) и тока ( $I$ ) сети;
- активную мощность ( $P$ ), потребляемую из сети или отдаваемую в сеть;
- реактивную ( $Q$ ) и полную мощность ( $S$ ), потребляемую из сети;
- коэффициент мощности  $\chi$  ( $Hi$ ) и косинус фи ( $\cos Fi$ ) сети;
- коэффициент искажения кривой напряжения ( $Ku$ ) и кривой тока ( $Ki$ ) сети.

Изменяемый параметр блока – частота измерения (*Measuring frequency, Hz*) установить равной 50 Гц.

8) Блок измерения параметров нагрузки (*BM2\_Load*) – блок, позволяющий измерять следующие параметры в нагрузке переменного тока:

- действующее значение напряжения ( $U$ ) и тока ( $I$ ) нагрузки;
- активную ( $P$ ) и реактивную ( $Q$ ) мощность, потребляемую нагрузкой из сети;
- мощность искажений ( $T$ ), создаваемую нагрузкой переменного тока;
- пассивную (неактивную) ( $N$ ) и полную мощность ( $S$ ), потребляемую нагрузкой из сети;
- коэффициент мощности  $\chi$  ( $Hi$ ) и косинус фи ( $\cos Fi$ ) нагрузки;
- коэффициент несинусоидальности кривой тока ( $Nu$ ) нагрузки;
- коэффициент искажения кривой тока ( $Ki$ ) нагрузки.

Изменяемый параметр блока – частота измерения (*Measuring frequency, Hz*) установить равной 50 Гц.

9) Блок измерения параметров активного фильтра-компенсатора (*BM3\_AFC*) – блок, позволяющий измерять следующие параметры АФК:

- среднее значение напряжения ( $U_d$ ) и тока ( $I_d$ ) на выходе АФК;
- действующее значение тока компенсатора ( $I_k$ ) в фазе  $A$ ;

					<b>ЮУрГУ-13.04.02.2018.254.01ПЗ</b>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		74



– амплитуда первой гармоники тока компенсатора (*Magnitude\_Ik(1)*) в фазе *A*.

Изменяемые параметры блока:

– частота измерения (*Measuring frequency, Hz*) установить равной 50 Гц;

– максимальная частота коммутации силовых ключей АФК (*Maximum modulation frequency, Hz*).

10) Блок управления измерительными приборами (*BM\_turn on /off*) – позволяет включать или выключать измерительные блоки «*BM1\_Power grid*», «*BM2\_Load*» и «*BM3\_AFC*» с целью ускорения производительности работы компьютерной модели «*Active\_filter\_compensator\_RE*».

Изменяемые параметры блока:

– время начала работы измерительных блоков (*Step time, sec*) установить равным 0,14 с. Данный параметр разрешается изменять в процессе работы;

– начальное значение на выходе блока (*Initial value*) установить равным 0;

– конечное значение на выходе блока (*Final value*) установить равным 1.

11) Осциллографы (*Scope1 – Scope5*) – блоки, позволяющие наблюдать осциллограммы мгновенных значений токов и напряжений в компьютерной модели.

12) Дисплеи (*Display1 – Display3*) – блоки, предназначенные для цифрового отображения всех измеренных значений в компьютерной модели.

13) Блок «*powergui*» предназначен для спектрального анализа сигналов, снимаемых с осциллографа. Двойной щелчок левой кнопкой мыши по блоку «*powergui*» раскрывает панель инструментов, представленную на рис. 4.2 а. Щелчок левой кнопкой мыши по кнопке *FFT Analysis* (см. рис. 4.2 а) открывает окно «*Powergui FFT Analysis Tool*» с временной диаграммой и разложением этого сигнала в спектр.

									Лист
									75
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	ЮУрГУ-13.04.02.2018.254.01ПЗ				

## 4.2 Исследование статических характеристик трехфазного активного фильтра-компенсатора совместно с активно-индуктивной нагрузкой

Временные диаграммы работы активного фильтра-компенсатора с активно-индуктивной нагрузкой, полученные при помощи компьютерного моделирования в программе *MatLab + Simulink*, представлены на рисунке 4.2.

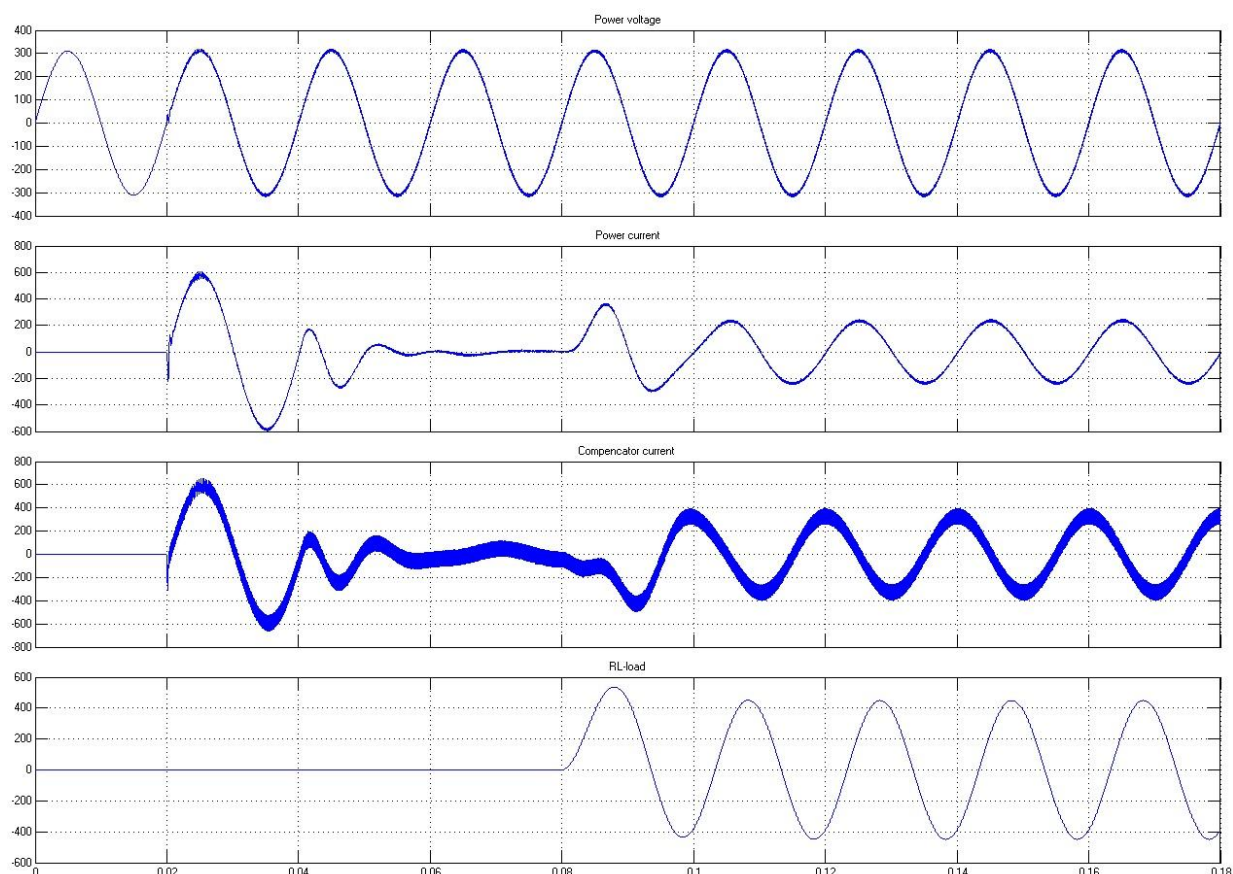


Рисунок 4.2 – Временные диаграммы  $u_C = f(t)$ ,  $i_C = f(t)$ ,  $i_{RL} = f(t)$  при  $\varphi_{RL} = 60$  эл. град.

На первой временной диаграмме (рисунок 4.5) изображено напряжение сети.

На второй диаграмме изображен ток, потребляемый из сети. В момент времени  $t = 0,02$  с происходит включение АФК и заряд конденсаторов в звене постоянного тока. В момент времени  $t = 0,08$  с происходит подключение активно-индуктивной нагрузки к сети.

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

На третьей временной диаграмме изображен ток компенсатора, а на последней приведен ток активно-индуктивной нагрузки.

Угол  $\varphi$  можно увидеть при сравнении первой и последней временной диаграмм (напряжения сети и тока  $RL$ -нагрузки). Видно, что ток нагрузки отстает от напряжения сети. Но из сети мы потребляем ток, который совпадает с напряжением, т.е.  $\varphi=0$  эл. град. Это достигается за счет работы АФК, который формирует компенсирующий ток, опережающий напряжение сети на +90 эл. град. В результате этого коэффициент мощности сети  $\chi_c$  и  $\cos \varphi$  равны 1,0.

При проведении исследования изменялся фазовый сдвиг активно-индуктивной нагрузки  $\varphi_{RL}$  в диапазоне от 0 до 60 эл. град. при постоянстве активной мощности  $P_{RL} = 105$  кВт согласно заданию. Результаты исследований сведены в таблицу 4.1.

Таблица 4.1 – Результаты исследования АФК совместно с активно-индуктивной нагрузкой

$\varphi_{RL}$	0	15	30	45	60
$I_c, A$	161,14	160,9	161,33	163,1	168,2
$I_{RL}, A$	158,8	164,5	183,4	224,7	317,7
$I_k, A$	42,5	2,64	49	115,7	231,2
$\delta I_c$	-0,015	0,022	0,12	0,274	0,47
$P_c, кВт$	106,1	106	106,2	107,4	110,7
$S_c, кВА$	106,3	106	106,3	107,4	110,8
$P_{RL}, кВт$	104,8	104,7	104,8	104,8	104,9
$Q_{RL}, квар$	0	28	60,5	104,7	181,3
$S_{RL}, кВА$	104,8	108,4	120,9	148,2	209,5
$\chi_c$	1	1	1	1	1
$\chi_{RL}$	1	0,97	0,87	0,71	0,5
$\eta$	0,98	0,98	0,98	0,97	0,94

В таблице 4.1 приняты следующие обозначения:  $I_c$  – действующее значение тока, потребляемого из сети совместно с компенсатором;  $I_{RL}$  – действующее значение тока активно-индуктивной нагрузки;  $I_k$  – действующее значение тока компенсатора;  $\delta I_c = (I_{RL} - I_c)/I_{RL}$  – относительное снижение тока, потребляемого из сети совместно с компенсатором;  $P_c, S_c$  – активная и полная мощности сети совместно с компенсатором;  $P_{RL}, Q_{RL}, S_{RL}$  – активная, реактивная и полная мощности активно-индуктивной нагрузки.

$\chi_C = |P_C|/S_C$ ,  $\chi_{RL} = |P_{RL}|/S_{RL}$  – коэффициент мощности сети и  $RL$ -нагрузки;  
 $\eta = |P_{RL}/P_C|$  – коэффициент полезного действия компенсатора;  $\varphi_{RL}$  – фазовый сдвиг активно-индуктивной нагрузки.

На основании данных, представленных в таблице 4.1, построены следующие зависимости:

- токов  $I_C = f(\varphi_{RL})$ ,  $I_{RL} = f(\varphi_{RL})$ ,  $I_K = f(\varphi_{RL})$  (рисунок 4.3);
- относительного снижения тока, потребляемого из сети  $\delta I_C = f(\varphi_{RL})$  (рисунок 4.4);
- мощностей  $P_C, S_C = f(\varphi_{RL})$ ,  $P_{RL}, Q_{RL}, S_{RL} = f(\varphi_{RL})$  (рисунок 4.5);
- основных энергетических показателей  $\chi_C = f(\varphi_{RL})$ ,  $\chi_{RL} = f(\varphi_{RL})$ ,  $\eta = f(\varphi_{RL})$  (рисунок 4.6).

Анализ, представленных зависимостей (рисунок 4.3 – 4.8) позволяет сделать следующие выводы:

- с ростом фазового угла сдвига  $\varphi_{RL}$  увеличивается действующее значение тока активно-индуктивной нагрузки  $I_{RL}$ , т.к. возрастает потребление реактивной мощности  $Q_{RL}$  из сети. Активная мощность  $RL$ -нагрузки остается постоянной. В результате этого коэффициент мощности  $\chi_{RL}$  также снижается с ростом фазового угла  $\varphi_{RL}$ . Так, например, при  $\varphi_{RL} = 60$  эл. град коэффициент мощности  $\chi_{RL} = 0,5$ ;
- с ростом фазового угла сдвига  $\varphi_{RL}$  увеличивается действующее значение тока компенсатора  $I_K$ , т.к. АФК компенсирует в сети потребление реактивной мощности  $RL$ -нагрузки. В результате этого снижается действующее значение тока сети  $I_C$ , а коэффициент мощности сети  $\chi_C = 1,0$ . Так, например, при  $\varphi_{RL} = 60$  эл. град  $\delta I_C$  уменьшается на 47%. Все это однозначно свидетельствует об эффективном использовании электроэнергии и снижении потерь мощности в сети;
- коэффициент полезного действия АФК  $\eta$  достаточно высокий и находится в диапазоне 0,94 – 0,98.

					<b>ЮУрГУ-13.04.02.2018.254.01ПЗ</b>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		78

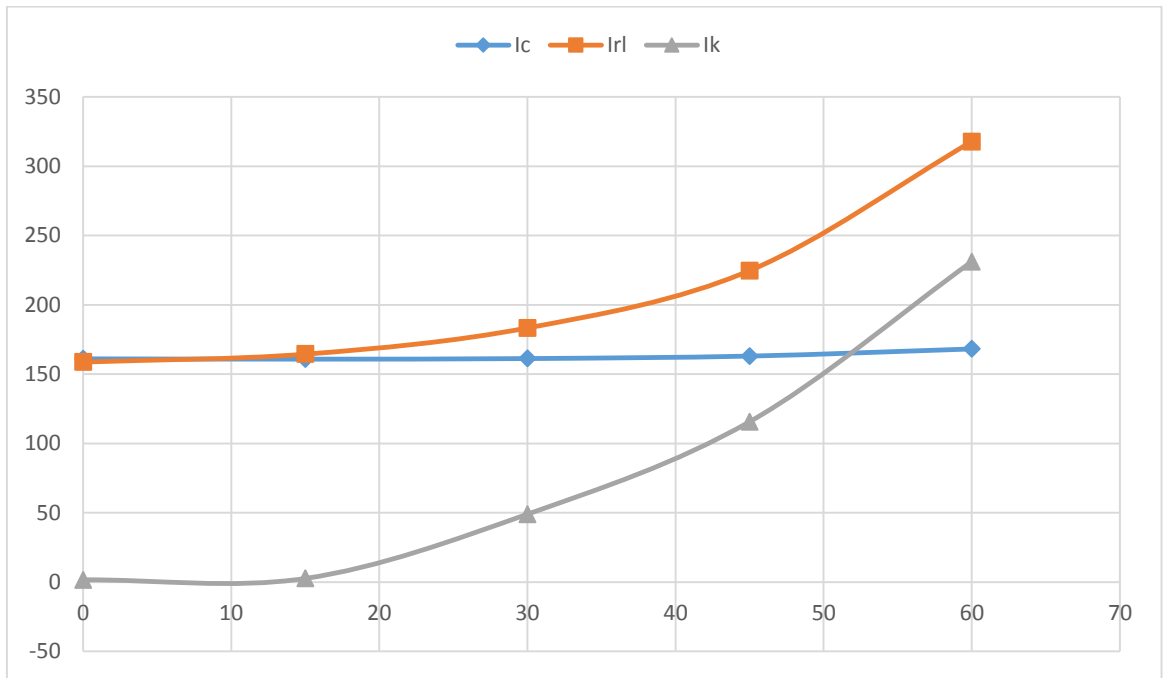


Рисунок 4.3 – Зависимости  $I_C = f(\varphi_{RL})$ ,  $I_{RL} = f(\varphi_{RL})$ ,  $I_K = f(\varphi_{RL})$

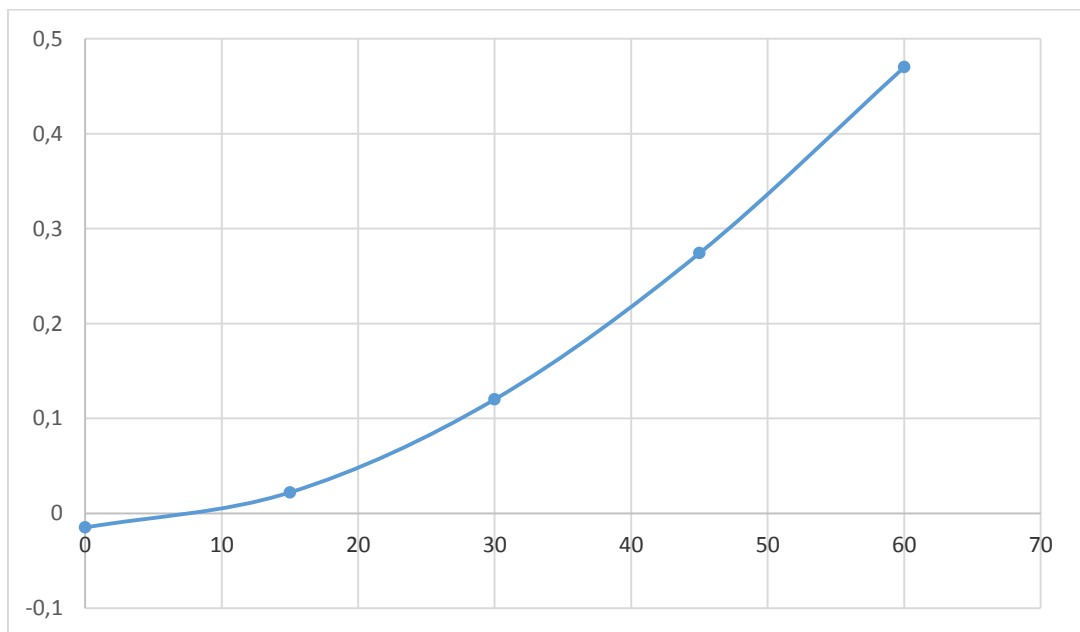


Рисунок 4.4 – Зависимость  $\delta I_C = f(\varphi_{RL})$

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

ЮУрГУ-13.04.02.2018.254.01ПЗ

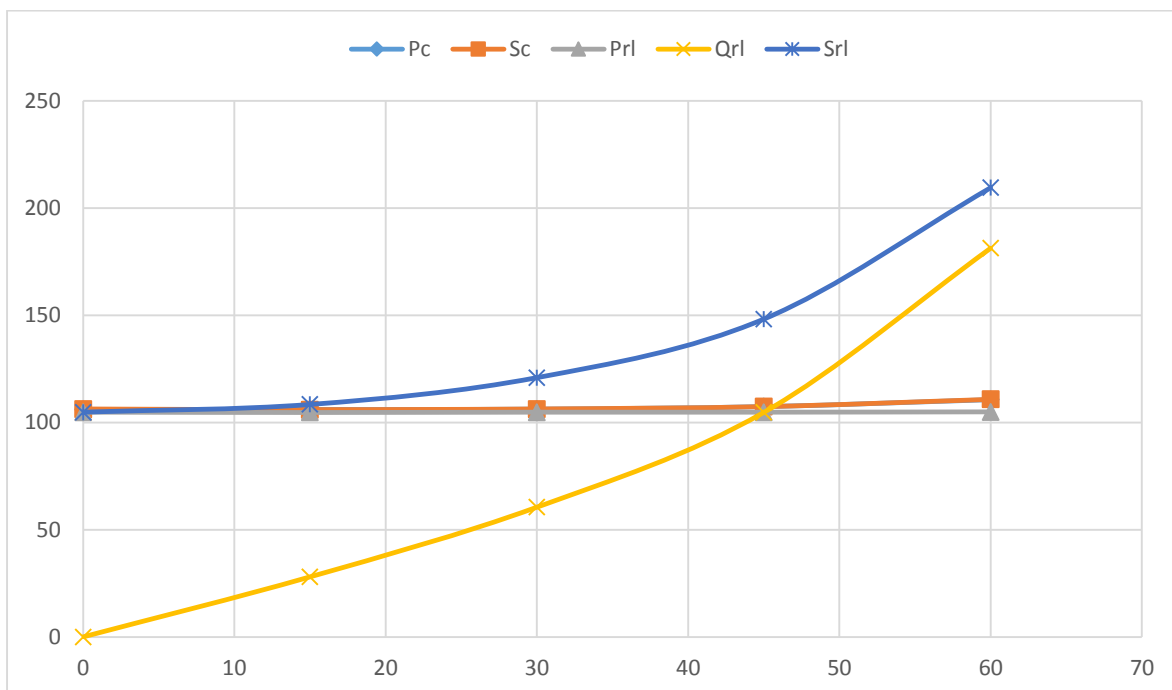


Рисунок 4.5 – Зависимости  $P_C, S_C = f(\varphi_{RL}), P_{RL}, Q_{RL}, S_{RL} = f(\varphi_{RL})$

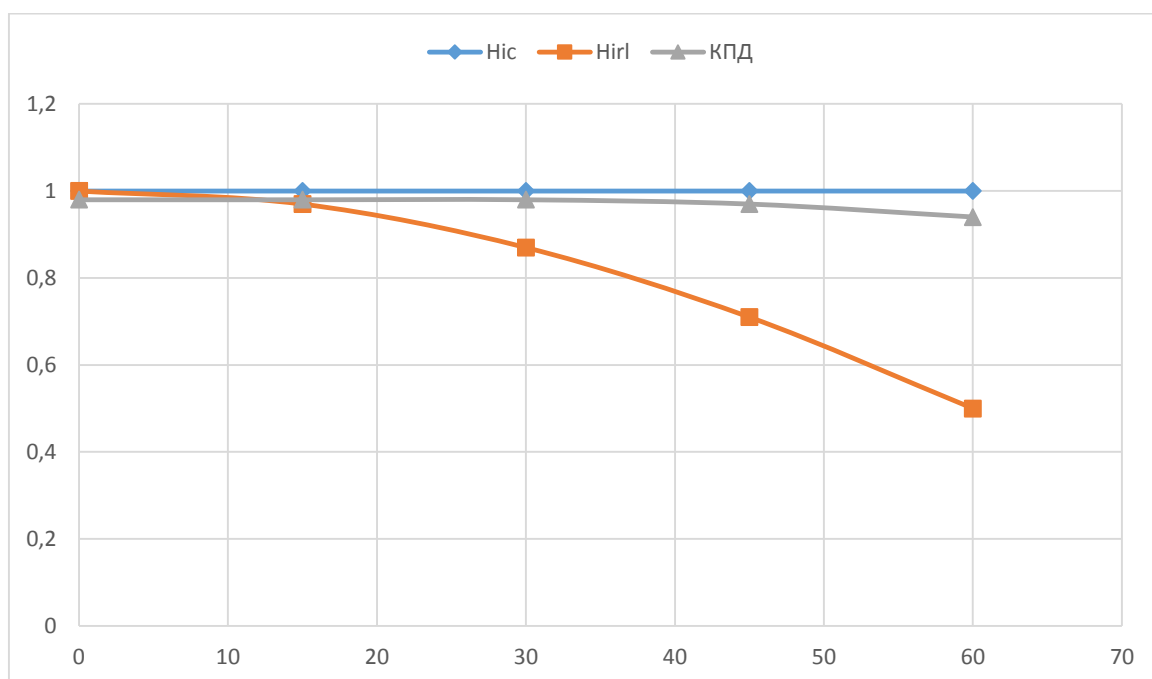


Рисунок 4.6 – Зависимости  $\chi_C = f(\varphi_{RL}), \chi_{RL} = f(\varphi_{RL}), \eta = f(\varphi_{RL})$

### 4.3 Исследование статических характеристик трехфазного активного фильтра-компенсатора совместно с реверсивным тиристорным преобразователем

Временные диаграммы работы активного фильтра-компенсатора совместно с реверсивным тиристорным преобразователем, полученные при помощи компьютерного моделирования в программе *MatLab + Simulink*, представлены на рисунке 4.7.

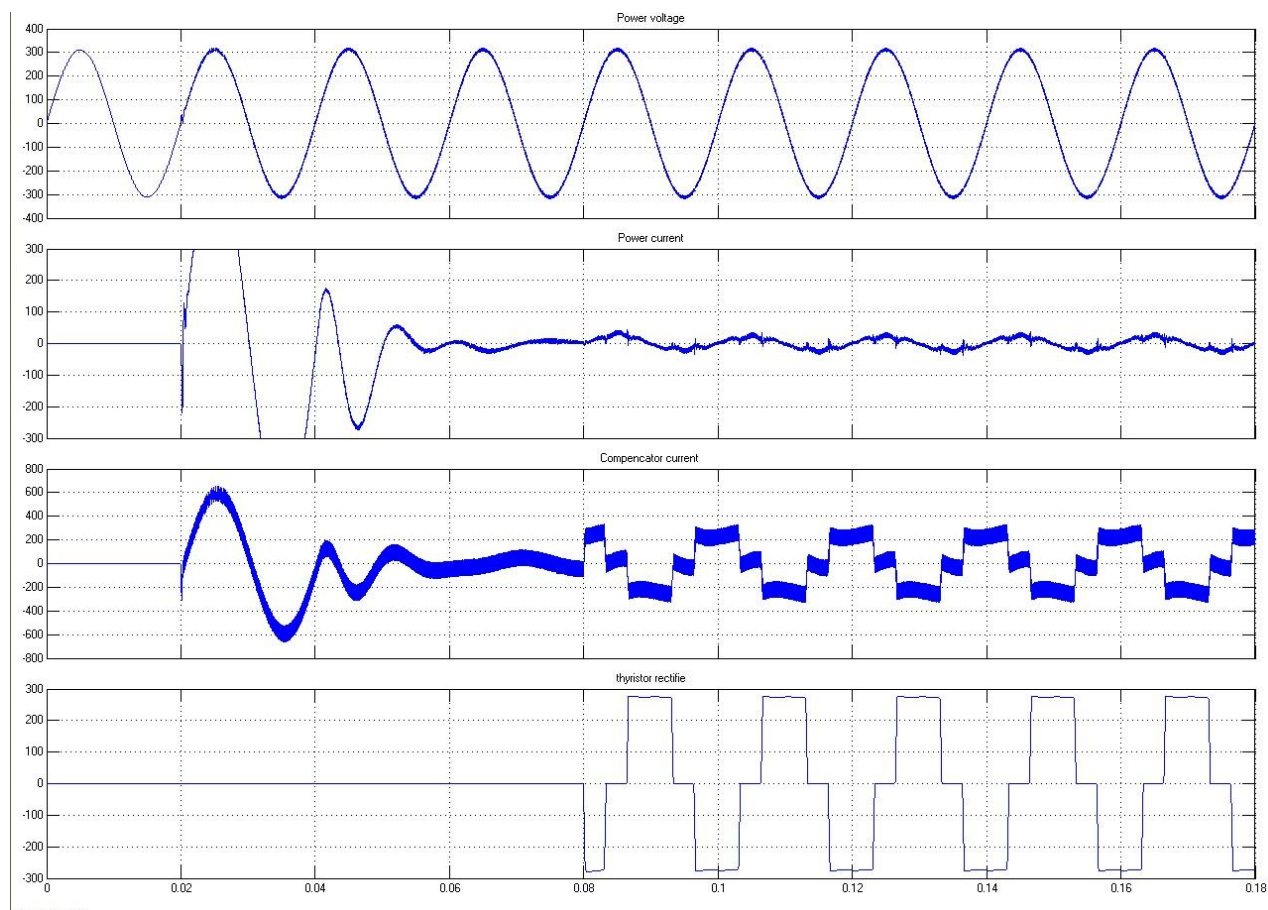


Рисунок 4.7 – Временные диаграммы  $u_C = f(t)$ ,  $i_C = f(t)$ ,  $i_{ТП} = f(t)$  при  $\alpha=85$  эл.град.

На первой временной диаграмме (рисунок 4.7) изображено напряжение сети.

На второй диаграмме изображен ток, потребляемый сети. В момент времени  $t=0,02$ с происходит включение АФК, и идет заряд конденсаторов в звене постоянного тока. В момент времени  $t=0,08$ с происходит подключение тиристорного преобразователя к сети.

На следующей, третьей, временной диаграмме изображен ток компенсатора.

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

На четвертой временной диаграмме изображен ток тиристорного преобразователя.

Временные диаграммы снимались при  $\alpha=85$  эл.град. При таком угле управления тиристорный преобразователь потребляет из сети максимальную реактивную мощность.

При проведении исследований изменялся угол управления тиристорного преобразователя  $\alpha$  в диапазоне (0 – 150) эл.град. с шагом 15 эл.град. при номинальном токе нагрузки  $I_{d,n}=274$  А согласно заданию. Результаты исследований занесены в таблицу 4.2.

Таблица 4.2 – Результаты исследования АФК совместно с тиристорным преобразователем

$\alpha$	0	15	30	45	60	75	90	105	120	135	150
$I_c, A$	206,6	199,5	178,9	146,4	103,6	53,4	6,4	58,1	110	155,4	190,5
$I_{mn}, A$	217,7	219,6	221	221,7	222	222,1	222,1	222	221,7	221,2	219,6
$I_k, A$	44,9	60,4	93	129,3	160	180,4	188,1	182,2	162,1	119,5	73
$\delta I_c$	0,05	0,09	0,19	0,34	0,53	0,75	0,97	0,73	0,5	0,3	0,13
$P_c, кВт$	136	131,4	117,8	96,4	68	35	-1,2	-37,8	-72	-102	-126
$S_c, кВА$	136,2	131,4	118	96,4	68	35	4,2	38	72,1	102	126
$P_{mn}, кВт$	134,7	129,8	115,8	93,4	64,3	30,3	-6,1	-42,6	-76,7	-106	-128
$Q_{mn}, квар$	39	54	80,1	105,4	125,4	137,6	140,8	134,3	118,3	92,9	57,5
$T_{mn}, кВА$	30,6	34,6	37,6	39,1	39,8	40,2	40,3	40,1	39,6	38,4	35,1
$N_{mn}, кВА$	49,6	64,1	88,5	112,4	131,5	143,4	146,5	140,2	124,7	100,5	67,5
$S_{mn}, кВА$	145,5	144,8	145,7	146,2	146,6	146,6	146,6	146,6	146,4	146,1	145
$\chi_c$	1	1	1	1	1	1	0,3	0,99	0,99	1	1
$\chi_{mn}$	0,94	0,9	0,79	0,64	0,44	0,21	0,04	0,29	0,52	0,73	0,89
$\eta$	0,98	0,98	0,98	0,97	0,94	0,86	0,2	0,88	0,94	0,96	0,98

В таблице 4.2 приняты следующие обозначения:  $I_{ТП}$  – действующее значение тока на входе тиристорного преобразователя;  $\delta I_c = (I_{ТП} - I_c) / I_{ТП}$  – относительное снижение тока, потребляемого из сети совместно с компенсатором;  $P_{ТП}$ ,  $Q_{ТП}$ ,  $N_{ТП}$ ,  $S_{ТП}$  – активная, реактивная, пассивная и полная мощности на входе тиристорного преобразователя;  $T_{ТП}$  – мощность искажений на входе тиристорного преобразователя;  $\eta = |P_{ТП} / P_c|$  – коэффициент полезного действия компенсатора при работе тиристорного преобразователя в выпрямительном режиме.



$\eta = |P_C / P_{ТП}|$  – коэффициент полезного действия компенсатора при работе тиристорного преобразователя в инверторном режиме;  $\eta = 0$ , если  $P_C$  и  $P_{ТП}$  имеют разные знаки;  $\alpha_{ТП}$  – угол управления тиристорного преобразователя.

На основании данных, представленных в таблице 4.2, построены следующие зависимости:

- токов  $I_C = f(\alpha_{ТП})$ ,  $I_{ТП} = f(\alpha_{ТП})$ ,  $I_K = f(\alpha_{ТП})$  (см. рисунок 4.8);
- относительного снижения тока, потребляемого из сети  $\delta I_C = f(\alpha_{ТП})$  (см. рисунок 4.9);
- мощностей  $P_C, S_C = f(\alpha_{ТП})$ ,  $P_{ТП}, Q_{ТП}, T_{ТП}, N_{ТП}, S_{ТП} = f(\alpha_{ТП})$  (см. рисунок 4.10);
- основных энергетических показателей  $\chi_C = f(\alpha_{ТП})$ ,  $\chi_{ТП} = f(\alpha_{ТП})$ ,  $\eta = f(\alpha_{ТП})$  (см. рисунок 4.11).

Анализ, представленных зависимостей (рисунок 4.8 – 4.13) позволяет сделать следующие выводы:

- при работе в выпрямительном режиме с ростом угла управления тиристорного преобразователя  $\alpha$  увеличивается действующее значение тока компенсатора  $I_K$ , т.к. АФК компенсирует в сети потребление не только реактивной, но и мощности искажения преобразователя. АФК компенсирует все нечетные гармоники преобразователя с номерами 5, 7, 11, 13, 17, 19 и т.д. В результате этого снижается действующее значение тока сети  $I_C$ , а коэффициент мощности сети  $\chi_C = 1,0$ . Так, например, при  $\alpha = 75$  эл. град. потребление тока из сети совместно с АФК уменьшается на 75%. Все это однозначно свидетельствует об эффективном использовании электроэнергии и снижении потерь мощности в сети;
- в точке перехода из выпрямительного в инверторный режим ( $\alpha=90$  эл.град.) наблюдается резкое ухудшение энергетических характеристик, но при работе в этих режимах (в двигательном до  $\alpha=85$  эл.град. и в инверторном при  $\alpha > 100$  эл.град.  $\chi_C=1$ , в результате улучшается эффективность передачи активной мощности через сеть и уменьшаются потери мощности на внутренних сопротивлениях сети.

					<b>ЮУрГУ-13.04.02.2018.254.01ПЗ</b>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		83

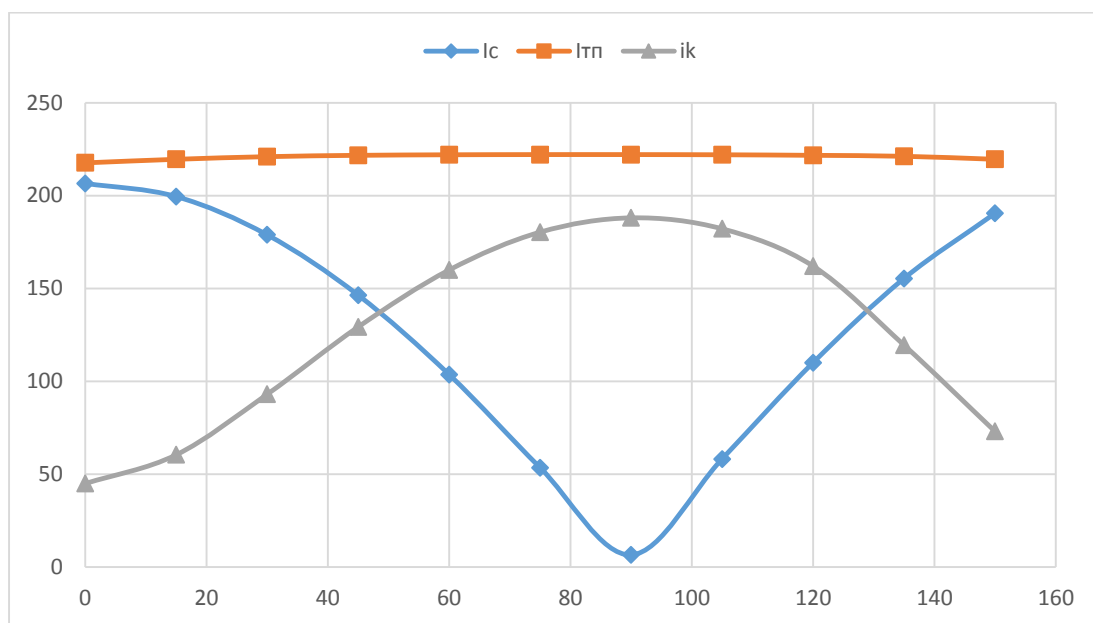


Рисунок 4.8 – Зависимости  $I_C = f(\alpha_{ТП})$ ,  $I_{\Sigma H} = f(\alpha_{ТП})$ ,  $I_K = f(\alpha_{ТП})$

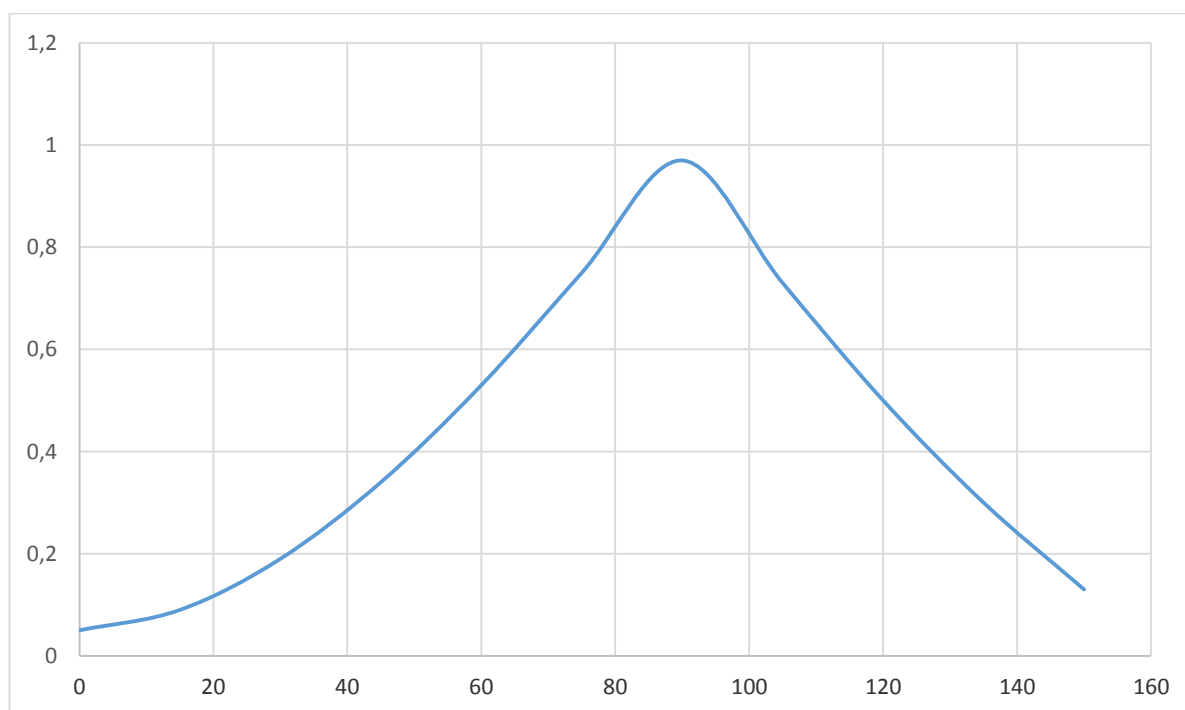


Рисунок 4.9 – Зависимость  $\Delta I_C = f(\alpha_{ТП})$

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

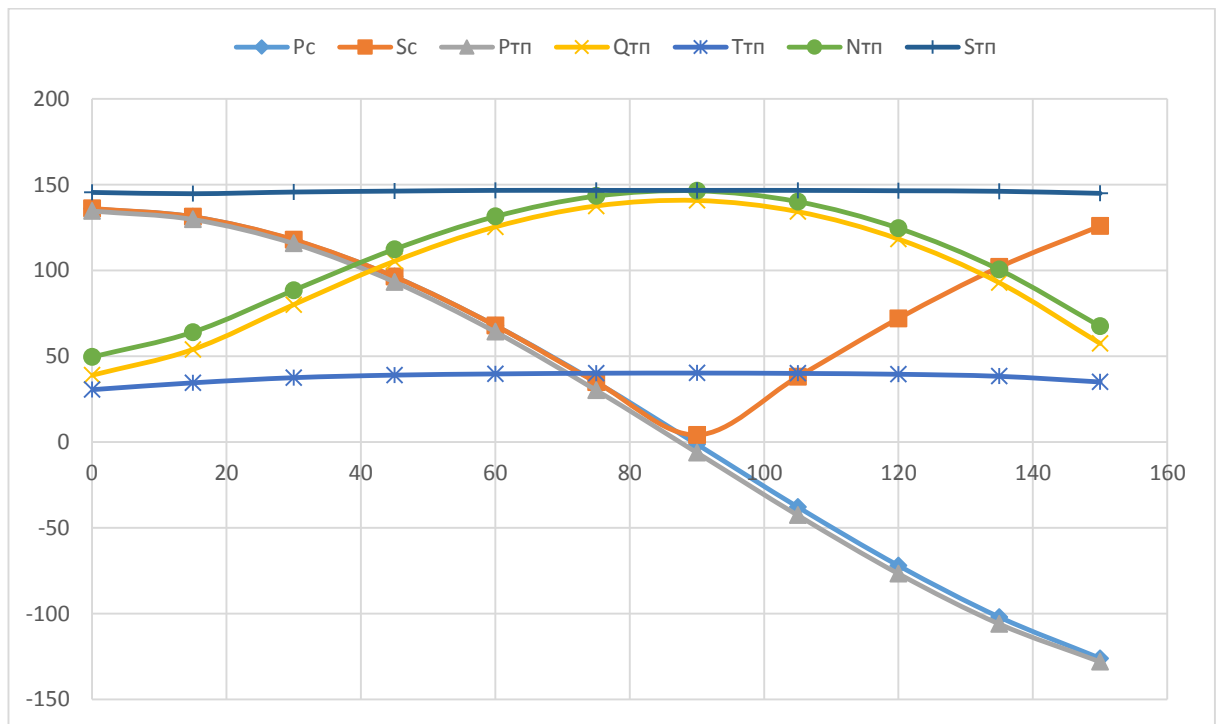


Рисунок 4.10 – Зависимости  $P_c, S_c = f(\alpha_{PI}), P_{PI}, Q_{PI}, T_{PI}, N_{PI}, S_{PI} = f(\alpha_{PI})$

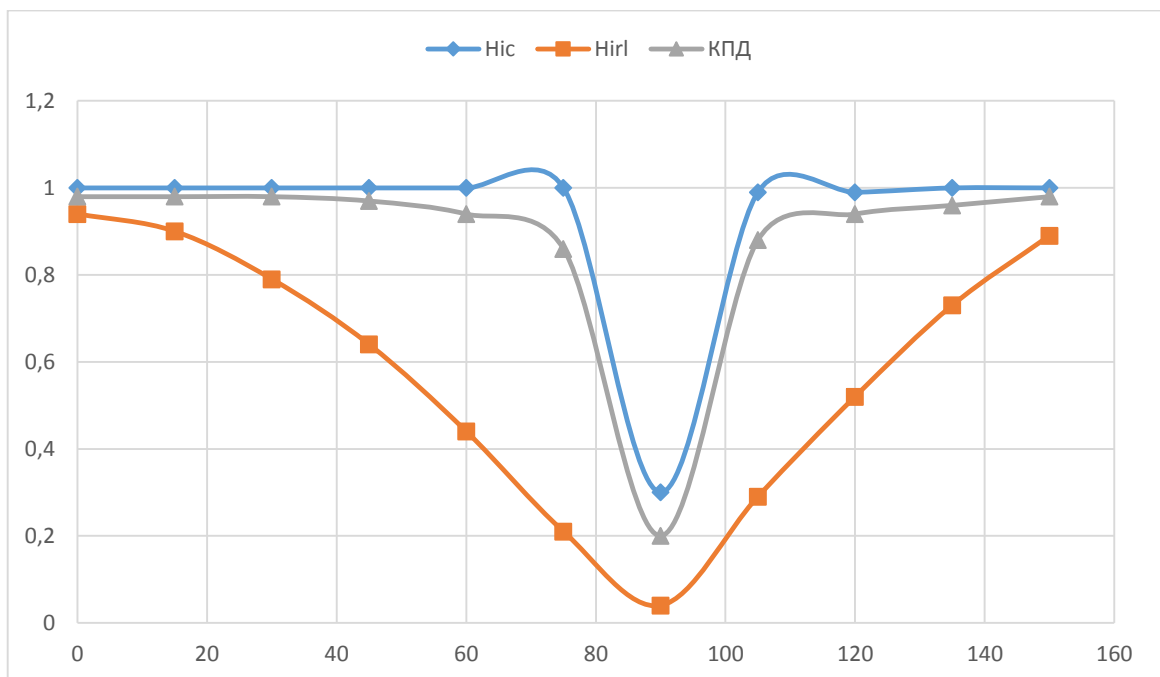


Рисунок 4.11 – Зависимости  $\chi_c = f(\alpha_{PI}), \chi_{PI} = f(\alpha_{PI}), \eta = f(\alpha_{PI})$

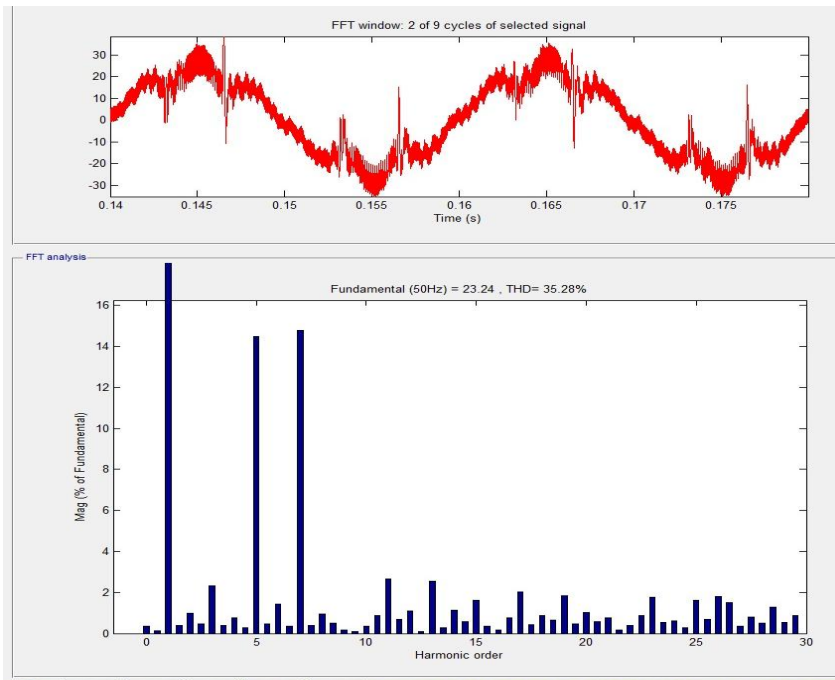


Рисунок 4.12 – Спектральный анализ тока сети  $I_C = f(n)$  при  $\alpha=85$

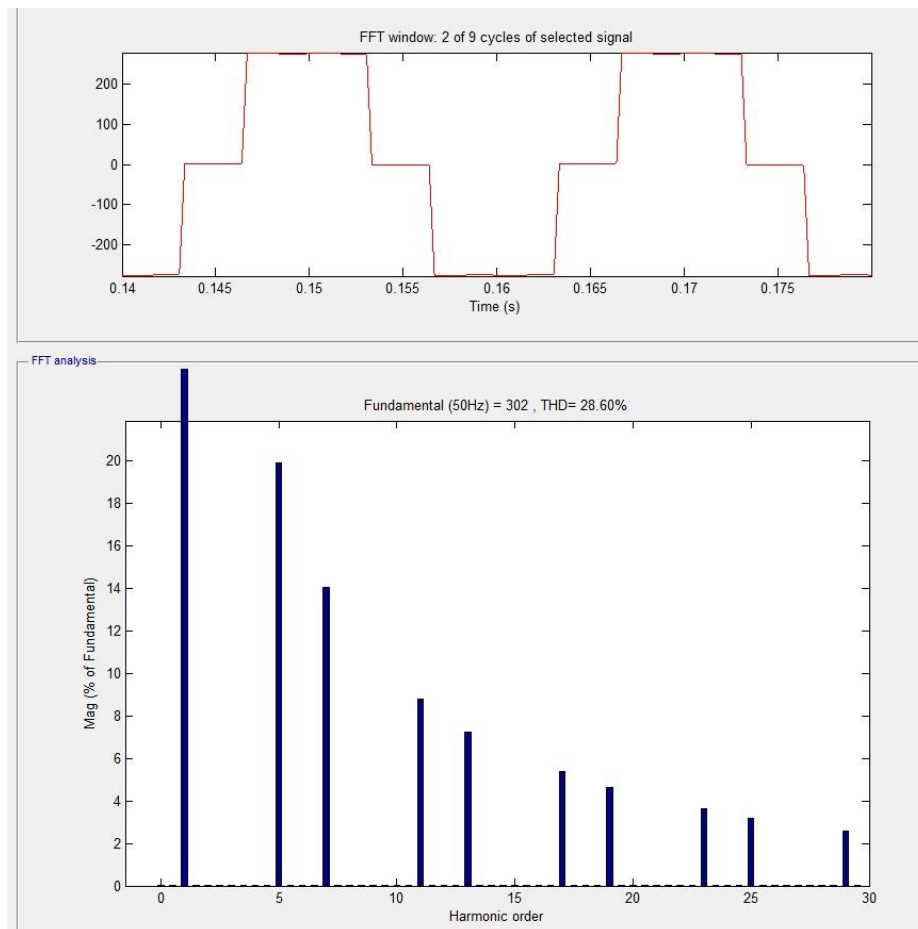


Рисунок 4.13 – Спектральный анализ входного тока тиристорного преобразователя  $I_{ТП} = f(n)$  при  $\alpha=85$  эл. град

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

ЮУрГУ-13.04.02.2018.254.01ПЗ

#### 4.4 Исследование статических характеристик трехфазного активного фильтра-компенсатора совместно с преобразователем частоты

Временные диаграммы работы активного фильтра-компенсатора с активно-индуктивной нагрузкой, полученные при помощи компьютерного моделирования в программе *MatLab + Simulink*, представлены на рисунке 4.14.

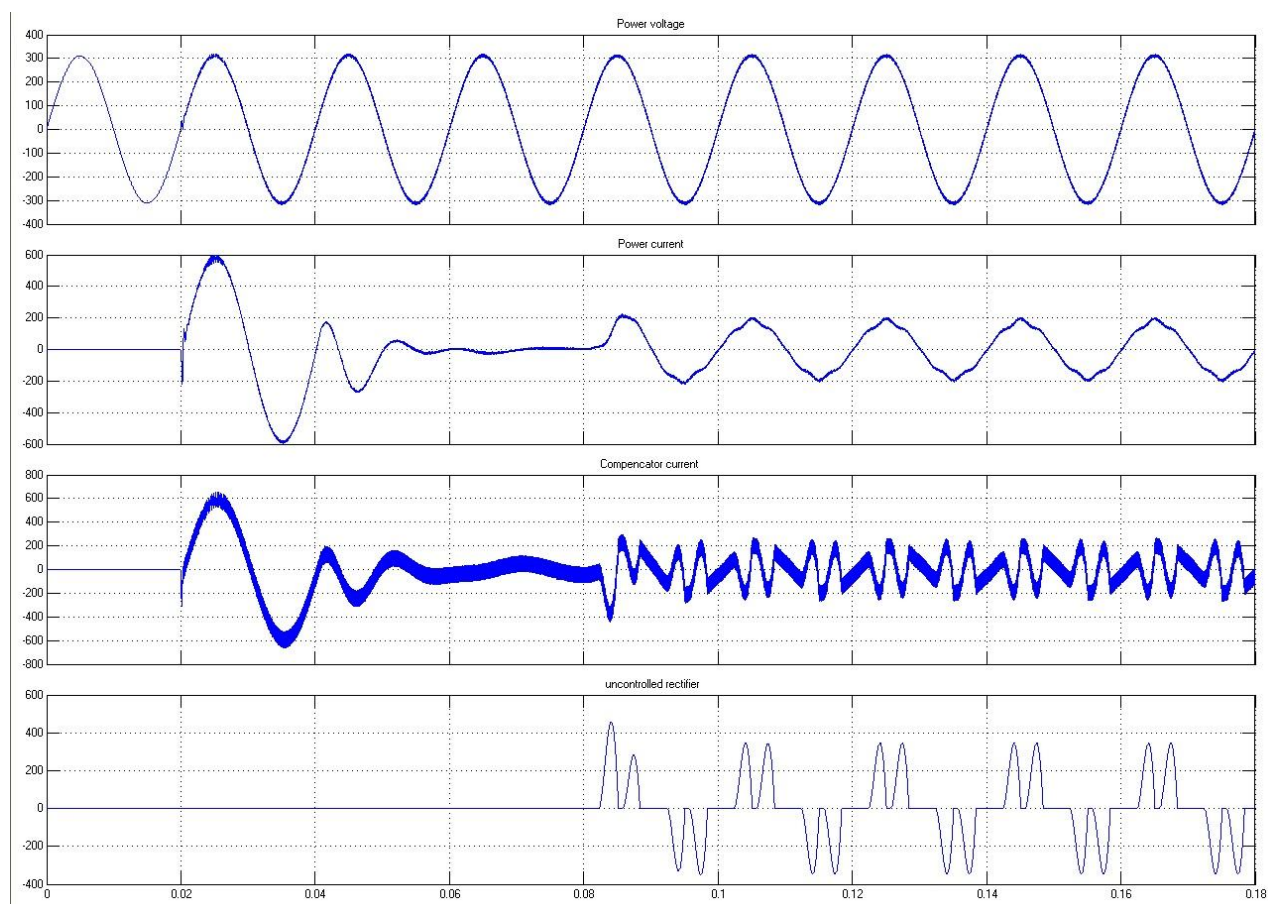


Рисунок 4.14 – Временные диаграммы  $u_C = f(t)$ ,  $i_C = f(t)$ ,  $I_K = f(t)$ ,  $i_{ПЧ} = f(t)$

На рисунке 4.14 показан, каким должен быть компенсирующий ток  $i_K$ , чтобы подавить влияние высших гармоник тока, создаваемых преобразователем частоты (ток  $i_{ПЧ}$ ), и одновременно обеспечить потребление из сети синусоидального тока  $i_C$ , сдвинутого относительно напряжения сети  $u_C$  на угол  $\varphi = 0$ .

Ток, потребляемый преобразователем частоты несинусоидален. В каждом полупериоде тока наблюдаются два импульса тока. Разложение тока сети в ряд Фурье (рисунок 4.20) дает нечетные гармоники 5, 7, 11, 13, 17, 19 и т.д., что приводит к искажению формы напряжения сети.

При проведении исследований изменяли ток  $I_{ПЧ}$  в диапазоне от 0 до номинального тока двигателя. Результаты исследований приведены в таблице 4.3.

Таблица 4.3 – Исследование статических характеристик АФК совместно с преобразователем частоты

$I_{нч}, А$	0	4	10	28	52	74	95	132	167
$I_c, А$	5	6,4	9	20,1	36,7	53,7	69,7	99,9	128,7
$I_k, А$	33	33,1	33,8	38,4	47,5	58,3	68,3	84,5	104,7
$\delta I_c$	-	-0,6	0,1	0,28	0,3	0,27	0,26	0,24	0,22
$P_c, кВт$	1,8	3,2	5,3	13	24	35,2	45,8	65,7	84,6
$S_c, кВА$	3,3	4,2	5,9	13,2	24,2	35,4	45,9	65,7	84,6
$P_{ПЧ}, кВт$	0,12	1,5	3,6	11,4	22,3	33,4	43,7	63,5	82,2
$Q_{ПЧ}, квар$	-0,008	0,096	0,35	1,4	3,3	5,4	7,6	12,2	16,8
$T_{нч}, кВА$	0,24	2,7	5,7	15	26	35,9	44,2	59,1	71,8
$N_{ПЧ}, кВА$	0,24	2,7	5,7	15,1	26,2	36,3	44,9	60,3	73,7
$S_{ПЧ}, кВА$	0,28	3,07	6,8	18,9	34,4	49,3	62,7	87,6	110,4
$\chi_c$	0,55	0,76	0,89	0,98	0,99	0,99	1	1	1
$\chi_{ПЧ}$	0,46	0,49	0,53	0,6	0,65	0,68	0,7	0,72	0,74
$\eta$	0,06	0,47	0,68	0,87	0,93	0,95	0,95	0,96	0,97
$k_{u.c}$	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
$k_{i.c}$	0,69	0,5	0,22	0,09	0,08	0,07	0,05	0,04	0,03

В таблице 4.3 приняты следующие обозначения:  $I_{ПЧ}$  – действующее значение тока на входе преобразователя частоты;  $\delta I_c = (I_{ПЧ} - I_c) / I_{ПЧ}$  – относительное снижение тока, потребляемого из сети совместно с компенсатором;  $P_{ПЧ}$ ,  $Q_{ПЧ}$ ,  $N_{ПЧ}$ ,  $S_{ПЧ}$  – активная, реактивная, пассивная и полная мощности на входе тиристорного преобразователя;  $T_{ПЧ}$  – мощность искажений на входе преобразователя частоты;  $\eta = |P_{ПЧ} / P_c|$  – коэффициент полезного действия компенсатора;  $k_{u.c}$ ,  $k_{i.c}$  – коэффициент искажения кривой напряжения и тока сети.

На основании данных, представленных в таблице 4.3, построены следующие зависимости:

- токов  $I_C = f(I_{ПЧ}), I_K = f(I_{ПЧ})$  (см. рисунок 4.15);
- относительного снижения тока, потребляемого из сети  $\delta I_C = f(I_{ПЧ})$  (см. рисунок 4.16);
- мощностей  $P_C, S_C = f(I_{ПЧ})$  ,  $P_{ПЧ}, Q_{ПЧ}, T_{ПЧ}, N_{ПЧ}, S_{ПЧ} = f(I_{ПЧ})$  (см. рисунок 4.17);
- основных энергетических показателей  $\chi_C = f(I_{ПЧ})$  ,  $\chi_{ПЧ} = f(I_{ПЧ})$  ,  $\eta = f(I_{ПЧ}), k_{и.С} = f(I_{ПЧ}), k_{i.С} = f(I_{ПЧ})$  (см. рисунок 4.18).

Анализ, представленных зависимостей (рисунок 4.15 – 4.20) позволяет сделать следующие выводы:

- улучшение спектрального состава тока, потребляемого из сети;
- коэффициент полезного действия АФК  $\eta$  достаточно высокий при  $I_{ПЧ} \rightarrow I_{ПЧ.Н}$  и находится в диапазоне 0,94 – 0,98;
- активный фильтр-компенсатор позволяет получить высокий коэффициент мощности  $\chi_c$  и  $\cos \varphi$  близкий к единице, в результате улучшается эффективность передачи активной мощности через сеть и уменьшаются потери мощности на внутренних сопротивлениях сети.

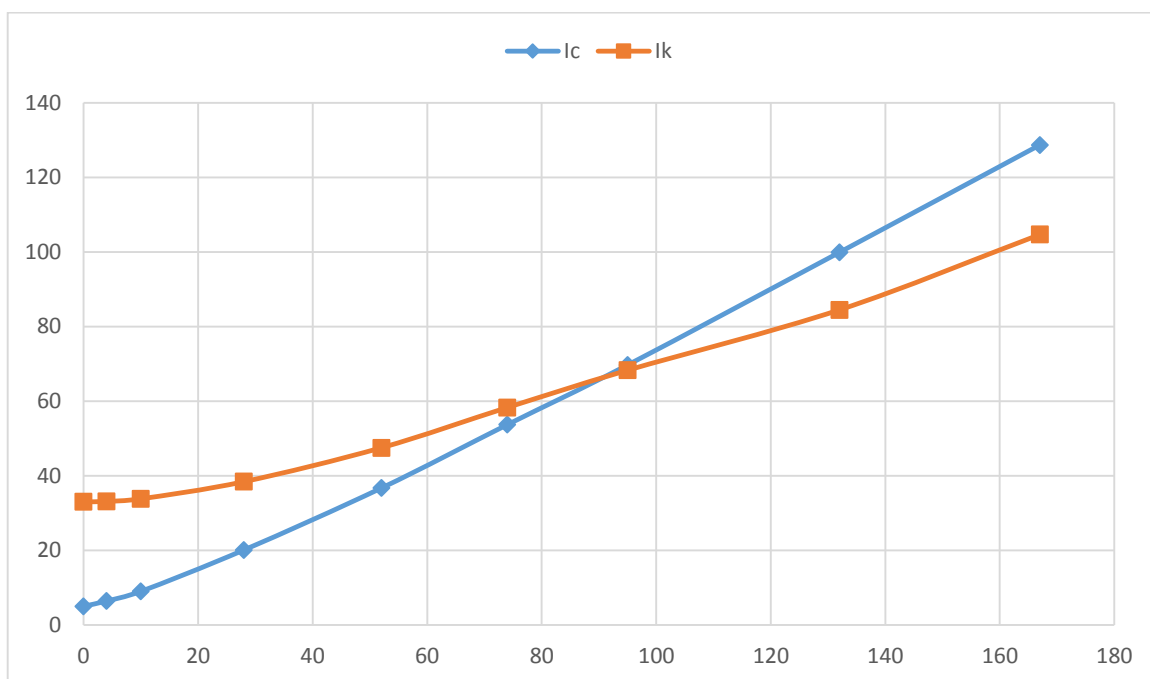


Рисунок 4.15 – Зависимости  $I_C = f(I_{ПЧ})$ ,  $I_K = f(I_{ПЧ})$

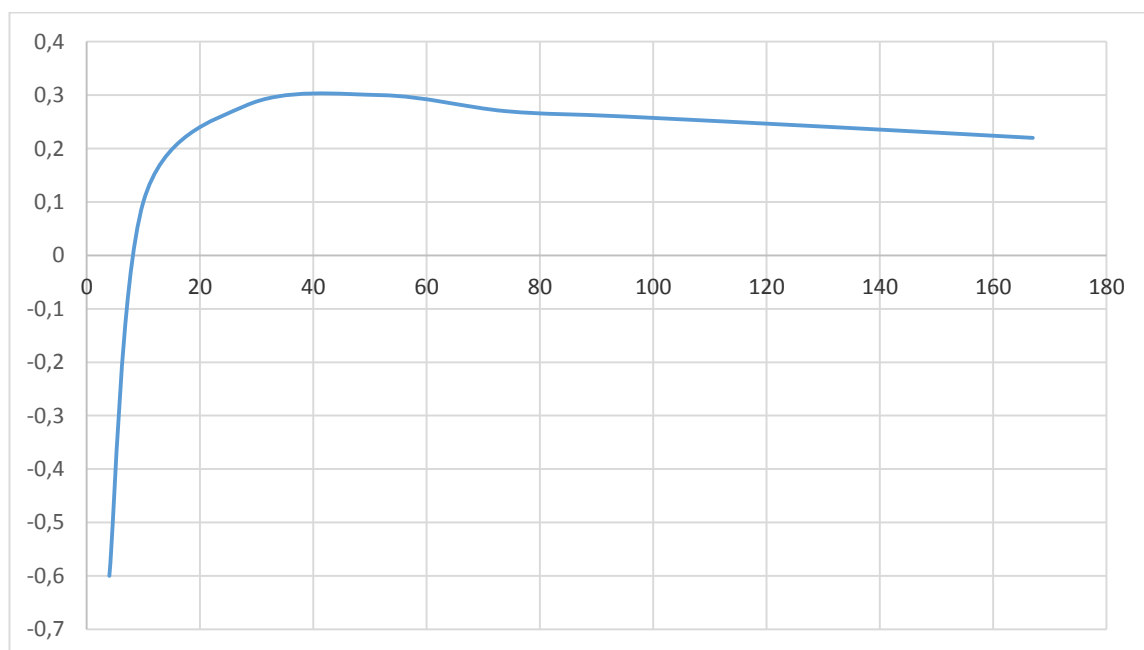


Рисунок 4.16 – Зависимость  $\delta I_C = f(I_{ПЧ})$

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

ЮУрГУ-13.04.02.2018.254.01ПЗ



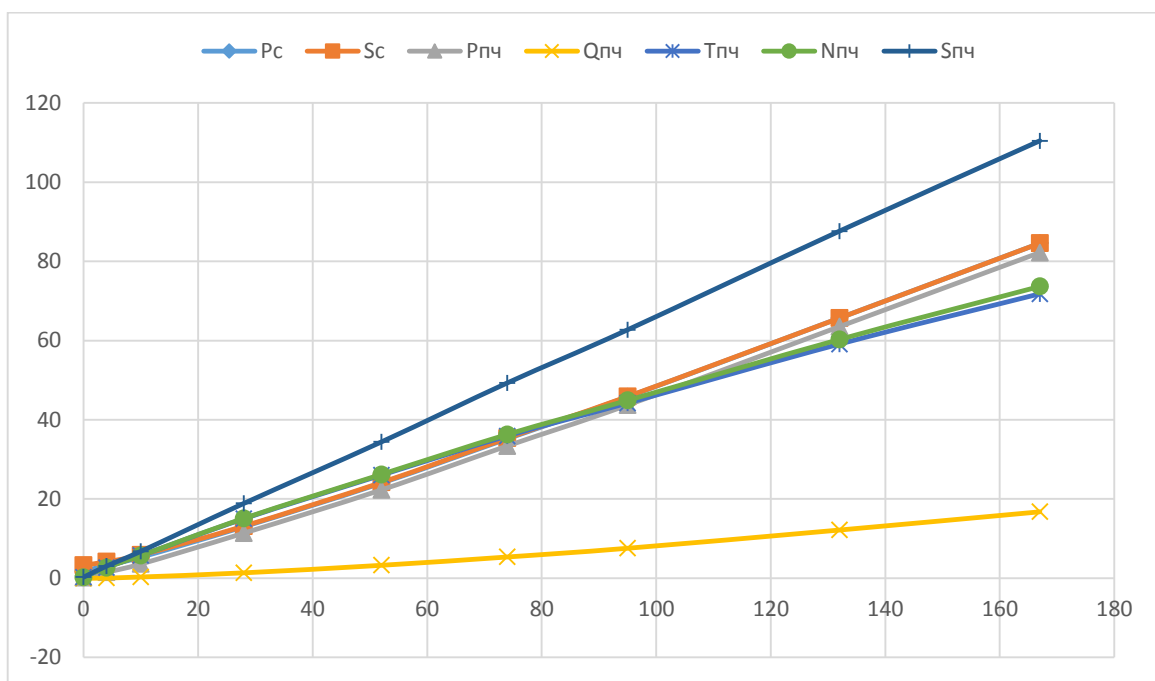


Рисунок 4.17 – Зависимости  $P_c, S_c = f(I_{пч}), P_{пч}, Q_{пч}, T_{пч}, N_{пч}, S_{пч} = f(I_{пч})$

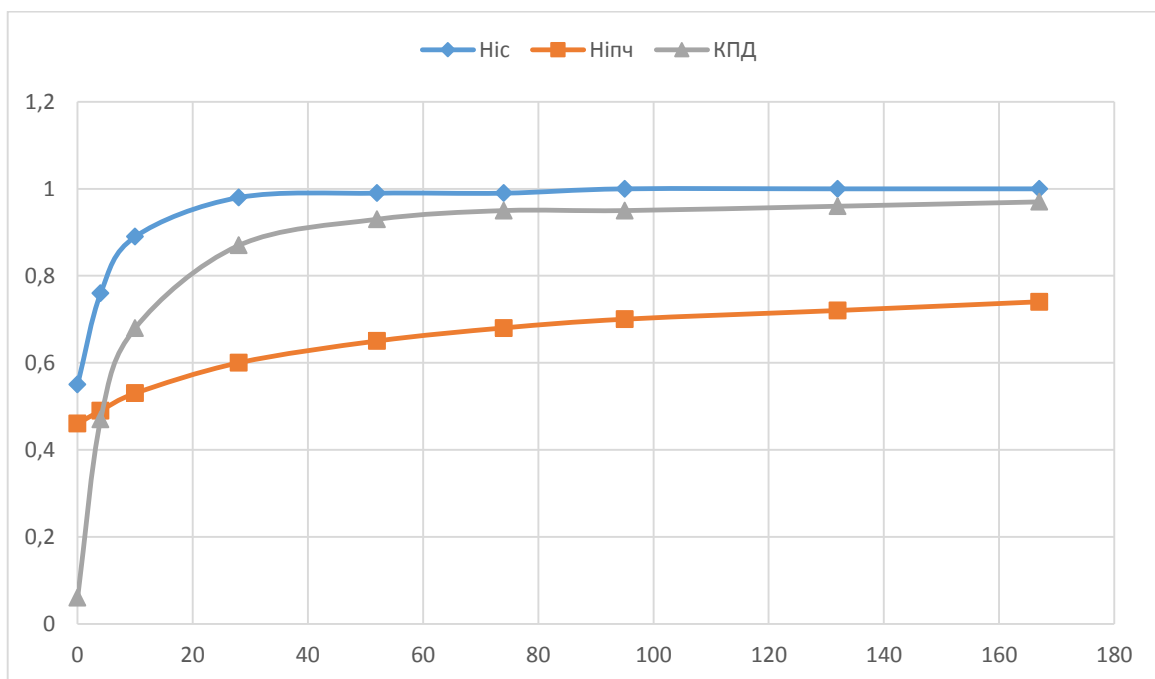


Рисунок 4.18 – Зависимости  $\chi_c = f(I_{пч}), \chi_{пч} = f(I_{пч}), \eta = f(I_{пч})$

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

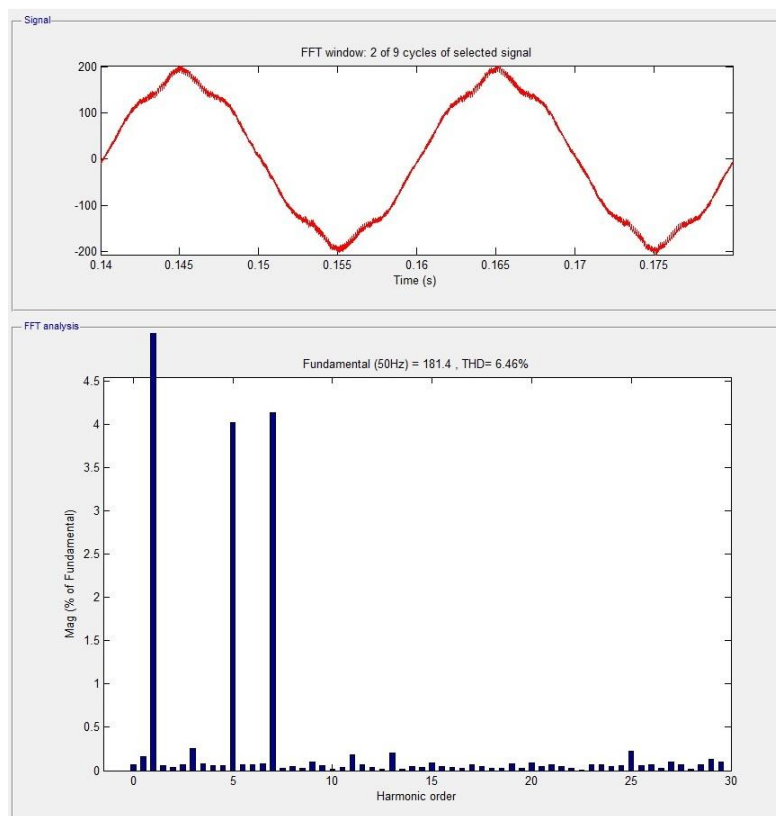


Рисунок 4.19 – Спектральный анализ тока сети  $I_C = f(n)$  при работе преобразователя частоты в номинальном режиме

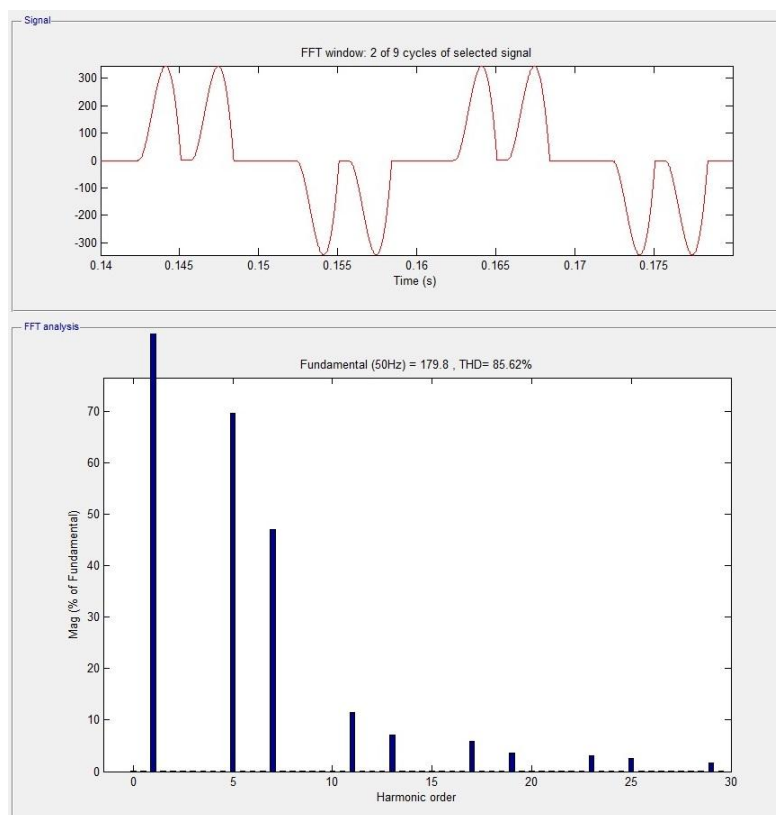


Рисунок 4.20 – Спектральный анализ входного тока преобразователя частоты  $I_{ПЧ} = f(n)$  в номинальном режиме

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

ЮУрГУ-13.04.02.2018.254.01ПЗ

На рисунках 4.19 и 4.20 Приведены спектральные анализы токов: сети и преобразователя частоты соответственно. Сравнив коэффициенты нелинейных искажений, видим, что ток потребляемый из сети при работе АФК имеет меньший *THD*, чем ток, потребляемый ПЧ (6,46% и 85,26% соответственно).

#### 4.5. Исследование статических характеристик трехфазного активного фильтра-компенсатора совместно со всеми нагрузками переменного тока

Временные диаграммы работы активного фильтра-компенсатора с активно-индуктивной нагрузкой, полученные при помощи компьютерного моделирования в программе *MatLab + Simulink*, представлены на рисунке 4.21.

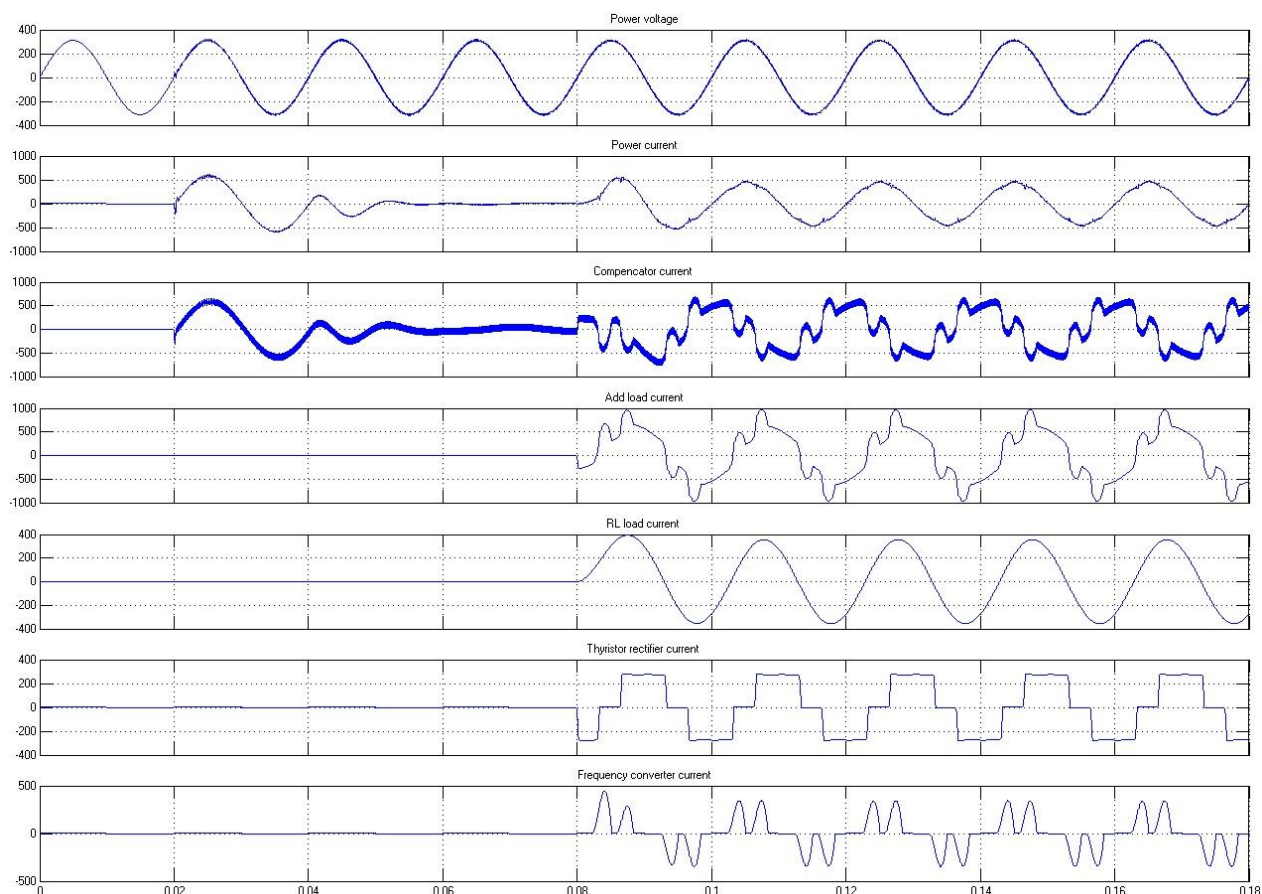


Рисунок 4.21 – Временные диаграммы  $u_C = f(t)$ ,  $i_C = f(t)$ ,  $i_K = f(t)$ ,  $i_{\Sigma H} = f(t)$ ,  $i_{RL} = f(t)$ ,  $i_{ПЧ} = f(t)$ ,  $i_{ПЧ} = f(t)$  при  $\alpha=85$  эд.град.

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

ЮУрГУ-13.04.02.2018.254.01ПЗ

Лист

93

На первой временной диаграмме (рисунок 4.21) изображено напряжение сети.

На второй диаграмме изображен ток, потребляемый сети. В момент времени  $t=0,02с$  происходит включение АФК, и идет заряд конденсаторов в звене постоянного тока. В момент времени  $t=0,08с$  происходит подключение тиристорного преобразователя к сети.

На следующей, третьей, временной диаграмме изображен ток компенсатора.

На четвертой временной диаграмме изображен суммарный ток, потребляемый всеми нагрузками.

На следующих диаграммах приведены токи активно-индуктивной нагрузки, тиристорного преобразователя и преобразователя частоты соответственно.

На рисунке 4.21 показан, каким должен быть компенсирующий ток  $i_k$  АФК, чтобы при включении всех нагрузок (ток  $i_{\Sigma H}$ ) из сети потреблялся синусоидальный ток  $i_c$ , передающий необходимую активную мощность и сдвинутый относительно напряжения сети  $u_c$  на угол  $\varphi = 0$ .

При снятии характеристик изменяли угол управления  $\alpha_{\text{ТП}}$  с шагом 15 эл. град в диапазоне от 0 до 150 эл. град. Результаты исследований занесены в таблицу 4.4.

Таблица 4.4 – Результаты исследования АФК совместно со всеми нагрузками

$\alpha$	0	15	30	45	60	75	90	105	120	135	150
$I_c, A$	496,7	490,8	471,5	439,2	397,5	349,9	294,8	237,7	184,3	139,4	102,9
$I_{\Sigma H}, A$	577,5	583	585,7	578	569,3	561	536,6	487,9	441,1	405,8	352,2
$I_k, A$	253,3	273,5	305,5	333,3	367	401,2	410,7	387,7	362,5	344,5	301,7
$\delta I_c$	0,14	0,16	0,19	0,24	0,3	0,37	0,45	0,51	0,58	0,65	0,7
$P_c, кВт$	326,6	322,7	310	288,8	261,5	230	193,8	156,4	121,2	91,5	67,4
$S_c, кВА$	326,6	323	310	288,7	261,6	230	194	156,4	121,5	91,5	67,8
$P, кВт$	320,9	316,1	302	279,7	250,6	216,8	180,5	144,1	110,2	81,1	58,8
$Q, квар$	184,3	199,7	225,4	250,8	270,8	282,9	286,1	279,9	263,9	238,5	203,2
$T, кВА$	87,1	88,2	81,8	61,2	66,8	97,8	103	65,6	53	90,5	95,9
$N, кВА$	204	217,8	239,8	285,2	278,9	299,3	304,1	287,5	269,2	255	224,7
$S, кВА$	380,3	383,9	385,7	380,7	375	369,7	353,7	321,7	290,8	267,7	232,3
$\chi_c$	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0,99
$\chi$	0,84	0,82	0,78	0,73	0,67	0,59	0,51	0,45	0,38	0,3	0,25
$\eta$	0,99	0,99	0,99	0,99	0,98	0,98	0,97	0,96	0,95	0,94	0,92

В таблице 4.4 приняты следующие обозначения:  $I_{\Sigma H}$  – суммарное значение действующего тока всех нагрузок;  $\delta I_C = (I_{\Sigma H} - I_C)/I_{\Sigma H}$  – относительное снижение тока, потребляемого из сети совместно с компенсатором;  $P_{\Sigma H}$ ,  $Q_{\Sigma H}$ ,  $N_{\Sigma H}$ ,  $S_{\Sigma H}$  – активная, реактивная, пассивная и полная мощности всех нагрузок;  $T_{\Sigma H}$  – мощность искажений всех нагрузок;  $\eta = |P_{\Sigma H}/P_C|$  – коэффициент полезного действия компенсатора;  $k_{u,C}$ ,  $k_{i,C}$  – коэффициент искажения кривой напряжения и тока сети.

На основании данных, представленных в таблице 4.4, построены следующие зависимости:

- токов  $I_C = f(\alpha_{ТП})$ ,  $I_{\Sigma H} = f(\alpha_{ТП})$ ,  $I_K = f(\alpha_{ТП})$  (см. рисунок 4.22);
- относительного снижения тока, потребляемого из сети  $\delta I_C = f(\alpha_{ТП})$  (см. рисунок 4.23);
- мощностей  $P_C, S_C = f(\alpha_{ТП})$ ,  $P_{\Sigma H}, Q_{\Sigma H}, T_{\Sigma H}, N_{\Sigma H}, S_{\Sigma H} = f(\alpha_{ТП})$  (рисунок 4.24);
- основных энергетических показателей  $\chi_C = f(\alpha_{ТП})$ ,  $\chi_{\Sigma H} = f(\alpha_{ТП})$ ,  $\eta = f(\alpha_{ТП})$ , (рисунок 4.24),  $k_{u,C} = f(\alpha_{ТП})$ ,  $k_{i,C} = f(\alpha_{ТП})$  (см. рисунок 4.25).

Анализ, представленных зависимостей (рисунок 4.22 – 4.25) позволяет сделать следующие выводы:

- при работе в выпрямительном режиме с ростом угла управления тиристорного преобразователя  $\alpha$  увеличивается действующее значение тока компенсатора  $I_K$ , т.к. АФК компенсирует в сети потребление пассивной мощности, создаваемую всеми нагрузками переменного тока;
- с ростом угла управления тиристорного преобразователя  $\alpha$  снижается действующее значение тока сети  $I_C$ , а коэффициент мощности сети  $\chi_C = 1,0$ . Так, например, при  $\alpha = 75$  эл. град. потребление тока из сети совместно с АФК уменьшается на 37%. Все это свидетельствует об эффективном использовании электроэнергии и снижении потерь мощности в сети;

					<b>ЮУрГУ-13.04.02.2018.254.01ПЗ</b>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		95

Таким образом, АФК существенно улучшает качество электроэнергии в системах электроснабжения, если на промышленном предприятии установлены мощные активно-индуктивные нагрузки (индуктивные печи), а также мощные приводы постоянного и переменного тока. Но его применение в промышленности требует больших финансовых затрат, которые могут окупиться в долгосрочном периоде.

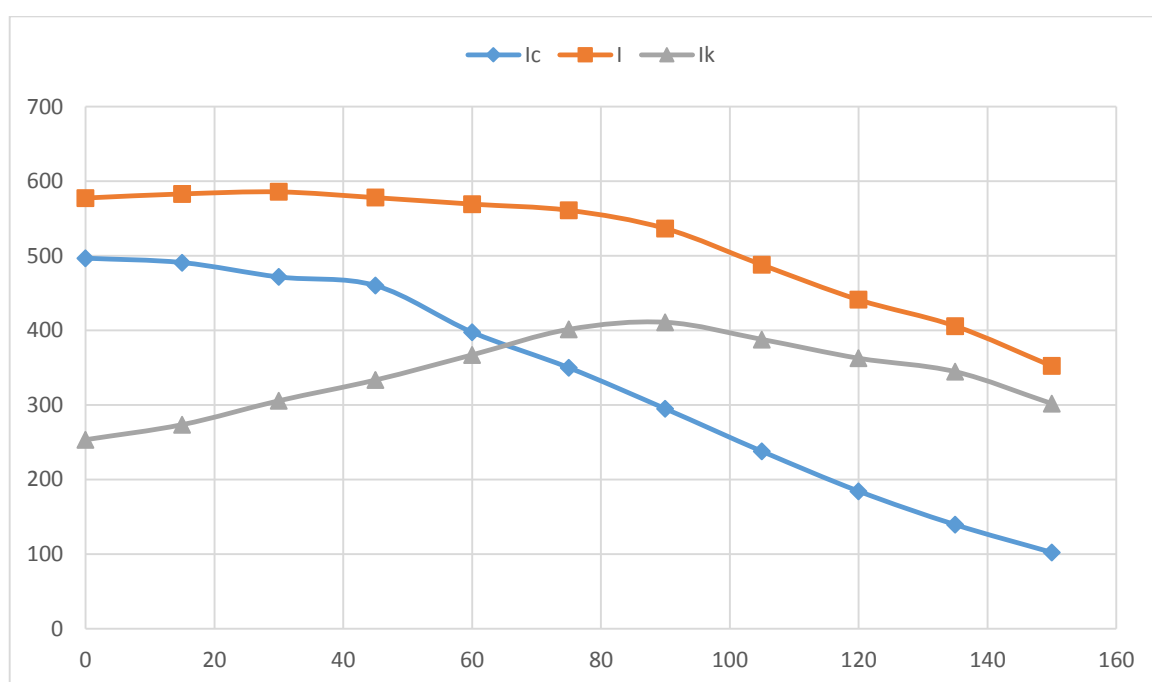


Рисунок 4.22 – Зависимости  $I_C = f(\alpha_{\text{П}})$ ,  $I_{\Sigma\text{Н}} = f(\alpha_{\text{П}})$ ,  $I_K = f(\alpha_{\text{П}})$

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

ЮУрГУ-13.04.02.2018.254.01ПЗ

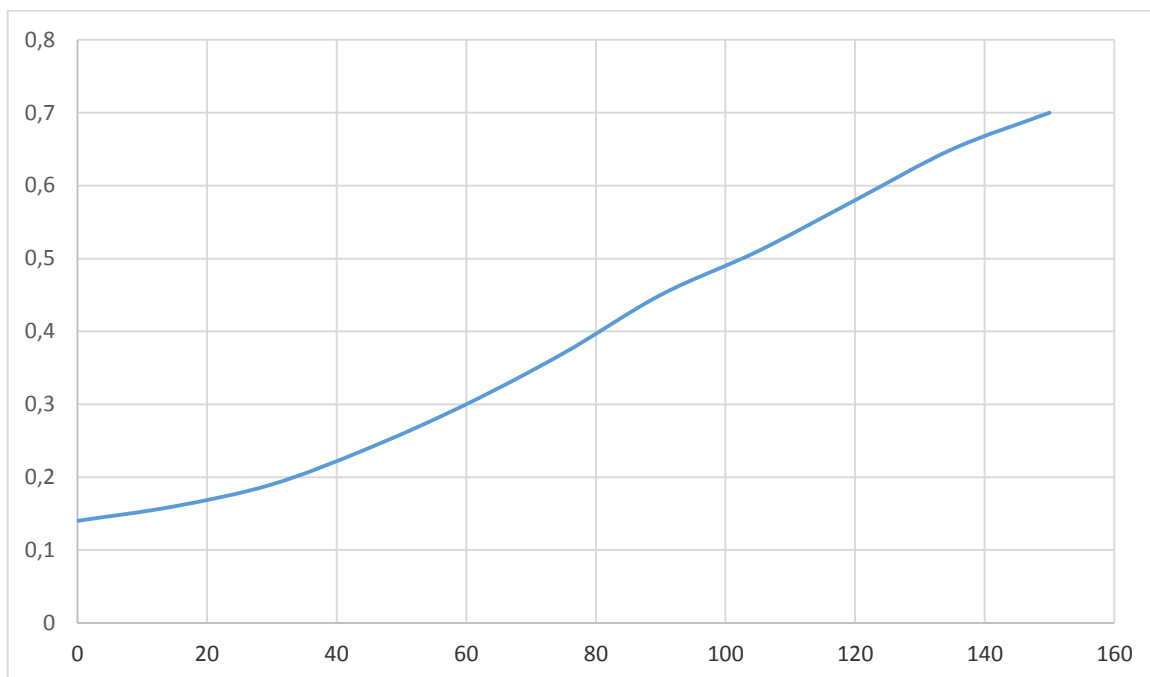


Рисунок 4.23 – Зависимость  $\delta I_C = f(\alpha_{ТП})$

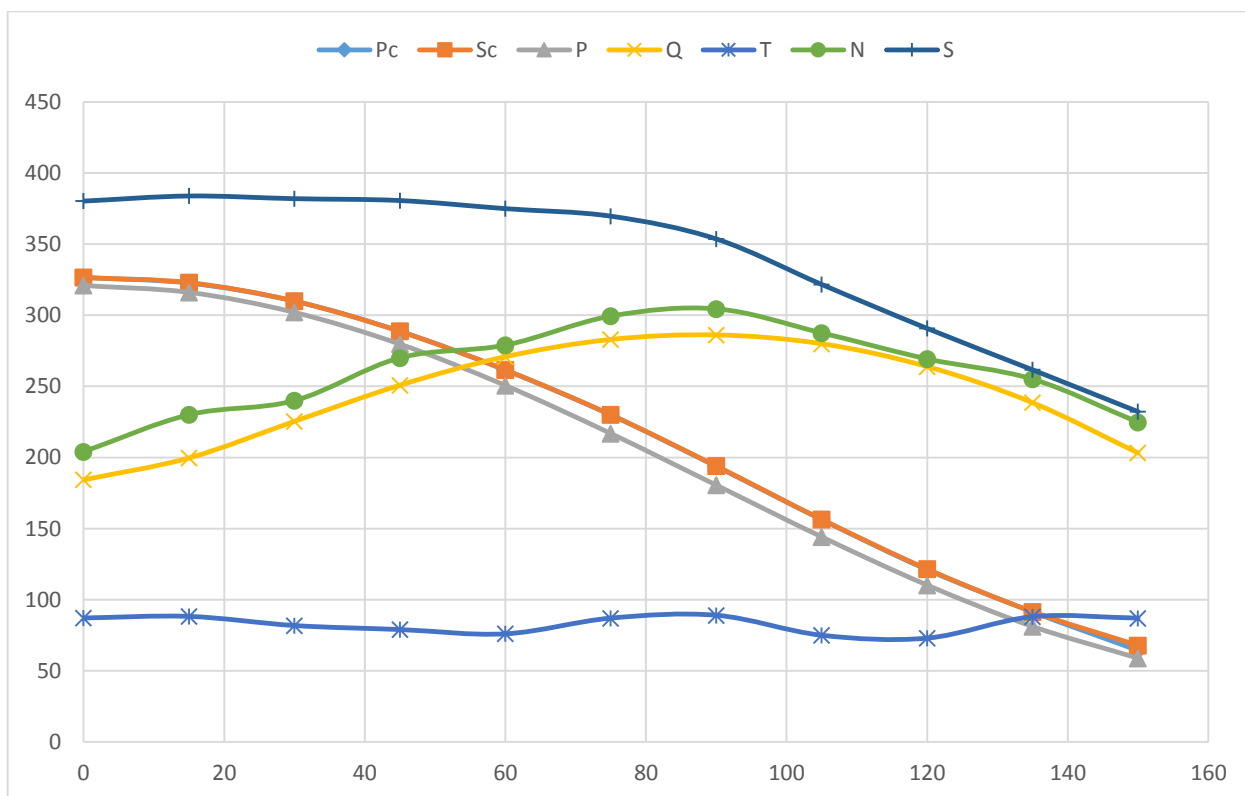


Рисунок 4.24 – Зависимости  $P_C, S_C = f(\alpha_{ТП}), P_{\Sigma H}, Q_{\Sigma H}, T_{\Sigma H}, N_{\Sigma H}, S_{\Sigma H} = f(\alpha_{ТП})$

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

ЮУрГУ-13.04.02.2018.254.01ПЗ

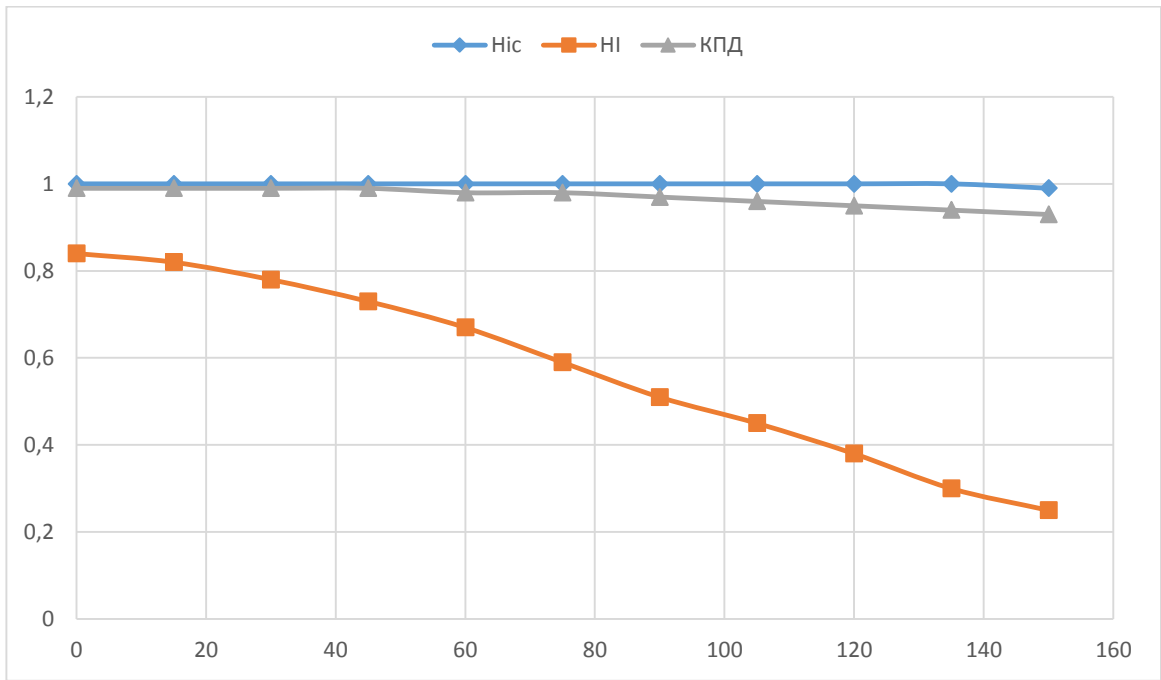


Рисунок 4.25 – Зависимости  $\chi_C = f(\alpha_{ТII})$ ,  $\chi_{\Sigma H} = f(\alpha_{ТII})$ ,  $\eta = f(\alpha_{ТII})$

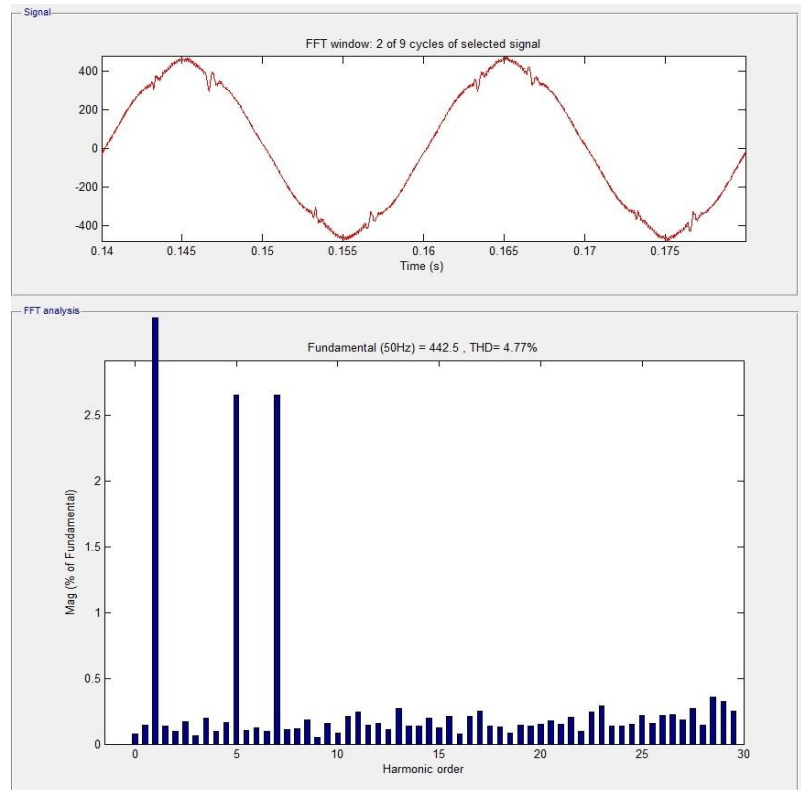


Рисунок 4.26 – Спектральный состав сетевого тока  $I_C = f(n)$  при  $\alpha=85$  эл. град.

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

ЮУрГУ-13.04.02.2018.254.01ПЗ



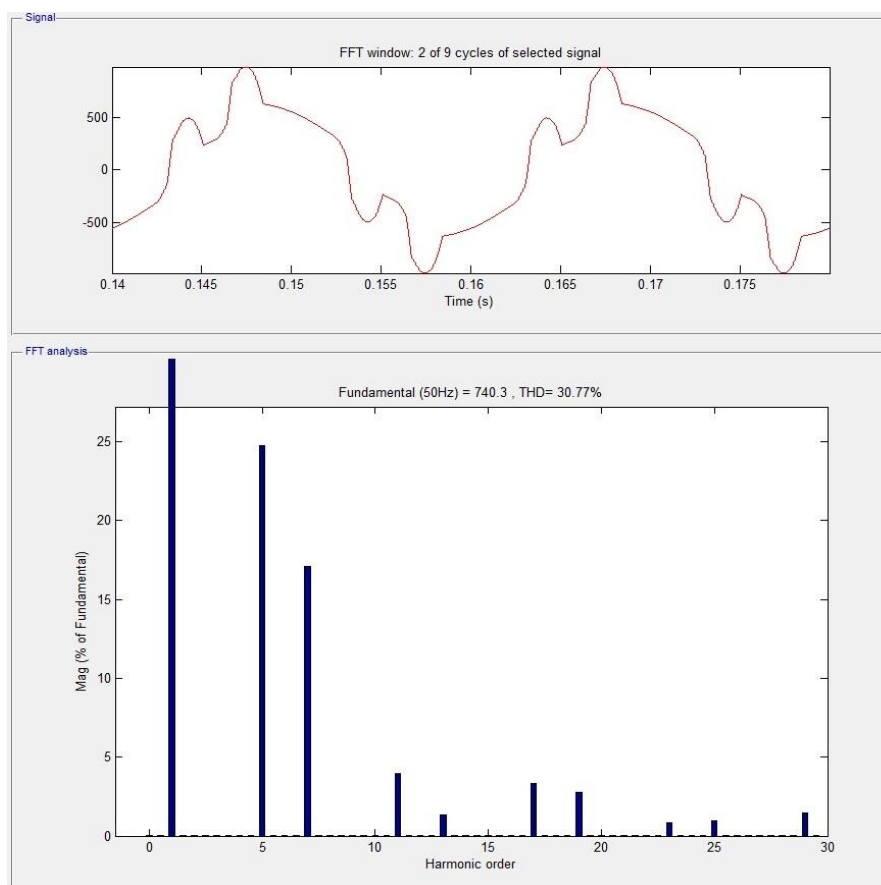


Рисунок 4.27 – Спектральный состав суммарного тока нагрузки  $I_{\Sigma H} = f(n)$  при  $\alpha=85$  эл. град.

На рисунках 4.26 и 4.27 приведены спектральные составы токов: сети и суммарного тока, потребляемого всеми нагрузками соответственно. Сравнив коэффициенты нелинейных искажений по току, видим, что ток потребляемый из сети при работе АФК имеет меньший  $THD$  4,77%, чем суммарный ток всех нагрузок 30,77%.

#### 4.6 Исследование динамических характеристик трехфазного активного фильтра-компенсатора совместно с регулируемыми электроприводами

Для более подробного изучения динамических характеристик активного фильтра-компенсатора и приближения к практическому применению АФК переработаем математическую модель.

Тиристорный преобразователь, который ранее для упрощения компьютерной модели реверсивного электропривода постоянного тока моделировался, как трехфазный однокомплектный тиристорный преобразователь, работающий на активно-индуктивную нагрузку с ПЭДС, изменен на двухкомплектный тиристорный преобразователь, нагрузка, на которую работает ТП – двигатель постоянного тока независимого возбуждения. Система управления ЭП – подчиненное регулирование (рисунок 4.28).

Ранее для упрощения компьютерной модели частотно-регулируемого асинхронного электропривода использовался трехфазный неуправляемый выпрямитель с емкостным фильтром на выходе, нагруженный на активное сопротивление.

В новой модели частотно-регулируемый привод представлен, как преобразователь частоты, выполненный на основе неуправляемого выпрямителя на входе, звена постоянного тока с емкостным фильтром, и автономным инвертором напряжения на базе *IGBT*-транзисторов на выходе. Преобразователь частоты нагружен на асинхронный двигатель (рисунок 4.29).

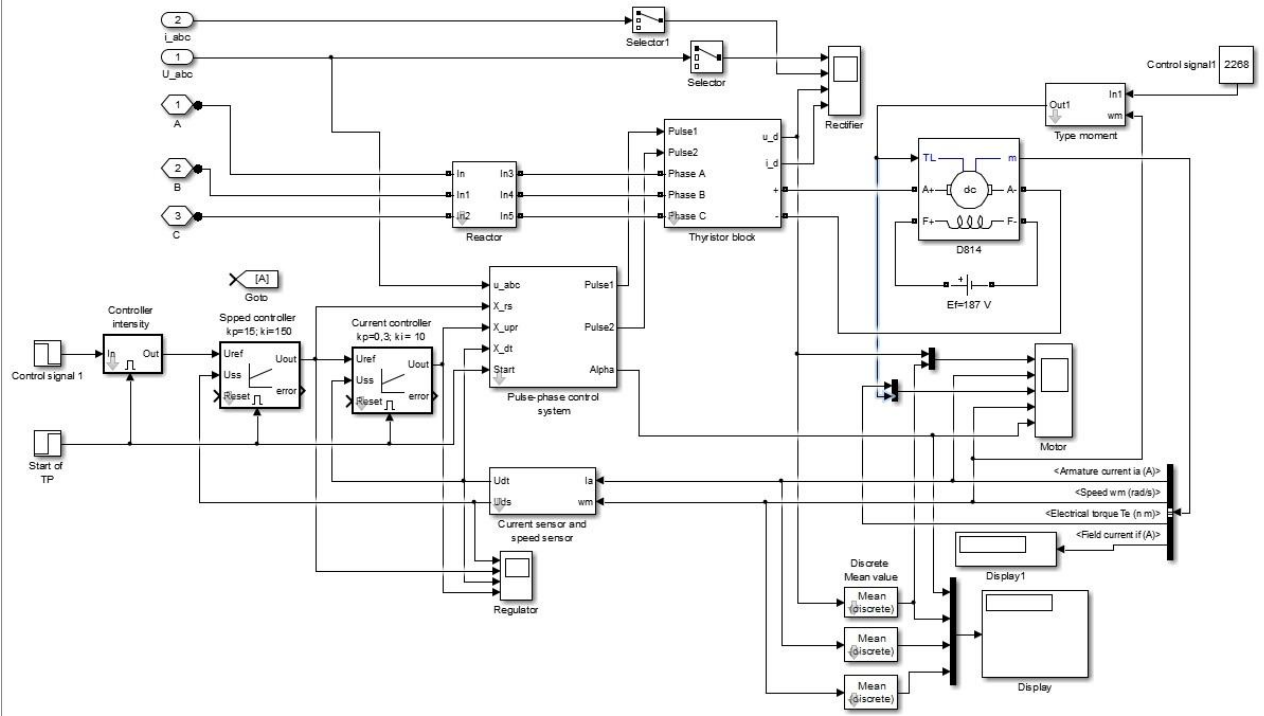


Рисунок 4.28 – Компьютерная модель электропривода постоянного тока в среде *MatLab+Simulink*

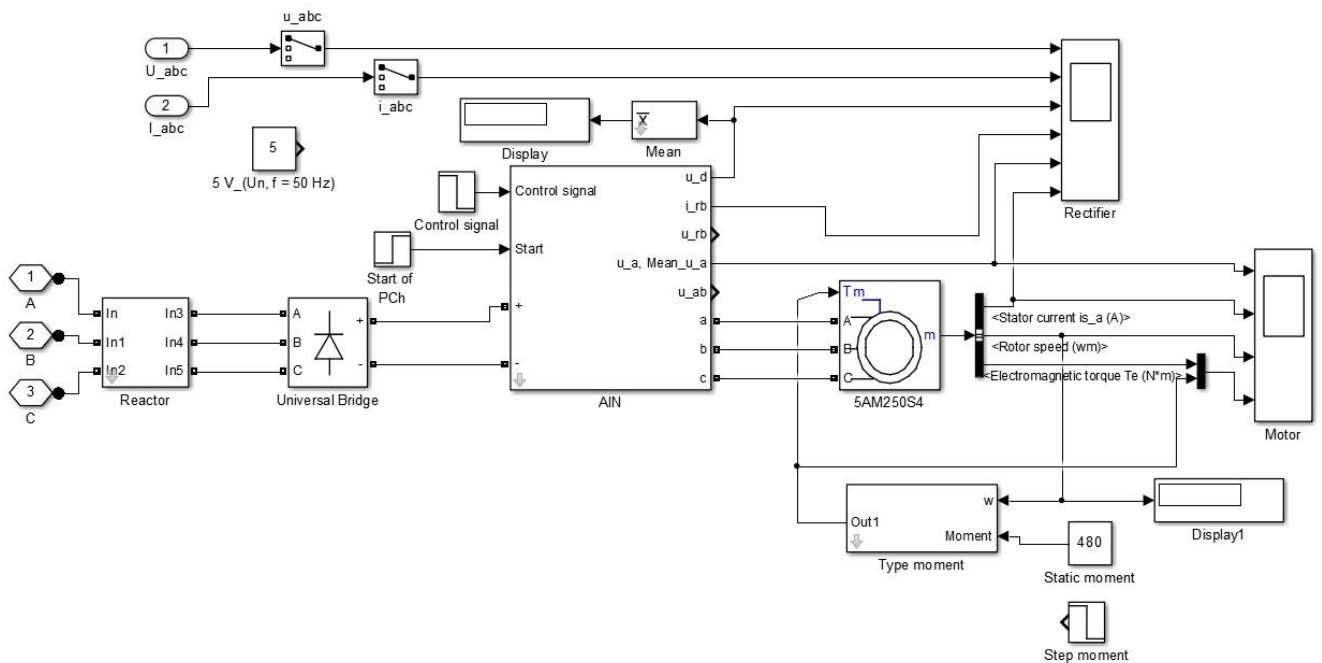


Рисунок 4.29 – Компьютерная модель электропривода переменного тока в среде *MatLab+Simulink*

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

ЮУрГУ-13.04.02.2018.254.01ПЗ

Лист

101

Снятие временных диаграмм будут проводится при подключении всех нагрузок: активно-индуктивная нагрузка, электропривод постоянного тока и частотно-регулируемого привода.

Электропривод постоянного тока работает с постоянным во времени номинальным реактивным моментом, который равен 2268 Нм. Параметры регуляторов настроены для достижения максимального быстродействия и минимального перерегулирования. На входе установлен задатчик интенсивности, который задает нужный темп разгона электропривода и ограничивает пусковой ток.

Частотно-регулируемый привод работает в скалярном режиме с форсировкой напряжения (форсировка напряжения составляет 5%). Привод нагружен постоянным во времени реактивным моментом, равным 480 Нм. Для ограничения пускового тока в системе управления установлен задатчик интенсивности.

Временные диаграммы работы АФК совместно с регулируемыми электроприводами постоянного и переменного тока представлены на рисунке 4.30.

					<i>ЮУрГУ-13.04.02.2018.254.01ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		102

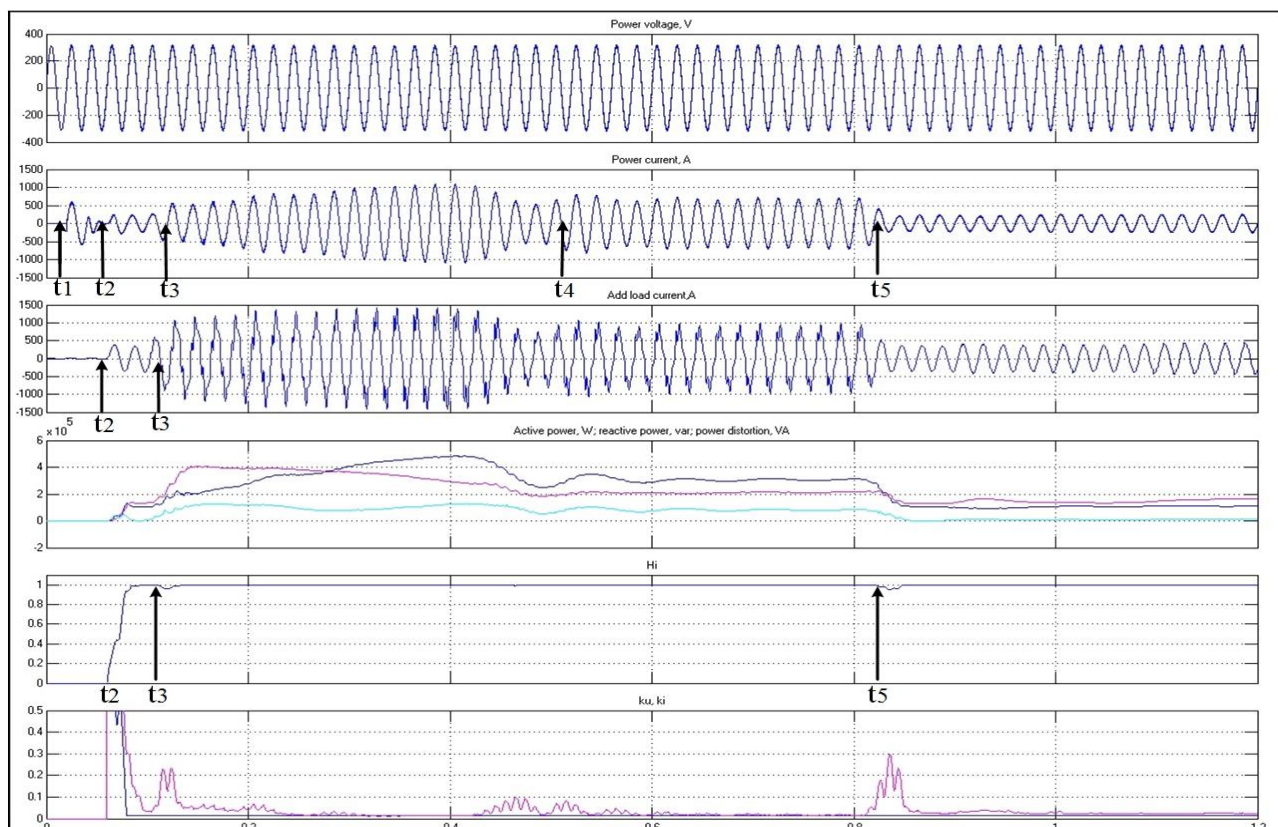


Рисунок 4.30 – Временные диаграммы работы АФК совместно с регулируемыми электроприводами постоянного и переменного тока

На первой временной диаграмме (рисунок 4.30) изображено напряжение сети.

На второй – ток, потребляемый из сети.

Третья временная диаграмма – ток, потребляемый всеми нагрузками.

На четвертой временной диаграмме приведены: активная мощность нагрузок, реактивная мощность, мощность искажений.

На пятой изображена осциллограмма коэффициента мощности сети  $\chi_c$

На последней диаграмме приведены осциллограммы коэффициентов искажений тока и напряжения сети.

В момент времени  $t_1$  происходит включение активного фильтра-компенсатора. Идет зарядка конденсаторов в звене постоянного тока.

$t_2$  – включение активно-индуктивной нагрузки.

Участок времени  $t_3-t_4$  соответствует участку разгону электроприводов постоянного и переменного тока.

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

Участок  $t_4-t_5$  – работа электроприводов в установившемся режиме на номинальной скорости.

С момента времени  $t_5$  происходит торможение электроприводов с номинальной скорости до 0.

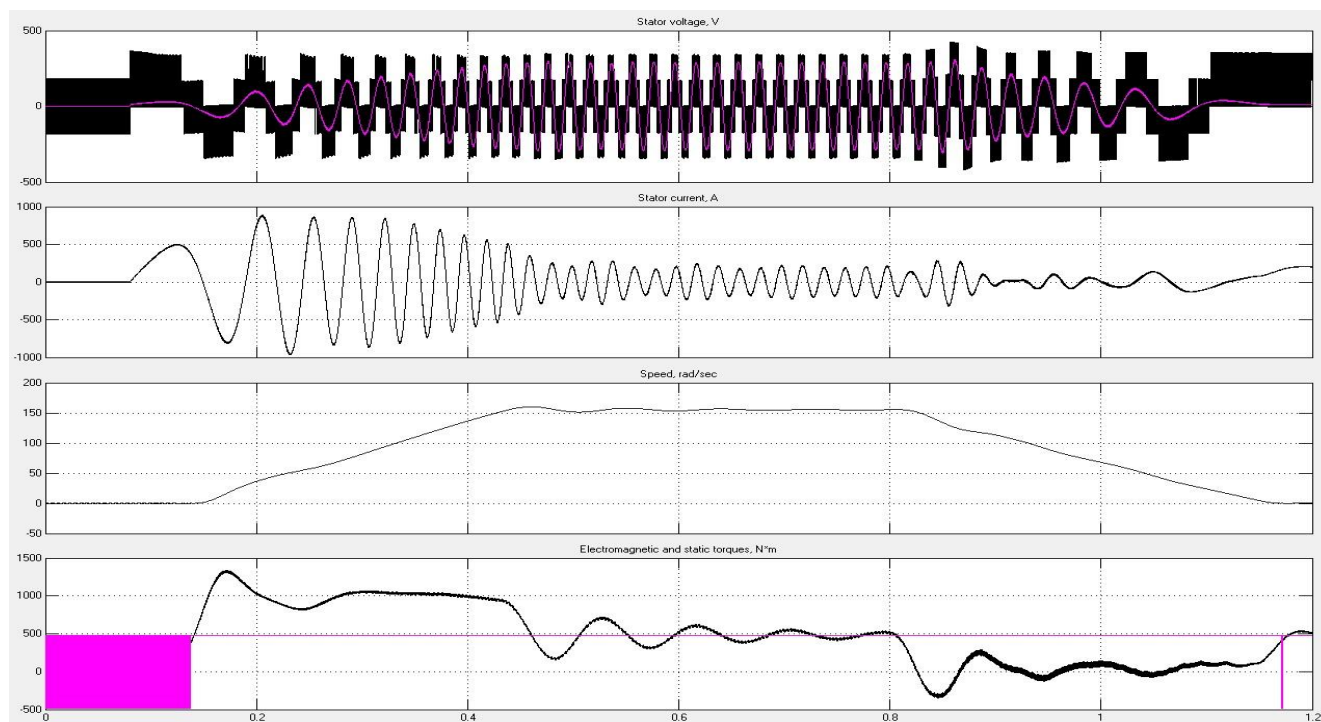


Рисунок 4.31 – Временные диаграммы работы электропривода переменного тока

На первой временной (рисунок 4.31) диаграмме приведено напряжение на статоре АД. Также выведена первая гармоника напряжения.

На второй диаграмме приведен ток статора асинхронного двигателя.

На третьей – скорость двигателя.

И на последней временной диаграмме приведен статический и электромагнитный момент двигателя.

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

ЮУрГУ-13.04.02.2018.254.01ПЗ

Лист

104

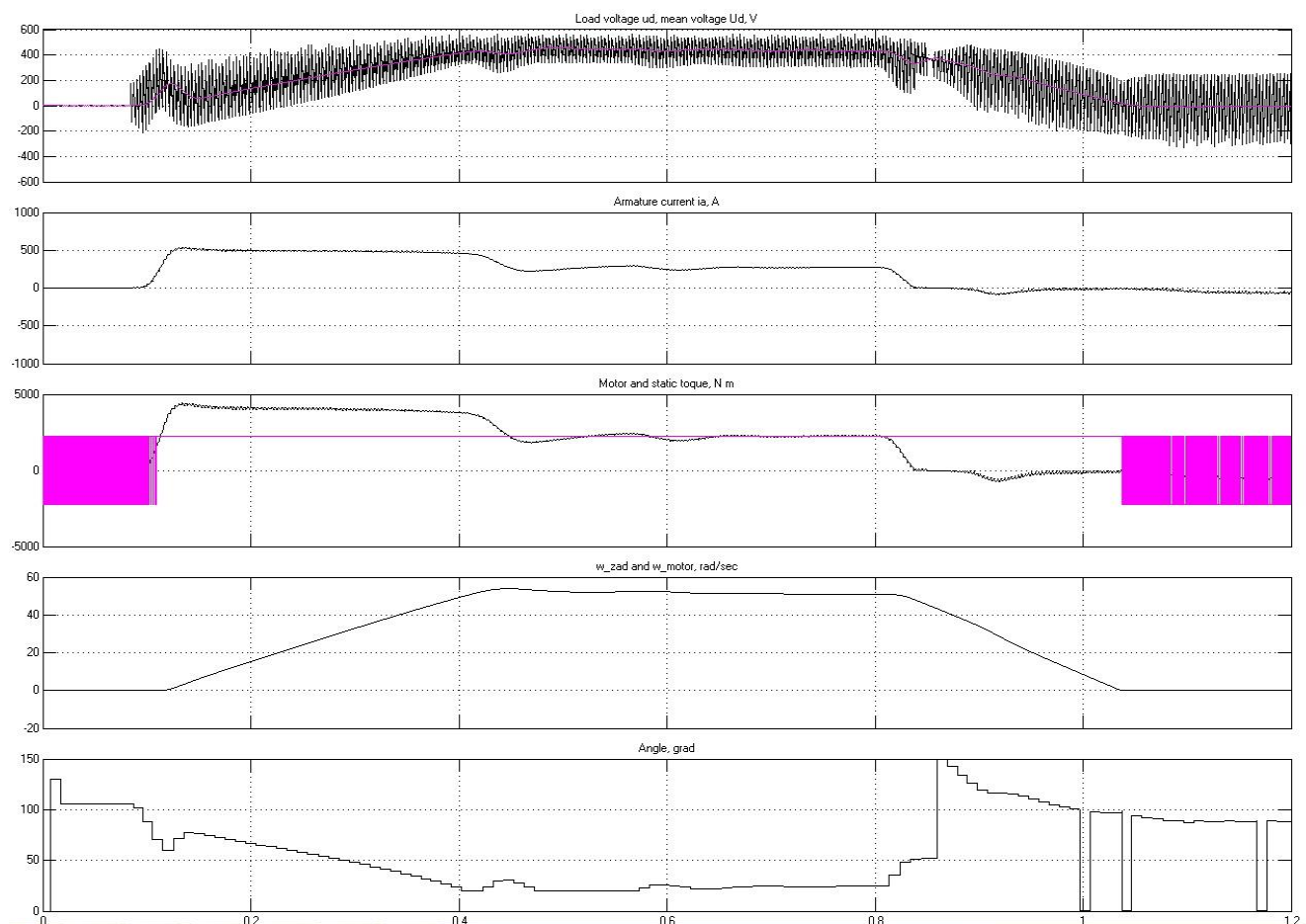


Рисунок 4.32 – Временные диаграммы работы электропривода постоянного тока

На первой временной (рисунок 4.32) диаграмме приведено напряжение на выходе преобразователя и его среднее значение.

На второй диаграмме приведен ток якоря.

На третьей диаграмме статический и электромагнитный момент двигателя.

На четвертой диаграмме приведена скорость двигателя постоянного тока.

И на последней временной диаграмме приведена осциллограмма изменения угла управления ТП  $\alpha$ .

Рассмотрим в более подробном варианте временные диаграммы работы АФК, соответствующие участкам разгона электроприводов, работа на установившейся скорости и торможение ЭП (рисунок 4.33 – 4.35).

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

ЮУрГУ-13.04.02.2018.254.01ПЗ

Лист

105

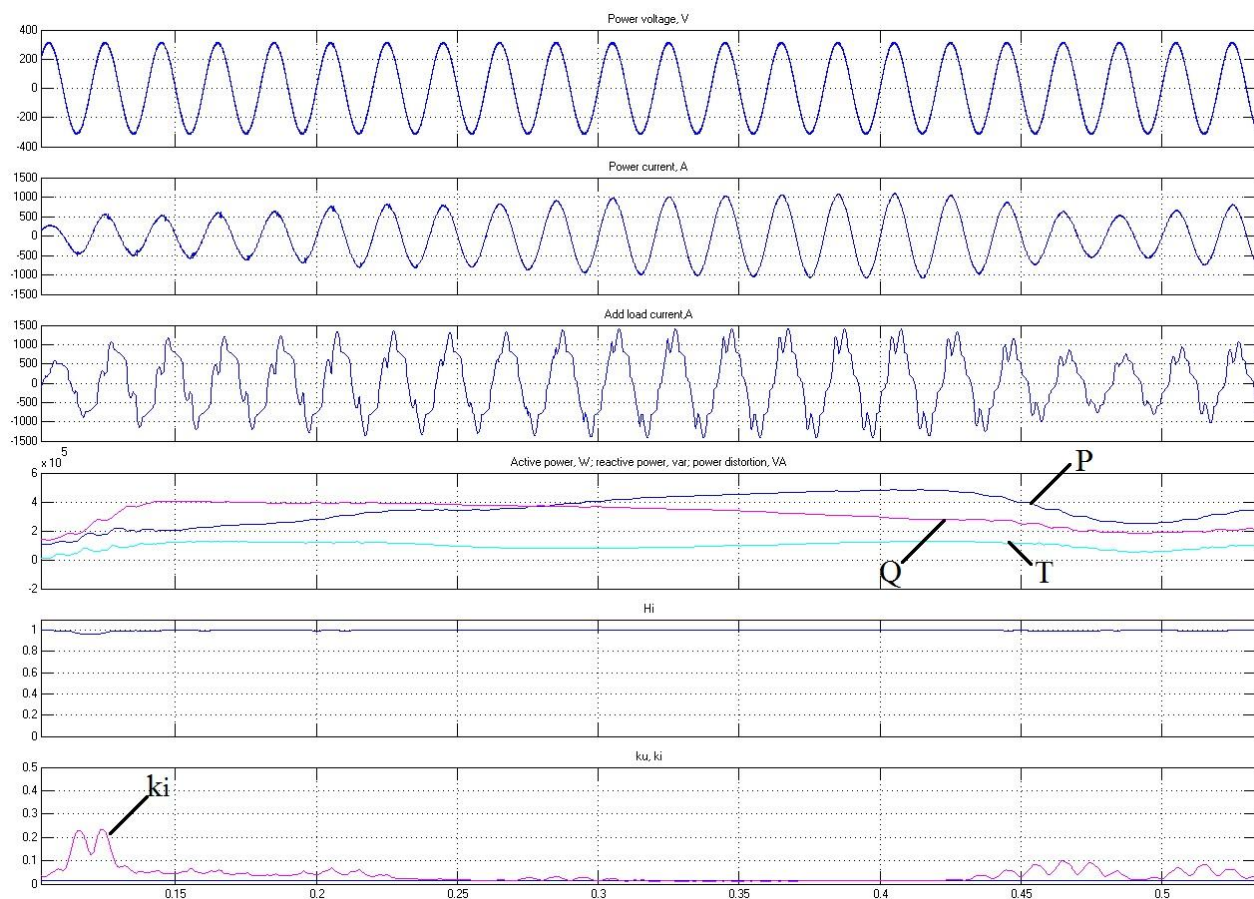


Рисунок 4.33 – Временные диаграммы работы АФК при разгоне электроприводов от нуля до номинальной скорости

На первой временной диаграмме (рисунок 4.33 – 4.35) изображено напряжение сети.

На второй – ток, потребляемый из сети.

Третья временная диаграмма – ток, потребляемый всеми нагрузками.

На четвертой временной диаграмме приведены: активная мощность нагрузок, реактивная мощность, мощность искажений.

На пятой изображена осциллограмма коэффициента мощности сети  $\chi_c$

На последней диаграмме приведены осциллограммы коэффициентов искажений тока и напряжения сети.

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата



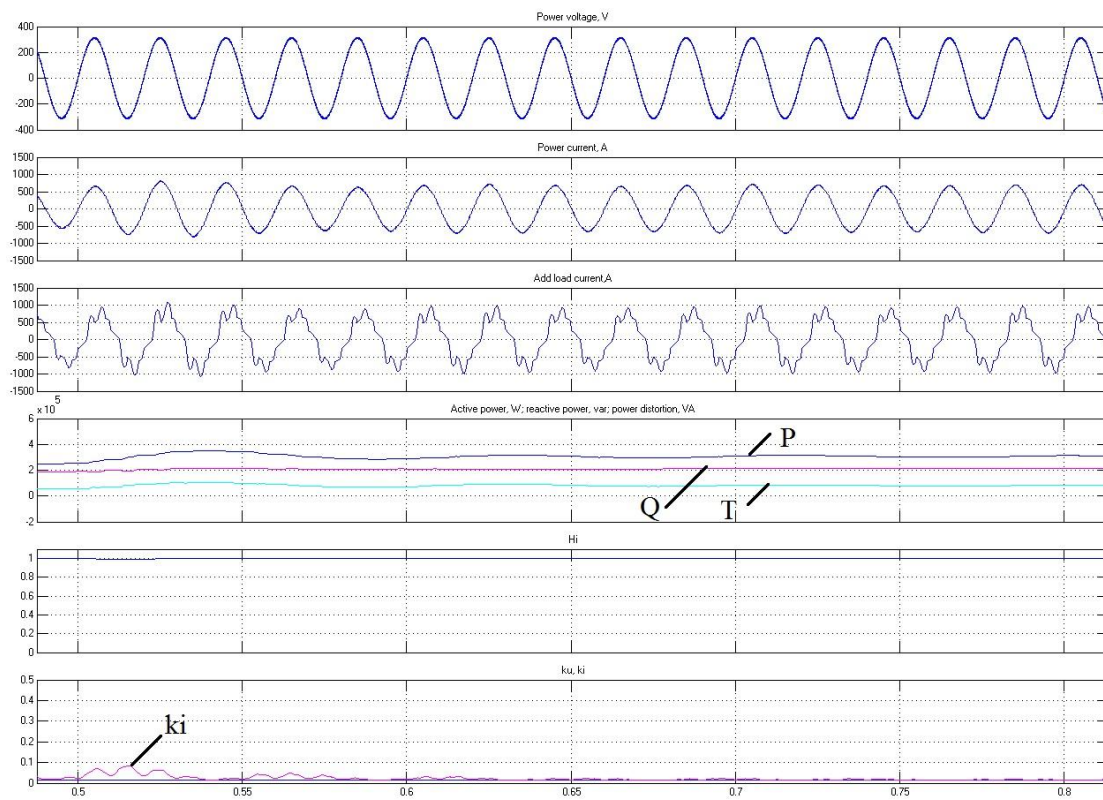


Рисунок 4.34 – Временные диаграммы работы АФК при работе электроприводов на номинальной скорости

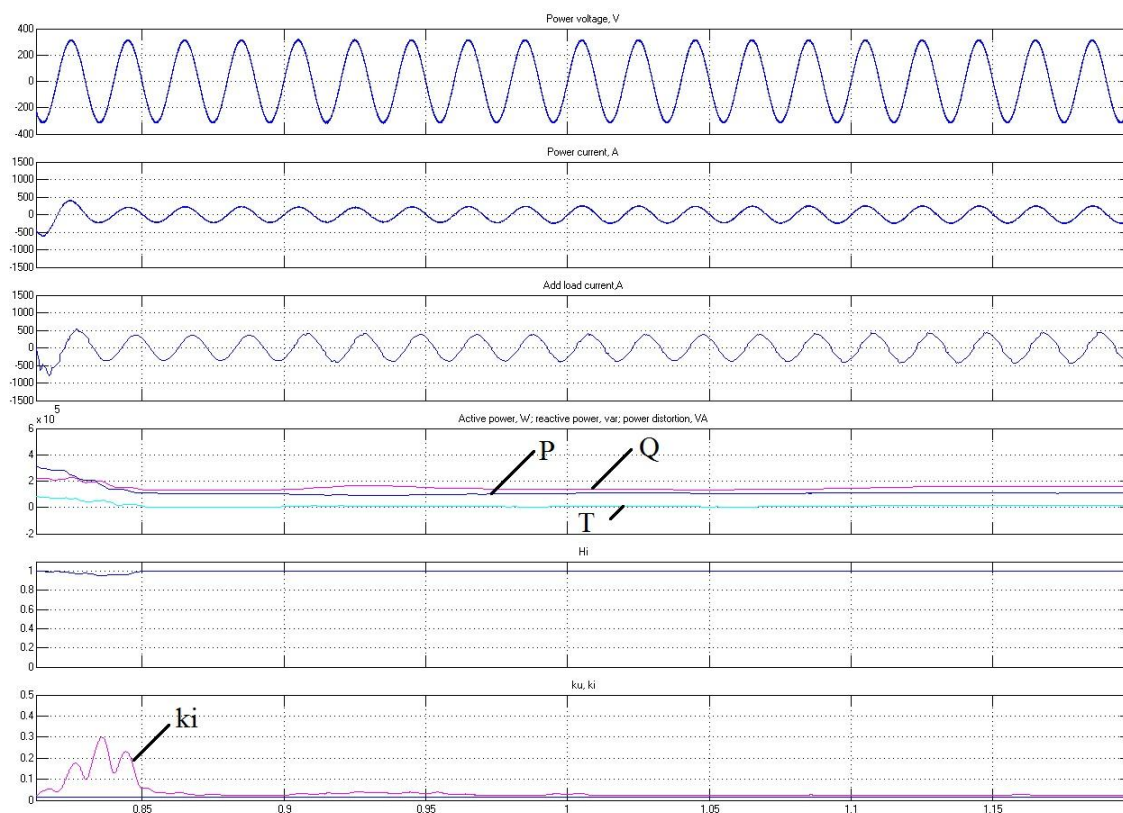


Рисунок 4.35 – Временные диаграммы работы АФК при торможении электроприводов от номинальной скорости до нуля

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

ЮУрГУ-13.04.02.2018.254.01ПЗ

Лист

107

Проанализировав полученные временные диаграммы, видим, что активный фильтр-компенсатор отлично выполняет те задачи, которые на него возложены.

При разгоне, торможении и работе на номинальной скорости из сети потребляется синусоидальный ток (см. рисунок 4.33-4.35).

Во время начала разгона электроприводов коэффициент мощности спадает до  $\chi_c=0,93$  (см. рисунок 4.33), но далее, на всем участке разгона  $\chi_c=1$ . Также во время начала разгона коэффициент несинусоидальности тока сети  $k_{ic}=0,2$ .

На установившемся режиме работы электроприводов коэффициент мощности сети равен единице (таблица 4.5). Это свидетельствует об эффективном использовании электроэнергии и снижении потерь мощности в сети.

Таблица 4.5 – Энергетические показатели системы АФК–электропривод в различных режимах работы

Показатель	Разгон электроприводов	Установившийся режим работы электроприводов	Торможение электроприводов
$\chi_c$	0,93	1	0,95
$k_{ic}$	0,2	0,05	0,3
$k_{uc}$	0,02	0,01	0,02

Во время начала торможения электроприводов наблюдается снижение коэффициента мощности сети до значения 0,95 (см. рисунок 4.35). «Просадка» коэффициента мощности сети наблюдается из-за того, что активному фильтру компенсатору требуется небольшое время на отработку сигнала. Далее, на остальном участке торможения  $\chi_c=1$ .

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе проведен обзор полупроводниковых преобразователей, применение которых направлено на улучшение энергетических показателей качества сети, а также сформулированы их основные достоинства и недостатки.

Основной объект исследования – трехфазный активный фильтр-компенсатор. Для АФК были рассчитаны и выбраны основные элементы: реактор, конденсаторы звена постоянного тока, *IGBT*-транзисторы, настроен пассивный фильтр на входе АФК, также были рассчитаны основные параметры системы управления активного фильтра-компенсатора.

В *MatLab + Simulink* была разработана математическая модель трехфазного АФК совместно с нагрузками переменного тока: *RL*-нагрузка, тиристорный преобразователь, преобразователь частоты.

Исследование статических характеристик активного фильтра-компенсатора проводилось при работе АФК как отдельно с каждой нагрузкой, так и со всеми нагрузками одновременно.

При работе всех нагрузок совместно с АФК коэффициент мощности сети  $\chi_c$  и  $\cos \varphi$  равны единице практически во всех режимах работы, а из сети потребляется синусоидальная форма тока. Таким образом, применение активного фильтра-компенсатора в системе электроснабжения позволяет не только полностью скомпенсировать реактивную мощность и улучшить спектральный состав сетевого тока, но и снизить потребление действующего значения тока сети  $\delta I_c$ , достигающего максимального значения 70 % при  $\alpha = 150$  эл. град, когда тиристорный преобразователь рекуперирует в сеть максимальное количество электроэнергии. Все это однозначно говорит о том, что в результате использования АФК улучшается эффективность передачи активной мощности через сеть и уменьшаются потери мощности на внутренних сопротивлениях сети. Это, в конечном итоге, позволяет уменьшить потребление электроэнергии.

					<b>ЮУрГУ-13.04.02.2018.254.01ПЗ</b>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		109

Особое внимание в работе уделялось вопросу динамических свойств трехфазного активного фильтра-компенсатора. Был проведен анализ зависимостей времени нарастания компенсационного тока  $t_k$  от различных переменных и установлено, что время нарастание компенсационного тока  $t_k$  зависят от максимальной частоты коммутации силовых ключей АФК  $f_{k.max}$  и коэффициента повышения преобразователя  $k_{пов}$ . Поэтому с целью достижения максимального быстродействия АФК значения  $f_{k.max}$  и  $k_{пов}$  следует выбирать как можно больше. Однако следует помнить, что их предельные значения ограничены временем включения и выключения *IGBT*-транзисторов и их максимальным напряжением на коллекторе.

В заключительной части диплома были исследованы динамические характеристик трехфазного активного фильтра-компенсатора совместно с регулируемые электроприводами постоянного и переменного тока. Результаты исследований показали, что активный фильтр-компенсатор отлично выполняет возложенные на него задачи. Так, при разгоне электроприводов коэффициент мощности сети  $\chi_c$  не снижался ниже 0,93, коэффициент искажения тока  $k_{i.c} - 0,2$ , а коэффициент искажения напряжения сети  $k_{u.c} - 0,02$ . В установившемся режиме работы электроприводов эти же показатели составили равными  $\chi_c = 1,0$ ;  $k_{i.c} = 0,05$ ;  $k_{u.c} = 0,01$ .

Главные преимущества активного фильтра-компенсатора перед другими устройствами компенсации является его высокое быстродействие и гибкость в применении в сетях с постоянно изменяющейся мощностью нагрузок во времени.

Однако АФК обладает и недостатками. Это большая расчетная мощность, которая соизмерима с активной мощностью всех нагрузок переменного тока, а также высокая стоимость и, как следствие, большой срок окупаемости. Именно последний недостаток мешает массовому внедрению АФК в сетях промышленных предприятий.

Из-за короткого срока обучения в магистратуре и ограниченного объема выпускной квалификационной работы не была подробно проработана экономическая часть. Для изучения вопроса экономической эффективности внедрения активного фильтра-компенсатора на производство необходимо тесное сотрудничество с поставщиком электрической энергией и отделом главного энергетика предприятия.

					<i>ЮУрГУ-13.04.02.2018.254.01ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		111

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1 Гельман, М.В. Преобразовательная техника: учебное пособие / М.В. Гельман, М.М. Дудкин, К.А. Преображенский. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2009. – 425 с.

2 Гельман, М.В. Схемотехника преобразователей с высокими энергетическими показателями: учебное пособие / М.В. Гельман, М.М. Дудкин, К.А. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2013. – 104 с.

3 Зиновьев, Г.С. Силовая электроника: учеб. пособие для бакалавров / Г.С. Зиновьев. – 5-е изд., испр. и доп. – М.: Издательство Юрайт, 2015. – 667 с. – Серия: Бакалавр. Углубленный курс.

4 Розанов, Ю.К. Силовая электроника: учебник для вузов / Ю.К. Розанов, М.В. Рябчицкий, А.А. Кваснюк. – М.: Издательский дом МЭИ, 2016. – 632 с.

5 Akagi, H. Instantaneous power theory and applications to power conditioning. The power engineering: Handbook / H. Akagi, E.H. Watanabe, M. Aredes. – USA: IEEE Press, 2007. – 379 p.

6 Инженерная методика расчета синусных фильтров для активных выпрямителей и инверторов напряжения с ШИМ / Б.М. Берестов, В.В. Вдовин, С.С. Доманов и др. // Труды международной пятнадцатой научно-технической конференции «Электроприводы переменного тока». – Екатеринбург: ФГАОУ ВПО «УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», 2012. – С. 167–170.

7 Шалыгин, К.А. Техническая реализация принципов энергосбережения на базе активных силовых фильтров / К.А. Шалыгин, О.В. Нос // 8-ая Международная конференция по автоматизированному электроприводу. – 2014. – № 2. – С. 28–32.

8 Герман-Галкин, С.Г. *MatLab & Simulink* / Проектирование механотронных систем на ПК / С.Г. Герман-Галкин. – СПб.: КОРОНА Век, 2008. – 368 с.

9 Стандарт предприятия: курсовые и дипломные проекты. Общие требования к содержанию и оформлению. СТО ЮУрГУ 04 – 2008. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2008. – 56 с.

					<b>ЮУрГУ-13.04.02.2018.254.01ПЗ</b>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		112

10ГОСТ 32144-2013. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – М.: Стандартинформ, 2014. – 16 с.

11 Дудкин, М.М. Энергосберегающие технологии в испытательных стендах с использованием однофазных обратимых преобразователей / М.М. Дудкин // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2013. – Том 13. – № 1. – С. 5–18.

					<i>ЮУрГУ-13.04.02.2018.254.01ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		113