

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования «Национальный исследовательский технологический  
университет «МИСИС»

**На правах рукописи**

**КРЕЩАНОВСКИЙ ПАВЕЛ СЕРГЕЕВИЧ**

**ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В  
НЕФТЕПРОМЫСЛОВЫХ СЕТЯХ С ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМЫМИ  
ЭЛЕКТРОПРИВОДАМИ**

Специальность 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель: доктор технических наук

Шевырёв Юрий Вадимович

Москва – 2025

## Оглавление

<b>ВВЕДЕНИЕ.....</b>	<b>6</b>
<b>ГЛАВА 1. ПРОБЛЕМЫ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В НЕФТЕПРОМЫСЛОВЫХ СЕТЯХ.....</b>	<b>13</b>
1.1 Общее состояние нефтедобычи в России.....	13
1.2 Главные технологические процессы и потребители нефтедобычи.....	15
1.3 Общие требования к качеству электроэнергии.....	17
1.4 Причины отклонения параметров качества электроэнергии от норм.....	18
1.5 Потери мощности от высших гармоник в элементах систем электроснабжения.....	26
1.6 Анализ систем электроснабжения участков нефтедобычи.....	33
1.7 Анализ основных существующих типов, структур и систем управления фильтро-компенсирующих устройств.....	40
1.8 Пассивные фильтры высших гармоник.....	41
1.9 Активные фильтры гармоник.....	45
1.10 Процессы в силовых частях активных фильтров гармоник.....	50
1.11 Система вычисления компенсируемых токов активным фильтром гармоник.....	52
1.12 Гибридные системы коррекции параметров качества электроэнергии.....	60
Выводы по первой главе и задачи исследования.....	61
<b>ГЛАВА 2. РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ НЕФТЕПРОМЫСЛОВОЙ СЕТИ С НЕЛИНЕЙНЫМИ НАГРУЗКАМИ И АКТИВНЫМИ ФИЛЬТРАМИ ГАРМОНИК.....</b>	<b>64</b>
2.1 Компьютерная модель системы электроснабжения нефтепромысловой сети, содержащей нелинейные нагрузки.....	64
2.2 Системы и модели электроснабжения принятые к исследованию.....	72
2.3 Компьютерная модель активного фильтра гармоник.....	74

Выводы по второй главы.....	78
<b>ГЛАВА 3. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМНОГО ВЛИЯНИЯ НА КАЧЕСТВО ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ АКТИВНОГО ФИЛЬТРА ГАРМОНИК, СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ И НЕЛИНЕЙНОЙ НАГРУЗКИ..</b>	<b>79</b>
3.1 Исследование параметров качества электроэнергии в линейной сети электроснабжения без применения устройств повышения параметров качества электроэнергии.....	79
3.2 Внутренние параметры активного фильтра и внешние параметры сети и нагрузки влияющие на работу АФГ.....	80
3.3 Исследование влияния параметров выходного <i>RC</i> фильтра активного фильтра гармоник на эффективность фильтрации высших гармонических искажений.....	81
3.4 Исследование влияния индуктивности выходного реактора активного фильтра гармоник на эффективность фильтрации высших гармонических искажений.....	84
3.5 Исследование влияния емкости накопительного конденсатора активного фильтра гармоник на эффективность фильтрации высших гармонических искажений.....	88
3.6 Исследование влияния параметров нелинейных потребителей на эффективность фильтрации высших гармонических искажений активным фильтром.....	92
Выводы по третьей главе.....	95
<b>ГЛАВА 4. ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ НА КОНДЕНСАТОРЕ АФГ И ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ АКТИВНОГО ФИЛЬТРА .....</b>	<b>97</b>
4.1 Регулирование напряжения на конденсаторе АФГ и исследование взаимовлияния параметров АФГ и регулятора.....	97
4.2 Исследование влияния индуктивности цепи питания ЧРЭП на методику выбора параметров АФГ.....	109

4.3 Исследование влияния емкости сглаживающего конденсатора ЧРЭП на методику выбора параметров АФГ.....	115
4.4 Исследование влияние величины нелинейной нагрузки на активный фильтр гармоник.....	117
4.5 Исследование влияния параметров питающей сети на параметры качества электроэнергии и работу активного фильтра.....	119
4.6 Методика выбора параметров двухуровневого АФГ.....	123
Выводы по четвертой главе.....	125
<b>ГЛАВА 5. ПРИМЕНЕНИЕ АКТИВНЫХ ФИЛЬТРОВ ГАРМОНИК С ТРЕХУРОВНЕВОЙ СТРУКТУРОЙ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ .....</b>	<b>126</b>
5.1 Общие положения.....	126
5.2 Исследование влияния параметров активного фильтра гармоник на эффективность фильтрации высших гармонических искажений.....	129
5.3 Исследование влияния параметров нелинейных потребителей на эффективность фильтрации высших гармонических искажений АФ.....	132
5.4 Исследование эффективности регулирования напряжения на конденсаторе трехуровневого активного фильтра и методика выбора параметров.....	134
5.5 Методика выбора параметров двухуровневого АФГ.....	149
Выводы по пятой главе.....	151
<b>ГЛАВА 6. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОВЛИЯНИЯ ЧАСТОТНО РЕГУЛИРУЕМЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ И АКТИВНЫХ ФИЛЬТРОВ ГАРМОНИК ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ НА КАЧЕСТВО ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ.....</b>	<b>152</b>
6.1 Взаимовлияние параллельных линий электропередач на качество электроэнергии.....	152
6.2 Оценка эффективности внедрения устройств повышения качества электроэнергии в распределительных сетях.....	156
Выводы по шестой главе.....	163
<b>Заключение.....</b>	<b>164</b>

<b>СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....</b>	<b>166</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ 1.....</b>	<b>185</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ 2.....</b>	<b>208</b>
Приложение 2.1.....	208
Приложение 2.2.....	209

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность темы диссертационной работы.** В настоящее время практически на всех предприятиях минерально-сырьевого комплекса внедряются частотно-регулируемые асинхронные электроприводы (ЧРЭП). Применение частотных преобразователей позволяет добиться экономии электроэнергии, уменьшить расходы на эксплуатацию, повысить надежность работы оборудования, увеличить срок службы двигателей и механизмов.

Широкое использование частотных преобразователей в нефтепромысловых сетях приводит к существенному отклонению формы напряжения в электрических сетях от синусоидальной. Искажение синусоидальной формы кривой напряжения приводит к увеличению потерь мощности в линиях электропередач, трансформаторах, реакторах и двигателях; сокращению срока службы электротехнического оборудования; высокой вероятности резонанса в электрической сети и выходу из строя батарей статических конденсаторов; сбоем в работе систем релейной защиты и автоматики. Поэтому повышение качества электроэнергии в нефтепромысловых сетях с частотно-регулируемыми электроприводами является актуальной задачей.

Перспективным средством фильтрации высших гармоник являются активные фильтры гармоник (АФГ). При соответствующем законе управления АФГ генерируют управляемые высшие гармоники тока в противофазе с фактическими гармониками токов преобразователей. Это позволяет получить практическую синусоидальную форму тока сети. Кроме того, АФГ может работать в режиме управляемого компенсатора реактивной мощности.

Применение активных устройств фильтрации высших гармонических составляющих потребляемого тока в свою очередь снижает гармонические искажения сетевого напряжения, позволяет, по сравнению с классическими пассивными фильтрами, добиться большей гибкости и стабильности системы.

Важным аспектом проектирования систем электроснабжения с АФГ является правильный выбор параметров АФГ, а также регулирование напряжения емкостного накопительного звена.

С учетом того, что такие устройства являются, по своей силовой части, управляемыми источниками тока с высокой частотой коммутации, активные фильтры генерируют высокочастотные помехи в сеть. Одним из возможных решений снижения передаваемых в сеть высокочастотных помех активными фильтрами гармоник является применение выходных фильтров низких частот. Другим способом снижения передаваемых в сеть высокочастотных помех от АФГ является применение многоуровневых инверторов с соответствующими системами управления.

При проектировании и выборе параметров АФГ необходимо учитывать, что только комплексный подход, учитывающий свойства системы электроснабжения (СЭС) и нелинейных нагрузок, позволит решить задачу проектирования АФГ.

На стадии проектирования, а также в процессе наладки АФГ необходимо иметь имитационные модели АФГ, учитывающие свойства СЭС и нелинейных нагрузок и позволяющие судить о качестве электроэнергии при наличии АФГ.

Проблема проектирования и выбора параметров АФГ является одной из важнейших при создании современных систем с регулируемым электроприводом. Решение этой проблемы возможно только при наличии научно обоснованных технических требований к АФГ.

**Степень разработанности проблемы.** Вопросам оценки эффективности применения разных типов АФГ в распределительных сетях с ЧРЭП для улучшения синусоидальной формы напряжения сети посвящено достаточно много работ. Среди них необходимо выделить работы отечественных ученых: Абрамович, Б.Н., Дед А.В., Довгун В.П., Мещеряков В.Н., Розанов Ю.К., Рябчицкий М.В., Сычев Ю.А., Титов Д.Ю., Хабибулин М.М., Шевырев Ю.В., Янченко С.А. и др.

Выполненный анализ показал, что во многих работах при оценке эффективности применения АФГ в распределительных сетях с ЧРЭП недостаточно изучены вопросы связанные с взаимовлиянием параметров сети, активного фильтра и нелинейных потребителей, возможности применения трехуровневых силовых частей АФ, регулирования напряжения на звене постоянного тока активного фильтра с системой управления, основанной на

теории мгновенной мощности и фазных преобразований, а также вопросы взаимовлияния ЧРЭП и средств повышения качества электроэнергии смежных линий электроснабжения.

**Цель работы:** обоснование параметров АФГ для повышения качества электроэнергии в нефтепромысловых электрических сетях, содержащих электроприводы с частотными преобразователями.

**Идея работы:** установление влияния на качество электроэнергии свойств и особенностей АФГ, системы регулирования напряжения на конденсаторе АФГ, СЭС и нелинейной нагрузки позволит обосновать параметры АФГ, обеспечивающие повышение качества электроэнергии в нефтепромысловых сетях с частотно-регулируемыми электроприводами.

**Задачи исследования.**

1. Создать имитационные модели, позволяющие количественно установить влияние АФГ на суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения и учитывающие наличие системы регулирования напряжения на конденсаторе АФГ, СЭС и нелинейной нагрузки.

2. Установить зависимости, характеризующие влияние на суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения параметров двухуровневого АФГ при учёте свойств и особенностей системы регулирования напряжения на конденсаторе АФГ, СЭС и нелинейной нагрузки.

3. Установить зависимости, характеризующие влияние на суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения параметров трёхуровневого АФГ при учёте свойств и особенностей системы регулирования напряжения на конденсаторе АФГ, СЭС и нелинейной нагрузки.

4. Установить зависимости, характеризующие взаимное влияние смежных ветвей СЭС на суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения, учитывающие наличие в этих ветвях нелинейной нагрузки и АФГ.

5. На основе установленных зависимостей обосновать метод выбора параметров АФГ и регулятора напряжения на конденсаторе АФГ с целью

получения нормативного суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения при наличии ЧРЭП в нефтепромысловых сетях.

#### **Научная новизна результатов исследования.**

1. Созданы имитационные модели, позволяющие установить количественное влияние АФГ на суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения при учёте свойств и особенностей АФГ, системы регулирования напряжения на конденсаторе АФГ, СЭС и нелинейной нагрузки.

2. Установлены зависимости, характеризующие влияние на суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения параметров двухуровневого АФГ, отличающиеся учётом свойств и особенностей системы регулирования напряжения на конденсаторе АФГ, СЭС и нелинейной нагрузки.

3. Установлены зависимости, характеризующие влияние на суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения параметров трёхуровневого АФГ, отличающиеся учётом свойств и особенностей системы регулирования напряжения на конденсаторе АФГ, СЭС и нелинейной нагрузки.

4. Установлены зависимости, характеризующие взаимное влияние смежных ветвей СЭС на суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения и учитывающие наличие в этих ветвях АФГ и нелинейной нагрузки.

#### **Теоретическая значимость работы заключается в:**

- создании имитационных моделей, дающих возможность количественно установить влияние параметров АФГ на суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения и учитывающих свойства и особенности системы регулирования напряжения на конденсаторе АФГ, СЭС и нелинейной нагрузки;

- установлении зависимостей, характеризующих влияние параметров двухуровневого и трёхуровневого АФГ на суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения, отличающихся учётом свойств и особенностей системы регулирования напряжения на конденсаторе АФГ, СЭС

и нелинейной нагрузки и позволяющих обосновать выбор АФГ и регулятора напряжения на конденсаторе АФГ с целью получения нормативного суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения.

**Практическая значимость работы** заключается в:

- создании имитационных моделей для количественной оценки влияния АФГ на суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения с учётом свойств и особенностей АФГ, системы регулирования напряжения на конденсаторе АФГ, СЭС и нелинейной нагрузки, дающих возможность принятия обоснованных решений на этапах проектирования и эксплуатации АФГ;

- в разработке рекомендаций по выбору параметров АФГ с учётом свойств и особенностей системы регулирования напряжения на конденсаторе АФГ, СЭС и нелинейной нагрузки, выполнение которых позволит повысить качество электроэнергии в нефтепромысловых сетях с частотно-регулируемыми электроприводами.

**Методы исследования.** При проведении исследований были использованы методы, которые применяются при имитационном моделировании электрических цепей, электрических машин, силовой полупроводниковой техники, теории автоматического регулирования, систем электроснабжения.

**Научные положения, выносимые на защиту:**

1. Имитационные модели, позволяющие установить количественное влияние параметров АФГ на суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения и учитывающие особенности и свойства системы регулирования напряжения на конденсаторе АФГ, СЭС и нелинейной нагрузки.

2. Зависимости, характеризующие влияние параметров двухуровневого АФГ на суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения, учитывающие особенности и свойства системы регулирования напряжения на конденсаторе АФГ, СЭС и нелинейной нагрузки, позволяющие обосновать выбор параметров двухуровневого АФГ.

3. Зависимости, характеризующие влияние параметров трёхуровневого АФГ на суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения, учитывающие особенности и свойства системы регулирования напряжения на конденсаторе АФГ, СЭС и нелинейной нагрузки, позволяющие обосновать выбор параметров трёхуровневого АФГ.

4. Зависимости, характеризующие взаимное влияние смежных ветвей СЭС на суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения, учитывающие наличие в этих ветвях нелинейной нагрузки и АФГ и позволяющие выбрать параметры АФГ для случая смежных ветвей.

**Степень достоверности результатов.** Сформулированные в диссертационной работе научные положения, выводы и рекомендации подтверждаются: корректным применением теорий электрических цепей, электрических машин, полупроводниковой преобразовательной техники, автоматического регулирования, электроснабжения; анализом литературы по теории и применению АФГ; сравнением и сходимостью результатов имитационного моделирования с результатами измерения аналогичных процессов в распределительных сетях с ЧРЭП, расхождение между которыми не превышает 10%.

**Апробация результатов.** Основные положения работы докладывались и обсуждались на: Международных научных симпозиумах «Неделя горняка» (г. Москва, 2022–2025 гг.), заседаниях научного семинара кафедры «Энергетика и энергоэффективность горной промышленности» НИТУ МИСИС (г. Москва, 2025 г.).

**Реализация выводов и рекомендаций работы.** Имитационные модели, методики выбора параметров активных фильтров гармоник используются в ООО «Электротехническая промышленная компания» при решении задачи повышения качества электроэнергии в распределительных электрических сетях с частотно-регулируемыми электроприводами.

**Публикации.** Результаты исследований, отражены в 3 публикациях, в том числе 2 опубликованы в изданиях, входящих в перечень ВАК Минобрнауки России, получено 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

**Объем и структура диссертационной работы.** Диссертационная работа состоит из введения, 6 глав, заключения, списка литературы из 136 наименований и 2 приложений. Основная часть диссертации изложена на 165 странице, в тексте содержится 106 рисунков и 21 таблица.

## ГЛАВА 1. ПРОБЛЕМЫ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В НЕФТЕПРОМЫСЛОВЫХ СЕТЯХ

### 1.1 Общее состояние нефтедобычи в России

Нефтяная промышленность России — ведущая отрасль российской промышленности, включающая в себя добычу, переработку, производство, транспортировку и сбыт нефтепродуктов.

Нефть является важнейшей статьёй российского экспорта, составляя, по данным за 2021 год, 22 % экспорта в денежном выражении (вместе с нефтепродуктами — 37 %). Кроме того, от уровня цен на нефть и нефтепродукты существенно зависят цены на третий основной компонент экспорта — природный газ.

В 2021 году в России добывалось нефти 9,6 млн баррелей в сутки. Это был второй показательный в мире после США (11,2 млн баррелей в сутки) и близко к показателям Саудовской Аравии (9,1 млн баррелей в сутки) [1].

Согласно данным ОПЕК на конец 2019 года Россия обладает запасами нефти в размере 80 млрд баррелей при этом, занимает седьмое место в мире по запасам нефти после Венесуэлы (304 млрд баррелей), Саудовской Аравии (259 млрд баррелей), Ирана (209 млрд баррелей), Ирака (145 млрд баррелей), Кувейта (102 млрд баррелей), ОАЭ (98 млрд баррелей).

Исходя из современного состояния и перспектив развития нефтяной промышленности в России, собственные разведанные запасы нефти могут обеспечить сырьём эту отрасль в течение 23 лет [2].

Основная часть сырья, в настоящее время, добывается в западной Сибири (рисунок 1.1) (более 61% от всей добычи в России). Так как запасы западной Сибири неограничены ведутся разработки на Урале, Северном Кавказе, Поволжье и Дальнем Востоке. Перспективы роста данной отрасли направлены не только на увеличение объемов добычи нефти, но и на ее переработку.



Рисунок 1.1 - Нефтяные, газовые и нефтегазовые месторождения Российской Федерации

Начиная с 1998 года (164 млн. т) объёмы нефтепереработки в РФ постоянно растут. Исторический максимум за последнее десятилетие был достигнут в 2014 году (295 млн. т). В 2019 году переработка нефти составила 290 млн. т, что существенно ниже пика 1987 года, когда эта цифра достигала 312 млн. т [1].

Тем не менее, начиная с 2015 года, цифра начинает падать, хотя вместе с тем наметилась тенденция к улучшению качества. Так, постепенно повышается глубина переработки нефти. В 2019 году она составила 82,7%, что выше 2018 года на 0,6% [1].

## 1.2 Главные технологические процессы и потребители нефтедобычи

В нефтедобыче технологический процесс осуществляет поэтапно следующие процессы:

- 1) Добыча нефти и попутного газа через нефтедобывающие скважины;
- 2) Прохождение нефти и попутного газа через автоматизированные групповые измерительные установки (АГЗУ), которые отделяют нефть от попутного газа и производят подсчет данного сырья;
- 3) Транспортировка нефти с помощью ДНС (дожимных насосных станций), которые создают необходимое давление в коллекторе;
- 4) Прохождение эмульсии нефти через УПН (установку подготовки нефти) для очистки её крупных примесей и разделения на газ, воду и саму нефть для её транспортировки;
- 5) Очистка от газа, конденсата и прочих вредных примесей, а также прохождение через компрессионные насосные станции (КНС), с помощью которых создается давление необходимого для транспортировки нефти;
- 6) Возврат полученной при очистке эмульсии воды назад в пласт [3].

В настоящее время 50-60% электропотребления на нефтяных месторождениях определяется нагрузкой механизированной добычи нефти. Погружные электроприводные центробежные насосы (ЭЦН), как потребители электроэнергии, отличаются своей спецификой, которая обусловлена конструкцией погружного электродвигателя (ПЭД), его эксплуатацией на значительном удалении от поверхности, переменным характером нагрузки, агрессивностью среды эксплуатации, наличием протяженной кабельной линии и т.д.

Неопределённость в объёмах запасов жидкости и необходимость плавного изменения темпов её отбора обусловили появление систем регулирования частотой вращения центробежного электронасоса – станций управления ПЭД с преобразователями частоты (ПЧ) [4].

Преимущества и целесообразность применения регулируемого привода ЭЦН с точки зрения технологии добычи нефти очевидны. Но ПЧ, особенно

при их массовом применении, вносят искажения в форму кривой тока и питающего напряжения, создавая в сети высшие (т.е. отличные от 50 Гц) гармонические составляющие (ВГС), что приводит к резкому ухудшению качества напряжения в питающей сети [4].

Качество электрической энергии в системе электроснабжения зависит не только от характеристики ПЧ, но и от параметров электрической сети, схемы подключения частотных преобразователей, количества параллельно работающих ПЧ. Существенное влияние на спектральный состав тока и напряжения, а также на амплитудные значения гармонических составляющих оказывают схемы подключения ЭЦН.

Наиболее распространенной для месторождений Западной Сибири являются схемы электроснабжения месторождений с ПС 35/6 кВ в центре нагрузок и достаточно развитой распределительной сетью 6 кВ.

Для месторождений с высокодебитными скважинами и большой электрической нагрузкой кустов скважин применяется распределительная сеть напряжением 35 кВ и размещением ПС 35/6 кВ практически на каждом кусте скважин [4].

Главные потребители электрической энергии при нефтедобыче:

- 1) Погружные нефтяные насосы центробежного типа (ЭЦН);
- 2) Нефтяные насосы - станки качалки;
- 3) Блок боксы насосов при ДНС;
- 4) Установки подготовки нефти (УПС);
- 5) Замерные установки АГЗУ

6) Блоки дозированной подачи реагента (БР) По надежности электроснабжения ГЗУ, ДНС скважины относятся ко II категории, КНС - к III категории [5].

### 1.3 Общие требования к качеству электроэнергии

В Российской Федерации показатели и нормы качества электрической энергии устанавливает ГОСТ 32144-2013. Данный стандарт соответствует европейскому региональному стандарту EN 50160:2010.

Государственный стандарт применяется для систематизированной оценке и регулированию показателей качества электроэнергии. Стандарт регламентирует продолжительные изменения характеристик напряжения и случайные события [7]. К продолжительным параметрам относятся:

- частота и ее допустимые отклонения;
- значение напряжения, его медленное и колебательные отклонения;
- синусоидальность напряжения;
- симметрия напряжения в трехфазных системах;
- напряжение сигналов, передаваемых по электрическим сетям [7].

Случайные события, регламентируемые государственными стандартами:

- Прерывания напряжения;
- Провалы напряжения и перенапряжения;
- Импульсные напряжения [7].

Данные параметры и характеристики электрической энергии нормируются разнообразными регламентами ввиду их высокого влияния на работу электросетей и электроустановок. Например, частота напряжения влияет на угловую скорость синхронных и асинхронных двигателей, прямо включенных в сеть, отклонение этого параметра может в значительной степени влиять на технологический процесс. Стабильный и постоянный во времени уровень напряжения залог надежной работы электросистемы и электробезопасности. Синусоидальность и напряжение сторонних сигналов в промышленной сети, в значительной степени влияет на работу электроприемников, обладающих индуктивным сопротивлением.

В случае с продолжительными отклонениями имеются предпосылки и причины их появления, в отличие от случайных событий предугадать которые,

практически невозможно, но можно защититься при помощи различных электротехнических устройств защиты и автоматики.

#### **1.4 Причины отклонения параметров качества электроэнергии от норм**

Прерывания напряжения могут быть как преднамеренными для проведения запланированного технического обслуживания и ремонта, так и случайными обусловленные разного вида авариями. Прерыванием по ГОСТ 32144–2013 считается снижения уровня напряжения до значения меньше 5% от номинальной величины.

Случайные прерывания напряжения подразделяют на длительные (длительность более 3 мин) и кратковременные (длительность не более 3 мин) [7].

Частым случаем прерывания напряжения являются обрывы линий электропередач, отказ или выход из строя коммутационного оборудования, аварийное отключение линий релейной защитой и автоматикой, как при аварийных ситуациях, так и при ложных срабатываниях РЗиА, серьезные провалы напряжения, связанные с переходными процессами в мощных электроприемниках.

Провалы напряжения и перенапряжения в основном происходят из-за неисправностей в электросетях или в электроприемниках, а также при переходных процессах в электросистемах.

Провалы напряжения по длительности могут достигать 1 минуты. Такой режим работы вреден для многих электроустановок, может приводить к нестабильной работе электроприемников, а также к ложному срабатыванию разнообразной релейной защите и автоматике. Перенапряжения также может приводить к нестабильной работе электроустановок и нарушению технологических процессов, но в основном перенапряжение опасно как фактор старения и нарушения изоляции электросистемы, что может привести к авариям.

Импульсное напряжение в основном вызывается молниевыми разрядами или процессами коммутации в электрической сети или электроприемнике.

Импульсные перенапряжения, вызванные молниевыми ударами, обычно характеризуются большим значением амплитуд при меньшей мощности, нежели импульсы от переходных процессов, ввиду их кратковременности [8].

Продолжительные изменения характеристик напряжения электропитания представляют собой длительные отклонения характеристик напряжения от номинальных значений и обусловлены, в основном, изменениями нагрузки или влиянием нелинейных нагрузок [4]. Все продолжительные отклонения характеристик напряжения имеют установленные стандарты, ограничивающие их максимальные значения.

Одной из основных характеристик переменного напряжения является частота. При этом качество электроэнергии характеризуется отклонением частоты, которое регламентируется государственным стандартом.

$$\Delta f = f_m - f_{nom}, \quad (1.1)$$

где  $f_m$  – значение основной частоты напряжения электропитания, Гц, измеренное в интервале времени 10 с в соответствии с требованиями ГОСТ 32144–2013;  $f_{nom}$  — номинальное значение частоты напряжения электропитания, Гц [9].

Номинальное значение частоты напряжения электропитания в электрической сети равно 50 Гц, при этом установленные следующие нормы качества электроэнергии:

- отклонение частоты в синхронизированных системах электроснабжения не должно превышать  $\pm 0,2$  Гц в течение 95 % времени интервала в одну неделю и  $\pm 0,4$  Гц в течение 100 % времени интервала в одну неделю;

- отклонение частоты в изолированных системах электроснабжения с автономными генераторными установками, не подключенных к

синхронизированным системам передачи электрической энергии, не должно превышать  $\pm 1$  Гц в течение 95 % времени интервала в одну неделю и  $\pm 5$  Гц в течение 100 % времени интервала в одну неделю [9].

Отклонения частот в синхронизированных системах электроснабжения обычно вызваны отклонениями угловых скоростей генераторов на электростанциях, которые в свою очередь колеблются в виду несовершенства систем управления, больших инерционных составляющих и резких перепадов нагрузок в сети [9].

Медленные изменения напряжения сети (продолжительностью более 1 минуты) обуславливаются изменением нагрузки электрической сети [9].

Показателями КЭ, относящимися к медленным изменениям напряжения электропитания, являются отрицательное  $\delta U(-)$  и положительное  $\delta U(+)$  отклонения напряжения электропитания в точке передачи электрической энергии от номинального/согласованного значения, %:

$$\delta U_{(-)} = \left[ \frac{(U_0 - U_{m(-)})}{U_0} \right] \cdot 100; \quad (1.2)$$

$$\delta U_{(+)} = \left[ \frac{(U_{m(+)} - U_0)}{U_0} \right] \cdot 100, \quad (1.3)$$

где  $U_{m(-)}$ ,  $U_{m(+)}$  — значения напряжения электропитания, меньшие  $U_0$  и большие  $U_0$  соответственно, усредненные в интервале времени 10 мин в соответствии с требованиями ГОСТ 30804.4.30, подраздел 5.12;  $U_0$  — напряжение, равное стандартному номинальному напряжению  $U_{nom}$  или согласованному напряжению  $U_c$  [9].

В электрических сетях низкого напряжения стандартное номинальное напряжение электропитания  $U_{nom}$  равно 220 В (между фазным и нейтральным проводниками для однофазных и четырехпроводных трехфазных систем) и 380 В (между фазными проводниками для трех- и четырехпроводных трехфазных систем) [9].

ГОСТ 32144–2013 устанавливает допустимое отклонения уровня напряжения  $\pm 10\%$ . Основными причинами отклонений уровня напряжения от

номинального является изменения параметров электросистемы, то есть изменение реактивных показателей, как нагрузки, так и самой электросети, или изменение активной составляющей нагрузок, при этом изменение уровня напряжения сводится к изменению падений напряжения на узлах электросети [8].

Кроме продолжительных отклонений уровня напряжения от номинально частым случаем, является колебание напряжения (продолжительность меньше 1 минуты) [8].

Обычно одиночные быстрые изменения напряжения не превышают 5 % в электрических сетях низкого напряжения и 4 % — в электрических сетях среднего напряжения, но иногда изменения напряжения с малой продолжительностью до 10%  $U_{nom}$  и до 6 %  $U_c$  соответственно могут происходить несколько раз в день [9].

Такие отклонения вызываются переходными процессами в электросетях и электроустановках.

Частым случаем в трехфазных сетях питания промышленности является несимметрия напряжений разных фазных. Такие режимы обусловлены несимметричными нагрузками потребителей электрической энергии или не симметрией элементов электрической сети.

Показателями КЭ, относящимися к несимметрии напряжений в трехфазных системах, являются коэффициент несимметрии напряжений по обратной последовательности  $K_{2u}$  и коэффициент несимметрии напряжений по нулевой последовательности  $K_{0u}$  [9].

В основном несимметрия напряжения является следствием большого количества однофазных потребителей, которые либо работают постоянно и неравномерно распределены по фазам, либо использование которых не подчиняются каким-то законам [10-16]. Второй случай является частым случаем в электроснабжении жилых домов, деревень, поселков и городов [17].

В конце 20 века стремительно начали развиваться полупроводниковые технологии. С каждым годом пропускная способность электронных ключей

росла, а стоимость устройств, основанных на таких элементах, падала, что привело к широкому распространению полупроводниковых преобразователей в промышленность и быту. Такие устройства имеют нелинейную вольт-амперную характеристику, а доля потребления электроэнергии на предприятиях такими приборами велика и постоянно растет. К числу таких нелинейных нагрузок относятся разнообразные электротехнические комплексы систем частотно регулируемых электроприводов или систем, работающих на постоянном токе [18-21].

В результате потребления из сети несинусоидального тока нелинейными нагрузками, возникают искажения формы напряжения. Большое распространение нелинейных потребителей электрического тока привело к появлению в промышленных сетях предприятий высших гармонических составляющих, которые негативно влияют на работы электросистемы.

Высшие гармонические составляющие – это токи или напряжения частота которых выше частоты основной гармоники переменного тока. Высшие гармоники негативно влияют на коэффициент полезного действия всей электросистемы, вызывая излишний нагрев всех элементов, обладающих индуктивностью, и приводят к нестабильной работе релейной защиты и автоматики. Параллелепипед мощности в сетях с высшими гармониками представлен на рисунке 1.2.

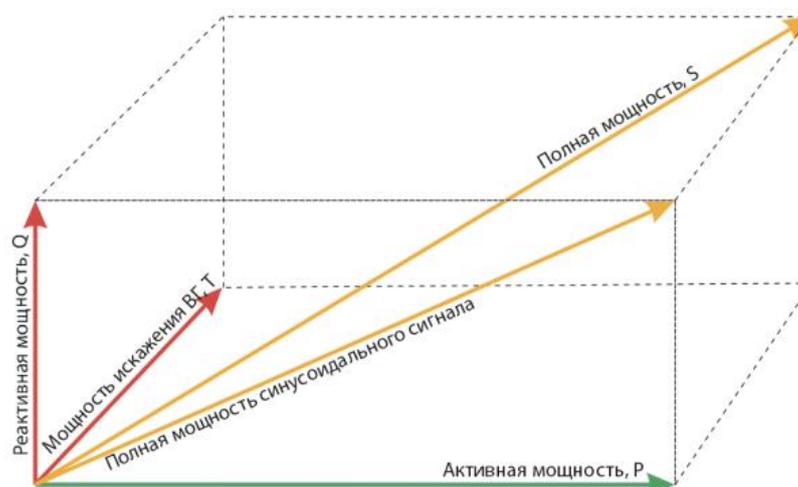


Рисунок 1.2 - Параллелепипед мощности в сетях с высшими гармониками

Как видно из рисунка 1.2, полная мощность, потребляемая из сети, геометрически складывается из полезной (активной) мощности, реактивной мощности, и мощностей искажений высшими гармониками.

Формы тока и напряжения при таких режимах, отличаются от синусоиды. При этом эта форма является суммой основной гармоники питающей сети и высших гармонических составляющих. Так на рисунке 1.3. изображены основная и высшие гармоники и их суммарная форма тока.

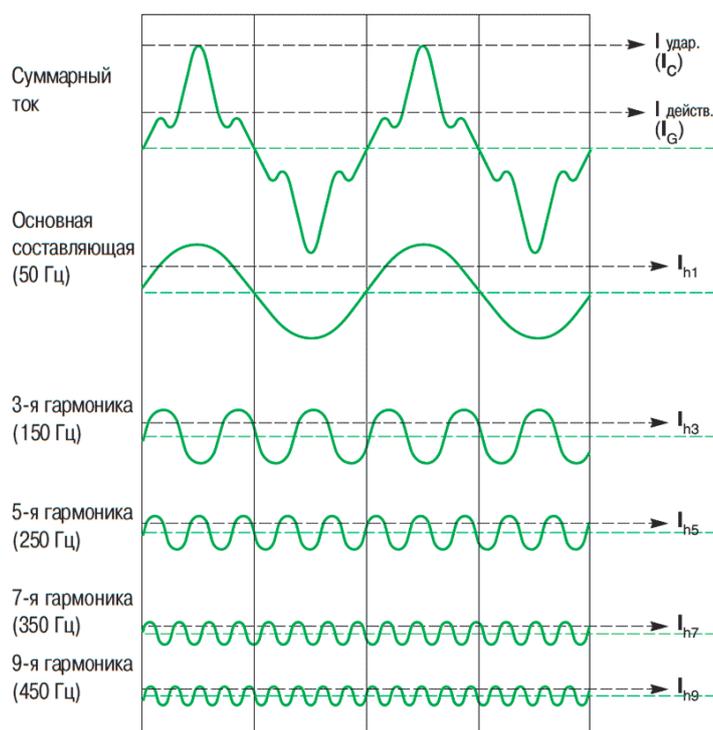


Рисунок 1.3 - Высшие гармоники токов

Токи высших гармоник, протекающие в электрических сетях, создают падения напряжений на полных сопротивлениях электрических сетей, что приводит к появлению высших гармоник напряжения [9]. Следовательно высшие гармоники тока являются первоисточником появления высших гармоник напряжения [22]. Государственные стандарты не нормируют допустимые значения искажений тока, но в ГОСТ 32144–2013 указаны допустимые коэффициенты гармонических искажений напряжений и допустимые коэффициенты отдельных гармонических составляющих при разных уровнях номинального напряжения сети.

Суммарные коэффициент гармонических составляющих ( $K_n$ ,  $K_{Un}$ ) – это параметр, характеризующий отклонение формы напряжения тока или напряжения от идеальной синусоиды. Суммарный коэффициент нелинейных искажений равен отношению среднеквадратичного значения всех высших гармоник к напряжению первой (основной) гармоники.

$$K_n = \frac{\sqrt{U_2^2 + U_3^2 + U_4^2 + \dots + U_n^2}}{U_1}. \quad (1.4)$$

Так как в ГОСТ 32144–2013 указаны так же допустимые значения гармонических искажения от отдельных высших гармоник, то для это используется выражение:

$$K_{Un} = \frac{\sqrt{U_n^2}}{U_1}. \quad (1.5)$$

Абсолютные значения как допустимых значений гармонических составляющих напряжения разных гармонических составляющих, так и суммарные коэффициентов гармонических составляющих напряжения приведены в таблицах 1.1 – 1.4.

Таблица 1.1 - Значения коэффициентов нечетных гармонических составляющих напряжения не кратных трем  $K_U$

Порядок гармонической составляющей n	Значение коэффициентов гармонических составляющих напряжения			
	Напряжения электрической сети, кВ			
	0,38	6–25	35	110–220
5	6	4	3	1,5
7	5	3	2,5	1
11	3,5	2	2	1
13	3	2	1,5	0,7
17	2	1,5	1	0,5
19	1,5	1	1	0,4
23	1,5	1	1	0,4
25	1,5	1	1	0,4
>25	1,5	1	1	0,4

Таблица 1.2 - Значения коэффициентов нечетных гармонических составляющих напряжения кратных трем  $K_U$

Порядок гармонической составляющей n	Значение коэффициентов гармонических составляющих напряжения			
	Напряжения электрической сети, кВ			
	0,38	6–25	35	110–220
3	5	3	3	1,5
9	1,5	1	1	0,4
15	0,3	0,3	0,3	0,2
21	0,2	0,2	0,2	0,2
>21	0,2	0,2	0,2	0,2

Таблица 1.3 - Значения коэффициентов четных гармонических составляющих напряжения  $K_U$

Порядок гармонической составляющей n	Значение коэффициентов гармонических составляющих напряжения			
	Напряжения электрической сети, кВ			
	0,38	6–25	35	110–220
2	2	1,5	1	0,5
4	1	0,7	0,5	0,3
6	0,5	0,3	0,3	0,2
8	0,5	0,3	0,2	0,2
10	0,5	0,3	0,3	0,2
12	0,2	0,2	0,2	0,2
>12	0,2	0,2	0,2	0,2

Таблица 1.4 - Значения суммарных коэффициентов гармонических составляющих напряжения  $K_U$

Значение суммарных коэффициентов гармонических составляющих напряжения			
Напряжения электрической сети, кВ			
0,38	6–25	35	110–220
8	5	4	2

Основными формами воздействия высших гармоник на элементы системы электроснабжения являются:

- увеличение токов и напряжений гармоник вследствие резонанса;

- снижение эффективности процессов генерации, передачи и использования электроэнергии вследствие дополнительных потерь;
  - ускоренное старение изоляции электрооборудования;
  - ложная работа устройств релейной защиты и автоматики;
  - помехи в сетях телемеханики;
- дополнительные погрешности при учете электрической энергии [23-47].

### 1.5 Потери мощности от высших гармоник в элементах систем электроснабжения

Большинство промышленных преобразователей частоты, структурно, схожи друг с другом, и имеют следующее строение (рисунок 1.4):

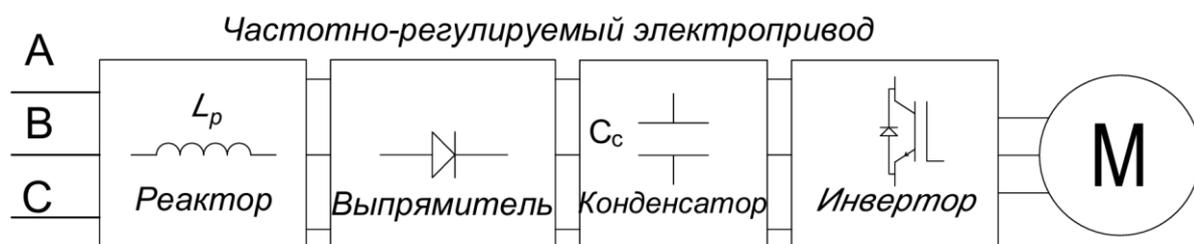


Рисунок 1.4 - Структурная схема преобразователя частоты

Для выпрямления переменного тока в постоянный используется, в основном, трехфазный мостовой выпрямитель (рисунок 1.5). После выпрямления фильтрами сглаживаются пульсации, после чего инвертором формируется по определенным законам переменное напряжение.

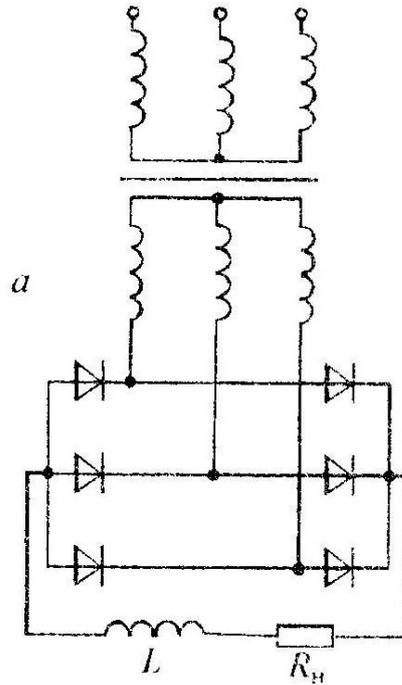


Рисунок 1.5 - Схема трехфазного мостового выпрямителя Ларионова

Данный вид выпрямителя применяется, как для питания потребителей постоянного тока, например, электроприводов постоянного тока, так и входит в состав трехфазных преобразователей частоты.

Так как в такие выпрямители присутствуют диоды, для выпрямления напряжения, ток потребляется из сети не линейно, то есть форма тока, потребляемого из сети, не является синусоидой (рисунок 1.6).

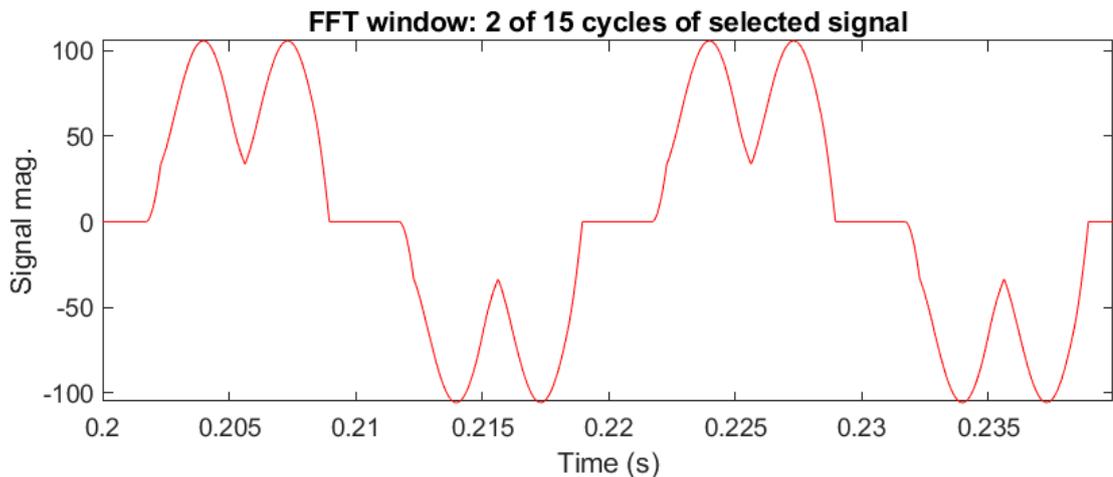


Рисунок 1.6 - Осциллограмма тока фазы «А», в трехфазном мостовом выпрямителе с активно индуктивной нагрузкой.

При таком нелинейном потреблении тока из сети в моменты скачкообразного возрастания тока, на всех элементах электросети, имеющих сопротивления, происходят падения напряжения. При соизмеримых мощностях источника тока и электроприемника, такие падения напряжения имеют существенные амплитуды. Так как скачкообразные возрастания токов имеют периодичный характер и синхронизированы с частотой напряжения, появляются высшие гармоники напряжения, частоты которых кратны частоте основной (номинальной) гармоники.

На рисунке 1.7 показана осциллограмма напряжения одной из фаз при потреблении тока выпрямителем Ларионова, работающим на активно индуктивную нагрузку, мощность которой примерно равна половине от мощности источника тока.

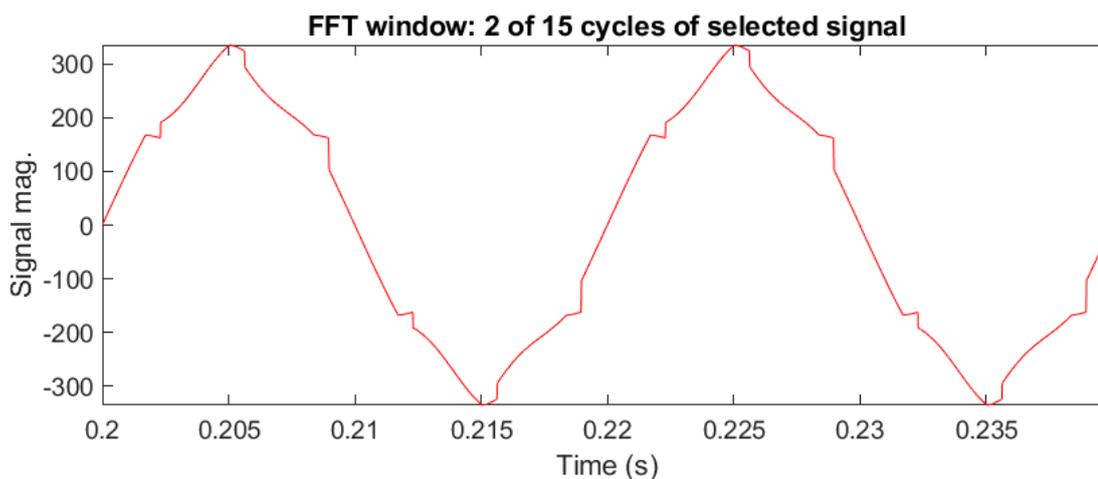


Рисунок 1.7 - Осциллограмма напряжения фазы «А»

При таких параметрах источника и нагрузки коэффициент нелинейных искажений равен 9,29%, что больше допустимых 8 %.

На многих современных предприятиях основную долю от потребляемой мощности занимают нелинейные потребители. При этом без устройств фильтрации и повышения качества электроэнергии, содержание высших гармоник будет выходить за все допустимые пределы.

Для оценки гармонических искажений напряжения и уровня отдельных гармонических его составляющих сложная периодическая форма (рис. 1.6)

напряжения раскладывается на составляющие, основную и высшие гармоники. Для разложения используется преобразование Фурье:

$$x(t) = \sum_{k=1}^{\infty} A_k \sin(k\omega t + \alpha_k), \quad (1.6)$$

где  $x(t)$  – уровень напряжения в момент времени  $t$ ,  $A_k$  – амплитуда  $k$ -ой гармоники,  $\omega$  – угловая скорость  $k$ -ой гармоники в момент времени  $t$ ,  $\alpha_k$  – сдвиг по фазе  $k$ -ой гармоники относительно основной гармоники.

Преобразование Фурье преобразует функцию зависимости уровня напряжения от времени в функцию зависимости амплитуд гармоник от их частоты. Разложение на гармоники напряжение питания выпрямителя Ларионова с мощностью нагрузки равной половине от мощности источника тока, представлено на рисунке 1.8.

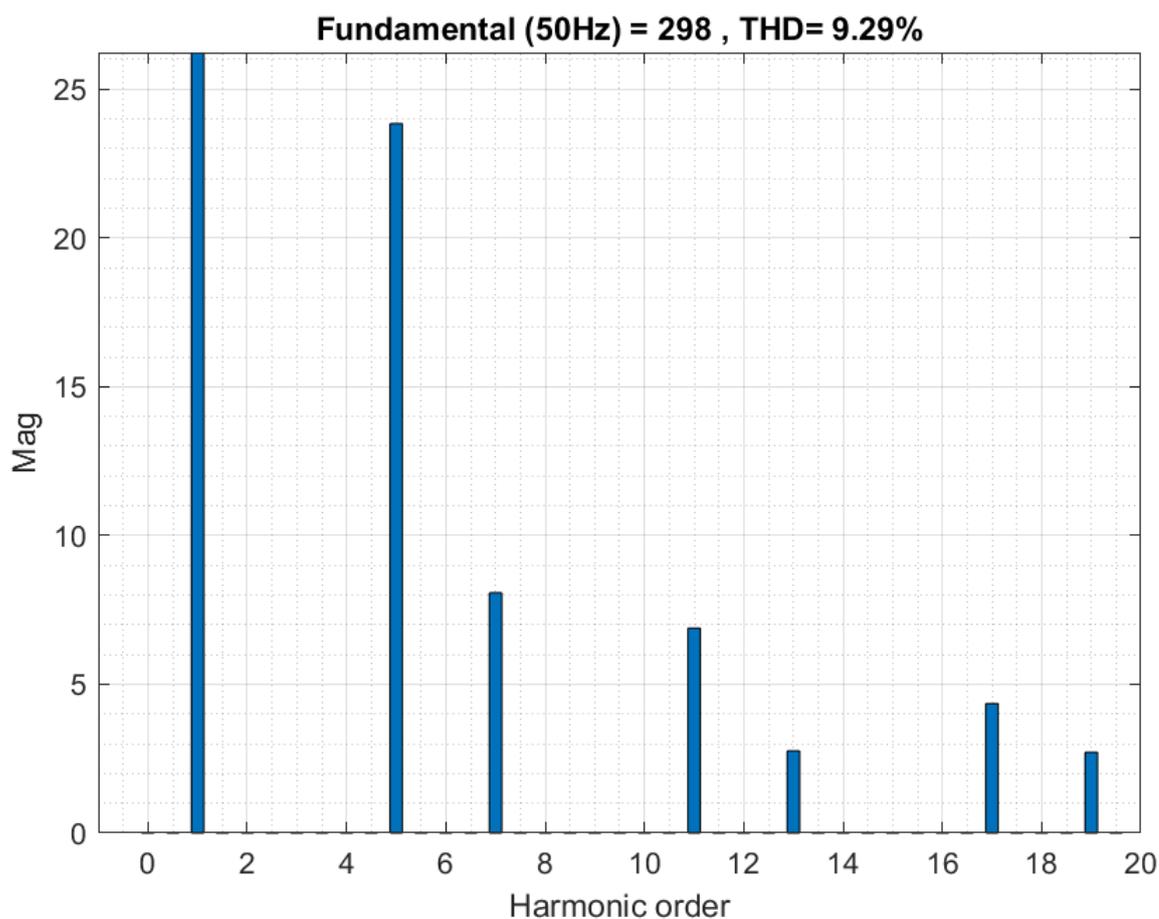


Рисунок 1.8 - Спектр гармонических составляющих напряжения

При значительных гармонических искажениях питающей сети, мощность каждой гармоники потребляется отдельно. Это в значительной степени влияет на элементы электросети, обладающие индуктивным сопротивлением [48].

Дополнительные потери в линиях электропередач, вызванные высшими гармониками:

$$\Delta P_{\Sigma v} = 3 \sum_{v=2}^n I_v^2 R_1 k_{rv}, \quad (1.7)$$

где  $v$  – номер гармоники;  $n$  – число учитываемых гармоник;  $I_v$  – ток  $v$ -ой гармоники;  $R_1$  – активное сопротивление линии на основной частоте;  $k_{rv}$  – коэффициент, учитывающий влияние поверхностного эффекта, как правило, его принимают равным:  $k_{rv} = 0,47\sqrt{v}$  [48].

Дополнительные потери в электрических машинах разделяются на основные и дополнительные. Основные потери обусловлены основными электромагнитными и механическими процессами, происходящими в машине. К этим потерям относятся потери в меди обмоток и потери на намагничивание сердечника, а также механические потери [48].

Дополнительные потери в синхронных двигателях равны:

$$\Delta P_{\Sigma v} = \sum_{v=2}^n \Delta P_{M(v)} + \sum_{v=2}^n \Delta P_{cm(v)} + \sum_{v=2}^n \Delta P_{m(v)}, \quad (1.8)$$

где  $\sum_{v=2}^n \Delta P_{M(v)}$  – дополнительные потери в меди;  $\sum_{v=2}^n \Delta P_{cm(v)}$  – дополнительные потери в стали;  $\sum_{v=2}^n \Delta P_{m(v)}$  – мощность, идущая на преодоление тормозного момента [48].

Дополнительные потери в меди:

$$\sum_{v=2}^n \Delta P_{M(v)} = I_{\Pi}^2 \Delta P_k \sum \left( \frac{U_v}{U_{\text{ном}}} \right)^2 \frac{\sqrt{v} + k' \sqrt{v \pm 1}}{v^2}, \quad (1.9)$$

где  $I_{\Pi}$  – кратность пускового тока при номинальном напряжении основной частоты;  $\Delta P_k$  – потери короткого замыкания;  $U_v$  – действующее значение  $v$ -

ой гармоники;  $k' = \frac{R'_2}{R_1}$  – отношение эквивалентного сопротивления ротора к сопротивлению статора. Знак «+» в подкоренном выражении соответствует симметричным составляющим гармоник, вращающимся против вращения поля основной гармоники, знак «-» - симметричным составляющим, вращение которых совпадает с вращением поля основной гармоники [48].

Дополнительные потери в стали равны:

$$\sum_{v=2}^n \Delta P_{cm(v)} = \Delta P_{cm.ном} \sum \left( \frac{U_v}{U_{ном}} \right)^2 \frac{1}{v^{0,7}}, \quad (1.10)$$

где  $\Delta P_{cm.ном}$  – номинальные потери в стали двигателя при номинальном напряжении  $U_{ном}$  [48].

$$\sum_{v=2}^n \Delta P_{m(v)} = \Delta P_{ном} \sum \left( \frac{U_v}{U_{ном}} \right)^2 \frac{M_{п}}{M_{ном}} \frac{1}{v^2 \sqrt{v \pm 1}}, \quad (1.11)$$

где  $M_{п}$  и  $M_{ном}$  – пусковой и номинальный моменты синхронного двигателя [48].

Дополнительные потери для асинхронных двигателей, обусловленные несинусоидальностью, определяются из выражения:

$$\Delta P_{\Sigma v} = \Delta P_{m1.ном} I_{п}^2 \sum \left( \frac{U_v}{U_{ном}} \right)^2 \frac{\sqrt{v} + \sqrt{v \pm 1}}{v^2}, \quad (1.12)$$

где  $\Delta P_{m1.ном}$  – потери в меди статора при номинальном токе основной частоты; знак «+» под знаком корня соответствует симметричным составляющим гармоник, создающим поля вращения, встречные полю основной гармоники, а знак «-» - попутные [48].

Потери мощности от высших гармоник в силовых трансформаторах выражаются формулой:

$$\Delta P_{\Sigma v} = 3 \sum_{v=2}^n I_v^2 R_{к1} k_{vm}, \quad (1.13)$$

где  $I_v$  – ток  $v$ -ой гармоники, гармоники, проходящей через трансформатор;  $R_{к1}$  – сопротивление короткого замыкания трансформатора на основной

частоте;  $k_{vm}$  – коэффициент учитывающий увеличение сопротивления короткого замыкания для высших гармоник вследствие влияния поверхностного эффекта и эффекта близости. Для силовых трансформаторов можно принять  $k_{5m} = 2,1$ ;  $k_{7m} = 2,5$ ;  $k_{11m} = 3,2$ ;  $k_{13m} = 3,7$  [48].

Дополнительные потери от высших гармоник возникают также в батареях конденсаторов и фильтрокомпенсирующих установках, которые находятся по формуле:

$$\Delta P_{\Sigma \text{ диэл}} = \omega \sum_{v=2}^n U_v^2 v \operatorname{tg} \delta_v C, \quad (1.14)$$

где  $U_v$  – напряжение  $v$ -ой гармоники;  $C$  – электрическая емкость конденсаторной установки;  $\omega$  – угловая частота;  $\operatorname{tg} \delta_v$  – тангенс угла потерь диэлектрика на  $v$ -ой гармоники [48].

Значение  $\operatorname{tg} \delta_v$  при частоте до 1000 Гц можно принять равным номинальному значению, а в диапазоне частот от 1000 до 3000 Гц значение  $\operatorname{tg} \delta_v$  возрастает примерно в 1,5 раза, при этом емкость конденсаторов в этом диапазоне частот можно считать постоянным и равным номинальному значению [48].

## 1.6 Анализ систем электроснабжения участков нефтедобычи

Исследования энергетических показателей систем электроснабжения нефтедобычного производства рассматриваются на примере системы электроснабжения района нефтедобычи, включающего в себя несколько кустов скважин, так как в основном схемы электроснабжения нефтедобычных районов имеют одинаковые принципы построения. Поэтому результаты исследования можно распространить и на другие районы добычи нефти в России [49-51].

Схема линии электроснабжения «Талая 1» нефтедобычи от ПС «Озерная» представлена на рисунке 1.9. Подстанция «Озёрная» понижает напряжение с уровня 110 кВ до необходимых для распределения 35 кВ и 6 кВ. Для этого используются два понижающих силовых трехобмоточных трансформатора мощностью каждый по 25 МВА. Таким образом потребители, находящиеся на небольшом удалении, питаются с шин 6 кВ, а на удаленные кусты скважин идут воздушные линии электропередач напряжением 35 кВ.

Ввиду высоких электрических нагрузок на каждом кусте скважин размещаются понизительные подстанции 35/6 кВ [23].

Для примера и дальнейшего исследования используется схема электроснабжения КУСТ 291 бис (рисунок 1.10). Данная схема понижает и распределяет напряжение с 35 кВ до необходимых для питания потребителей добычи нефти 0.4 кВ в два этапа. Первой ступенью выступает понизительная подстанция 35/6 кВ, второй расположенной непосредственно вблизи скважины 6/0.4 кВ. К каждой скважине используется свой понизительный трансформатор мощностью 1 МВА [23].

Такие схемы электроснабжения, обусловлены тем, что нефтедобыча, для максимального извлечения полезного материала, предполагает множество скважин на большом удалении друг от друга. Для таких задач является целесообразным использовать длинные линии передач, при этом напряжение этих линий должно быть максимально возможным, для снижения потери в линиях.

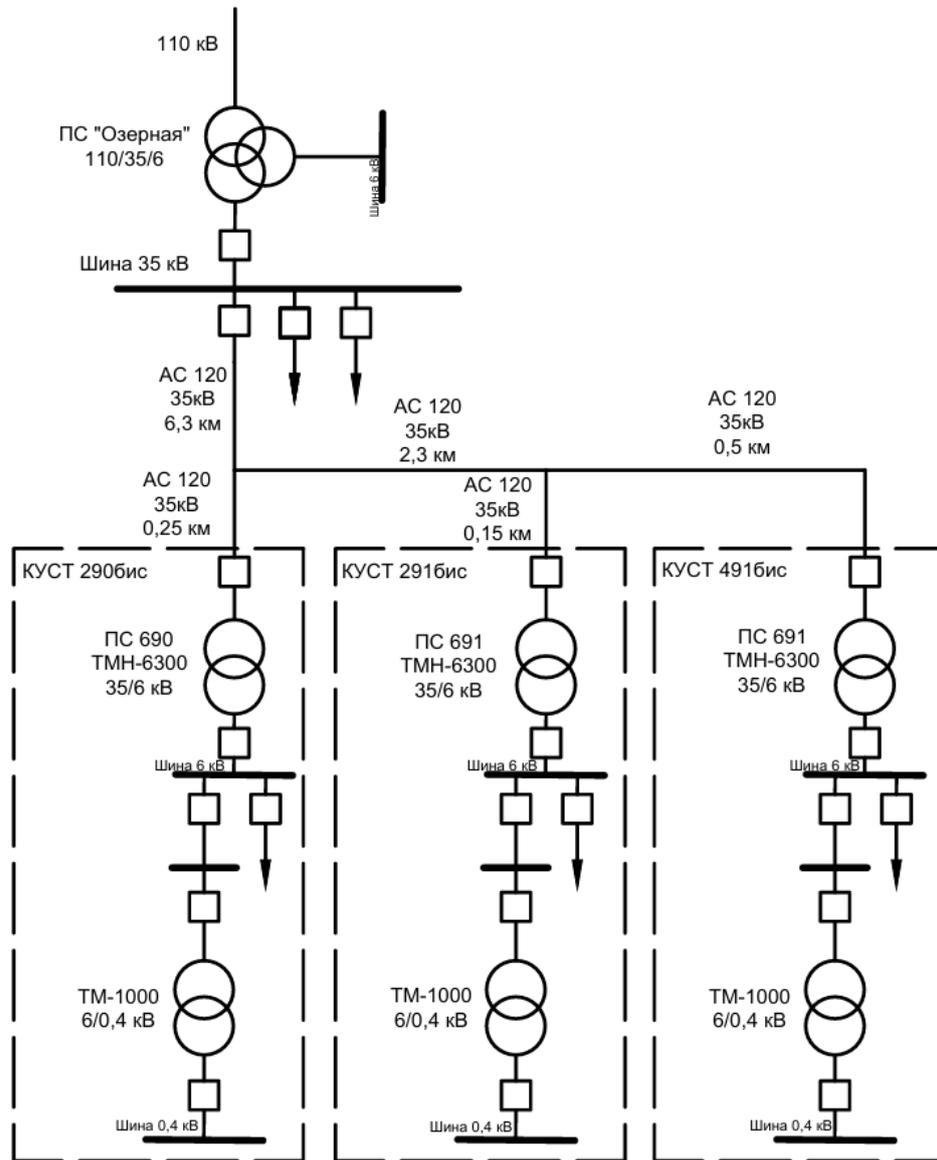


Рисунок 1.9 - Схема электроснабжения района нефтедобычи от ПС  
Озерная

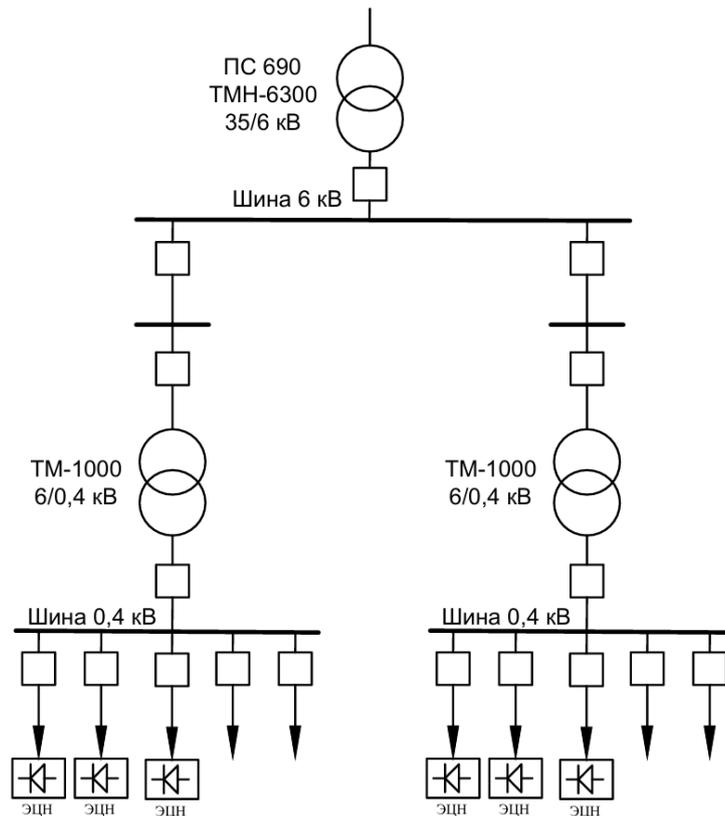


Рисунок 1.10 - Схема электроснабжения КУСТ 291бис

Как видно из схемы электроснабжения куста, основными потребителями такой промышленности являются электроцентробежные насосы. Такие насосы питаются либо от частотного преобразователя напрямую, либо через повышающий трансформатор.

Применения преобразователей частоты для каждой скважины является целесообразным решением с точки зрения автоматизации и регулирования всеми технологическими процессами добычи. Но такие технические решения приводят к искажению формы питающего напряжения вследствие нелинейного потребления тока преобразователями частоты. Ввиду протекания высших гармоник тока через трансформаторы и кабельные линии, возникают дополнительные потери.

Инструментальные исследования качества электроэнергии, выполненные сотрудниками ООО «Электротехническая промышленная компания» на Приобском месторождении ООО «РН-Юганскнефтегаз» показывают высокий уровень несоответствия ПКЭ с допустимыми. Необходимо отметить, что

применение батарей статических конденсаторов в таких сетях приводит существенному ухудшению ПКЭ, что повышает необходимость применения устройств повышения ПКЭ [23].

Ниже приведены основные результаты исследований качества электроэнергии, выполненные сотрудниками ООО «Электротехническая промышленная компания» на Приобском месторождении ООО «РН-Юганскнефтегаз» [23].

**Исследование параметров качества электроэнергии на сборных шинах 6кВ понизительной станции 35/6 кВ [20].** Измерения ПКЭ на сборных шинах 6кВ ПС 35/6 кВ мощностью 6300 кВА проводились при отключенных батареях статических конденсаторов [23].

Форма напряжения на сборных шинах 6 кВ и тока на вводе РУ-6 кВ показаны на рисунках 1.11 и 1.12 Из графиков видно, что форма напряжений и токов на вводах РУ-6 кВ существенно искажена [23].

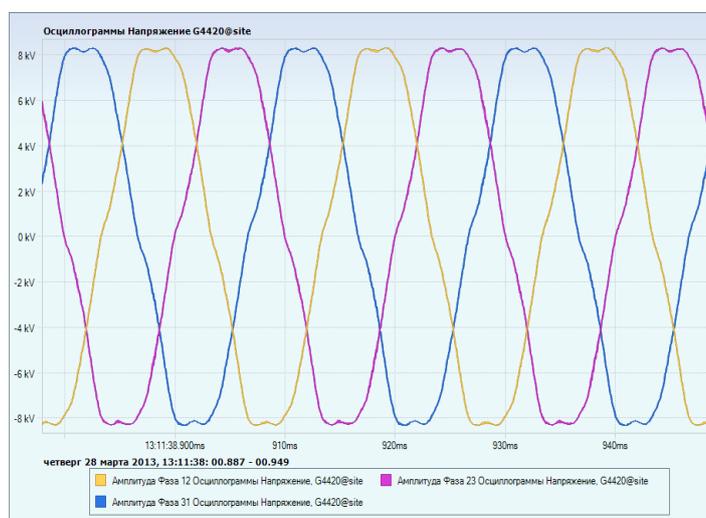


Рисунок 1.11 - Форма напряжения на сборных шинах 6 кВ

Гармонический анализ показал, что в спектре напряжения и тока в сетях 6 кВ ярко выражены 5-я, 7-я, 11-я и 13-я гармоники, а также нечетные гармоники более высокого порядка, что характерно для нелинейной нагрузки в виде станций управления с преобразователями частоты.

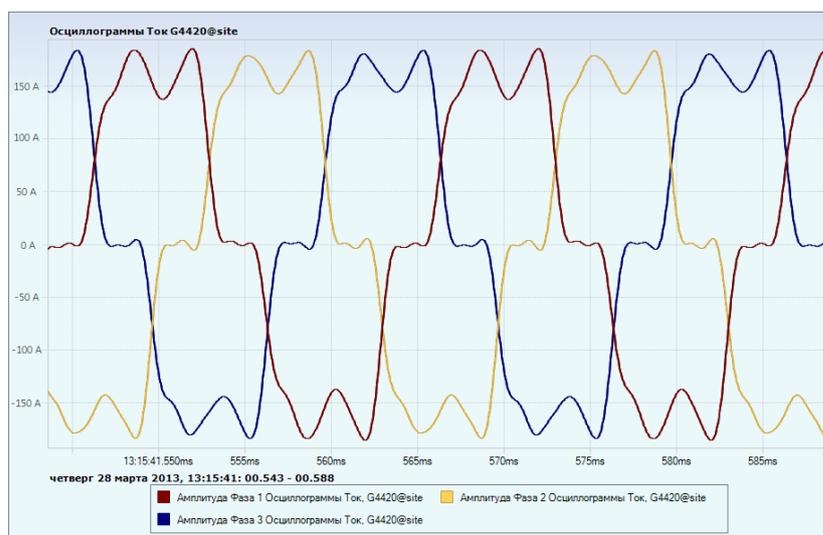


Рисунок 1.12 - Форма тока на вводе РУ-6 кВ

Результаты измерений коэффициентов искажения синусоидальности кривых напряжения  $K_u$  и тока  $K_i$ , приведенные в таблице 1.5, показывают, что значения нелинейных искажений напряжения в сетях 6 кВ превышают допустимый по ГОСТ 32144-2013 уровень, который составляет 5% [23].

Таблица 1.5 - Результаты измерений ПКЭ на сборных шинах 6 кВ ПС 35/6 кВ

№ куста	№ ввода	Ток ввода, А	Напряжение, кВ	$K_i$ , %	$K_u$ , %	Коэф. мощн.
287	1	52	6,2	19	6,1	0,97
	2	99	6,2	59	9,7	0,86

При этом после включения батарей статических конденсаторов, на подобных соседних кустах, коэффициент мощности становится емкостным и равным 0,86. Также после включения конденсаторных установок, предусмотренных проектом, коэффициенты искажения синусоидальности кривых тока и напряжения на вводе составили 52% и 9,7% соответственно [23].

Для уточнения причин существенного увеличения искажений синусоидальности кривых тока и напряжения на понизительной подстанции 35/6кВ измерения были проведены повторно, при этом БСК была временно выведена из работы [23].

При отключении батарей статических конденсаторов существенно снизились коэффициенты искажения синусоидальности кривых тока и напряжения. Так, после отключения БСК коэффициент искажений напряжения составил 6,7%, а коэффициент искажений тока понизился с 52% до уровня 20%. Это привело к улучшению формы напряжения и тока на вводе РУ-6 кВ по сравнению со случаем, когда батарея статических конденсаторов включена (рисунки 1.13 и 1.14) [23].

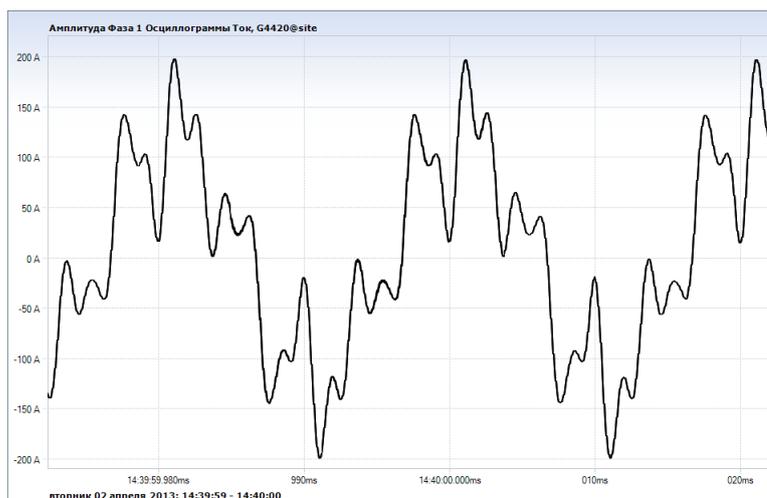


Рисунок 1.13 - Форма тока на вводе РУ-6кВ при включенной БСК

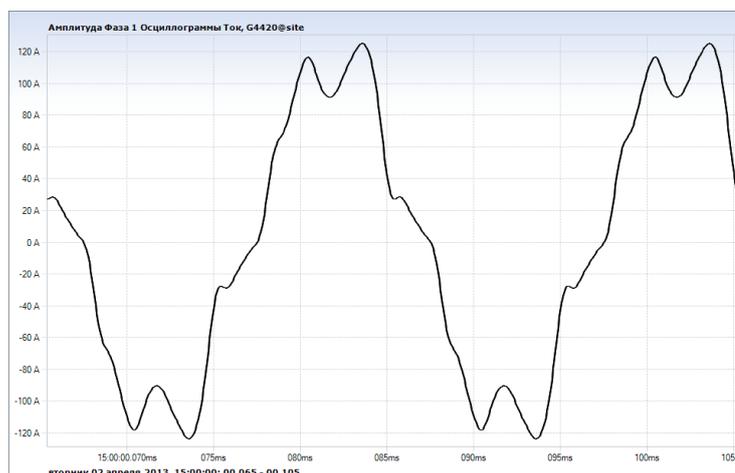


Рисунок 1.14 - Форма тока на вводе РУ-6кВ при отключенной БСК

Анализ содержания высших гармоник в кривых тока и напряжения показывает, что при отключении БСК уровень 5-й гармоники снизился в 2,5 раза, 11-й гармоники почти в 7 раз. Данные показатели говорят о том, что в

системе с включенной конденсаторной установкой создаются благоприятные условия для развития параллельного резонанса токов в системе «БСК – система электроснабжения – частотно регулируемый привод» на частотах, близких к пятой и седьмой гармоникам [23].

Параллельный резонанс токов в системе «БСК – система электроснабжения – частотно-регулируемый электропривод» может привести к выходу из строя БСК, вызвать сбои в работе систем релейной защиты и автоматики, сократить срок службы силовых трансформаторов и кабелей [23].

Приведенное исследование полностью раскрывает недостатки пассивных устройств компенсации и коррекции параметров качества электроэнергии [23].

#### **Исследование параметров качества электроэнергии на вводах РУ-0.4 кВ КТПН-6/0.4 кВ [20].**

Измерения ПКЭ на вводах РУ-0.4 кВ КТПН-6/0.4 кВ проводились на кустах №291бис., результаты измерения приведены в таблице 1.6.

Таблица 1.6 - Результаты измерений ПКЭ на сборных шинах 0,4 кВ ПС 6/0,4 кВ

№ куста	№ ввода	Ток ввода, А	Напряжение, кВ	K <sub>i</sub> , %	K <sub>u</sub> , %
287	1	660	407	29	11
	2	327	407	20	8,5
	3	245	405	23	6,5

Анализ результатов, приведенных в таблице 1.6, показывает, что уровень нелинейных искажений формы напряжения на сборных шинах КТПН-6/0,4 кВ превышает нормально допустимый по ГОСТ 32144–2013. Искажения ещё больше возрастают, если на сборные шины 6 кВ включены БСК-6 кВ [23].

## 1.7 Анализ основных существующих типов, структур и систем управления фильтро-компенсирующих устройств

Снижение гармонических составляющих сети может обеспечиваться как изначальным построением системы электроснабжения мощных нелинейных потребителей с учетом их возможного влияния на сеть, так и использованием специальных средств, схем и устройств корректировки параметров качества электроэнергии.

К индивидуальным системным способам снижения гармонических составляющих можно отнести применение 12-пульсных выпрямителей, схема которого показана на рисунке 1.15.

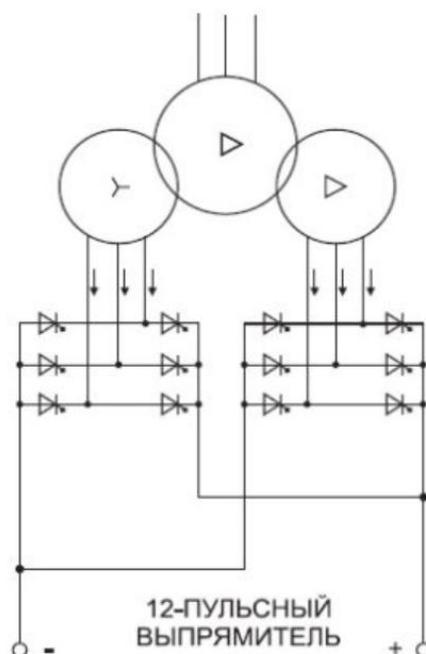


Рисунок 1.15 - Схема двенадцатипульсного выпрямителя

Также немалую роль влияет наличие и параметры реактора в сети перед нелинейными потребителями. Большая индуктивность в цепи питания нелинейных потребителей сглаживает резкие скачки тока, что обеспечивает меньшее влияние таких потребителей на сеть.

Существующие средства фильтрации высших гармоник можно разделить на пассивные и активные, а также системы, в которых оба эти типа

работают совместно для достижения наибольшего эффекта. На рисунке 1.16 перечислены виды фильтров повышения КЭ.

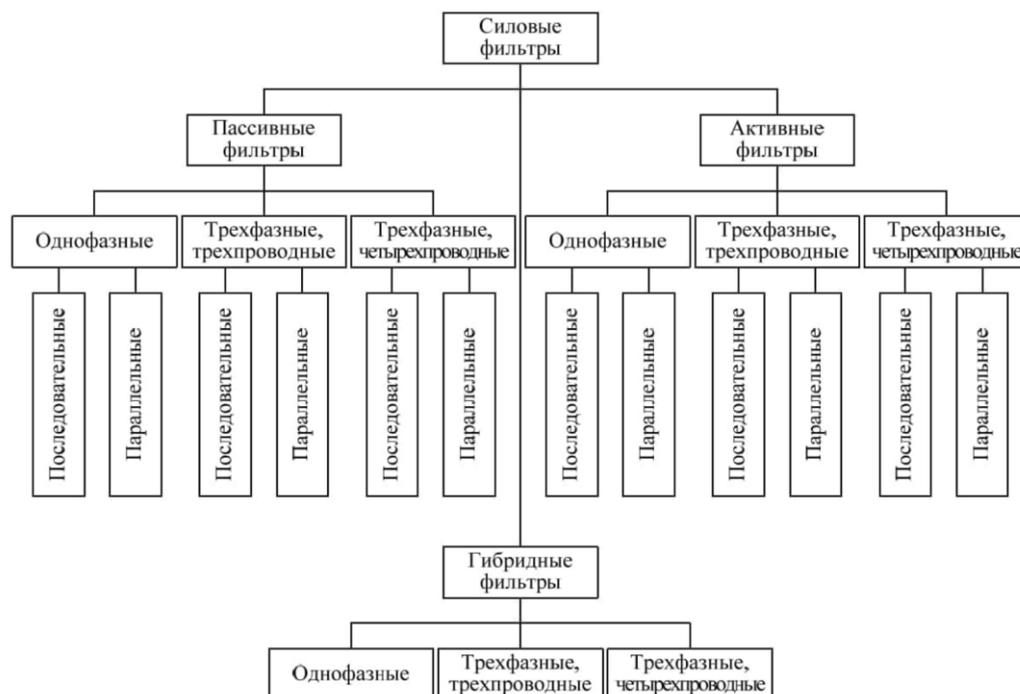


Рисунок 1.16 - Виды фильтров для повышения качества электроэнергии

Все виды систем для фильтрации высших гармоник подразделяются на типы в зависимости от необходимых целей, которые они должны выполнять. Так пассивные, активные и гибридные фильтрокомпенсирующие устройства разделяются на непосредственно включаемые в цепь (последовательно) или подключаемые параллельно нагрузке. Немалую роль при выборе ФКУ имеет количество фаз и проводников.

### 1.8 Пассивные фильтры высших гармоник

Пассивные фильтры (ПФ) являются традиционным и наиболее распространенным методом коррекции гармонических составляющих нелинейных потребителей электроэнергии. Схема пассивного фильтра высших гармоник состоит из активных, индуктивных и емкостных элементов, соединенных определенным образом [14]. Параметры таких цепей

выбираются из условия образования резонанса с частотой компенсируемой гармоники.

Емкостное сопротивление контура фильтра:

$$X_c = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C} = \frac{1}{\omega \cdot C}, \quad (1.15)$$

где  $f, \omega$  – частота и угловая скорость фильтруемой гармоники,  $C$  – емкость конденсатора.

Индуктивное сопротивление:

$$X_L = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L = \omega \cdot L, \quad (1.16)$$

где  $f, \omega$  – частота и угловая скорость фильтруемой гармоники,  $L$  – индуктивность реактора.

Модуль комплексного сопротивления:

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2} = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} = \sqrt{R^2 + \left(\omega \cdot L - \frac{1}{\omega \cdot C}\right)^2}. \quad (1.17)$$

При этом ток протекаемый через такую цепь будет равен:

$$I = \frac{U}{\sqrt{R^2 + X^2}} = \frac{U}{\sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}} = \frac{U}{\sqrt{R^2 + \left(\omega \cdot L - \frac{1}{\omega \cdot C}\right)^2}}. \quad (1.18)$$

Схема узкополосного фильтра высших гармоник, настроенного на подавление отдельной одной гармоники, включенного в сеть параллельно, представлена на рисунке 1.17.

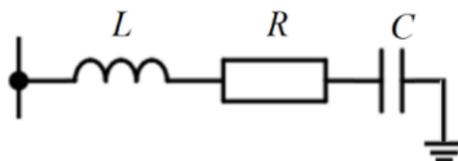


Рисунок 1.17 - Узкополосный фильтр высших гармоник

В такой схеме уровень тока, а, следовательно, и эффективность фильтрации, будет максимальным при равенстве:

$$X_c = X_L = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f_0 \cdot C} = 2 \cdot \pi \cdot f_0 \cdot L, \quad (1.19)$$

где  $f_0$  – резонансная частота фильтра.

$$f_0 = \frac{1}{2 \cdot \pi \sqrt{L \cdot C}}. \quad (1.20)$$

Расчетными параметрами пассивных фильтров являются реактивная мощности  $Q_{PF}$ , частота настройки  $f_0$ , значение добротности  $Q$  [14]. Добротность – величина во сколько раз запасы энергии в фильтре, чем потери энергии за один период колебаний, для схемы (рисунок 1.17) равна:

$$Q = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}}. \quad (1.21)$$

В дополнение к фильтрации высших гармоник пассивные фильтры гармоник обеспечивают компенсацию реактивной мощности, которая равна:

$$Q_c = \frac{U^2}{X_c}. \quad (1.22)$$

За счет компенсации реактивной мощности снижается потребление электроэнергии, а также нагрузка с трансформаторов, линий электропередач, и других составляющих электросистемы, что позволяет дополнительно нагрузить их дополнительной полезной нагрузкой и продлевает срок службы оборудования.

Существуют схемные решения соединения RLC элементов для фильтрации широкой полосы частот, некоторые из таких схем представлены на рисунке 1.18.

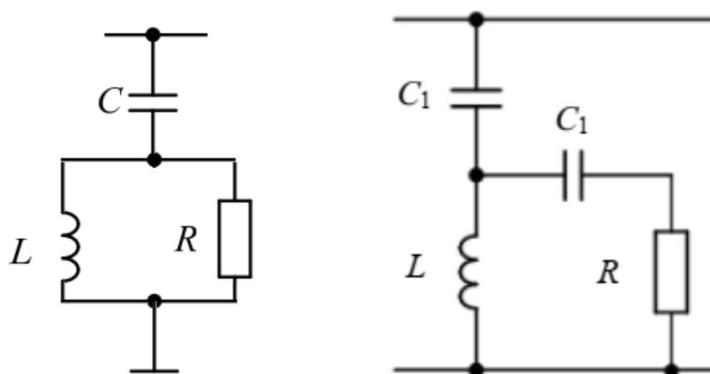


Рисунок 1.18 - Широкополосные фильтры гармоник второго (слева) и третьего (справа) порядка

Широкополосные фильтры высших высших гармоник являются более универсальным решением для промышленности ввиду компенсации сразу нескольких гармонических составляющих, и при появлении дополнительных помех в сети при модернизации производства или изменении технологических процессов отсутствует необходимость в дополнительных затратах на новые узкополосные фильтры. Но существенным недостатком таких схематических решений являются большие потери электроэнергии по сравнению с узкополосными фильтрами.

Пассивные фильтры повышают качество электроэнергии, позволяя использовать большое количество нелинейных потребителей и снижают потребление электроэнергии, компенсируя реактивную мощность. Эти качества и дешевизна их установки и обслуживания делают такие устройства очень востребованными. Однако, наряду с положительными качествами, пассивные фильтра имеют существенные недостатки. При проектировании систем электроснабжения с пассивными фильтрами необходимо тщательно анализировать сеть для точного расчета и выбора таких устройств. Другим недостатком ПФ является отсутствие гибкости, то есть при увеличении или изменении характера гармонических искажений пассивные фильтры могут выходить из строя или быть не эффективными.

### 1.9 Активные фильтры гармоник.

Кроме традиционных средств и способов повышения качества электроэнергии в виде пассивных фильтров, в последнее время, вследствие развития силовых полупроводниковых технологий, все большее распространение получают устройства коррекции параметров электроэнергии, основанные на активных преобразователях. Такие устройства (активные фильтры гармоник) представляют собой автономные инверторы (схема которого приведена на рисунке 1.19) со звеном накопления энергии, благодаря быстродействующей системе управления и высокой пропускной способности силовых ключей на основе IGBT, IGCT, IEGT, GTO и GCT, данные системы успешно справляются не только с нивелированием высших гармоник, но и существенно могут компенсировать реактивную мощность, потребляемую промышленностью [52-74].

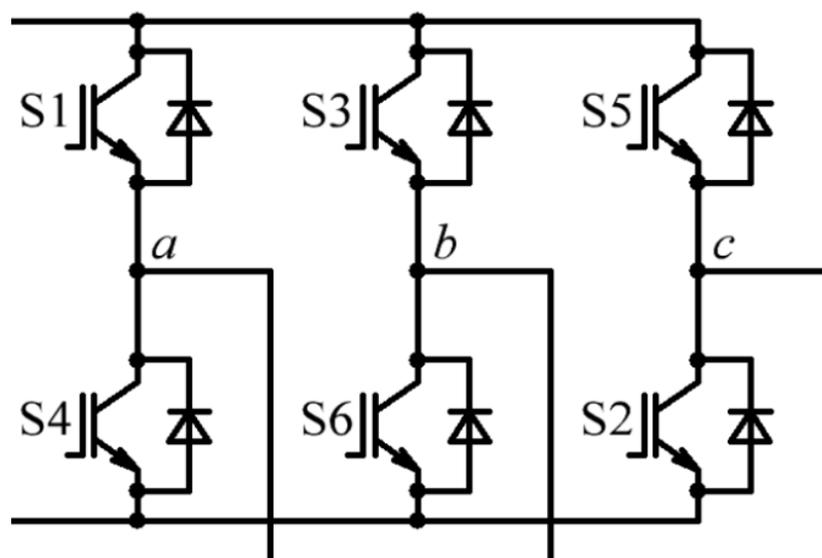


Рисунок 1.19 - Схема автономного инвертора

Для управления инвертором в активных фильтрах гармоник используются простые алгоритмы, для которых измеряется напряжение и ток потребителя, и сравнивается с заведомо идеальным током и напряжением с учетом компенсации реактивной мощности.

Этапы работы системы управления активными фильтрами гармоник для снижения высших гармонических составляющих:

1. Измерение токов и напряжений;
2. Выделение негативных гармонических составляющих;
3. Вычисление требуемого компенсируемого тока;
4. Формирование сигналов управления на инвертор.

Активные фильтры при необходимости могут обеспечивать:

- Компенсацию негативных высших гармоник напряжения и тока сети;
- Повышения коэффициента мощности предприятия;
- Корректировку и стабилизацию напряжения при кратковременных отклонениях;
- Снижение падений напряжений при резком изменении характера или мощности нагрузки;
- Снижение резонансных явлений в электросистеме предприятия.

В отличие от пассивных устройств коррекции параметров электроэнергии активные фильтры гармоник не нуждаются в точном анализе системы электроснабжения и потребителей. Активные фильтры гармоник обладают гибкостью настраиваемых параметров, а также лишены такого недостатка пассивных фильтров, как резонансы в электросистеме при изменении характера или мощности нагрузки и параметров системы электроснабжения и обладают более высоким КПД.

Все активные фильтры гармоник (АФГ) можно классифицировать по следующим признакам:

- число фаз;
- тип накопительного элемента;
- способ включения в сеть;
- топология инвертора;
- способ вычисления компенсационного тока;
- система управления инвертором.

По числу фаз активные фильтры гармоник можно разделить на однофазные, трехфазные и трехфазные с нулевым проводником. В основном в

промышленности используются трехфазные системы электроснабжения и трехфазные потребители, поэтому трехфазные устройства коррекции параметров качества электроэнергии получили наибольшее распространение. Трехфазные фильтры с нулевым проводником применяются в том случае если на производстве применяются однофазные нелинейные потребители.

В зависимости от принципа накопления электроэнергии для работы инвертора АФГ делятся на устройства с индуктивным звеном накопления энергии  $L_d$  (рисунок 1.20) при котором инвертор становится источником тока, и системы с емкостными звеньями накопления энергии  $C_d$  (рисунок 1.21), в этом случае инвертор является источником напряжения, а силовая часть активного фильтра мало отличается от схемы автономного инвертора напряжения.

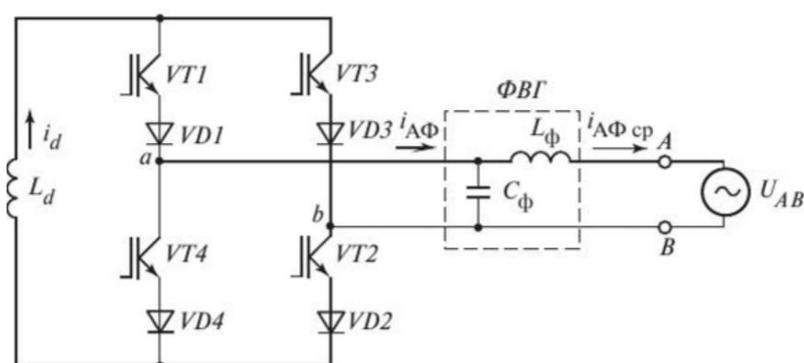


Рисунок 1.20 - Принципиальная схема силовой части активного фильтра гармоник с индуктивным звеном накопления энергии

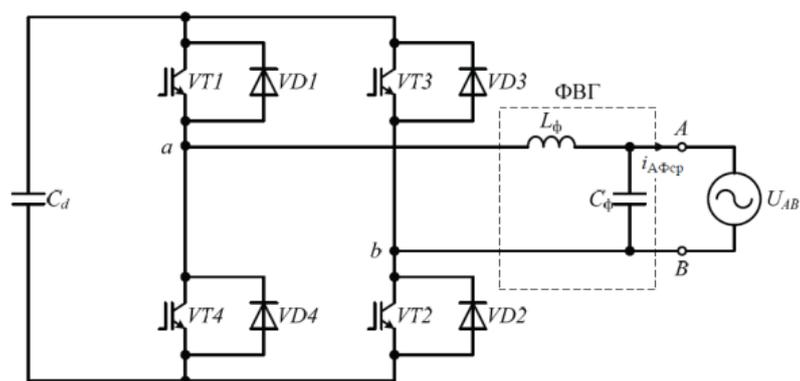


Рисунок 1.21 - Принципиальная схема силовой части активного фильтра гармоник с емкостным звеном накопления энергии

Различают последовательное и параллельное включение активных фильтров с нагрузкой. Для включения в цепь активных фильтров последовательно с потребителями используются согласующие трансформаторы (рисунок 1.22), такие решения позволяют использовать активные фильтры для коррекции параметров качества электроэнергии в сетях высокого напряжения, но так как согласующие или повышающие трансформаторы имеют сопротивление при такой схеме, возникают дополнительные потери. При последовательном подключении активного фильтра компенсация высших гармонических составляющих (ВГС) напряжения осуществляется за счет источника дополнительной ЭДС, функцию которого выполняет фильтр [14].

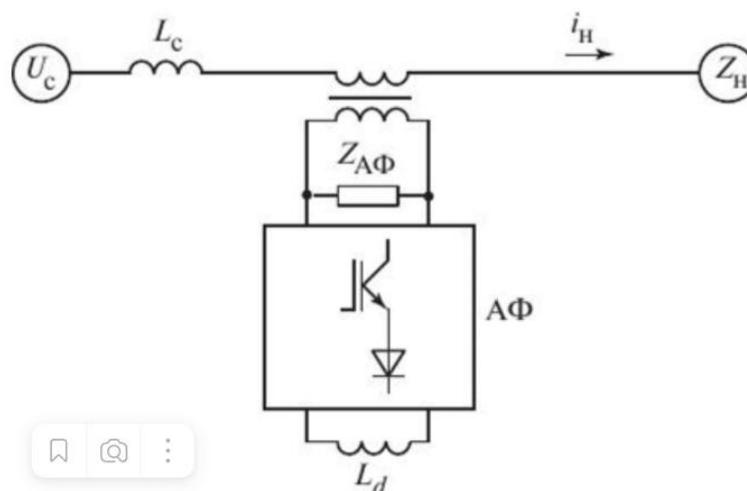


Рисунок 1.22 - Структурная схема последовательного подключения к сети АФГ с индуктивным накопителем

Параллельно включаемые АФГ (шунтирующие) лишены этого недостатка, но не могут работать при высоких напряжениях ввиду ограничений, накладываемых современными полупроводниковыми технологиями. При параллельной работе активные фильтры генерируют в сеть компенсационный ток равный по амплитуде, но противоположный фазе току высших гармонических искажений. Структурная схема параллельно

подключенного к сети АФГ с емкостным накопителем представлена на рисунке 1.23.

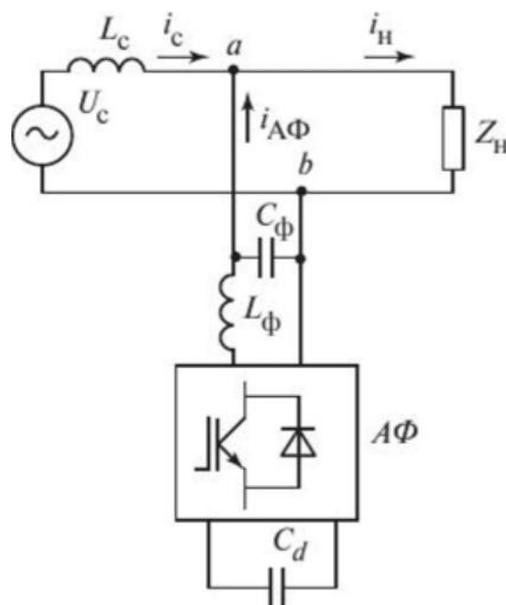


Рисунок 1.23 - Структурная схема параллельно подключенного к сети АФГ с емкостным накопителем

Выходной  $RLC$  фильтр активного фильтра гармоник можно разделить на две части  $L$  и  $RC$ .  $RC$  компоненты выходного фильтра предназначен для снижения передаваемых в сети высокочастотных помех, генерируемых активным фильтром и представляет из себя фильтр низких частот, принципиальная схема которого приведена на рисунке 1.24.

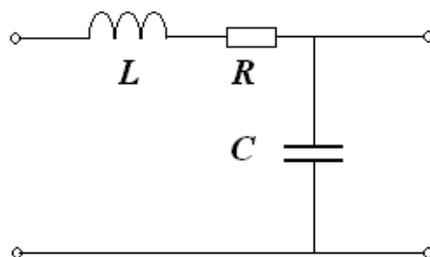


Рисунок 1.24 - Принципиальная схема фильтра низких частот

Индуктивная составляющая, включенная последовательно с инвертором АФГ, кроме сглаживания пульсаций тока, заряжает звено постоянного тока активного фильтра благодаря ЭДС самоиндукции. При этом напряжение, до

которого заряжается конденсатор АФГ, может превышать напряжение сети на порядок.

### 1.10 Процессы в силовых частях активных фильтров гармоник

При подаче сигнала на затвор транзистора  $VT1$  (рисунок 1.25) ток начинает нарастать по цепи: реактор  $L1$  – обратный диод транзистора  $VT3$  – сток – исток транзистора  $VT1$  – реактор  $L2$ , при этом сопротивление такой цепи, в идеальном случае, стремится к нулю, а ток при нарастании стремится к бесконечности. После снятия с затвора транзистора  $VT1$ , по первому закону коммутации, энергия, накопившаяся в индуктивном элементе  $L1$ , начинает разряжаться по цепи: реактор  $L1$  – обратный диод транзистора  $VT3$  – конденсатор  $C$  – обратный диод транзистора  $VT2$  – реактор  $L2$ , заряжая конденсатор  $C$ . Так как сопротивление конденсатора постоянному току близко к бесконечности, при снижении тока через индуктивность, ЭДС самоиндукции будет повышать напряжение на зажимах индуктивности и конденсатор  $C$  будет заряжаться повышенным напряжением.

Ток нарастает в реакторе по следующему закону:

$$I(t) = \frac{\varepsilon_0}{R_1} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{L_1 + L_c}{R_c + R_1} t\right) \right], \quad (1.23)$$

где  $\varepsilon_0$  – ЭДС сети в момент замыкания ключа  $VT1$ ,  $R_1$  – суммарное сопротивление красного контура на рисунке 1.25,  $L_1$  – индуктивность реактора,  $L_c$  – индуктивность сети,  $R_c$  – сопротивление сети.

ЭДС самоиндукции при замыкании ключа  $VT1$  изменяется по следующему закону:

$$\varepsilon_i(t) = -\varepsilon_0 \cdot \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right), \quad (1.24)$$

где  $\tau$  – постоянная времени цепи ( $\tau = \frac{L_1 + L_c}{R_c + R_1}$ ).

ЭДС самоиндукции при размыкании ключа  $VT1$  изменяется по следующему закону:

$$\varepsilon_{i1}(t) = \varepsilon_0 - \varepsilon_0 \cdot \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \cdot \frac{R_c + R_2}{R_c} \cdot \exp\left(-\frac{t_1 - t_0}{\tau_1}\right), \quad (1.25)$$

а так как при равенстве ЭДС самоиндукции и напряжения конденсатора  $C$ ,  $\varepsilon_{i1}(t)$  и  $U_c$ , сопротивление  $R_2$  будет стремиться, в идеальном случае, к бесконечности, то  $\varepsilon_{i1}(t)$  будет стремиться к бесконечности при условии, что  $\varepsilon_0 - \varepsilon_0 \cdot \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \neq 0$ .

Ток спадает в реакторе после размыкания ключа по следующему закону:

$$I_1(t) = \frac{U_c}{R_c + R_2} \exp\left(-\frac{t_1 - t_0}{\tau_1}\right), \quad (1.26)$$

где  $\tau_1$  – постоянная времени цепи ( $\tau_1 = \frac{L_1 + L_c}{R_c + R_2}$ ), где  $R_2$  – суммарное сопротивление синего контура на рисунке 1.25,  $t = t_0$  – начальный момент времени после отключения ключа,  $\varepsilon_1$  – ЭДС самоиндукции в момент отключения ключа.

Из такой схемы заряда емкости можно сделать вывод, что чем больше энергии запаса индуктивность, тем больше она отдаст, при этом будет увеличиваться напряжение. Запасенная энергия же в свою очередь зависит, в основном, от длительности протекания через нее токов КЗ ( $t$ ) и индуктивности самого реактора и сети, а также от сопротивлений сети ( $R_c$ ), сопротивлений  $R_l$  и  $R_l$  и постоянной заряда конденсатора.

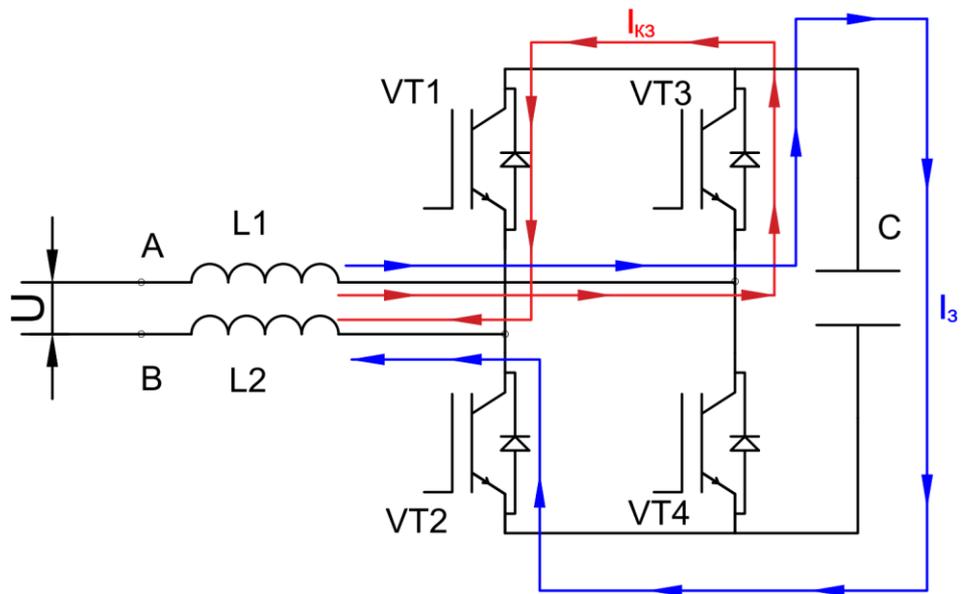


Рисунок 1.25 - Иллюстрация протекания токов для заряда конденсатора

Для снижения влияния на сеть активными фильтрами, в последнее время, выпускаемая промышленность начинает создавать АФГ не только с двухуровневыми инверторами, но и на базе трехуровневых инверторами (рисунок 1.26), существует возможность использования и инверторов с большим числом выходных уровней.

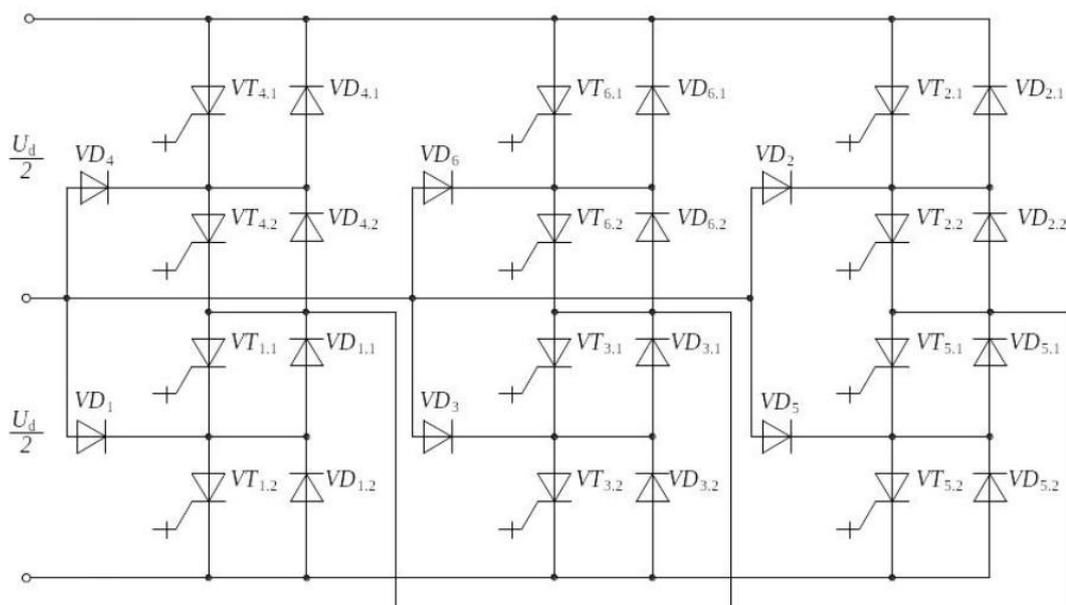


Рисунок 1.26 - Принципиальная схема трехуровневого инвертора

Несмотря на увеличения стоимости таких устройств по сравнению с классическими на базе двухуровневых инверторов, применение активных фильтров с более высокой топологией является оправданным шагом. При таких схемах АФ могут эффективнее снижать ВГ. Благодаря большому числу уровней инвертора моделированный сигнал может в большей мере повторять гармонические колебания.

### 1.11 Система вычисления компенсируемых токов активным фильтром гармоник

Для компенсации высших гармонических составляющих их необходимо отделить от основной первой гармоники. Эту задачу выполняет система управления активным фильтром. Существуют несколько подходов для выделения негативных составляющих. Самым простым способом является

применение узкополосного фильтра с резонансной частотой равной частоте первой гармоники. При таком способе ВГС будут получены после вычитания из основной выделенной гармоники из реального тока или напряжения сети. Похожий метод, но обладающий более высокими возможностями – выделение основной гармоники с использованием быстрого преобразования Фурье:

$$x(t) = \sum_{k=1}^{\infty} A_k \sin(k\omega t + \alpha_k), \quad (1.27)$$

где  $x(t)$  – уровень напряжения в момент времени  $t$ ,  $A_k$  – амплитуда  $k$ -ой гармоники,  $\omega$  – угловая скорость  $k$ -ой гармоники в момент времени  $t$ ,  $\alpha_k$  – сдвиг по фазе  $k$ -ой гармоники относительно основной гармоники.

Применение этого способа дает не только выделение основной гармоники, но и всех остальных, что дает возможность корректировать как искажения, накладываемые определенным диапазоном гармоник так и гармоник определенных частот [75].

Основным, в настоящее время, для расчета компенсируемых токов является метод предложенный Х. Акаджи, основанный на теории мгновенной мощности. Данный метод совмещает в себе выделение высших гармонических искажений и расчет для компенсации реактивной мощности для активного фильтра. Такие преобразования менее требовательны к вычислительным мощностям ЭВМ и обладают более высоким потенциалом.

В данной теории трехфазные напряжение и ток  $(u_a, u_b, u_c)$  и  $(i_a, i_b, i_c)$  преобразуются в двухфазную систему  $\alpha\beta$ , без нулевого преобразования так как рассматриваемая трехпроводная сеть, при помощи преобразования Кларк:

$$\begin{bmatrix} u_\alpha(t) \\ u_\beta(t) \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & \frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_a(t) \\ u_b(t) \\ u_c(t) \end{bmatrix} \quad (1.28)$$

$$\begin{bmatrix} i_\alpha(t) \\ i_\beta(t) \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & \frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_a(t) \\ i_b(t) \\ i_c(t) \end{bmatrix} \quad (1.29)$$

Следовательно, переменным  $u_\alpha$  и  $u_\beta$  соответствует комплексная плоскость с координатами пространственного вектора, который можно разложить на плоскости согласно выражению [107]:

$$\dot{U}_s(t) = u_\alpha + j \cdot u_\beta. \quad (1.30)$$

Аналогично записывается пространственный вектор тока [107]:

$$\dot{I}_s(t) = i_\alpha + j \cdot i_\beta. \quad (1.31)$$

Таким образом, пространственные векторы напряжения и тока:

$$\dot{U}_s(t) = u_\alpha + j \cdot u_\beta = \sqrt{3} \cdot U \cdot [\cos(\omega t) + j \cdot \sin(\omega t)] = \sqrt{3} \cdot U \cdot e^{j\omega t}, \quad (1.32)$$

$$\dot{I}_s(t) = i_\alpha + j \cdot i_\beta = \sqrt{3} \cdot I \cdot [\cos(\omega t - \varphi) + j \cdot \sin(\omega t - \varphi)] = \sqrt{3} \cdot I \cdot e^{j(\omega t - \varphi)}, \quad (1.33)$$

где  $U$ ,  $I$  – фазные напряжение и ток,  $\varphi$  – фазовый угол между напряжением и током [107].

Векторы на комплексной плоскости имеют постоянную амплитуду и вращаются с угловой частотой относительно неподвижных осей  $\alpha$  и  $\beta$  [107].

Одним из важных положений  $pq$ -теории Х. Акаджи является понятие мгновенной комплексной мощности:

$$\begin{aligned} S = \dot{U}_s \cdot \dot{I}_s &= (u_\alpha + j u_\beta)(i_\alpha - j i_\beta) = (u_\alpha i_\alpha + u_\beta i_\beta) + j(u_\beta u_\alpha - u_\alpha i_\beta) \\ &= p(t) + j q(t), \end{aligned} \quad (1.34)$$

где  $p$  – действительная мощность;  $q$  – мнимая мощность [14].

Действительная составляющая мощности вычисляется следующим образом:

$$p = u_a i_a + u_b i_b + u_c i_c = u_\alpha i_\alpha + u_\beta i_\beta = p. \quad (1.35)$$

Мнимая составляющая мощности вычисляется следующим образом:

$$q = u_\beta u_\alpha - u_\alpha i_\beta = \frac{1}{\sqrt{3}}(u_{ab} i_c + u_{bc} i_a + u_{ca} i_b). \quad (1.36)$$

Следующим этапом вычисляется составляющая действительной мощности, определяемая высшими гармониками. Для этого из  $p_{abc}(t)$  (синяя линия на осциллограмме рисунок 1.27а) вычитается постоянная составляющая  $p_{abc}(t)$  (красная линия рисунок 1.27а). Для этого можно в том числе

использовать среднее арифметическое значение  $p_{abc}(t)$  из небольшой выборки.

Таким образом действительная мощность высших гармонических искажений (рисунок 1.27б) равна:

$$p_{\text{ВГС}}(t) = p_{abc}(t) - p_{\text{пост}} \quad (1.37)$$

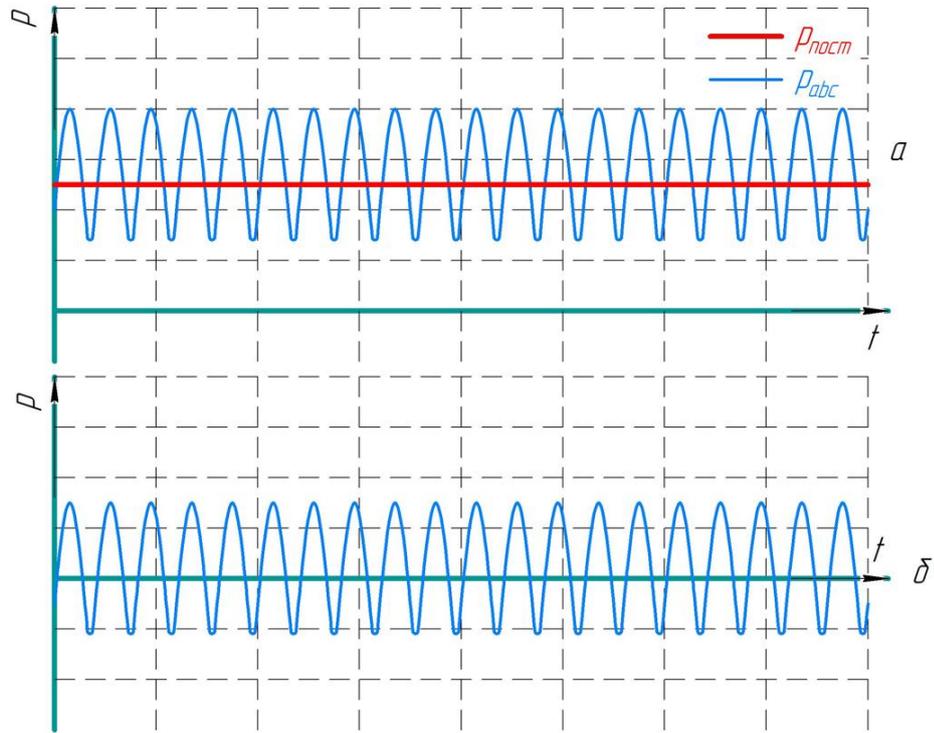


Рисунок 1.27 - Осциллограммы действительной мощности, действительной мощности ВГС и постоянной составляющей действительной мощности

При установленных  $p_{\text{ВГС}}(t)$  и  $q(t)$  рассчитываются токи действительной и мнимой составляющих мощности в  $\alpha\beta$  координатах по соответствующим выражениям:

$$I_p(t) = \frac{u_\alpha(t) \cdot p_{\text{ВГС}}(t) + u_\beta(t) \cdot q(t)}{|u_\alpha(t)|^2 + |u_\beta(t)|^2}, \quad (1.38)$$

$$I_q(t) = \frac{u_\beta(t) \cdot p_{\text{ВГС}}(t) - u_\alpha(t) \cdot q(t)}{|u_\alpha(t)|^2 + |u_\beta(t)|^2}, \quad (1.39)$$

Переход от  $\alpha\beta$  координат к АВС осуществляется обратным преобразованием Кларк:

$$\begin{bmatrix} i_a(t) \\ i_b(t) \\ i_c(t) \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_p(t) \\ I_q(t) \end{bmatrix} \quad (1.40)$$

Схема системы вычисления компенсируемых токов активным фильтром гармоник X. Акаджи приведена на рисунке 1.28.

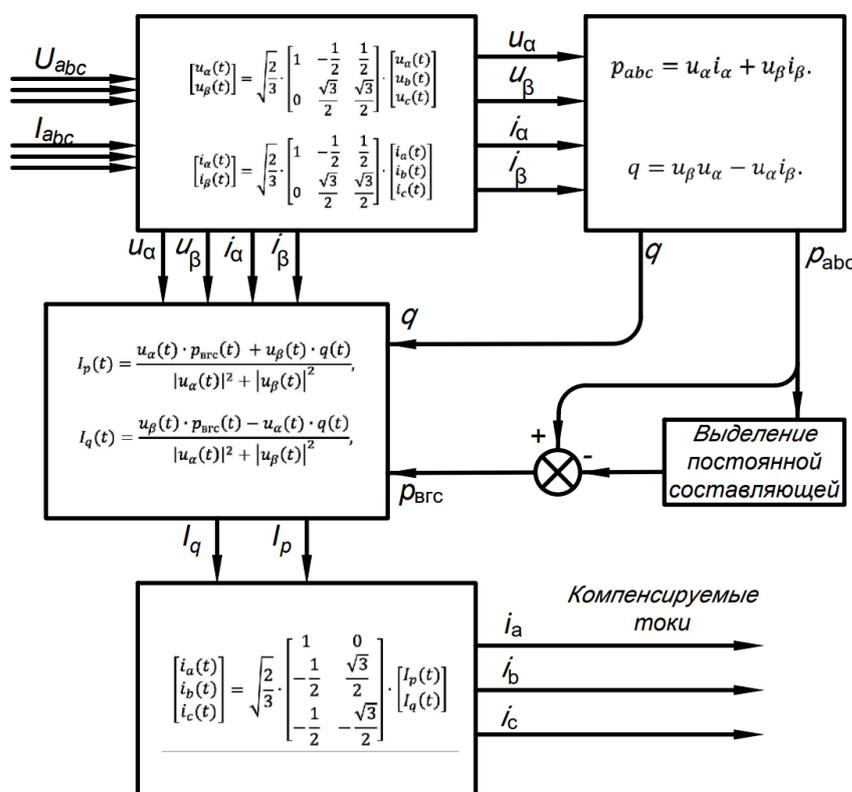


Рисунок 1.28 - Структурная схема системы вычисления компенсируемых токов активным фильтром гармоник X. Акаджи

После вычисления компенсируемого тока, инвертору необходимо смоделировать сигнал. В активных устройствах коррекции параметров качества электроэнергии используются несколько распространенных способов модуляции сигналов.

В качестве одного из таких методов применяется система на базе релейного управления инвертором. Такие системы крайне просты и не

требовательны. Принцип такой системы основан на генерировании в сеть токов до тех пор, пока искажение не будет устранено. Так как открытия одних силовых ключей накладывают ограничения на открытие других, а время в открытом состоянии при релейном управлении никак не нормировано, такие системы правления не могут компенсировать искажения во всех фазах в равной степени.

Существующий способ регулирования напряжения при такой системе вычисления компенсируемых токов заключается в создании контура обратной связи по напряжению на конденсаторе, который воздействует на выделенную мгновенную действительную мощность (выражение (1.34), рисунок 1.27 снизу). При этом воздействие осуществляется вычитаем из полученного после вычисления выражения (1.34) некоторой величины. Значение этой величины должно рассчитываться ПИД регулятором и зависит от значений заданного и реального величин напряжения на конденсаторе. Модель такой системы вычисления компенсируемых токов представлена на рисунке 1.29 [76].

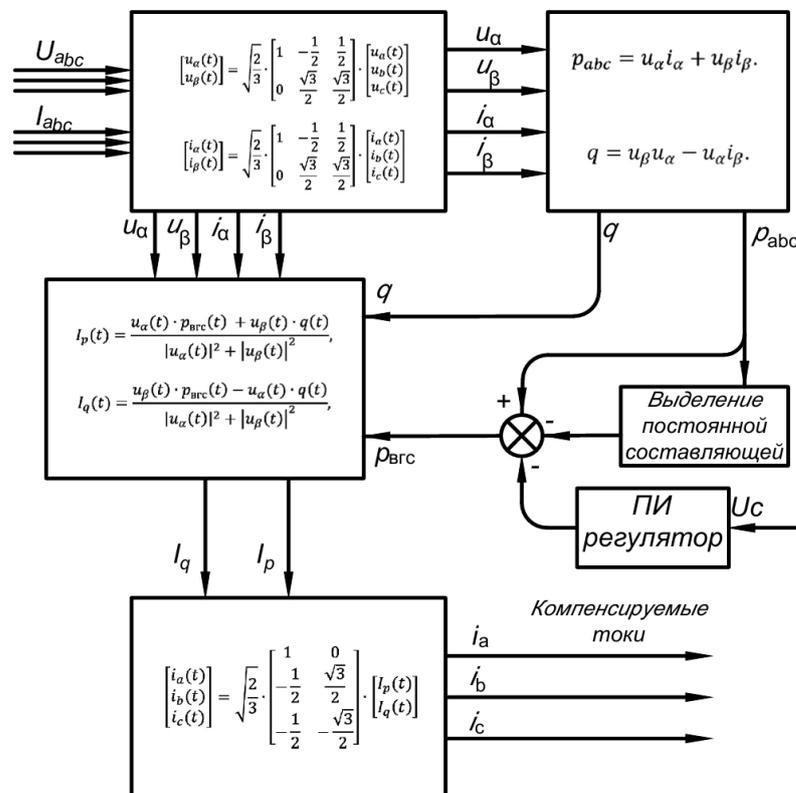


Рисунок 1.29 - Структурная схема системы вычисления компенсируемых токов АФГ X. Акаджи с обратной связью по напряжению

Основным недостатком такой системы является воздействие ПИД регулятора на абсолютное значение действительной мощности высших гармонических искажений. Такой подход в корне не правильный. При таком регулировании в случае отклонения напряжения нижний график на рисунке 1.27 будет смещаться вверх или вниз, но при учете специфики работы релейной модуляции компенсируемых токов и заряда конденсатора, это воздействие не может в полной мере регулировать напряжение. Также такое воздействие на действительную мощность высших гармонических искажений приводит к некорректной компенсации реальных ВГС. То есть, смещение по вертикальной оси действительной мощности высших гармонических искажений, ввиду регулирования напряжения, снижает точность компенсации ВГС.

При таком подходе возможно добиться регулирования напряжения в небольшом диапазоне при определенных условиях. А физическим следствием такого регулирования, которое влияет на напряжение, является перераспределение компенсации ВГС. Что незначительно изменит среднюю мощность, отдаваемую активным фильтром, и повлияет на временные периоды открытия ключей инвертора АФГ, что в свою очередь повлияет на напряжение самоиндукции входного реактора АФ.

При настройке на одну определенную действительную мощность высших гармонических искажений, после изменения ее характера или величины, воздействия регулятора не изменятся, что приведет либо к перерегулированию и автоколебаниям системы, либо к недорегулированию напряжения.

Еще одним существенным недостатком, вытекающим из предыдущего, такой системы является отсутствие воздействия на мнимую составляющую мгновенной мощности. При изменении реактивной составляющей сети или нагрузки такой способ регулирования продолжит воздействие исключительно на действительную составляющую высших гармонических искажений.

Из всего вышперечисленного можно сделать вывод о том, что существующий способ может регулировать напряжение на конденсаторе АФГ в крайне небольшом диапазоне, при заранее заданных величине и характере нагрузки. Что не отвечает целям и задачам, возложенным на активные устройства коррекции параметров качества электроэнергии [75].

Другим методом модуляции компенсационного тока или напряжения является широтно-импульсная модуляция (ШИМ). Принцип действия ШИМ представлен на рисунке 1.30.

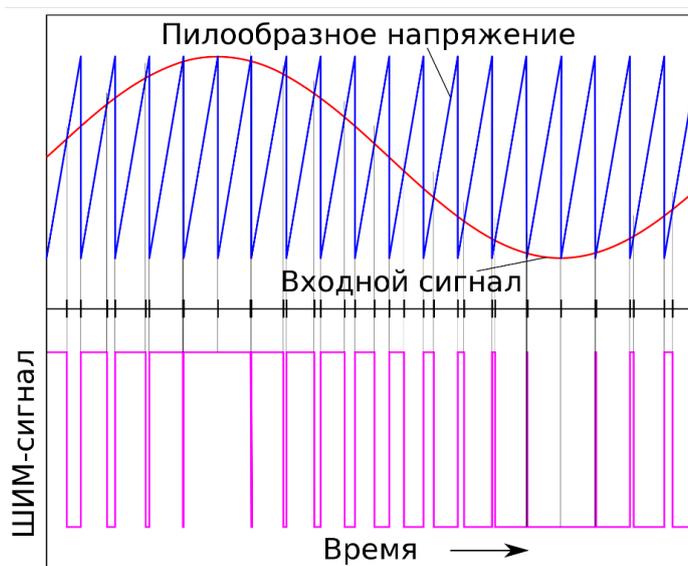


Рисунок 1.30 - Принцип действия широтно-импульсной модуляции

При таком методе модуляции высшие гармонические составляющие каждой фазы корректируются в равной мере, а время в открытом состоянии транзисторов выравнивается.

Широтно-импульсная модуляция для формирования выходных сигналов с активных фильтров гармоник обладает рядом недостатков. Одним из таких недостатков является выбор опорной частоты, так как для модуляции сигнала появляется необходимость в её увеличении, что приводит к необходимости в быстродействующих *IGBT* транзисторах. Так как для сглаживания ступенчатых форм токов и напряжения с инвертора на выходе АФГ применяются выходные фильтры, состоящие из индуктивных  $L_f$  и емкостных  $C_f$  (рисунок 1.23) элементов, расчет частоты коммутаций

становится серьезной проблемой. При увеличении частоты ШИМ, для сохранения одного уровня ЭДС самоиндукции необходимо снижать индуктивность выходных реакторов, и одновременно снижать емкость емкостного элемента выходного фильтра. Такие требования к выходным фильтрам при увеличении частоты могут приводить к снижению качества сигнала активного фильтра и увеличению его отрицательного влияния на сеть.

При расчете и проектировании устройств коррекции параметров качества электроэнергии основанных на широтно-импульсной модуляции необходимо искать экстремумы производительности при учете опорной частоты модуляции, емкости и индуктивности выходных фильтров и емкости накопительного элемента. Дальнейшим развитием может быть частотная широтно-импульсная модуляция, то есть система ШИМ с изменяющейся опорной частотой в зависимости от режимов работы и нагрузки на АФГ.

## 1.12 Гибридные системы коррекции параметров качества электроэнергии

Одним из решений для борьбы с ВГС сети являются гибридные системы, сочетающие в себе как пассивные, так и активные фильтры гармоник [77-86]. Структурная схема гибридной системы коррекции параметров КЭ представлена на рисунке 1.31.

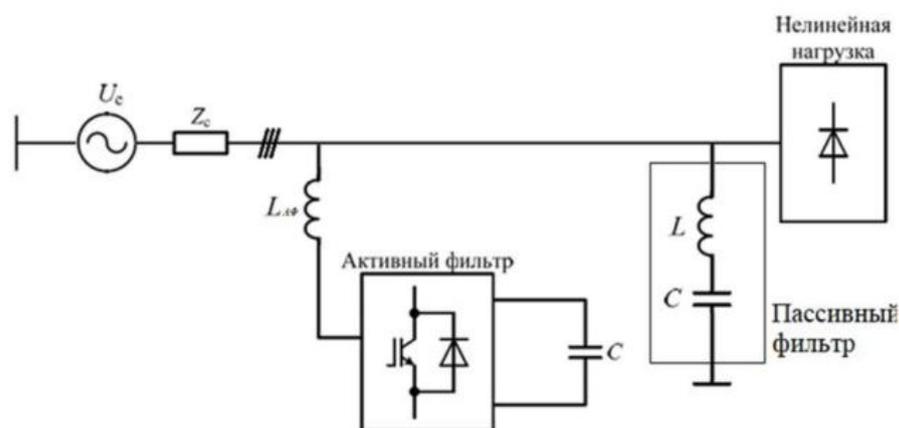


Рисунок 1.31 - Структурная схема гибридной системы коррекции ПКЭ

Такие системы обладают достоинствами активных и пассивных фильтров высших гармоник. В таких схемах фильтрацию основных негативных (5-ой, 7-ой) гармоник берут на себя пассивные устройства, а остальные гармоники компенсируются устройствами с активными преобразователями. При таких решениях, благодаря активным фильтрам, существенно снижаются риски появления резонансных явлений. Также отсутствует необходимость в мощных АФГ так как основную роль выполняют пассивные фильтры.

Основным и существенным недостатком таких систем является их стоимость. Такие схемы коррекции параметров качества электроэнергии требуют не только значительных начальных капитальных вложений на их приобретение, но и траты на проектирование схем электроснабжения с их интеграцией и затраты на обслуживание.

### **Выводы по первой главе и задачи исследования**

С целью обеспечения заданных технологических процессов и решения задачи энергосбережения в настоящее время практически на всех предприятиях минерально-сырьевого комплекса внедряются частотно-регулируемые асинхронные электроприводы. Применение частотных преобразователей позволяет добиться экономии электроэнергии, уменьшить расходы на эксплуатацию, повысить надежность работы оборудования, увеличить срок службы двигателей и механизмов, повысить производительность.

Однако широкое использование частотных преобразователей приводит к существенному отклонению формы напряжения в электрических сетях от синусоидальной. Искажение синусоидальной формы кривой напряжения приводит к увеличению потерь мощности в линиях электропередач, трансформаторах, реакторах и двигателях; сокращению срока службы электротехнического оборудования; высокой вероятности резонанса в системе

электропитания и выходу из строя батарей статических конденсаторов; сбою в работе систем релейной защиты и автоматики.

Кроме основных мер борьбы с ВГС в виде увеличения пульсности выпрямителей и использования специальных сетевых реакторов, используются пассивные и активные фильтры высших гармоник. Использование некоторых этих мер борьбы решают возникшие проблемы с качеством электроэнергии частично. Зачастую использования конкретных отдельных мер недостаточно и для решения проблем с качеством электроэнергии необходимо использовать все доступные схемы и системы комплексно. Комплексное решение подразумевает применение активных и пассивных фильтров, повышения пульсности выпрямителей и использования специальных реакторов. Такие решения существенно повышают затраты на системы электропитания предприятий, что в конечном итоге влияет на конечную себестоимость продукции и может стать решающим фактором в рентабельности и конкурентоспособности предприятия.

Сдерживающим фактором невозможности использования только активных фильтров для эффективной коррекции высших гармоник сети является недостаточная изученность в этой области. Существующие активные устройства коррекции параметров электроэнергии обладают несовершенными системами управления и модуляции выходных сигналов. Методики выбора таких параметров активных фильтров как емкость и индуктивность выходных фильтров и емкости накопительных элементов АФГ описанные в научной литературе, не учитывают параметры сети и нелинейных потребителей.

Исходя из анализа состояния вопроса поставлены следующие задачи исследования:

1. Разработать компьютерные модели, позволяющие количественно установить влияние параметров активного фильтра гармоник на суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения и учитывающие свойства и особенности системы электропитания, нелинейной нагрузки,

активного фильтра гармоник и системы регулирования напряжения на конденсаторе активного фильтра.

2. Установить зависимости, характеризующие влияние параметров двухуровневого активного фильтра гармоник на суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения, учитывающие свойства и особенности системы электроснабжения, нелинейной нагрузки, активного фильтра гармоник и системы регулирования напряжения на конденсаторе активного фильтра гармоник.

3. Установить зависимости, характеризующие влияние параметров трёхуровневого активного фильтра гармоник на суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения, учитывающие свойства и особенности системы электроснабжения, нелинейной нагрузки, активного фильтра гармоник и системы регулирования напряжения на конденсаторе активного фильтра гармоник.

4. Установить зависимости, характеризующие взаимное влияние смежных ветвей системы электроснабжения на суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения, учитывающие наличие в этих ветвях нелинейной нагрузки и активных фильтров гармоник.

5. На основе установленных зависимостей обосновать метод выбора параметров активного фильтра гармоник и регулятора напряжения на конденсаторе активного фильтра гармоник, позволяющий обеспечить нормативный суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения.

## ГЛАВА 2. РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ НЕФТЕПРОМЫСЛОВОЙ СЕТИ С НЕЛИНЕЙНЫМИ НАГРУЗКАМИ И АКТИВНЫМИ ФИЛЬТРАМИ ГАРМОНИК

### 2.1 Компьютерная модель системы электроснабжения нефтепромысловой сети, содержащей нелинейные нагрузки

Для дальнейшего исследования системы электроснабжения нефтедобычи, влияния высших гармонических составляющих и средств коррекции параметров качества электроэнергии, целесообразно, для облегчения постановки экспериментов, построить компьютерные модели систем электроснабжения. Такие модели позволят проводить множество экспериментов с возможностью контролировать все процессы и отслеживать каждую величину.

Компьютерное моделирование системы электроснабжения района нефтедобычи проведено в программном комплексе *MATLAB&Simulink*. Имитационная модель, представленная на рисунке 2.2, построена в соответствии с веткой схемы замещения ветки «Талая 1» системы электроснабжения района нефтедобычи, представленной на рисунке 1.9. На рисунке 2.1 представлена схема замещения системы электроснабжения района нефтедобычи, представленной на рисунке 1.9. Как видно из схемы на рисунке 2.1, ветка «Талая 1» питает три куста нефтедобычи напряжением 35 кВ. При этом все кусты разнесены на местности, а каждый куст питается двумя линиями электропитания и имеет по два главных понизительных трансформатора.

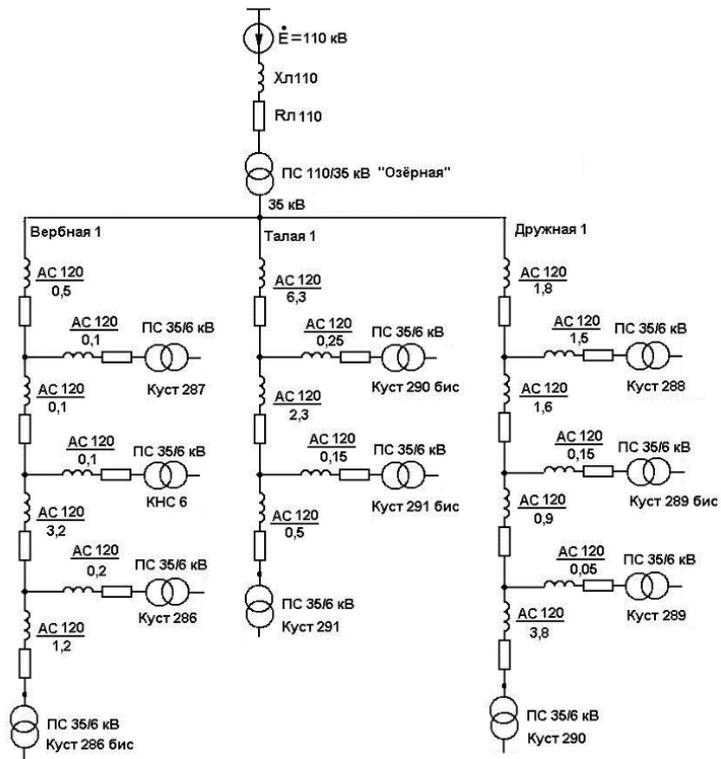


Рисунок 2.1 - Схема замещения системы электроснабжения района нефтедобычи

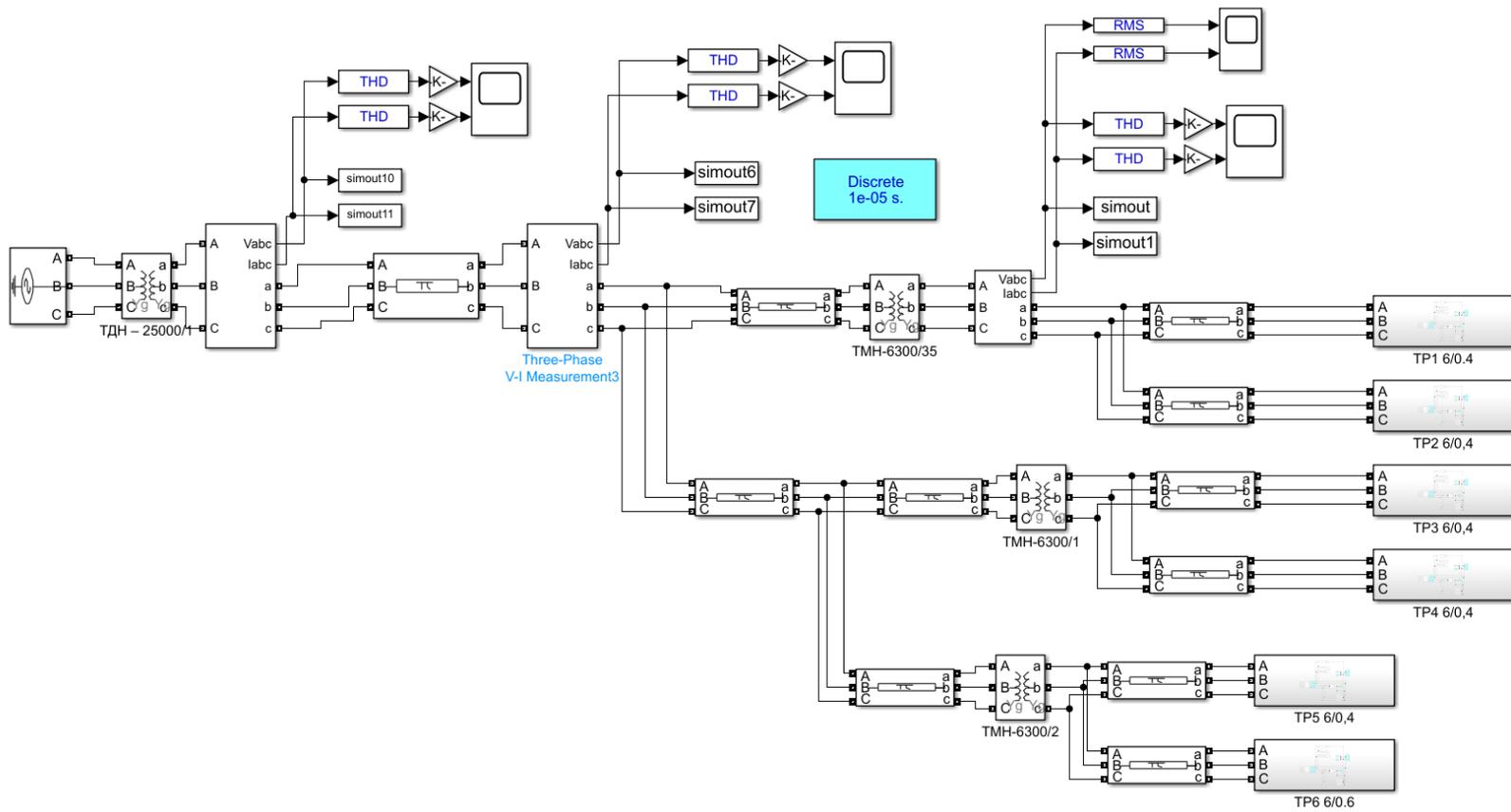


Рисунок 2.2 - Имитационная модель системы электроснабжения ветки района нефтедобычи

В состав имитационной модели системы электроснабжения ветки района нефтедобычи (рисунок 2.2) входят следующие элементы.

В качестве источника напряжения используется стандартный блок «Three-Phase Source», с частотой напряжения 50 Гц и напряжением 115 кВ. Имитация внутреннего сопротивления выключена.

Для имитации процессов, происходящих в трансформаторах, используются модули «Three-Phase Transformer», которые имитируют работу двухобмоточного трансформатора. Параметры таких модулей определяются из расчетных выражений по каталожным данным производителей трансформаторов.

Активное сопротивление обмоток:

$$R_1^* = R_2^* = \frac{\Delta P_{кз}}{2 \cdot S_{HT}}, \text{ о. е.} \quad (2.1)$$

где  $S_{HT}$  – номинальная мощность трансформатора,  $\Delta P_{кз}$  – потери короткого замыкания.

Полное сопротивление обмоток:

$$Z_1^* = Z_2^* = \frac{U_{к\%}}{200}, \text{ о. е.} \quad (2.2)$$

где  $U_{к\%}$  - напряжение короткого замыкания трансформатора.

Индуктивное сопротивление обмоток:

$$X_1^* = X_2^* = \sqrt{Z_1^{*2} - R_1^{*2}}, \text{ о. е.} \quad (2.3)$$

Индуктивность обмоток:

$$L_1^* = L_2^* = X_1^* = X_2^*, \text{ о. е.} \quad (2.4)$$

Полные потери мощности в режиме холостого хода трансформатора:

$$\Delta S_x^* = \frac{I_{x\%}}{100}, \text{ о. е.} \quad (2.5)$$

где  $I_{x\%}$  - ток холостого хода трансформатора.

Намагничивающая мощность трансформатора:

$$\Delta Q_x^* = \sqrt{\Delta S_x^{*2} - \Delta P_x^{*2}}, \text{ о. е.} \quad (2.6)$$

где  $\Delta P_x^* = \frac{P_x}{S_{HT}}$  – активные потери холостого хода.

Активное сопротивление цепи намагничивания:

$$R_\mu^* = \frac{S_{HT}}{\Delta P_{xx}}, \text{ о. е.} \quad (2.7)$$

Индуктивное сопротивление цепи намагничивания:

$$X_\mu^* = \frac{1}{\Delta Q_x^*}, \text{ о. е.} \quad (2.8)$$

Индуктивность цепи намагничивания:

$$L_\mu^* = X_\mu^*, \text{ о. е.} \quad (2.9)$$

В качестве элементов для учета сопротивления линий электропередач используются «PI Section Line». На участке нефтедобычи, питающейся от ПС «Озерная», применяются воздушные провода типа АС 120. Параметрами моделей, замещающих эти провода, являются значения удельного сопротивления, удельных индуктивности и емкости.

Для измерения и дальнейших преобразований на каждом этапе распределения и преобразования электроэнергии используются измерительные блоки «Three-Phase V-I Measurement».

В имитационную модель входят три куста: 290бис, 291бис и 291, но в модели каждый куст разделен на две части, так как в нормальных условиях при двухцепной системе питания куста, электрической связи между ними нет.

Имитационная модель куста 291бис представлена на рисунке 2.3. Модели остальных кустов участка схожи с моделью куста 291бис.

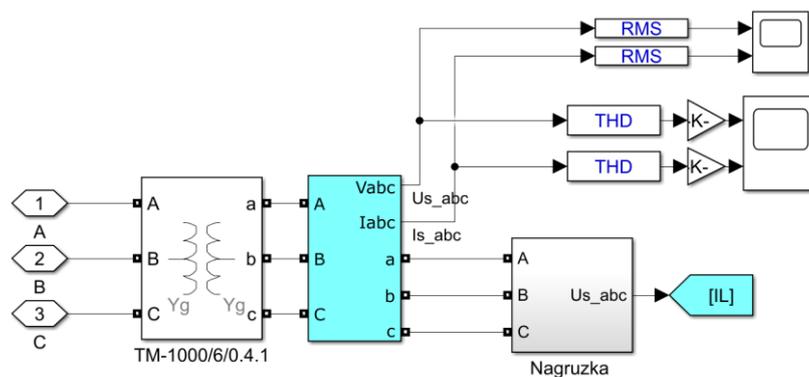


Рисунок 2.3 - Имитационная модель системы электроснабжения куста 291бис

Модель электроснабжения куста 291бис, представленная на рисунке 2.3 построена в соответствии со схемой электроснабжения куста 291бис изображенной на рисунке 1.10.

Для эмуляции работы погружных центробежные насосы с частотными преобразователями в программе собраны модели частотных преобразователей. Имитационная модель потребителей, питающихся от одного из понижающих трансформаторов 6/0,4 представлена на рисунке 2.4.

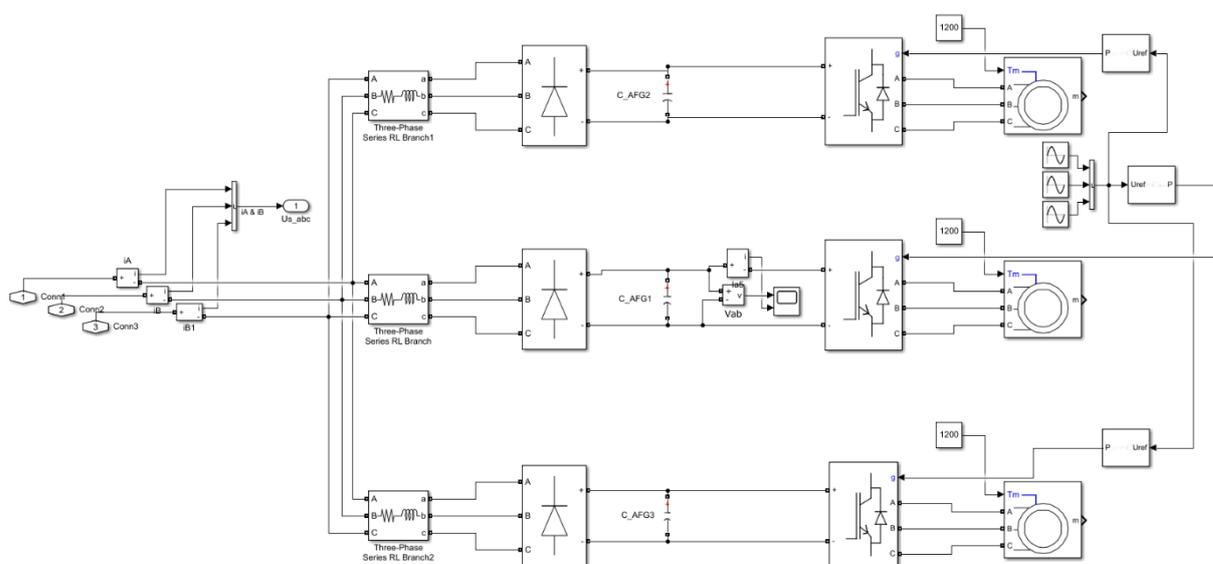


Рисунок 2.4 - Имитационная модель нелинейной нагрузки

Модуль «Three-Phase Series RL Branch» эмулирует сопротивление реактора и кабелей от трансформатора до электропривода.

Частотный преобразователь построен на нескольких стандартных модулях. Преобразователь выпрямляет сетевое переменное напряжение (модуль Universal Bridge), сглаживает пульсации (модуль Series RLC Branch) и модулирует ток фиксированной частоты инвертором (Universal Bridge, Sine Wave, PWM Generator) [85].

В качестве исполнительной машины используется модуль «Asynchronous Machine» эмулирующий работу асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором.

Для снижения пусковых переходных процессов, а также переходных процессов, связанных с зарядкой звена постоянного тока, двигатель изначально вращается с частотой близкой к номинальной, а емкость звена постоянного тока заряжена.

Результаты измерения параметров качества электроэнергии на разных участках модели представлены в таблицах 2.1 и 2.2.

Таблица 2.1 - Результаты измерения ПКЭ на вводах 6 кВ

№ куста	№ ввода	Ток ввода, А	Напряжение, кВ	K <sub>i</sub> , %	K <sub>u</sub> , %
287	1	60	6,2	22	6,1
	2	95	6,2	55	9

Таблица 2.2 - Результаты измерения ПКЭ на вводах 0,4 кВ

№ куста	№ ввода	Ток ввода, А	Напряжение, кВ	K <sub>i</sub> , %	K <sub>u</sub> , %
287	1	670	409	27	10,5
	2	350	410	22	8,5
	3	250	410	23	7

Показатели, снятые непосредственно в системе электроснабжения участка нефтепромысла (таблица 1.6), имеют незначительное расхождение с показателями, снятым на модели. Для наглядности на рисунке 2.5 приведены осциллограммы кривых токов и напряжения на модели, которые не имеют значительных отличий кривых на рисунках 1.11 и 1.12.

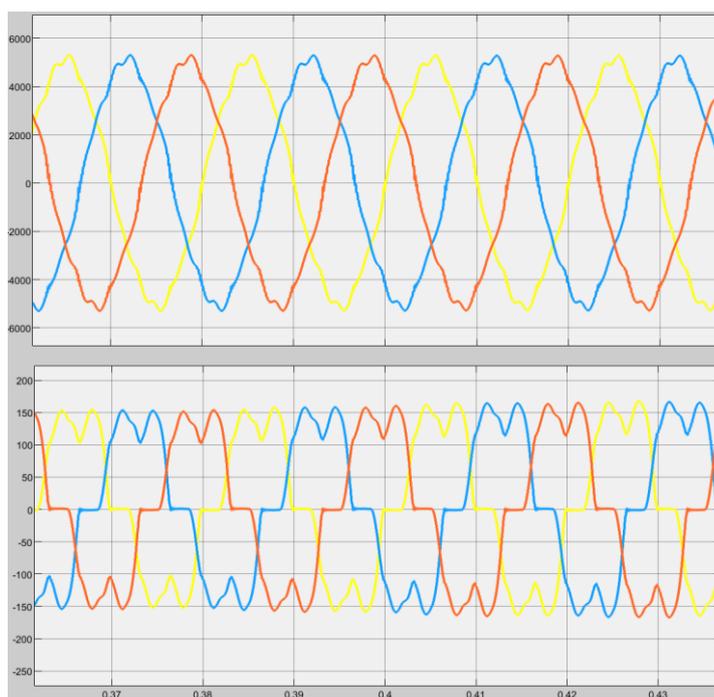


Рисунок 2.5 - Форма напряжения и тока на шинах 6 кВ в модели

Для оценки адекватности модели рассчитаны относительные погрешности отклонения к первоначальным экспериментальным значениям и их средние значения:

$$\Delta Ku = \left| \frac{Ku_{\text{э}} - Ku_{\text{м}}}{Ku_{\text{э}}} \right| \quad (2.10)$$

$$\overline{\Delta Ku} = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta Ku_n}{n} \quad (2.11)$$

где  $Ku_{\text{э}}$  – экспериментальные значения,  $Ku_{\text{м}}$  – значения, полученные при моделировании, результаты сведены в таблицу 2.3.

Таблица 2.3 - Оценка адекватности модели

	Экспериментальные значения		Значения при моделировании		Адекватность	
	$K_u, \%$	$K_i, \%$	$K_u, \%$	$K_i, \%$	$K_u$	$K_i$
6 кВ	6,1	19	6,1	22	0,96	0,9
	9,7	59	9	55		
0,4 кВ	11	29	10,5	27	0,96	0,94
	8,5	20	8,5	22		
	6,5	23	7	23		

## 2.2 Системы и модели электроснабжения принятые к исследованию

Для облегчения исследования, в дальнейшем, будут использоваться отдельные модифицированные участки схемы, представленной на рисунке 1.9. На рисунке 2.6а представлена схема одной ветви, питающая один куст нефтедобычи, а на рисунке 2.6б представлена схема для исследования взаимовлияния нелинейных нагрузок и работы АФГ смежных линий.

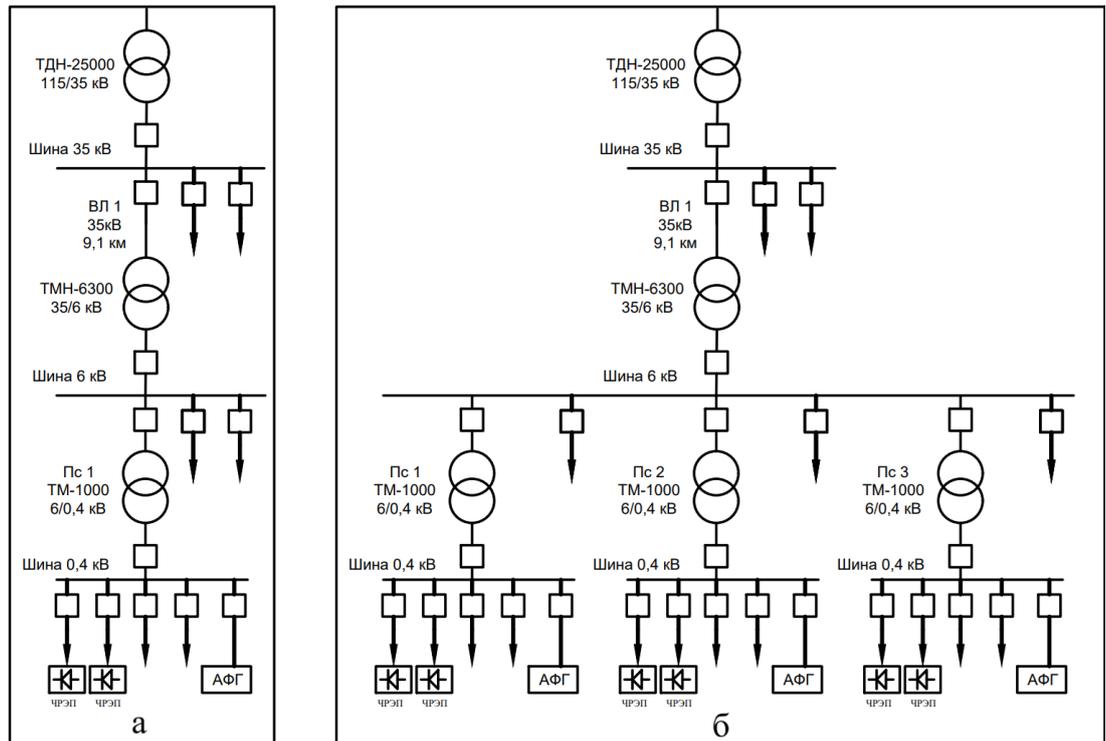


Рисунок 2.6 - Участки схемы электроснабжения принятые для облегчения исследования

Имитационная модель схем электроснабжения, представленных на рисунке 2.6а, приведены на рисунке 2.7. На рисунке 2.8 приведена имитационная модель схемы рисунка 2.6б, также на рисунке 2.9 раскрыта схема подстанции ПС1, включающая в себя нелинейную нагрузку и параллельно ей включенный активный фильтр гармоник. Для имитации нелинейной нагрузки в блоке «*Nagruczka*» используются несколько ЧРЭП (рисунок 2.4). В состав каждого ЧРЭП входит асинхронный электродвигатель, мощностью 170 кВт, питаемый от преобразователя частоты с неуправляемым выпрямителем, трёхфазный реактор на входе выпрямителя, индуктивность

которого равна 50 мкГн, и конденсатор на выходе выпрямителя емкостью 20 мкФ [88].

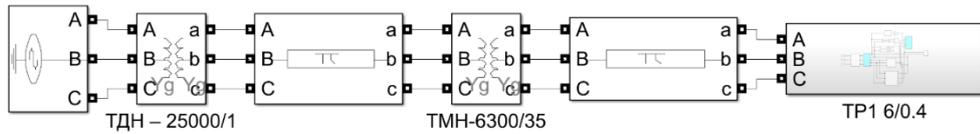


Рисунок 2.7 - Имитационная модель ветки электроснабжения

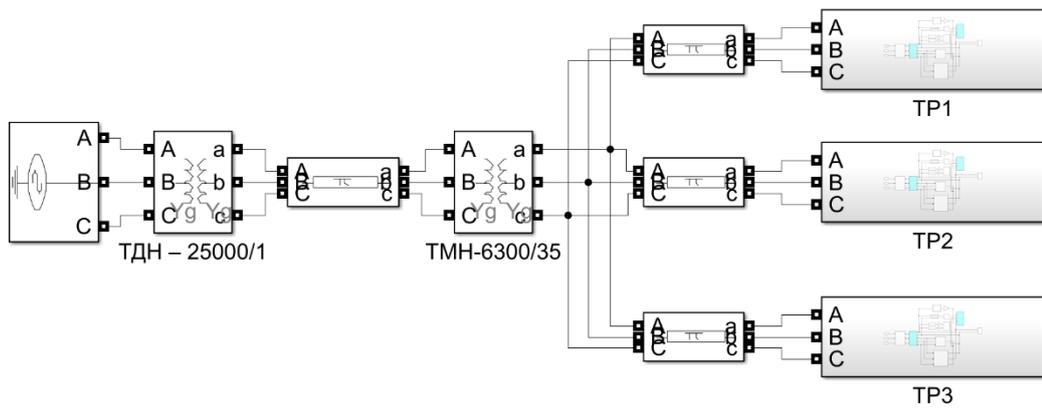


Рисунок 2.8 - Имитационная модель ветки электроснабжения

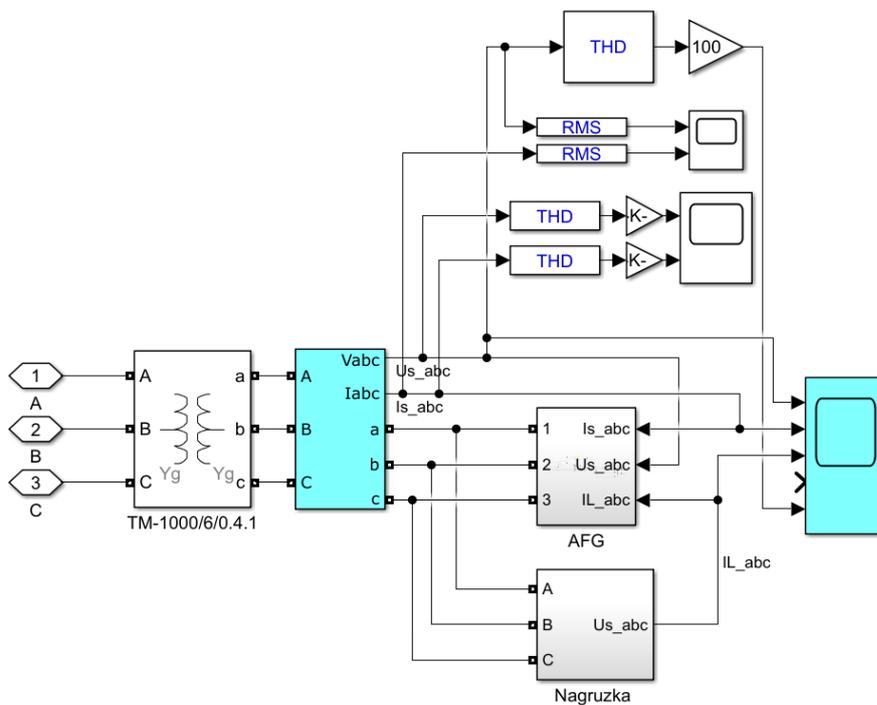


Рисунок 2.9 - Имитационная модель подстанции ПС1

### 2.3 Компьютерная модель активного фильтра гармоник

Самым распространённым видом АФГ являются параллельно включаемые активные фильтры с емкостным звеном постоянного тока для накопления энергии. На рисунке 2.10 приведена функциональная схема параллельного АФГ с двухуровневым инвертором и релейной схемой модуляции компенсируемых токов. Для имитации двухуровневого инвертора в модели используется блок из стандартной библиотеки «*Universal Bridge*», а в качестве ключей используются IGB транзисторы, выходной RC фильтр и накопительный конденсатор реализуются с помощью блоков «*Series RLC Branch*». Выходной реактор активного фильтра построен в модели на стандартном блоке «*Three-Phase Series RL Branch*». Общий вид модели активного фильтра гармоник, отражающего функциональную схему рисунка 2.10, представлен на рисунке 2.11.

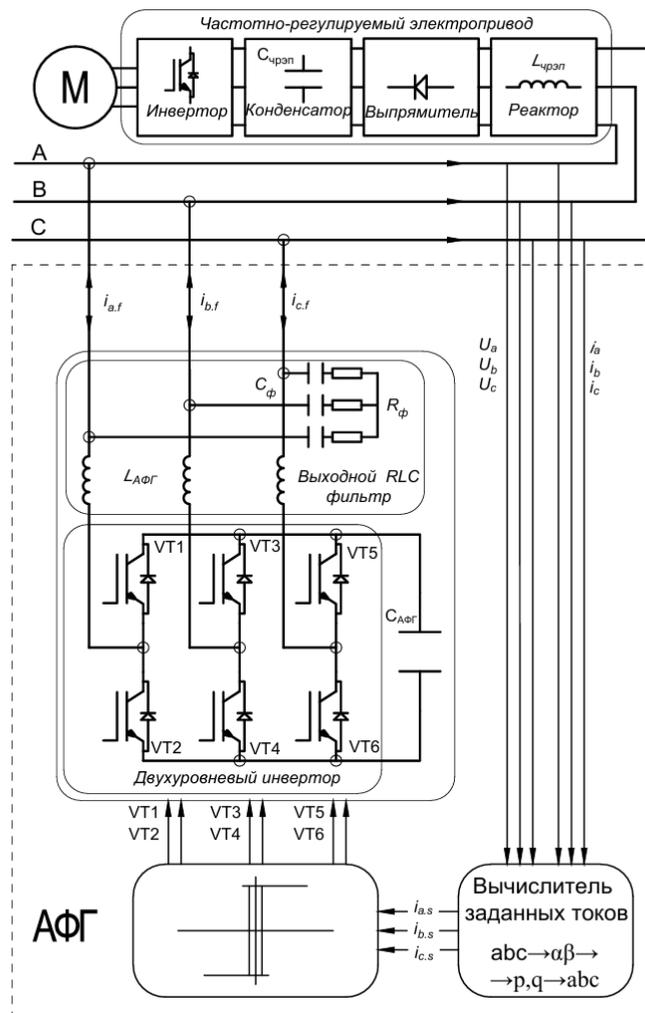
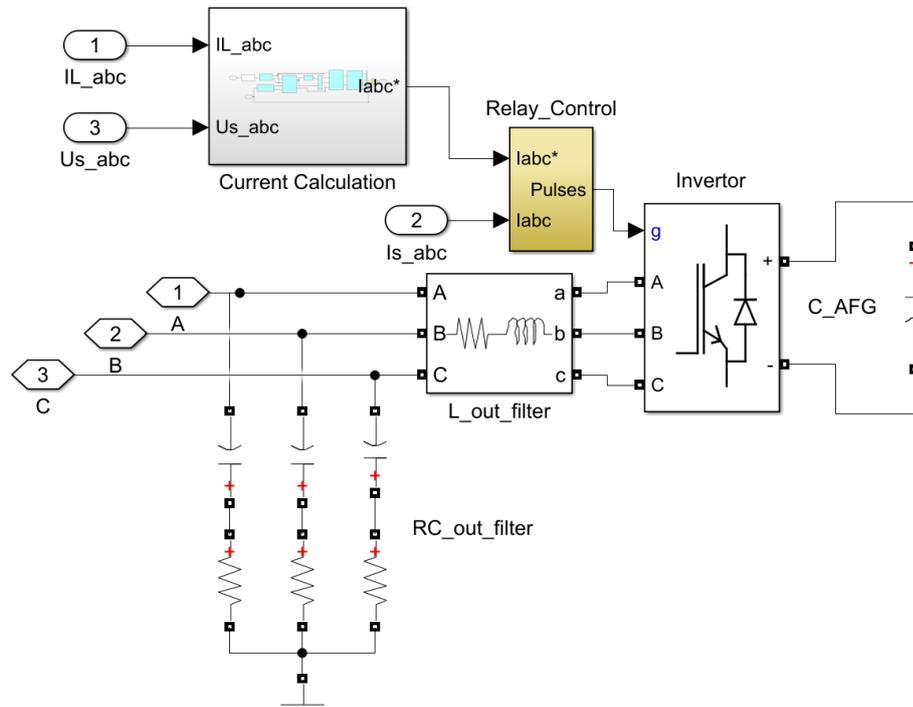


Рисунок 2.10 - Функциональная схема параллельного АФГ



2.11 - Общий вид модели активного фильтра гармоник

Модель АФГ содержит инвертор с двухуровневой топологией (блок «*Invertor*») (см. рисунок 1.19), систему вычисления компенсируемых токов, основанную на теории мгновенной мощности (блок «*Current Calculation*») релейный модулятор («*Relay\_Control*»). Для фильтрации высокочастотных помех АФГ применяется выходной RLC фильтр [88].

Блок «*Current Calculation*» вычисления компенсируемых токов без регулирования напряжения методом Х. Акаджи, представлен на рисунке 2.12. Представленная модель вычисления компенсируемых токов полностью имитирует систему Х. Акаджи представленную на рисунке 1.28.

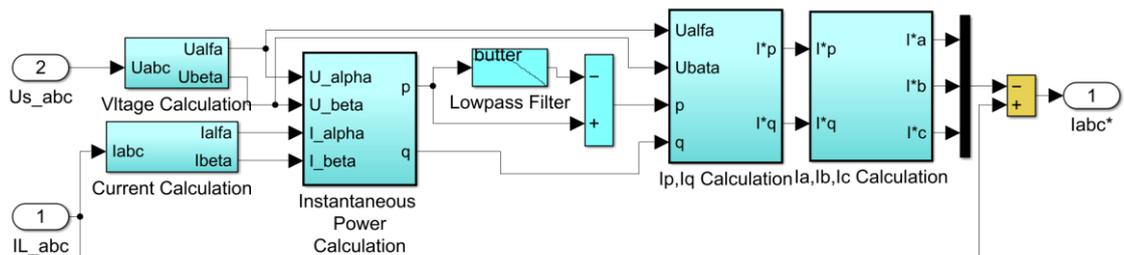


Рисунок 2.12 - Модель системы вычисления компенсируемых токов АФГ без регулирования напряжения

За модуляцию в активном фильтре, модель которого представлена на рисунке 2.11 отвечает блок «*Relay\_Control*», который представляет из себя модель релейного модулятора (рисунок 2.13).

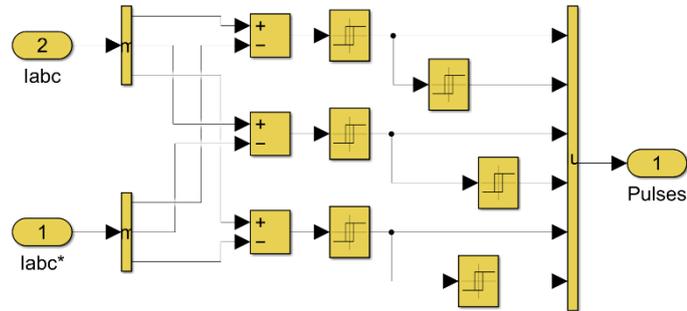


Рисунок 2.13 - Модель релейного модулятора компенсационных токов

Принцип действия такого устройства заключается в ограничении открытия сразу двух ключей одной стойки (см рисунок 1.25), то есть, например, ключей *S1* и *S2*, а также в создание сигнала на открытие части ключей для моделирования требуемого сигнала. Такой принцип является крайне простым и дешевым, но имеет некоторые недостатки, такие, например, как не фиксированная частота коммутаций и несимметричное моделирование сигналов по фазам.

На рисунке 2.14 приведена модель системы вычисления компенсируемых токов, основанная на фазных преобразованиях *pq* с классическим для такой системы регулятором напряжения. Эта модель полностью соответствует схеме вычисления, показанной на рисунке 1.29.

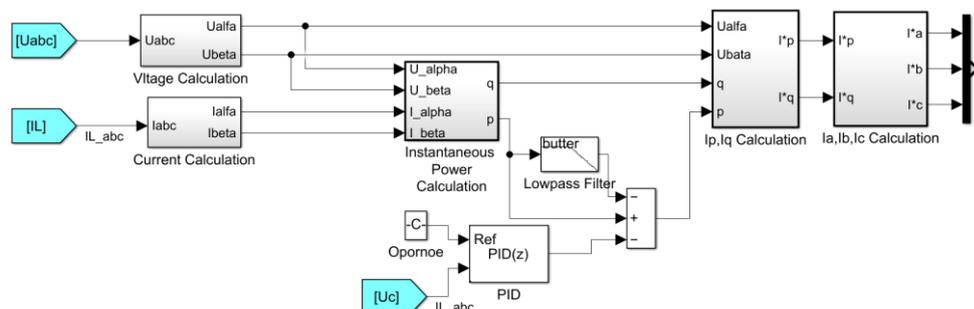


Рисунок 2.14 - Модель системы вычисления компенсируемых токов  
АФГ с регулятором напряжения

В качестве регулятора в модели выступает дискретный блок «*PID*» который имитирует ПИД регулятор с заданием уровня опорной величины напряжения константой.

Для исследования трехуровневого активного фильтра разработана его математическая модель, внешний вид которой практически не отличается от модели, изображенной на рисунке 2.11. Отличия состоят лишь в использовании двух накопительных конденсаторов вместо одного, трехуровневого инвертора (блок «*Invertor*»), и релейного модулятора для управления трехуровневым инвертором. Внешний вид модели релейного модулятора трехуровневого активного фильтра представлен на рисунке 2.15.

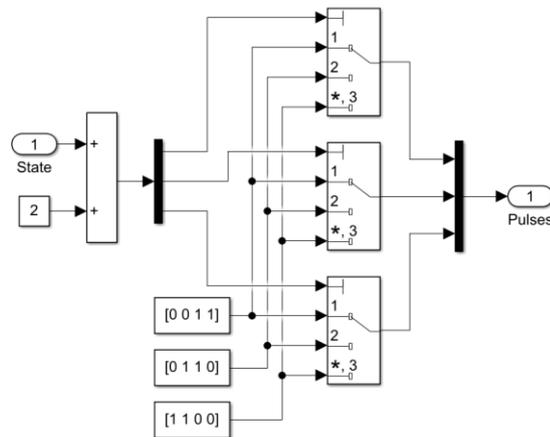


Рисунок 2.15 - Модель релейного модулятора трехуровневого АФГ

### **Выводы по второй главы**

Созданы имитационные модели, позволяющие количественно установить влияние АФГ на суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения и учитывающие наличие системы регулирования напряжения на конденсаторе АФГ, СЭС и нелинейной нагрузки.

Модели реализованы с учетом существующих подходов к анализу динамических процессов, происходящих в системе электроснабжения промышленных предприятий.

Выполненный анализ параметров качества электроэнергии разработанных моделей, показывает высокую сходимость с результатами, полученными при проведении экспериментальных измерений в системе электроснабжения, что подтверждает адекватность моделей и показывает возможность применения разработанных моделей для моделирования и дальнейшего исследования процессов и параметров качества электроэнергии в промышленных сетях нефтедобычи с частотно регулируемые электроприводами.

### ГЛАВА 3. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМНОГО ВЛИЯНИЯ НА КАЧЕСТВО ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ АКТИВНОГО ФИЛЬТРА ГАРМОНИК, СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ И НЕЛИНЕЙНОЙ НАГРУЗКИ

#### 3.1 Исследование параметров качества электроэнергии в линии сети электроснабжения без применения устройств повышения параметров качества электроэнергии

Необходимость установки устройств корректировки параметров качества электроэнергии в представленной на рисунке 2.6а системе электроснабжения обусловлена тем, что на стороне 0,4 кВ частотно регулируемые электропривода при загрузке трансформаторной подстанции нелинейной нагрузкой ( $\beta_{нл}$ )  $\beta_{нл} > 0,57$  (рисунок 3.1), создают недопустимые по ГОСТ 32144-2013 гармонические искажения напряжения. Под загрузкой трансформатора нелинейной нагрузкой понимается отношение полной мощности частотно регулируемого электропривода ( $S_{нл}$ ) к номинальной мощности трансформатора ( $S_{тр.ном}$ ):

$$\beta_{нл} = \frac{S_{нл}}{S_{тр.ном}}. \quad (3.1)$$

При этом необходимо иметь в виду, что в соответствии с ГОСТ 32144-2013, нет необходимости снижать суммарные коэффициенты гармонических составляющих напряжения  $K_u$  и тока  $K_i$  при  $K_u < 8\%$ , в соответствии с таблицей 1.4 для 0,4 кВ. Но снижение гармонических искажений напряжения сети и искажений потребляемого из сети тока, даже при  $K_u < 8\%$ , приводит к снижению потерь мощности электроэнергии, увеличению срока службы электрооборудования и снижает вероятности отказа и ложных срабатываний релейной защиты и автоматики.

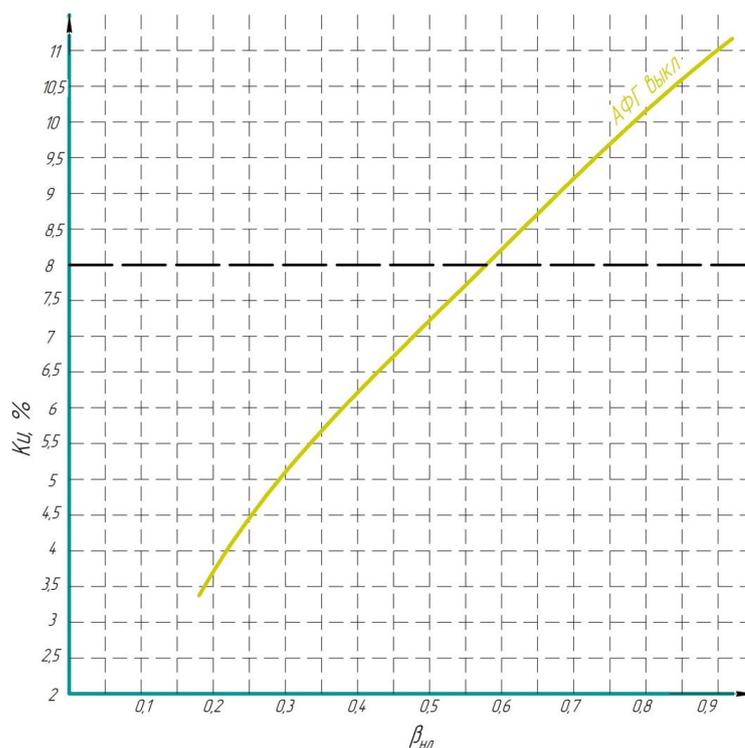


Рисунок 3.1 - Зависимость  $K_u$  от  $\beta_{нл}$

### 3.2 Внутренние параметры активного фильтра и внешние параметры сети и нагрузки, влияющие на работу АФГ

Применение активных фильтров гармоник для повышения качества электроэнергии, в отличие от пассивных устройств повышения ПКЭ, не приводит к перерегулированию ПКЭ и убирает возможность резонансов, при изменении характера и уровней нагрузки. Но такие качества АФГ получают при правильном выборе внутренних параметров, как системы управления и регулирования, так и параметров пассивных элементов при учете внешних параметров сети электроснабжения и параметров нелинейных потребителей:

К параметрам активного фильтра гармоник, влияющих на эффективность компенсации ВГС, относятся следующие:

1. Параметры выходного  $RLC$  фильтра (см. рисунок 2.19):
  - Индуктивность реактора  $L_{abc}$ ;
  - Емкость конденсаторов  $C_{abc}$ ;
  - Активное сопротивление  $R_{abc}$ ;
2. Емкость конденсатора звена постоянного тока (см. рисунок 2.15);

Также на эффективность компенсации ВГС фильтром влияют такие внешние факторы как:

1. Параметры питающей сети;
2. Высшие гармонические составляющие питающей сети;
3. Параметры линий питания нелинейных потребителей;
4. Параметры нелинейных потребителей (см. рисунок 1.16) [88].

Каждый параметр из перечисленных выше влияет на остальные, поэтому выбор параметров АФГ должен осуществляться с учетом всех перечисленных факторов.

Исследование эффективности применения АФГ осуществляется на основе расчёта суммарных коэффициентов, гармонических составляющих напряжения  $K_u$  и тока  $K_i$  в точке присоединения ЧРЭП к сети электроснабжения с учётом взаимозависимости работы всех элементов системы электроснабжения [88]. При этом эффективной работой активного фильтра может называться, не только снижение  $K_u$  до нормативных показателей, но и существенное снижение гармонических составляющих напряжения  $K_u$  и тока  $K_i$ .

### **3.3 Исследование влияния параметров выходного $RC$ фильтра активного фильтра гармоник на эффективность фильтрации высших гармонических искажений**

Выходной  $RLC$  фильтр предназначен для фильтрации создаваемых активным фильтром гармоник [2], высокочастотных помех. Параметры этого выходного фильтра необходимо выбирать достаточными для фильтрации высокочастотных помех. При этом при применении выходных фильтров с высокими емкостями конденсаторов и маленькими активными сопротивлениями теряется смысл в использовании АФГ, так как такие фильтры сами по себе являются пассивными фильтра высших гармонических искажений (см. рисунок 2.3).

Для исследования влияния параметров активного фильтра гармоник на эффективность фильтрации высших гармонических искажений используется

модель схемы электроснабжения, включающая в себя одну ветвь, представленная на рисунках 2.6а и 2.7.

Параметры качества электроэнергии при изменении емкости конденсатора и активного сопротивления выходного фильтра приведены в таблицах 1 и 2 (приложение 1), данные приведены для нагрузки 1050 А ( $\beta_{нл} = 0,74$ ) и 256 А ( $\beta_{нл} = 0,18$ ). Выполненные расчёты на модели позволили установить зависимости коэффициента  $K_u$  при изменении емкости конденсаторов и активных сопротивлений выходного фильтра, которые приведены в графическом виде на рисунке 3.2.

На рисунке 3.2 обозначены черной пунктирной линией, полученные эмпирически достаточные параметры выходного  $RC$  фильтра.

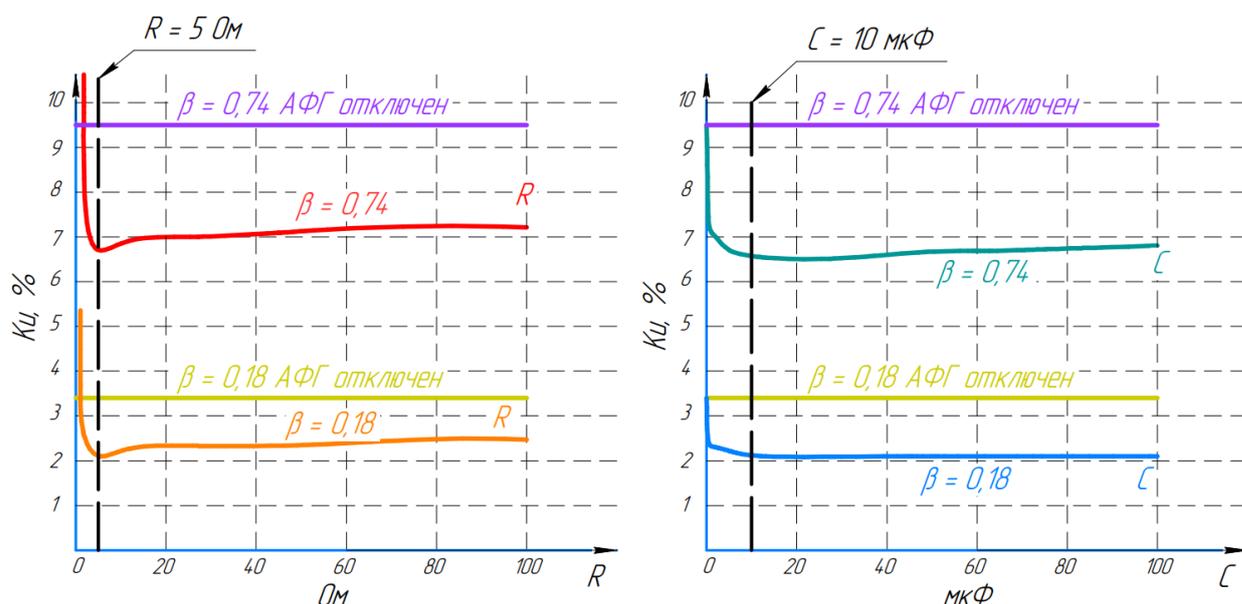


Рисунок 3.2 - Зависимости коэффициента  $K_u$  от значений  $R$  и  $C$  выходного фильтра при разных нагрузках

Для исследования эффективности работы только АФГ выходной  $RC$  фильтр при имитациях постоянно включен в сеть, что исключает прирост эффективности для АФГ от частичной фильтрации ВГС пассивным фильтром. В подтверждении выше сказанного в таблицах 3.1 и 3.2 приведены параметры качества электроэнергии при разных параметрах выходного фильтра.

Как видно из таблиц 3.1 и 3.2 выходной фильтр АФГ в приведённом диапазоне параметров не влияет на ПКЭ. Поэтому эффект снижения суммарного коэффициента гармонических искажений напряжения при работе АФГ, получен исключительно от активного фильтра, без использования пассивных устройств повышения параметров качества электроэнергии.

Как видно из рисунка 3,2, необходимым и достаточным условием для фильтрации высокочастотных помех, создаваемых активным фильтром, является выполнение неравенств  $R \approx 5$  Ом и  $C \geq 10$  мкФ. Такие параметры принимаются для дальнейших исследований АФГ.

Таблица 3.1 - Параметры качества электроэнергии при разных активных сопротивлениях выходного фильтра  $RC$  без АФГ

$R_{\phi}$ , Ом	$I_n$ , А	$I_{\phi}$ , А	$K_u$ , %	$K_I$ , %
-	1051	-	9,5	29
0	1051	3,7	10	29
1	1051	2,2	9,7	29
10	1051	1	9,5	29
100	1051	0,7	9,5	29

Таблица 3.2 - Параметры качества электроэнергии при разных емкостях конденсаторов выходного фильтра  $RC$  без АФГ

$C_{\phi}$ , мкФ	$I_n$ , А	$I_{\phi}$ , А	$K_u$ , %	$K_I$ , %
-	1051	-	9,5	29
1	1051	0,2	9,5	29
10	1051	1	9,5	29
100	1051	7,2	9,5	29
1000	1070	22,4	9,5	28,4

### 3.4 Исследование влияния индуктивности выходного реактора активного фильтра гармоник на эффективность фильтрации высших гармонических искажений

Индуктивность реактора, включенная последовательно с инвертором АФГ (« $L_{a...c}$ » на рисунке 2.15), кроме сглаживания пульсаций тока, заряжает звено постоянного тока активного фильтра благодаря ЭДС самоиндукции по закону (1.24) и (1.25). При этом напряжение, до которого заряжается конденсатор АФГ, может превышать напряжение сети на порядок.

Для проверки полученных аналитически выражения (1.23-1.26), на модели проведено исследование, в ходе которого изменялась индуктивность реактора АФГ, и снимались количественные показатели качества электроэнергии. В таблицах 3–6 (приложение 1) приведены результаты расчёта на модели коэффициента  $K_u$  при разных индуктивностях выходного реактора АФГ.

Для наглядности данные из таблиц 3–6 (приложение 1) изображены в виде зависимостей напряжения конденсатора от индуктивности реактора при разных нагрузках на рисунке 3.3.

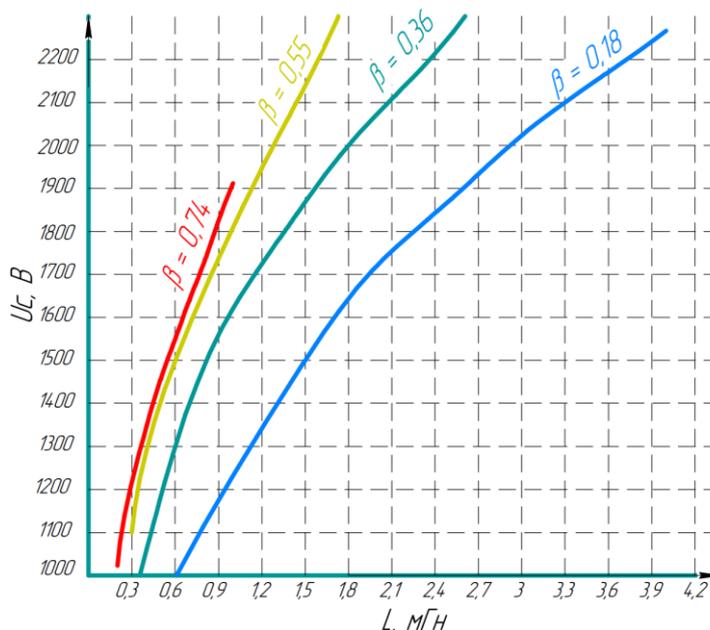


Рисунок 3.3 - Зависимости напряжение конденсатора от индуктивности реактора при разных нагрузках

Из графиков на рисунке 3.3 видно, что с ростом индуктивности реактора АФГ, напряжение до которого заряжается конденсатор активного фильтра увеличивается по одинаковому закону для разных нагрузок. Подобным образом будут выглядеть зависимости напряжения конденсатора при изменении индуктивности сети (трансформатора).

На рисунке 3.4 изображены зависимости коэффициента  $K_u$  от значения индуктивности реактора при разных нагрузках, отражающие эффективность АФГ при разных индуктивностях реактора, которые позволили определить на этих зависимостях экстремумы, используемые при дальнейших исследованиях.

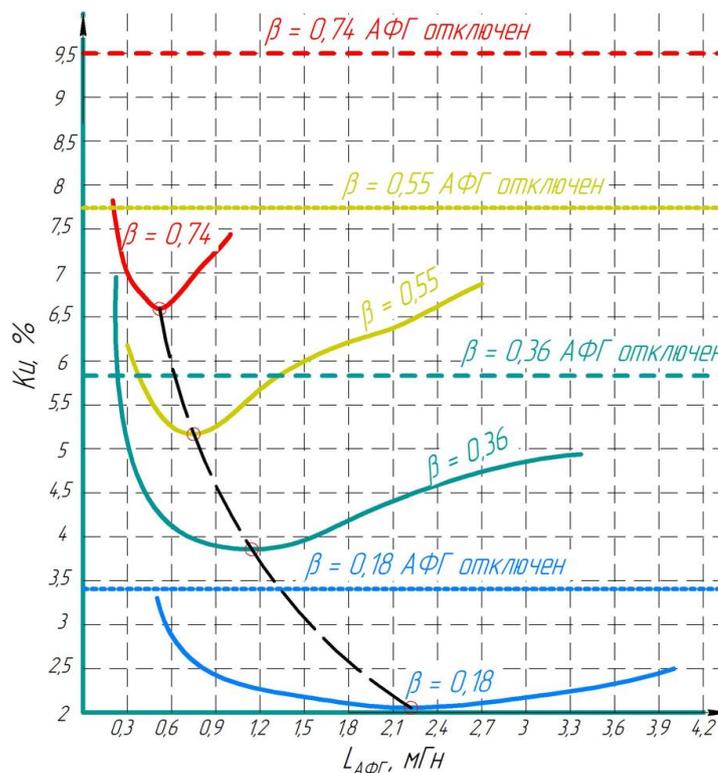


Рисунок 3.4 - Зависимости коэффициента  $K_u$  от значения индуктивности реактора АФГ при разных нагрузках

На рисунке 3.5 приведены полученные на модели зависимости коэффициента гармонических составляющих напряжения ( $K_u$ ) от коэффициента гармонических составляющих тока ( $K_i$ ).

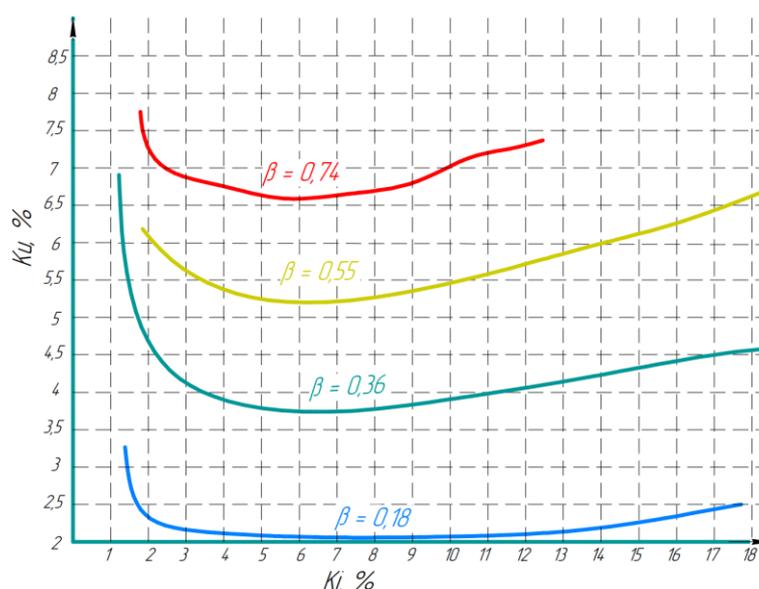


Рисунок 3.5 - Зависимость искажений напряжений от искажений токов при разных нагрузках

Из рисунка 3.5 видно, что минимальные искажения напряжения соответствуют искажениям тока от 4 до 8 %. Снижение индуктивности реактора, приводит к снижению низкочастотных гармоник сети (5, 7, 11 и 13 гармоник) и значимому снижению  $K_I$ . Но как видно из графика на рисунке 3.5, содержание высших гармоник напряжения увеличивается при маленьких  $K_I$ . Связан такой эффект с принципом работы релейного моделирования компенсируемых токов. Так как напряжение на конденсаторе АФ пропорционально времени открытия ключей инвертора, а время открытия, в свою очередь, от мощности компенсируемого искажения, то при снижении мощных гармонических составляющих (5, 7, 11 и 13 гармоник) снижается напряжение, до которого заряжается конденсатор активного фильтра. Так как частота коммутаций увеличивается, а индуктивность выходного реактора, который, в том числе, является фильтром низких частот, уменьшилась, в сеть попадает больше высокочастотных шумов.

Кроме индуктивности реактора и элементов системы электроснабжения, на работу активного фильтра должны влиять активные сопротивления, как реактора АФГ, так и элементов электроснабжения. В таблицах 7 и 8

(приложение 1) приведены полученные на модели параметры качества электроэнергии и активного фильтра при изменении активного сопротивления цепи включающую в себя внутренний контур АФГ и сопротивление линии, не включая сопротивление трансформатора.

Как видно из таблиц 7 и 8 (приложение 1), изменение только активного сопротивления линии, не влияет на изменение напряжения на конденсаторе, в отличие от индуктивности. При изменении индуктивности в пять раз напряжение возрастает в два раза, в то время как при изменении активного сопротивления линии в сто раз напряжение значительно не возрастает. Связано это с тем, что сопротивление линии от трансформатора до активного фильтра много меньше активного сопротивления обмотки трансформатора. При изменении, существенней, активных сопротивлений линии, напряжение будет снижаться, но с ним будут расти активные потери (что видно из последних двух замеров таблиц 7 и 8 приложения 1) (растет ток, а эффект от АФГ снижается).

На рисунке 3.6 изображены установленные зависимости напряжения на конденсаторе от гармонических искажений тока. Подобная зависимость отражает зависимость величины ЭДС самоиндукции реактора от времени протекания в нем токов КЗ. При увеличении гармонических искажений тока возрастает время на компенсацию каждого отклонения, и при каждом таком отклонении индуктивность накапливает в себе энергию, которую потом отдает на конденсатор АФГ.

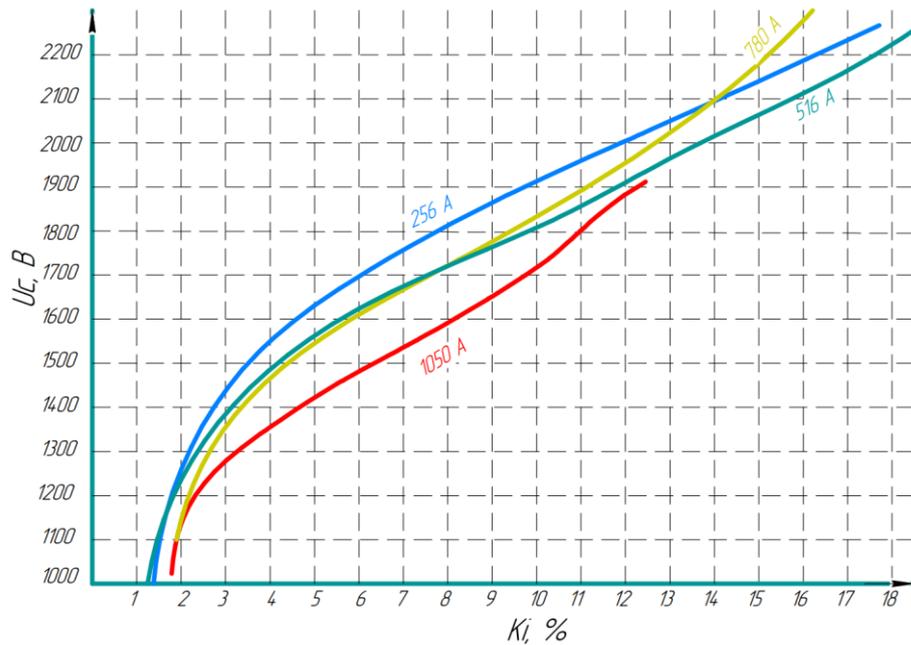


Рисунок 3.6 - Зависимости напряжение на конденсаторе от  $K_i$

Полученные зависимости подтверждают взаимосвязь напряжения на конденсаторе активного фильтра от гармонических искажений тока.

Из полученных зависимостей можно сделать вывод, что:

- При возрастании сопротивления сети до АФГ (синий контур на рисунке 1.25) напряжение звена постоянного тока снижается;
- При возрастании индуктивности входного реактора АФГ напряжение, на конденсаторе активного фильтра растет.
- Напряжение на конденсаторе АФГ зависит также от длительности импульсов компенсации ВГС.

### 3.5 Исследование влияния емкости накопительного конденсатора активного фильтра гармоник на эффективность фильтрации высших гармонических искажений

В качестве накопительного элемента в АФГ используется конденсатор («С» на рисунке 2.10). Совместно с индуктивностью реактора, емкость  $C$  образует контур, параметры которого существенно влияют на эффективность работы АФГ.

Так как в качестве накопительного элемента в АФГ используется конденсатор, величина его емкости имеет значение. Совместно с индуктивностью реактора, емкость АФГ образуют контур, стабильность процессов в котором, в основном, определяет качество и эффективность работы АФГ.

Напряжение, создаваемое ЭДС самоиндукции реактора:

$$U_c = \varepsilon_{i1}(t) \left[ 1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_c}\right) \right], \quad (3.2)$$

где  $\tau_c = RC$  – постоянная времени контура конденсатора.

Но так как  $\varepsilon_{i1}(t)$  (ЭДС самоиндукции) реактора снижается по мере передачи энергии в конденсатор, и продолжительность этого процесса ограничена, напряжение  $U_c$  будет определяться точкой баланса системы, при которой конденсатор будет получать столько же энергии, сколько отдает в сеть. При этом уже получаемая энергия зависит от времени компенсации ВГС.

Результаты эффективности работы АФГ при изменении емкости накопительного конденсатора, приведены в таблицах 9–12 (приложение 1) и на рисунке 3.7. Индуктивности реактора при этих расчетах принимались одинаковые для всех нагрузок.

Данные ПКЭ из таблиц 9–12 (приложение 1) и рисунка 3.7 показывают, что выбор емкости накопительного конденсатора активного фильтра сводится к значению, после которого, прирост эффективности АФ становится несущественным. На рисунке 3.7 значения емкости после которых прирост эффективности АФ становится несущественным соединены черной пунктирной линией. Как видно из полученных зависимостей, при увеличении нелинейной нагрузки, необходимая емкость накопительного конденсатора АФГ растет пропорционально нагрузке. При этом как видно из рисунка 3.8 напряжение на конденсаторе активного фильтра зависит, в том числе, от нагрузки.

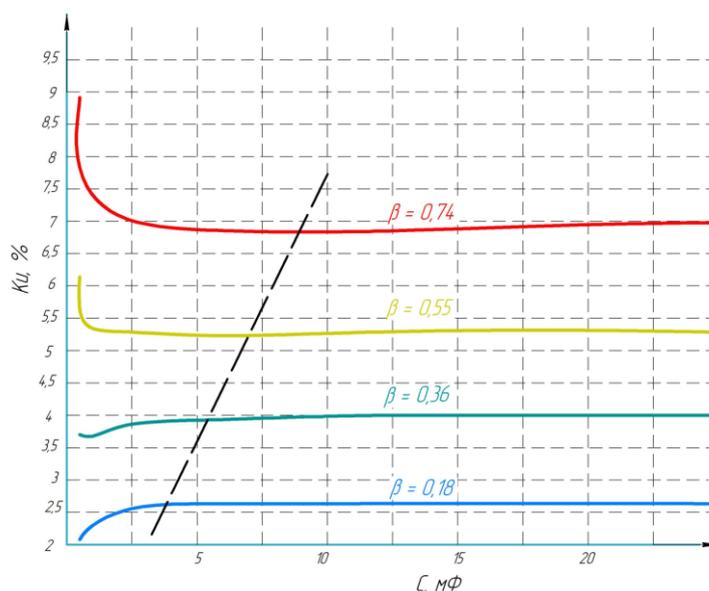


Рисунок 3.7 - Зависимости  $K_u$  от емкости накопительного конденсатора при разных нагрузках

В таблицах 13–16 (приложение 1) приведены параметры качества электроэнергии и компонентов АФГ при разных емкостях накопительного конденсатора активного фильтра полученные на модели. На рисунках 3.8 и 3.9 построены зависимости под данным таблиц 13 – 16 (приложение 1). При этом для всех нагрузок и емкостей конденсатора АФГ применяется реактор с индуктивностью, выбранной по зависимости, приведенной на рисунке 3.4, проведенной через экстремумы зависимостей  $K_u$  от индуктивности реактора АФГ.

Важным аспектом при выборе емкости накопительного конденсатора АФГ является проектирование таких устройств при учете будущих пульсаций в емкостном звене постоянного тока. Пульсации постоянного напряжения приводят к потерям энергии, уходящей на нагрев конденсаторов АФГ, при этом снижается срок службы таких элементов. Так же пульсации негативно влияют на эффективность работы активного фильтра.

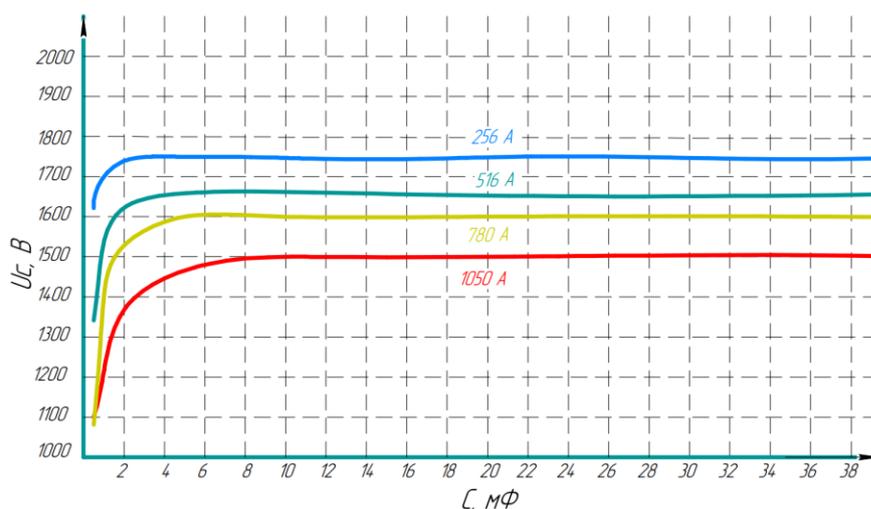


Рисунок 3.8 - Зависимости напряжение на конденсаторе от емкости конденсатора при разных нагрузках

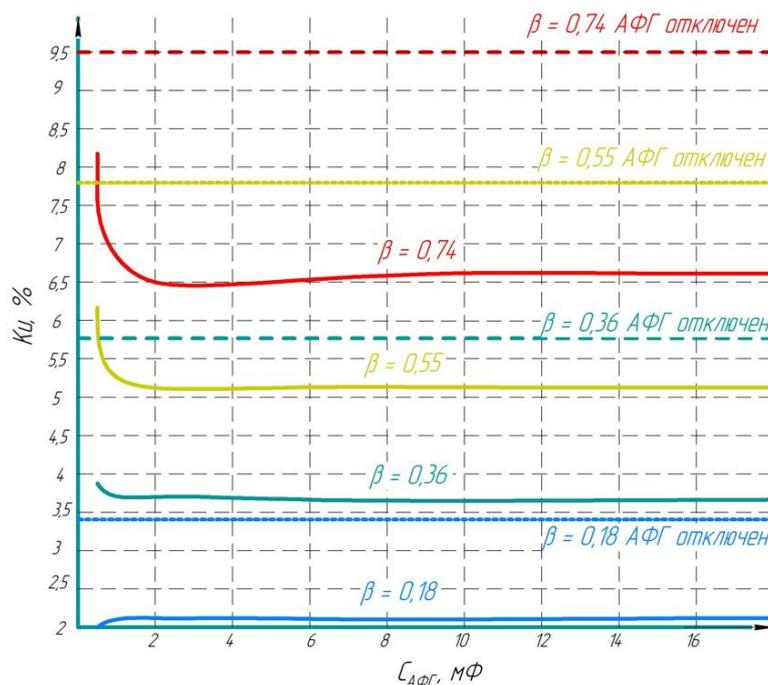


Рисунок 3.9 - Зависимости коэффициента  $K_u$  от значения емкости конденсатора АФГ при разных нагрузках

Как видно из таблиц 13 – 16 (приложение 1) и рисунков 3.8 и 3.9, зависимости  $K_u$  от значения емкости конденсатора АФГ при разных нагрузках идентичны, и нагрузка не влияет на работу АФГ при выборе индуктивности реактора АФГ по зависимости, проведенной через экстремумы на рисунке 3.4. Из этого можно сделать вывод, что параметры « $L$ » реактора фильтра и « $C$ »

конденсатора АФГ – жестко взаимосвязаны. Следовательно, нельзя рассматривать отдельно выбор каждого параметра. Так как зависимости  $K_u$  от индуктивности реактора АФГ более сложные, емкость накопительного конденсатора необходимо выбирать после выбора индуктивности реактора. Напряжение при этом увеличивается ввиду того, что активные сопротивления сети и реактора остаются неизменными, а индуктивность при снижении нагрузки увеличивается.

### **3.6 Исследование влияния параметров нелинейных потребителей на эффективность фильтрации высших гармонических искажений активным фильтром**

Параметры нелинейных потребителей, (типовая структурная схема приведена на рисунке 2.10) также существенно влияют на эффективность работы АФГ. В числе таких параметров можно выделить следующие:

- Активное сопротивление до нелинейного потребителя включая реактор;
- Индуктивность линии до нелинейного потребителя включая реактор;
- Емкость сглаживающего конденсатора;

Емкость сглаживающего конденсатора, включенного параллельно нагрузке, обеспечивает снижение пульсаций тока, и, как следствие, напряжения. Входной реактор (общая индуктивность линии и реактора) электропривода обеспечивает снижение пульсаций тока как со стороны источника, так и тока заряда конденсатора. Активное сопротивление сети снижает мощность пульсаций тока и, как следствие, снижает амплитуды высших гармоник, передаваемых в сеть.

#### **Емкость сглаживающего конденсатора**

В таблицах 17–19 (приложение 1) приведены результаты измерения параметров качества электроэнергии и параметры АФГ при разных удельных емкостях сглаживающих конденсаторов электроприводом нагрузки (емкость сглаживающего конденсатора ЧРЭП, приведенная к единице мощности

ЧРЭП). Применение удельных величин емкости и индуктивности узлов электропривода применяется для унификации полученных результатов.

На рисунке 3.10 изображены зависимости коэффициента  $K_u$  от емкости сглаживающего конденсатора ЧРЭП, построенные по данным из таблиц 17–19 (приложение 1), и сносками со стрелочками обозначены необходимые граничные величины, при которых активный фильтр в сети с такой нагрузкой может, хоть и не существенно, снижать гармонические искажения напряжения. При этом необходимая для работы АФГ граничная емкость сглаживающего конденсатора ЧРЭП снижается при увеличении индуктивности реактора электропривода.

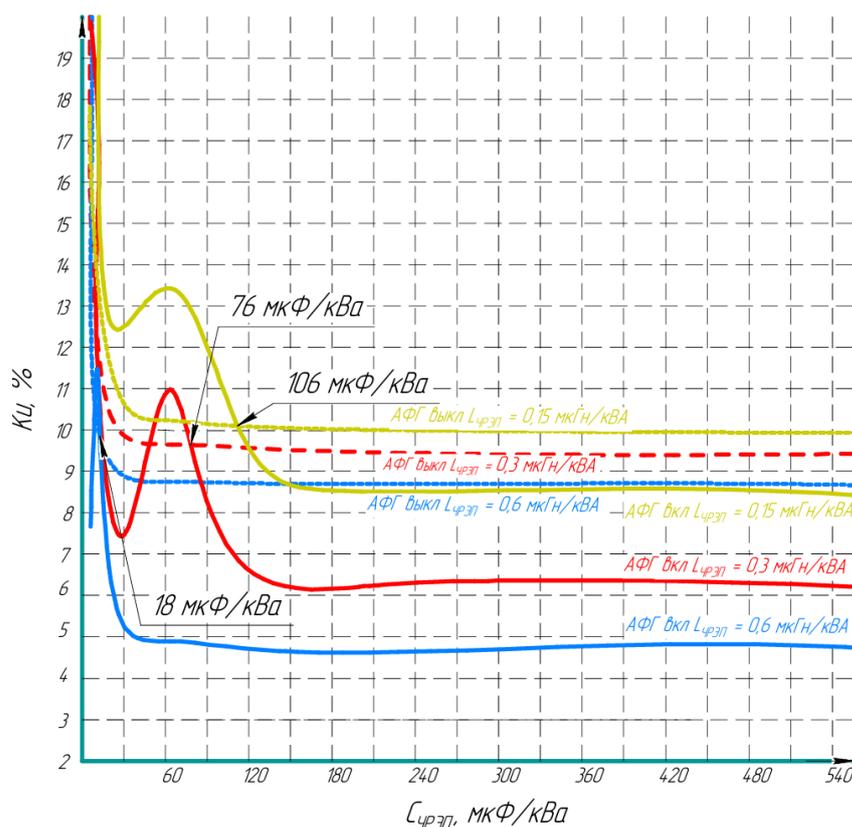


Рисунок 3.10 - Зависимость коэффициента  $K_u$  от ( $C$ ) сглаживающего конденсатора ЧРЭП

### Суммарная индуктивность линии и реактора ЧРЭП

В таблице 20 (приложение 1) приведены результаты измерения параметров качества электроэнергии и параметры АФГ при разной суммарной индуктивности линии и реактора электроприводов нагрузки. При этом

используется относительная индуктивность, то есть индуктивность линии на один кВА нагрузки.

На рисунке 3.11 приведены результаты расчёта на модели коэффициента  $K_u$  при разной, последовательно с ЧРЭП включенной, суммарной индуктивностью линии и реактора.

Как видно из рисунков 3.10 и 3.11, при данном коэффициенте загрузки трансформатора, АФ не может повышать качество электроэнергии без суммарной индуктивности линии и реактора индуктивностью меньше 0,17 мкГн/кВА, но даже при значениях  $L_{\text{ЧРЭП}} > 0,17$  мкГн/кВА, необходима соответствующая емкость сглаживающего конденсатора для стабильной работы АФГ. Такие показатели объясняются тем, что сглаживающая емкость и индуктивность ЧРЭП снижают амплитуды и углы фронтов пульсаций, что существенно снижает необходимую мощность для компенсации таких ВГС.

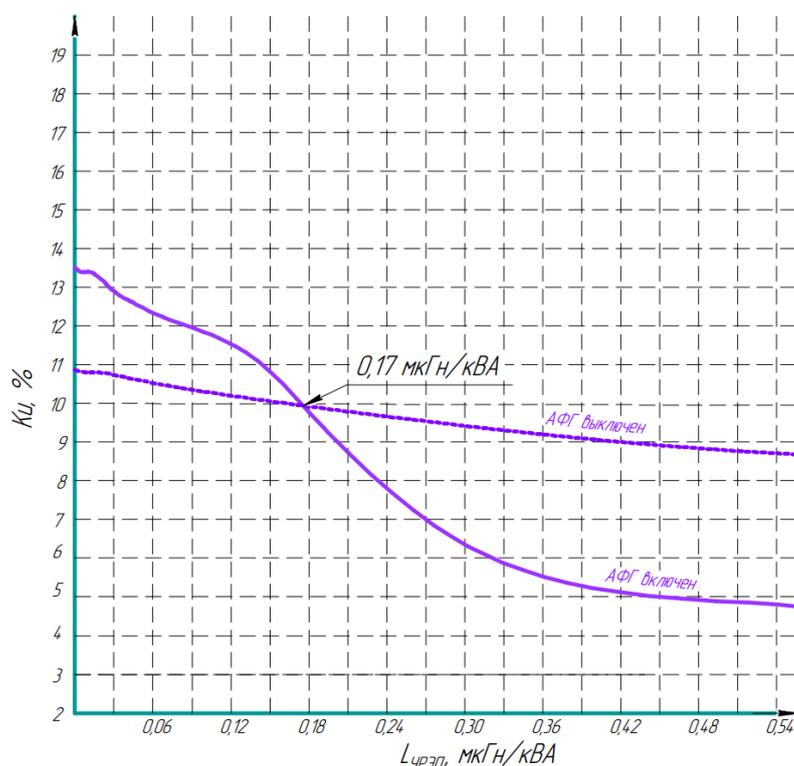


Рисунок 3.11 - Зависимость  $K_u$  от суммарной индуктивности линии и реактора ЧРЭП

### **Выводы по третьей главе**

Активные фильтры гармоник на основе релейной модуляции компенсируемых токов, имеют преимущества в цене и простоте, но обладают рядом недостатков. Основным недостатком таких систем является создание большого количества высокочастотных гармоник напряжения при малых значениях гармонических искажений токов.

Нельзя рассматривать отдельно каждый параметр активного фильтра без учета остальных, так как процессы, происходящие в активном фильтре гармоник, имеют существенно нелинейный характер. При выборе параметров необходим комплексный подход к оценке внешних параметров сети, нелинейной нагрузке и выбору параметров АФГ.

Включение  $RC$  фильтра на выходе АФГ повышает эффективность работы АФГ, при этом, практически, не влияет на сеть, а параметры такого фильтра не зависят от нагрузки ЧРЭП.

Выбор индуктивности реактора и емкости накопительного конденсатора активных фильтров гармоник является основной задачей при проектировании регуляторов качества электроэнергии на основе АФГ. При этом параметры сети и параметры электроприводов нагрузки могут существенно влиять на работу АФГ при отсутствии системы регулирования напряжения АФГ.

Индуктивность выходного реактора АФГ в существенной степени влияет на эффективность работы АФГ. При выборе индуктивности реактора необходимо учитывать мощность, потребляемую нелинейными потребителями и емкость накопительного конденсатора.

Емкость накопительного звена постоянного тока активного фильтра является одной из основных частей АФГ. Так как существует её взаимосвязь с индуктивностью реактора, то при выборе ее величины необходимо принимать во внимание ранее выбранную индуктивность реактора.

Параметры частотно-регулируемых электроприводов существенно влияют на работу активного фильтра гармоник. При некоторых значениях и соотношениях параметров ЧРЭП, возможны появления резонансных явлений

в контуре ЧРЭП – АФГ. Так как емкость сглаживающего конденсатора и суммарная индуктивность линии и реактора ЧРЭП влияют на величины и формы пульсаций потребляемого из сети тока, то эти параметры могут быть более значимы в выборе параметров АФГ чем мощность электропривода.

## ГЛАВА 4. ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ НА КОНДЕНСАТОРЕ АФГ И ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ АКТИВНОГО ФИЛЬТРА

### 4.1 Регулирование напряжения на конденсаторе АФГ и исследование взаимовлияния параметров АФГ и регулятора

Для предсказуемой и стабильной работы активного фильтра гармоник необходимо стабильное контролируемое напряжение на емкостном элементе звена постоянного тока. Повлиять на уровень напряжения  $C_{АФГ}$  возможно путем регулирования действительной и мнимой составляющих компенсационных токов [76].

После выделения компенсируемых действительных  $p_{вс}$  и мнимых  $q$  составляющих мощностей по выражениям 1.28 – 1.36, перед дальнейшим преобразованием  $p_{вс}$  и  $q$  в компенсируемые токи, выполняется операция по регулированию напряжения на звене постоянного тока АФГ. В качестве регулятора напряжения предлагается применение пропорционального регулятора. На рисунке 4.1 представлена структурная схема вычисления компенсируемых токов АФГ с регулятором напряжения на конденсаторе [76].

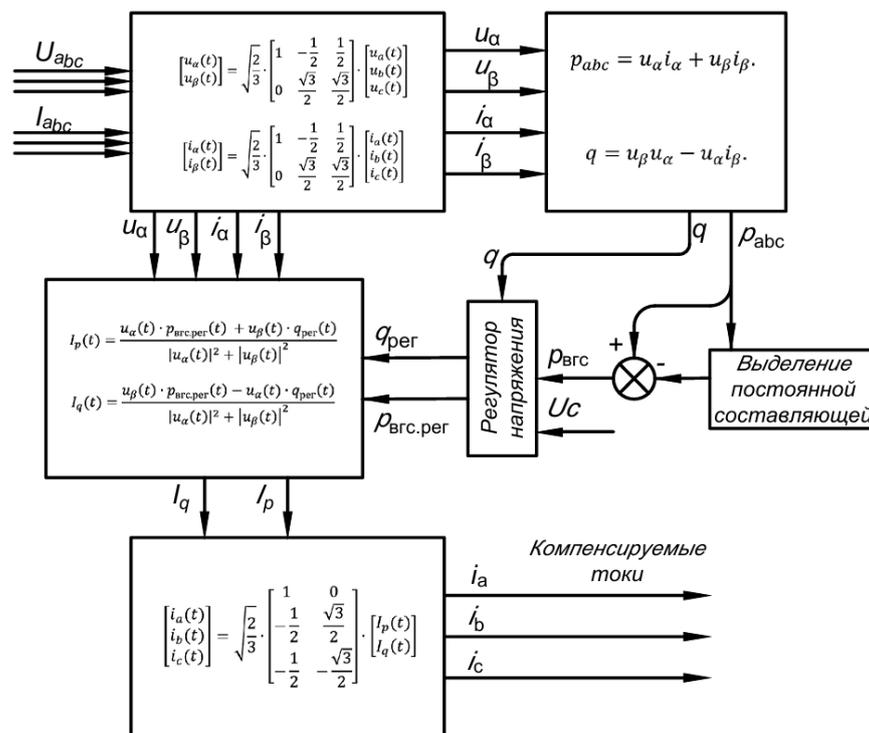


Рисунок 4.1 - Структурная схема вычисления компенсируемых токов АФГ

Для регулирования напряжения на звене постоянного тока предлагается применение пропорционального регулятора напряжения, который управляет мощностями  $p_{\text{вгс}}(t)$  и  $q(t)$  по следующим законам:

$$p_{\text{вгс.рег}}(t) = p_{\text{вгс}}(t) \cdot f_1(U_C) = p_{\text{вгс}}(t) \cdot \left[ 1 - \frac{K_1 \cdot (U_C - U_{\text{опр}})}{U_{\text{опр}}} \right], \quad (4.1)$$

$$q_{\text{рег}}(t) = q(t) \cdot f_2(U_C) = q(t) \cdot \left[ 1 - \frac{K_2 \cdot (U_C - U_{\text{опр}})}{U_{\text{опр}}} \right], \quad (4.2)$$

где  $f_1(U_C) = \left[ 1 - \frac{K_1 \cdot (U_C - U_{\text{опр}})}{U_{\text{опр}}} \right]$ ,  $f_2(U_C) = \left[ 1 - \frac{K_2 \cdot (U_C - U_{\text{опр}})}{U_{\text{опр}}} \right]$  – законы регулирования напряжения  $U_C$ ;  $p_{\text{вгс.рег}}(t)$  и  $q_{\text{рег}}(t)$  – выходные величины регулятора напряжения;  $U_{\text{опр}}$  – опорное напряжение (сигнал задания) регулятора;  $K_1$  и  $K_2$  – коэффициенты регулятора напряжения звена постоянного тока, значения которых может изменяться в зависимости от соотношения индуктивности реактора АФГ к емкости накопительного конденсатора активного фильтра. При этом для максимальной эффективности, по полученным на модели результатам, предлагается принимать  $K_2 = K_1/2$ .

Для снижения вероятности возникновения автоколебаний при переходных процессах в сети, значение  $f(U_C)$  ограничивается в пределах от 0 до 2.

Коэффициенты усиления регулятора  $K_1$  и  $K_2$  выбираются из условий достаточного быстродействия регулятора при учете постоянной времени контура, включающего индуктивность реактора и емкость конденсатора АФГ. Так как предлагаемый пропорциональный регулятор не может полностью исключить ошибку регулирования, но может в разной степени приближать значения реального напряжения конденсатора к опорному (желаемому), то коэффициенты  $K_1$  и  $K_2$ , следует выбирать достаточными для адекватного реагирования на изменения напряжения, но, недостаточными для возникновения колебаний в системе, вызванных перерегулированием [76].

При этом, ввиду того что все параметры АФГ взаимосвязаны, включая и параметры регулятора напряжения, необходимо устанавливать жесткую взаимосвязь между параметрами активного фильтра.

Так как параметры АФГ зависят напрямую или косвенно от индуктивности реактора, в первую очередь выбирается  $L_{АФГ}$ . Анализ полученных зависимостей коэффициента  $K_u$  от индуктивности выходного реактора АФГ (таблицы 3-6 приложение 1 и рисунок 3.4) показал существенную нелинейность этих зависимостей. Определив экстремумы (минимальные значения) зависимостей  $K_u$  от индуктивности выходного реактора АФГ и отстроив от них допустимые пределы в 10 %  $K_u$ , получается область допустимых значений индуктивности реактора АФГ, представленная на рисунке 4.2, а значения экстремумов и допустимых значений сведены в таблицу 4.1.

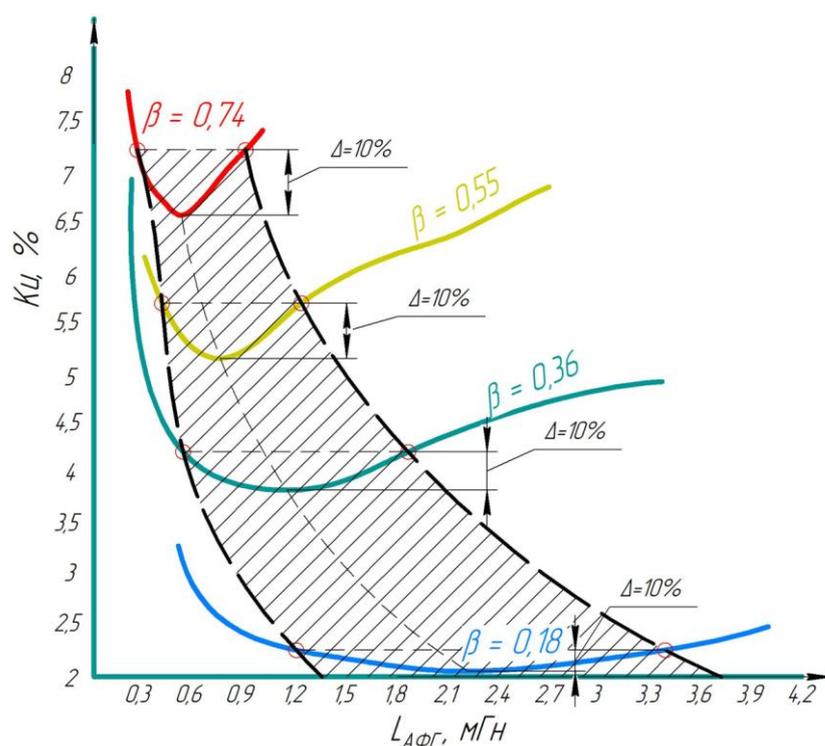
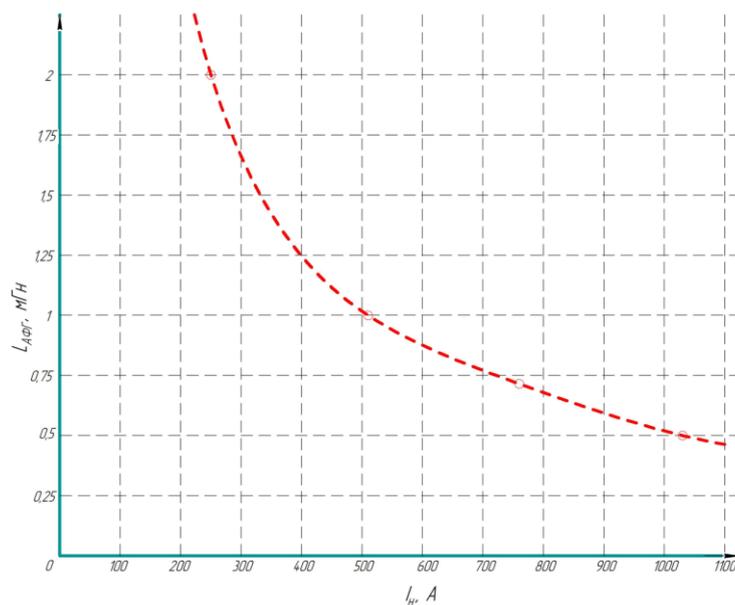


Рисунок 4.2 – Зависимости коэффициента гармонических составляющих напряжения ( $K_u$ ) от индуктивности реактора АФГ ( $L_{АФГ}$ ) в диапазоне допустимых значений

Таблица 4.1 – Допустимые значения  $L_{АФГ}$  АФГ, по условиям 10% допуска  $K_u$ 

$I_n, A$	$\beta_{нл}$	Экстремумы		Допустимые $L_{АФГ}$ , мГн	
		$K_u, \%$	$L_{АФГ}$ , мГн	Мин.	Макс.
1030	0,74	6,6	0,5	0,25	0,9
762	0,55	5,3	0,72	0,37	1,23
510	0,36	3,8	1	0,55	1,86
253	0,18	2,1	2	1,18	3,4

На рисунке 4.3, для графического определения вида зависимости, по данным из таблицы 4.1, построена зависимость индуктивностей реактора АФГ от тока нелинейных потребителей при минимальных  $K_u$ . По приведенным в таблице 4.1 зависимостям индуктивностей реактора АФГ от тока нелинейных потребителей при минимальных значениях  $K_u$ , получено уравнение для выбора индуктивности реактора АФГ по току нелинейных потребителей.

Рисунок 4.3 – Зависимость индуктивностей реактора АФГ от тока нелинейных потребителей при минимальных значениях  $K_u$

Анализ полученных зависимостей, показал, что, необходимая индуктивность реактора АФГ обратно пропорциональна току нелинейных потребителей. То есть функция  $L_{АФГ}$  от  $I_H$  имеет следующий вид:

$$L_{АФГ} = \frac{k}{I_H}, \quad (4.3)$$

где коэффициент ( $k$ ) гиперболы (из выражения 4.3) определяется по данным таблицы 4.1, исходя из тока нелинейной нагрузки и экстремумов индуктивности реактора АФГ:

$$k = I_H \cdot L_{АФГ} = 1030 \cdot 0,5 = 515 \text{ мГн} \cdot A \quad (4.4)$$

Таким образом, подставив получившееся в выражении 4.4 коэффициент  $k = 515$  в уравнение 4.3, выражение для вычисления индуктивности реактора АФГ по току нелинейных потребителей представляет собой:

$$L_{АФГ} = \frac{515}{I_H}, \text{ мГн.} \quad (4.5)$$

В качестве проверки полученного уравнения для вычисления индуктивности реактора АФГ по току нелинейных потребителей выполнено сравнение показателей, полученные на модели с показателями, рассчитанными по уравнению (таблица 4.2).

Таблица 4.2 – Проверка полученного выражения

$I_H, A$	$\beta_{нл}$	$L_{АФГ}, \text{ мГн, расчетный}$	$L_{АФГ}, \text{ мГн, экспериментальный}$	Сходимость
1030	0,74	0,5	0,5	1
762	0,55	0,68	0,72	0,94
510	0,36	1,01	1	0,99
253	0,18	2,04	2	0,98

Подобным образом получены значения коэффициента « $k$ » (выражения (4,3)) для крайних допустимых значений  $L_{АФГ}$  по условию 10% отклонения от минимальных значений.

$$k_{max} = 927 \text{ мГн} \cdot A, \quad (4.6)$$

$$k_{min} = 258 \text{ мГн} \cdot A. \quad (4.7)$$

В качестве проверки полученных коэффициентов сравнены показатели, полученные на модели с показателями, рассчитанными по уравнению (таблица 4.3).

Таблица 4.3 - Проверка полученных коэффициентов

$I_n, A$	$\beta_{нл}$	$L_{АФГ}, мГн, расчетный$		$L_{АФГ}, мГн, экспериментальный$		Сходимость	
		Мин.	Макс.	Мин.	Макс.	Мин.	Макс.
1030	0,74	0,25	0,9	0,25	0,9	1	1
762	0,55	0,34	1,22	0,37	1,23	0,9	0,99
510	0,36	0,51	1,82	0,55	1,86	0,92	0,98
253	0,18	1,04	3,6	1,18	3,4	0,9	0,93

Полученная область допустимых значений индуктивности реактора АФГ, ограниченная двумя линиями, описываемыми выражением (4.3) с коэффициентами (4.6) и (4.7), имеет высокую сходимость с результатами расчета на модели, что подтверждает возможность использования выражения (4.3) для дальнейших расчетов.

Таким образом выражение для выбора индуктивности выходного реактора АФГ сводится к следующему виду:

$$L_{АФГ} = \frac{k}{I_n}, \text{ мГн} \quad (4.8)$$

где  $k = 258 \div 927 \text{ мГн} \cdot A$ , а наилучшие показатели активный фильтр обеспечиваются при  $k = 515 \text{ мГн} \cdot A$ .

Для определения взаимовлияния  $L_{АФГ}$ ,  $C_{АФГ}$  и  $K_I$ , проведены расчеты на модели с перебором возможных коэффициентов  $K_I$ ,  $L_{АФГ}$  и  $C_{АФГ}$ . Полученные результаты измерения ПКЭ и параметров АФГ при исследовании на модели приведены в таблицах 21 – 23 (приложение 1).

По данным из таблицы 21 (приложение 1) построены графические зависимости  $K_u$  от  $C_{АФГ}$  при разных коэффициентах  $K_I$  на рисунке 4.4. На этом рисунке заштрихованная область показывает значения  $K_I$  и  $C_{АФГ}$ , при которых регулятор, за счет небольшой емкости накопительного конденсатора АФГ,

вводит активный фильтр в режим автоколебаний, поэтому такие соотношения  $K_I$  и  $C_{АФГ}$ , не могут применяться для эффективной работы АФГ.

На рисунке 4.5, а приведен график  $K_u$ , на рисунке 4.5, б график  $U_c$  от времени. Эти графики показывают автоколебания, к которым приводит выбор параметров из заштрихованной области на рисунке 4.4. При изменении соотношений  $L_{АФГ}$ ,  $C_{АФГ}$ , а также  $K_I$  может изменяться частота колебания или их амплитуда.

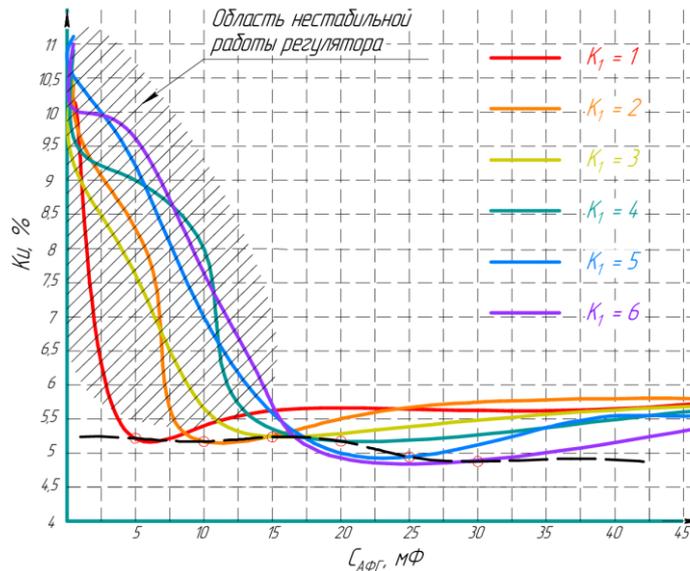


Рисунок 4.4 - Зависимости  $K_u$  от разных настроек ( $K_I$ ) регулятора и емкости накопительного конденсатора АФГ ( $C_{АФГ}$ )

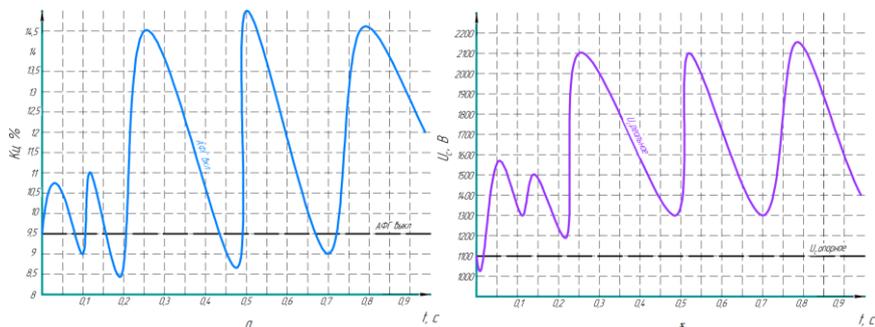


Рисунок 4.5 – Осциллограммы  $K_u$  и  $U_c$  при автоколебаниях

Графики на рисунке 4.5 отражают ограничения, наложенные на регулятор. При приближении  $U_c$  к 2200 В, что в два раза больше опорного напряжения, регулятор для гашения колебаний отключает АФГ, что приводит

к снижению  $U_c$ , но так как колебание вызвано не переходным процессом в сети, а ошибочным выбором соотношений  $L_{АФГ}$ ,  $C_{АФГ}$ , а также  $K_1$  и  $K_2$ , то в дальнейшем колебания повторяются.

На рисунке 4.3 определены и соединены черной пунктирной линией экстремумы (минимальные значения) зависимостей  $K_u$  от  $C_{АФГ}$ .

Подобные зависимости можно проследить в таблицах 21–23 (приложение 1). Если точки экстремумов соединить в линии и представить в виде зависимостей  $C_{АФГ}$  от  $K_1$ , то получатся зависимости, изображенные на рисунке 4.6

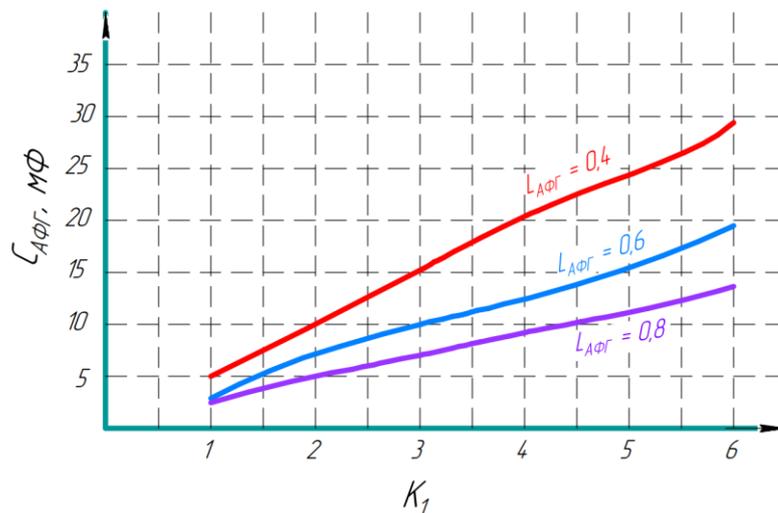


Рисунок 4.6 - Зависимости емкости накопительного конденсатора АФГ ( $C_{АФГ}$ ) от настроек ( $K_1$ ) регулятора

Из анализа представленных на рисунке 4.6 зависимостей можно сделать вывод, что зависимости  $C_{АФГ}$  от  $K_1$  имеют линейный характер.

$$C_{АФГ} = aK_1 + b. \quad (4.9)$$

При этом от индуктивности реактора АФГ зависит наклон данной линейной зависимости, то есть коэффициент ( $a$ ).

Для индуктивности  $L_{АФГ} = 0,4$  мГн реактора АФГ определен коэффициент « $a$ » по уравнению прямой проходящей через две точки, полученные из зависимостей, изображённых на рисунке 4.6:

$$\frac{C_{АФГ} - 5}{30 - 5} = \frac{K_1 - 1}{6 - 1}, \quad (4.10)$$

После преобразований уравнение имеет следующий вид:

$$C_{\text{АФГ}} = 5 \cdot K_1, \text{ мФ}, \quad (4.11)$$

где коэффициент  $a = 5$ , а коэффициент  $b = 0$ .

Аналогичным образом определены коэффициенты для остальных индуктивностей:

$$L_{\text{АФГ}} = 0,4 \text{ мГн}, a = 5.$$

$$L_{\text{АФГ}} = 0,6 \text{ мГн}, a = 3,8. \quad (4.12)$$

$$L_{\text{АФГ}} = 0,8 \text{ мГн}, a = 2,5.$$

Анализ полученных коэффициентов (4.12) показал, что коэффициент ( $a$ ), обратно пропорционален индуктивности реактора АФГ. То есть функция ( $a$ ) от  $L_{\text{АФГ}}$  будет иметь следующий вид:

$$a = \frac{k}{L_{\text{АФГ}}}, \text{ мГн} \quad (4.13)$$

Вычисление константы ( $k$ ) гиперболической зависимости:

$$k = a \cdot L_{\text{АФГ}} = 5 \cdot 0,4 = 2 \text{ мГн}. \quad (4.14)$$

Таким образом, подставив получившееся в выражении 4.14 коэффициент  $k = 2$  в уравнение 4.15, выражение для вычисления коэффициента ( $a$ ) выглядит следующим образом:

$$a = \frac{2}{L_{\text{АФГ}}}, \text{ мГн} \quad (4.15)$$

Заменив в выражении (4.11) коэффициент ( $a$ ) на его функцию от  $L_{\text{АФГ}}$  из выражения (4.15), получим следующее параметрическое выражение для расчета требуемого  $C_{\text{АФГ}}$  при известных  $L_{\text{АФГ}}$  и  $K_1$ :

$$C_{\text{АФГ}} \geq \frac{2 \cdot K_1}{L_{\text{АФГ}}}, \text{ мФ}, \quad (4.16)$$

где  $L_{\text{АФГ}}$  – индуктивность реактора АФГ в мГн;  $K_1$  – коэффициент, который, как будет показано дальше, рекомендуется принимать от  $1 \div 6$ .

В качестве проверки полученного уравнения для вычисления индуктивности реактора АФГ по току нелинейных потребителей сравнены показатели, полученные на модели с показателями, рассчитанными по

уравнению (4.16). Минимальная сходимость результатов моделирования и расчетов по полученному выражению (4.16) превышает 0,95, поэтому предложенное выражение (4.16) можно принимать для дальнейшего исследования.

В таблицы 24–27 (приложение 1) сведены параметры качества электроэнергии, сети и активного фильтра при выборе параметров АФГ по предложенной методике. В графическом виде данные из таблиц 24–27 (приложение 1), представлены в виде зависимостей суммарных коэффициентов гармонических составляющих от коэффициента  $K_I$  на рисунке 4.6.

Проведенные вычисления, данные которых представлены в таблицах 24–27 (приложение 1) и рисунке 4.7, показывают правильность предложенного выражения для выбора емкости накопительного конденсатора (4.16). Так при выборе параметров АФГ по предложенной методике существенно снижается суммарный коэффициент гармонических составляющих (рисунок 4.7), регулируется напряжение (рисунок 4.8), а также отсутствуют колебания напряжения на звене постоянного тока активного фильтра.

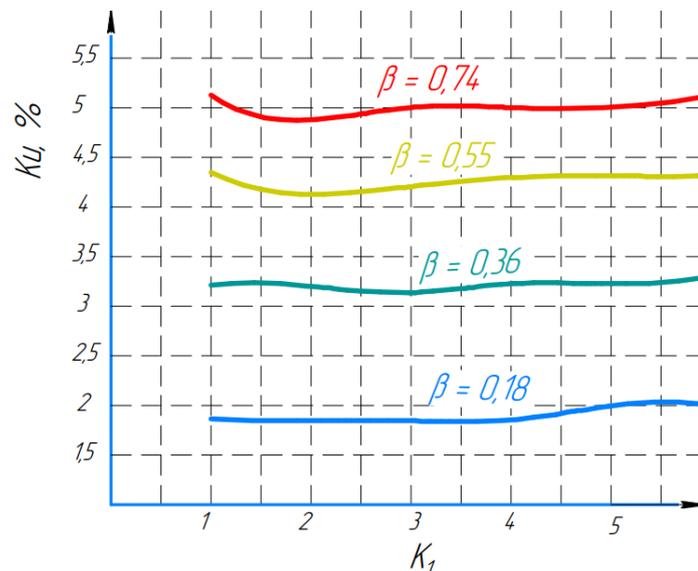


Рисунок 4.7 - Зависимость коэффициента гармонических искажений напряжения от загрузки трансформатора при разных настройках ( $K_I$ ) регулятора

При работе регулятора напряжения возможно добиться при  $\beta = 0,74$   $K_u = 4,9\%$ , в то время как без регулятора напряжения на звене постоянного тока АФГ, возможно получить только  $K_u = 6,5\%$ , прирост эффективности составляет 25%.

На рисунке 4.8 изображены зависимости напряжения на конденсаторе от коэффициента « $K_I$ ». Как можно видеть из этого рисунка, напряжение близится к опорному значению в 1100 В при увеличении « $K_I$ ». Как видно из рисунка 4.7, при коэффициенте  $K_I = 1$ , напряжение регулируется с допуском в 20 % от опорного, при  $K_I = 4$ , с допуском в 10 %. Наиболее эффективной работы АФГ можно добиться при выборе параметров АФГ, соответствующим  $K_I = 3 \div 4$ , так как при таких значениях напряжение регулируется с отклонением не более 10% от заданного значения, а увеличение значения  $K_I > 4$  приведет к существенному росту емкости накопительного конденсатора, такой выбор может быть не целесообразен с экономической стороны.

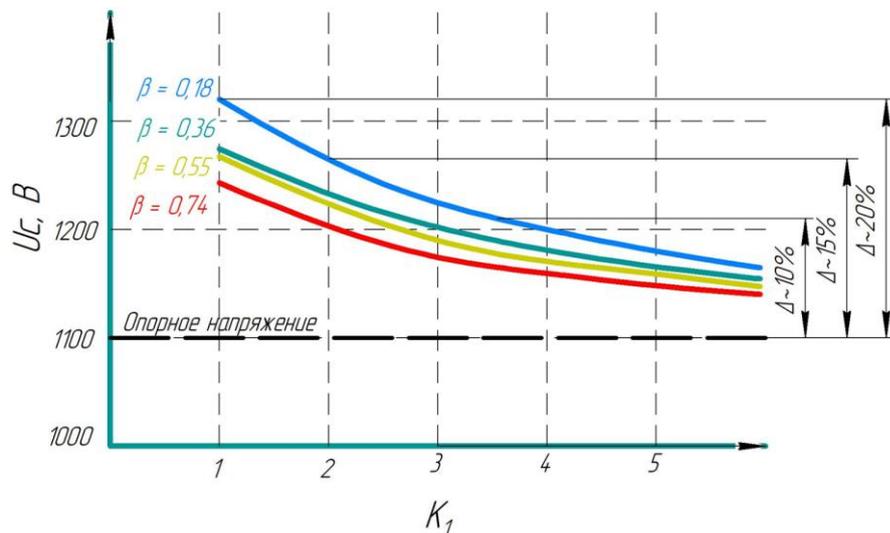


Рисунок 4.8 - Зависимости напряжения на конденсаторе АФГ от разных настроек ( $K_I$ ) регулятора

Важным значением при проектировании активных фильтров гармоник является опорное напряжения регулятора напряжения на конденсаторе АФГ. То есть то напряжение, до которого регулятор будет стабилизировать напряжение на конденсаторе. В таблицах 28–31 (приложение 1) приведены

результаты вычисления параметров качества электроэнергии и активного фильтра при изменении опорного напряжения.

На рисунке 4.9 изображена диаграмма зависимостей  $K_u$  от коэффициента  $K_I$  опорного напряжения, построенная по данным из таблиц 28–31 (приложение 1).

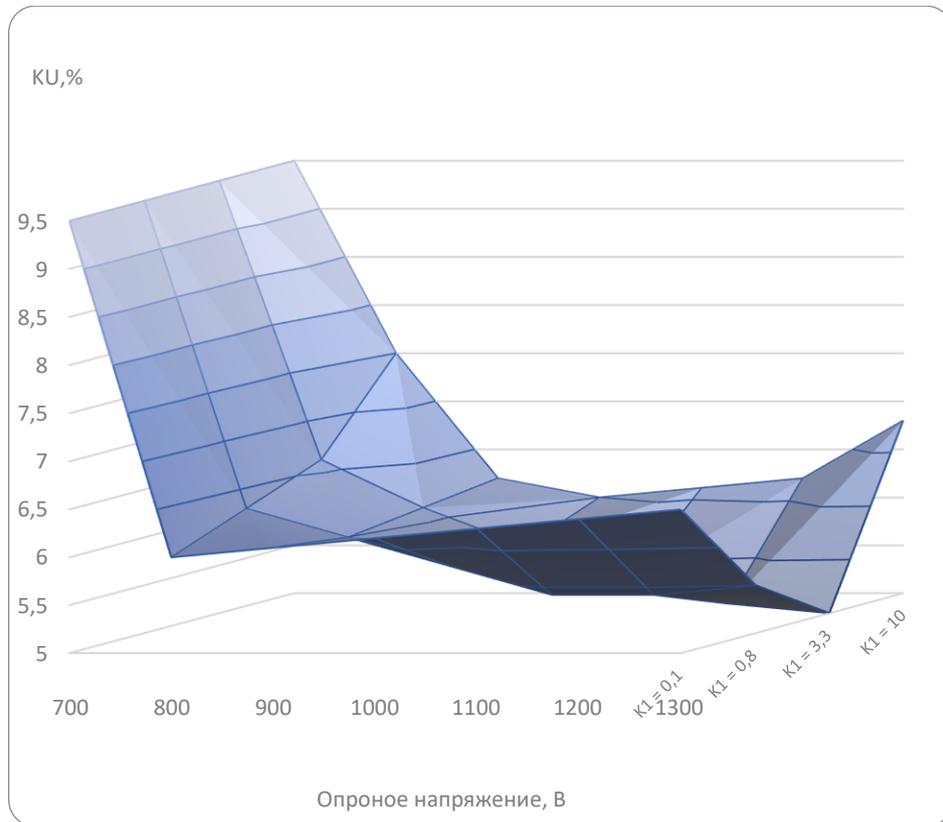


Рисунок 4.9 - Зависимости коэффициента гармонических искажений напряжения ( $K_u$ ) от разных настроек ( $K_I$ ) регулятора и опорного напряжения

Данные из таблиц 28–31 (приложение 1) и рисунка 4.9, показывают эффективную работу активного фильтра в большом диапазоне опорных напряжений. При этом прослеживается связь разницы опорного напряжения с реальным напряжением и коэффициента гармонических составляющих тока. Искажения напряжения при этом не изменяется пропорционально снижению отклонения реального напряжения от опорного, ввиду увеличения передаваемых в сеть от АФГ высокочастотных гармоник. ВГС, создаваемые самим АФГ, увеличиваются, ввиду повышения частоты коммутаций и напряжения на конденсаторе.

Значение опорного напряжения необходимо выбирать при проектировании активных фильтров, при этом повышение эффективности АФГ путем увеличения опорного напряжения, может быть неоправданным с точки зрения цены за незначительное снижение  $K_u$ .

#### **4.2 Исследование влияния индуктивности цепи питания ЧРЭП на методику выбора параметров АФГ**

Так как предложенное выражение (4.16) выведено при определенных параметрах нелинейной нагрузки, а характер гармонических искажений меняется с их изменением, в этом выражении необходимо заменить коэффициент « $k = 2$ » из выражения (4.16), на функцию от индуктивности ЧРЭП для учета этого параметра.

При снижении индуктивности реактора ЧРЭП существенно повышаются амплитуды гармонических искажений, что требует более высокого тока для их компенсации. А это, в свою очередь, влечет за собой необходимость либо снижать  $K_1$ , либо повышать емкость  $C_{АФГ}$ .

В таблице 32 (приложение 1) сведены результаты расчетов ПКЭ при изменении удельной индуктивности реактора ЧРЭП и емкости накопительного конденсатора АФ. На рисунке 4.10 изображены зависимости  $K_u$  от емкости накопительного конденсатора АФ при разных индуктивностях реактора ЧРЭП, построенные по данным из таблицы 32 (приложение 1).

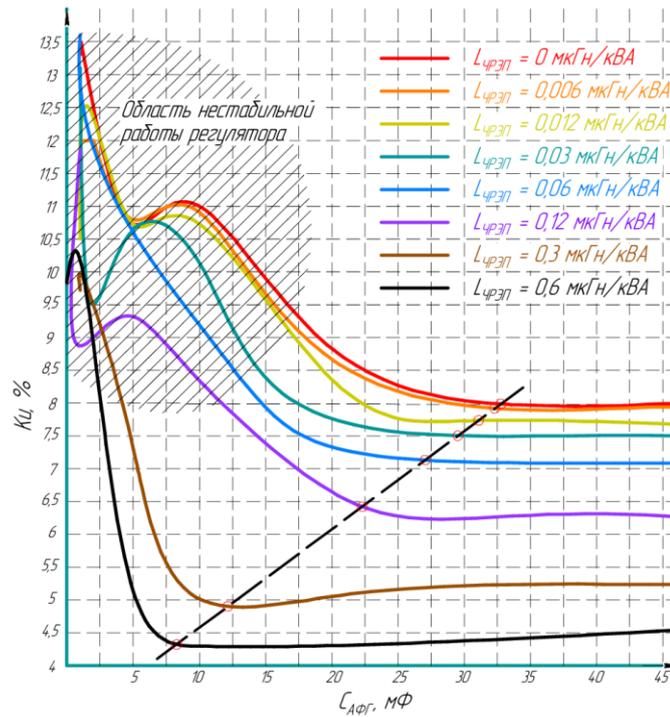


Рисунок 4.10 - Зависимости  $K_u$  от емкости накопительного конденсатора АФГ ( $C_{\text{АФГ}}$ ) при разной суммарной индуктивности линии и реактора ЧРЭП ( $L_{\text{чрЭП}}$ )

На рисунке 4.10 черной пунктирной линией соединены точки емкости накопительного конденсатора активного фильтра достаточной для обеспечения стабильной работы АФГ, а на рисунке 4.11 построена красной линией зависимость допустимых для стабильной работы активного фильтра  $C_{\text{афг}}$  от  $L_{\text{чрЭП}}$ . Также на рисунке 4.11 обозначены отстроенные от минимально допустимых значений точки, значение емкости АФГ в которых при той же индуктивности ЧРЭП на 20 % больше.

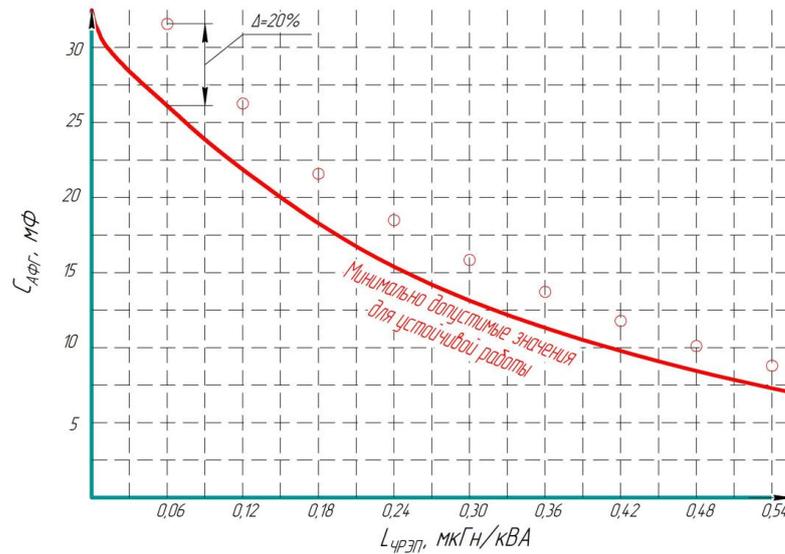


Рисунок 4.11 – Зависимость емкости накопительного конденсатора АФГ ( $C_{\text{АФГ}}$ ) от суммарной индуктивности линии и реактора ЧРЭП ( $L_{\text{чрЭП}}$ ) для устойчивой работы АФГ

Методом аппроксимации логарифмической функции одной переменной при помощи компьютерных расчетов [138] и полученных результатов расчетов на модели минимально допустимых значений емкости накопительного конденсатора, с учетом 20% запаса емкости (точки на рисунке 4.11), была получена функция (со средней ошибкой аппроксимации 2,7%) коэффициента  $C_{\text{АФГ}}$  от индуктивности реактора ЧРЭП:

$$C_{\text{АФГ}} \geq (4,8 - 9,6 \cdot \ln[L_{\text{чрЭП}}]), \text{ мФ}, \quad (4.17)$$

функция получена при определенных значениях индуктивности реактора АФГ ( $L_{\text{АФГ}} = 0,5 \text{ мГн}$ ) и коэффициенте регулятора ( $K_I = 4$ ).

Выражение для выбора емкости накопительного конденсатора АФГ при учете индуктивности реактора ЧРЭП индуктивности реактора АФГ и коэффициента регулятора:

$$C_{\text{АФГ}} \geq \frac{(0,6 - 1,2 \cdot \ln[L_{\text{чрЭП}}]) \cdot K_1}{L_{\text{АФГ}}}, \text{ мФ}, \quad (4.18)$$

где  $L_{\text{чрЭП}}$  – удельная суммарная индуктивность ЧРЭП (мкГн/кВа),  $L_{\text{АФГ}}$  – индуктивность реактора АФГ (мГн).

На рисунке 4.12, проведена синяя линия, по которой в дальнейшем будет производиться выбор параметров активного фильтра. Эта линия описывается выражением (4.18).

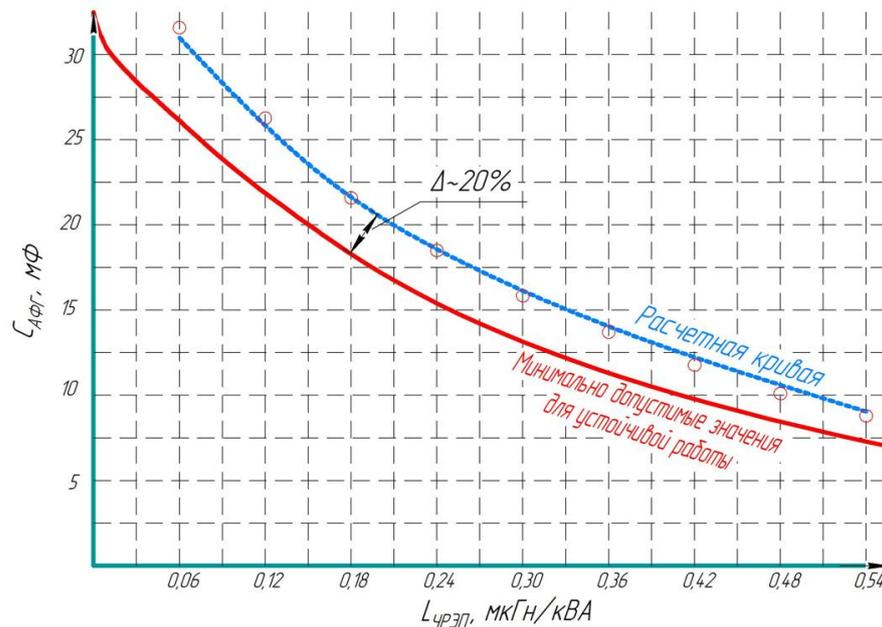


Рисунок 4.12 – Зависимости значений емкости накопительного конденсатора АФГ, от суммарной индуктивности линии и реактора ЧРЭП

В таблицы 33–36 (приложение 1) сведены параметры качества электроэнергии, сети и активного фильтра при выборе параметров АФГ по предложенной уточненной методике выбора емкости накопительного конденсатора активного фильтра. В графическом виде данные из таблиц 33 – 36 (приложение 1) представлены в виде зависимостей суммарных коэффициентов гармонических составляющих от индуктивности нелинейных потребителей ( $L_{\text{ЧРЭП}}$ ) на рисунке 4.13. Для всех нагрузок выбраны индуктивности АФГ при коэффициенте  $k = 515$  и емкость  $C_{\text{АФГ}}$  при коэффициенте  $K_1 = 4$ .

Проведенные вычисления, результаты которых представлены в таблицах 33–36 (приложение 1) и рисунке 4.13, показывают правильность предложенного выражения для выбора емкости накопительного конденсатора (4.18). Так при выборе параметров АФГ по предложенной методике существенно снижается суммарный коэффициент гармонических

составляющих, регулируется напряжение, а также отсутствуют колебания напряжения на звене постоянного тока активного фильтра, что показывает правильность выбора соотношений параметров активного фильтра.

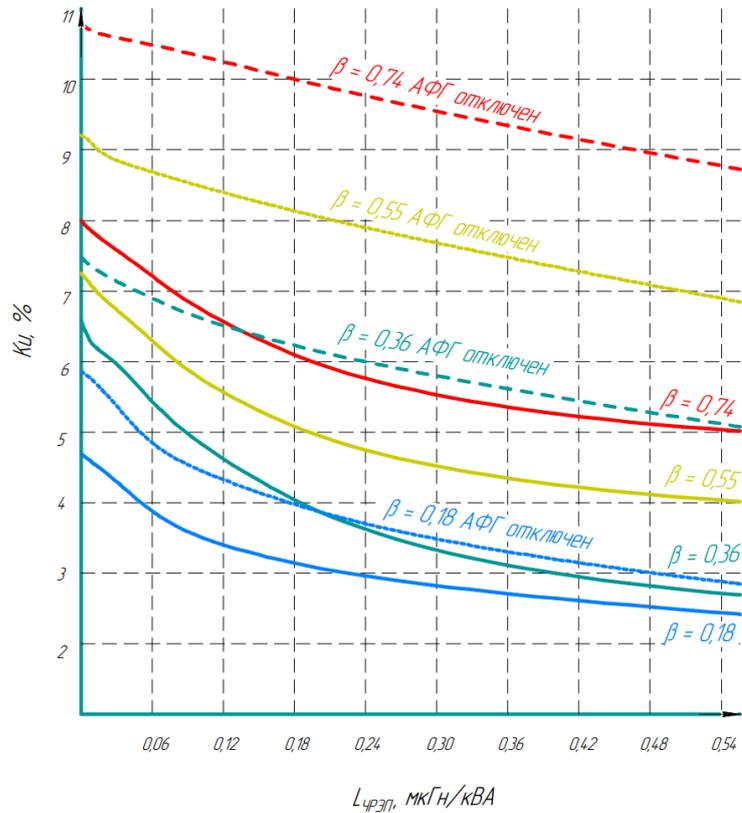


Рисунок 4.13 - Зависимость коэффициента гармонических составляющих напряжения ( $K_u$ ) от суммарной индуктивности линии и реактора нелинейной нагрузки ( $L_{чрЭП}$ )

В таблице 4.4 приведены результаты измерений ПКЭ при изменении индуктивности реакторов на электроприводах нагрузки как при работе АФ с регулятором напряжения, так и без него. При этом параметры АФГ не изменялись под каждую суммарную индуктивность ЧРЭП, а были выбраны для фиксированной нагрузки и индуктивности  $L_{чрЭП} = 30$  мГн/кВА. На рисунке 4.14 приведены результаты вычислений коэффициента  $K_u$  при изменении индуктивности реакторов на электроприводах нагрузки с регулятором напряжения. Как видно из рисунка 4.14, применение регулятора напряжения конденсатора АФГ, увеличивает эффективность активного

фильтра как в идеальных случаях, с большой индуктивностью реакторов нагрузок, так и полном их отсутствии.

Также для объективности оценки, добавлены результаты измерений ПКЭ при работе классического метода регулирования напряжения с использованием ПИ регулятора. При этом коэффициенты регулятора для данной нагрузки приняты следующие:  $P = 200$ ,  $I = 40$ . Для имитации регулятора на модели, используется «*Discrete PID controller*», а приведенные коэффициенты настройки, так как нет описанной методики их выбора, получены при переборе на модели из условий приемлемого снижения гармонических искажений напряжения и соизмеримого с «новым», уровнем регулирования напряжения.

Таблица 4.4. Показатели качества электроэнергии и напряжения активного фильтра при разных индуктивностях линии с нелинейной нагрузкой

LчрЭП, мГн/кВА	АФГ выкл.			АФГ с новым рег. вкл.				АФГ с классическим рег.вкл.			
	I <sub>н</sub> , А	K <sub>и</sub>	K <sub>и</sub>	I <sub>н</sub>	K <sub>и</sub>	K <sub>и</sub>	U <sub>с</sub>	I <sub>н</sub> , А	K <sub>и</sub>	K <sub>и</sub>	U <sub>с</sub>
0	1043	10,8	32,9	102	8	18,9	1200	1026	13	35,	1450
0,006	1043	10,7	32,8	102	7,9	18,6	1200	990	11,3	26,	1330
0,012	1044	10,7	32,7	102	7,9	18,3	1200	960	11,2	25	1320
0,03	1044	10,6	32,4	102	7,6	17,6	1190	1062	11,3	26,	1310
0,06	1045	10,5	32	102	7,2	16,4	1190	1008	11,4	24,	1300
0,12	1046	10,2	31,1	102	6,5	14,4	1180	1023	10,1	20,	1270
0,3	1053	9,5	28,7	101	5,1	10	1160	1020	6,8	9,5	1220
0,6	1061	8,7	26,2	102	4,4	5,9	1130	1022	4,7	4,3	1200

Из данных таблицы 4.4 можно сделать вывод о нестабильной работе классического регулятора напряжения при изменении параметров линии нелинейной нагрузки. Это подтверждает тезис о необходимости, при таком регуляторе, настройки регулятора под конкретные условия, что в условиях промышленности, с частыми изменениями уровня и характера нагрузки, невозможно.

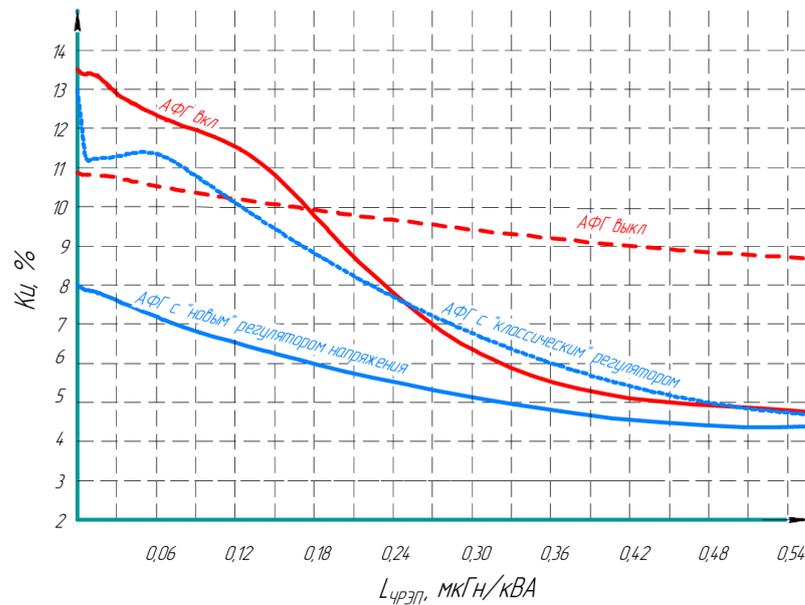


Рисунок 4.14 - Зависимости коэффициента  $K_u$  от индуктивности линии нелинейной нагрузки ( $L_{чрэл}$ )

Из зависимости на рисунке 4.14 видно, что активный фильтр без регулятора напряжения или с классическим регулятором (рисунок 1.29), не способен снижать  $K_u$  при маленьких удельных индуктивностях линии нагрузки, в отличие от АФ с предложенным «новым» регулятором напряжения. Так активный фильтр с регулятором напряжения и выбором параметров по предложенной методике обеспечивает допустимое содержания высших гармонических искажений в соответствии с ГОСТ 32144-2013 во всем диапазоне изменения удельных индуктивностей линии.

### 4.3 Исследование влияния емкости сглаживающего конденсатора ЧРЭП на методику выбора параметров АФГ

Так как предложенное уточненное выражение (4.18) установлено при статичных емкостях сглаживающего конденсатора нелинейной нагрузки, а характер гармонических искажений меняется с их изменением, в это выражение необходимо добавить поправочный коэффициент, учитывающий емкость конденсаторов ЧРЭП.

При снижении емкости конденсатора ЧРЭП существенно повышаются амплитуды гармонических искажений, что может существенно влиять на работу АФГ.

В таблице 37 (приложение 1) сведены результаты расчетов ПКЭ при изменении удельной емкости сглаживающего конденсатора ЧРЭП и емкости накопительного конденсатора АФ. На рисунке 4.15 изображены зависимости  $K_u$  от емкости накопительного конденсатора АФ при разных емкостях конденсатора ЧРЭП, построенные по данным из таблицы 37 (приложение 1).

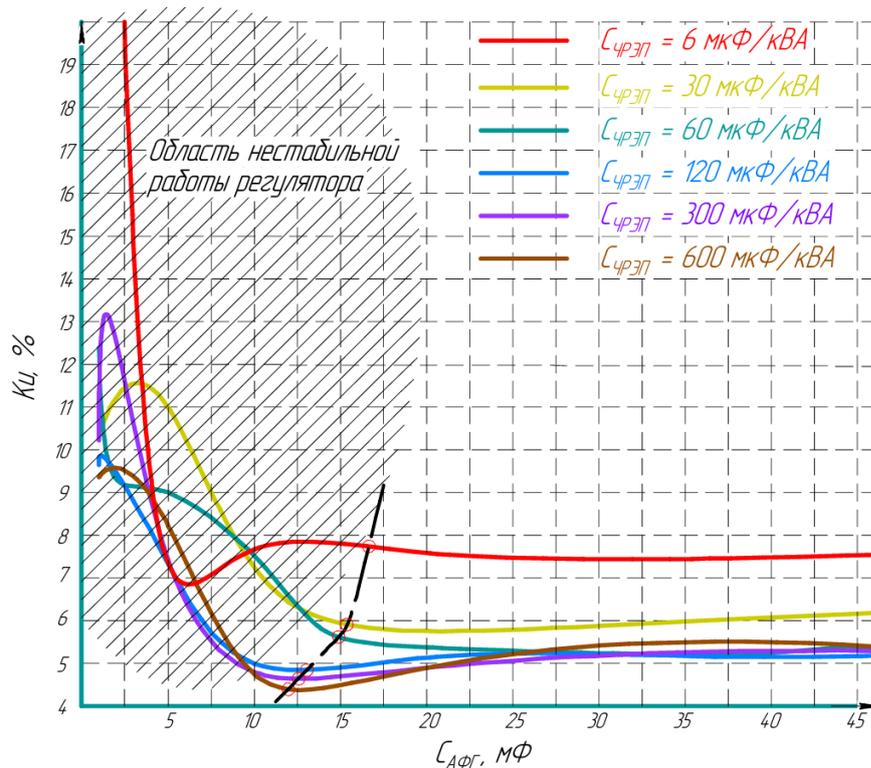


Рисунок 4.15 - Зависимости  $K_u$  от емкости накопительного конденсатора АФ ( $C_{АФГ}$ ) при разных емкостях сглаживающего конденсатора ЧРЭП ( $C_{ЧРЭП}$ )

На рисунке 4.15 черной пунктирной линией соединены точки достаточной емкости конденсатора активного фильтра. Из этой зависимости можно сделать вывод о том, что при выбранной емкости накопительного конденсатора АФ по индуктивности ЧРЭП, изменение емкости сглаживающего конденсатора ЧРЭП не приводит к необходимости повышать емкость накопительного конденсатора АФ.

#### 4.4 Исследование влияние нелинейной нагрузки на работу активного фильтра гармоник

Кроме возможности использования АФГ с регулятором для фильтрации ВГС от ЧРЭП без входных фильтров и больших емкостей сглаживающих емкостей, предложенный регулятор напряжения повышает эффективность АФГ при изменении уровня нелинейной нагрузки. Результаты исследования на имитационной модели эффективности активного фильтра, представлены в таблице 4.5 и на рисунке 4.16. Исследование заключалось в приближении имитационных режимов работы к реальным, то есть к возможным изменениям уровней нелинейных нагрузок, при этом АФГ по предложенной методике настроен на загрузку трансформаторной подстанции нелинейной нагрузкой  $\beta_{нл} = 0,36$ .

Таблица 4.5 – Показатели качества электроэнергии от загрузки трансформатора

	АФГ выкл		АФГ вкл		АФГ с новым рег.		АФГ с классическим рег.	
	$K_u, \%$	$K_I, \%$	$K_u, \%$	$K_I, \%$	$K_u, \%$	$K_I, \%$	$K_u, \%$	$K_I, \%$
$\beta = 0,18$	3,4	42,9	2,7	1,7	2,7	3,3	2,6	4,4
$\beta = 0,36$	5,8	35,9	3,9	4,1	3	10,6	4,1	12,6
$\beta = 0,55$	7,8	31,9	5,3	7,4	4,4	12,7	6,3	16,9
$\beta = 0,74$	9,6	29	6,9	9,5	6,1	14	8,4	18
$\beta = 0,92$	11,2	26,6	8,6	10,7	7,7	14,6	10	18,1

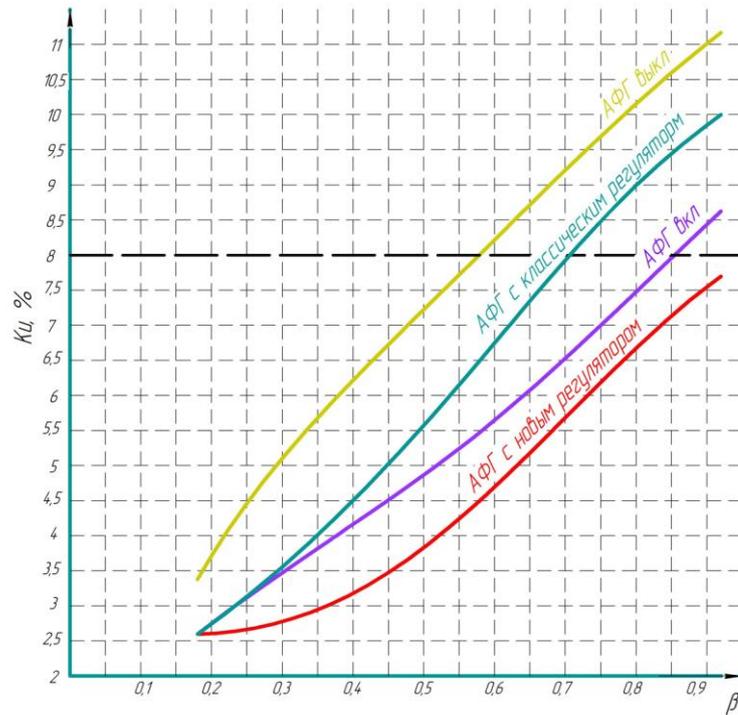


Рисунок 4.16 - Зависимости коэффициента гармонических составляющих напряжения  $K_{ц}$  от загрузки трансформатора

Как видно из рисунка 4.16, АФ с «новым» регулятором напряжения эффективно подавляет ВГС на всем диапазоне возможной загрузки трансформатора. Активный фильтр без регулятора или с классическим регулятором не может обеспечить таких показателей. Также необходимо учитывать, что в данной модели применялись реакторы нагрузки около 0,3 мГн/кВА, что существенно облегчило работу АФ без регулятора. При снижении индуктивности  $L_{чрэл}$ , картина будет существенно менять в пользу «нового» регулятора напряжения АФГ.

#### 4.5 Исследование влияния параметров питающей сети на параметры качества электроэнергии и работу активного фильтра

В соответствии с выражениями (1.23–1.26) на работу АФГ могут влиять не только параметры активного фильтра и нелинейной нагрузки, но и питающей сети. В таблицах 4.6–4.8 приведены результаты расчетов на модели параметров качества электроэнергии при изменении расчетного  $U_k$  трансформатора ТМ1000 6/0,4 (рисунок 2.6а), изменении расчетных потерь короткого замыкания этого же трансформатора, а также изменение длины линии, питающей трансформатор.

Таблица 4.6 - Показатели качества электроэнергии и напряжения активного фильтра при изменении  $U_k$  трансформатора.

$U_k, \%$	АФГ выкл			АФГ вкл				АФГ с рег. вкл			
	$I_H, A$	$K_u, \%$	$K_I, \%$	$I_H, A$	$K_u, \%$	$K_I, \%$	$U_c, B$	$I_H, A$	$K_u, \%$	$K_I, \%$	$U_c, B$
4	1048	8,6	30,4	1029	5,7	5,6	1490	1020	4,5	10,6	1170
4,5	1049	9,1	29,7	1029	6,2	5,6	1470	1020	5	10	1160
5	1051	9,6	29	1029	6,5	5,5	1460	1019	5,1	10	1160
5,5	1053	10	28,4	1029	6,9	5,4	1450	1020	5,4	9,7	1160
6	1055	10,4	27,8	1029	7,3	5,3	1440	1020	5,7	9,5	1160

Таблица 4.7 - Показатели качества электроэнергии и напряжения активного фильтра при изменении  $\Delta P_{кз}$  трансформатора.

$\Delta P_{кз},$ кВт	АФГ выкл			АФГ вкл				АФГ с рег. вкл			
	$I_H, A$	$K_u, \%$	$K_I, \%$	$I_H, A$	$K_u, \%$	$K_I, \%$	$U_c, B$	$I_H, A$	$K_u, \%$	$K_I, \%$	$U_c, B$
5	1042	9,5	29,3	1020	6,5	5,6	1480	1010	5,1	10,1	1160
8	1046	9,5	29,2	1026	6,7	5,6	1470	1015	5,1	10	1160
10	1051	9,6	29	1029	6,5	5,5	1460	1019	5,1	10	1160
15	1059	9,6	28,8	1036	6,5	5,4	1460	1027	5,2	9,9	1160
20	1070	9,7	28,4	1043	6,6	5,3	1450	1034	5,2	9,7	1160

Таблица 4.8 - Показатели качества электроэнергии и напряжения активного фильтра при изменении длины линии питания трансформатора подстанции.

L, км	АФГ выкл		АФГ вкл			АФГ с «новым» рег.			АФГ с классическим рег.		
	K <sub>u</sub> , %	K <sub>I</sub> , %	K <sub>u</sub> , %	K <sub>I</sub> , %	U <sub>c</sub> , В	K <sub>u</sub> , %	K <sub>I</sub> , %	U <sub>c</sub> , В	K <sub>u</sub> , %	K <sub>I</sub> , %	U <sub>c</sub> , В
0,5	9,6	29	6,5	5,5	1460	5,1	10	1160	6,8	9,5	1220
1	9,8	28,7	7	5,5	1460	5,3	9,8	1160	7,1	9,5	1220
2	10,2	28	7,7	5,3	1450	5,4	9,5	1160	7,6	9,1	1220
5	11,6	26,2	9,2	5,1	1400	5,9	8,9	1160	10,7	8,6	1210
10	14,1	23,1	10	4,4	1350	7,1	8,1	1160	13,6	8,5	1200

Результаты расчетов из таблиц 4.6 и 4.7 показывают, что при изменении параметров  $\Delta P_{кз}$  и  $U_k$ , изменение ПКЭ, как при работе АФГ, так и без него, незначительно изменяются. Это связано с маленьким диапазоном изменения параметров трансформатора, но так как серийно выпускаемые трансформаторы имеют схожие параметры, то изменять параметры в больших диапазонах нет смысла.

В таблице 4.8 изменение длина линии электропитания трансформатора изменяется в большем диапазоне, что существенно влияет как на параметры качества электроэнергии без АФГ, так и на работу АФГ. На рисунке 4.17 представлена графическая зависимость суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения от длины линии питания трансформатора подстанции.

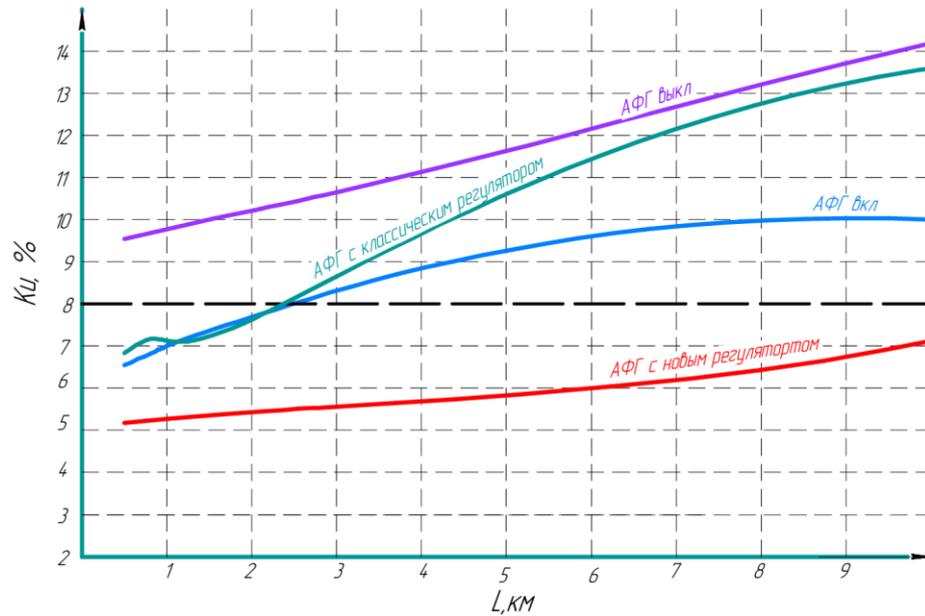


Рисунок 4.17 - Зависимости коэффициента  $K_u$  от длины линии питания трансформатора

Как видно из рисунка 4.17 фильтр без регулятора или с классическим регулятором напряжения не способен снижать  $K_u$  до допустимых согласно ГОСТ 32144–2013 нормам при длине линии больше 2,5 км. При этом АФГ с регулятором напряжения на конденсаторе эффективно справляется с такой задачей на всем исследуемом диапазоне.

Предложенный метод выбора параметров АФГ и регулирования напряжения на накопительном конденсаторе активного фильтра, обеспечивает эффективную работу такого устройства при существенном изменении параметров сети, электропривода и величины нагрузки.

При выборе параметров активного фильтра и регулятора напряжения по предложенной методике напряжение на звене постоянного тока АФГ стабилизируется на одном уровне, а автоколебания системы отсутствуют. При этом уровень напряжения, на котором стабилизируется система, не имеет абсолютного, фиксированного значения, а определяется характером и уровнем нелинейных потребителей, и параметрами активного фильтра и регулятора напряжения, но его значение изменяется при изменении перечисленных

факторов незначительно. На рисунке 4.18 представлена осциллограмма напряжения на накопительном конденсаторе АФ.

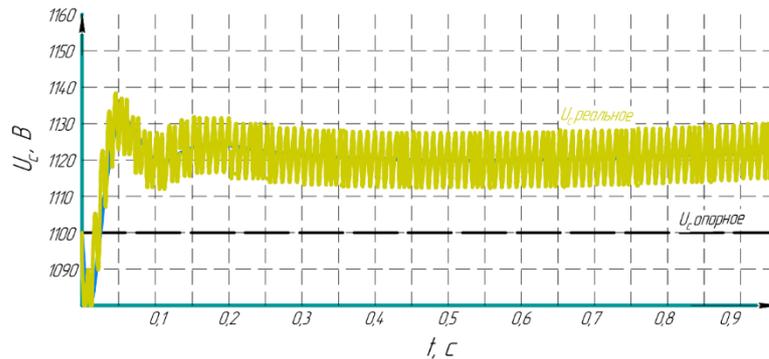


Рисунок 4.18 - Осциллограмма напряжения на звене постоянного тока АФ

Снижение  $K_u$  при использовании АФГ с регулятором напряжения по сравнению с АФГ без регулятора обусловлено не снижением всех высших гармоник, а снижением лишь части из них. На рисунке 4.19 приведен спектральный анализ кривых напряжения без АФГ, с АФГ, но без регулятора и с АФГ, включающем регулятор на напряжения.

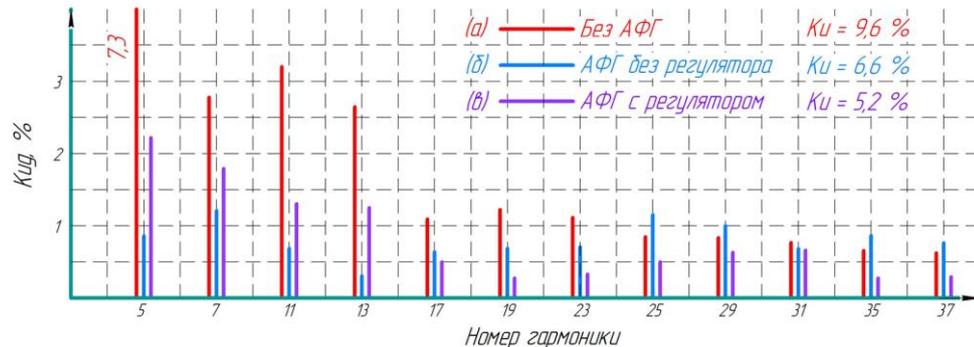


Рисунок 4.19 - Спектральный состав напряжения: (а) без АФГ, (б) с АФГ, но без регулятора и (в) с АФГ, включающем регулятор напряжения.

Из рисунка 4.19 видно, что до 13 гармоники включительно, активный фильтр без регулятора напряжения, за счет высокого напряжения на конденсаторе, эффективнее компенсирует искажения. Такой эффект получается за счет более быстрого нарастания тока в индуктивности реактора активного фильтра.

Но гармоники более высоких частот при АФ с регулятором становятся существенно ниже, за счет меньшего влияния активного фильтра на сеть. При этом коэффициент суммарных гармонических составляющих при АФ с регулятором ниже, за счет снижения большого количества высокочастотных гармоник, а не ввиду существенного снижения низкочастотных ВГС.

#### **4.6 Методика выбора параметров двухуровневого АФГ**

Методика выбора параметров АФГ сводится к следующим пунктам:

1. Оценка текущего состояния качества электроэнергии. На этом этапе производятся инструментальные измерения на разных участках электросистемы параметров качества электроэнергии. В число необходимых измеряемых параметров входят: суммарные коэффициенты гармонических искажений напряжения и тока (как первоисточника искажений напряжения), величины токов и напряжения, а также коэффициента мощности.

2. После проведенных инструментальных измерений параметров качества электроэнергии принимается техническое обоснование установки устройств повышения качества электроэнергии.

3. Оценка средневзвешенных значений загрузки трансформатора нелинейной нагрузкой. Исходя из полученных в первом пункте данных, рассчитывается нормальная загрузка трансформатора нелинейной нагрузкой, на величину которой, впоследствии, будет выбираться активный фильтр. При этом необходимо учитывать возможные изменения этой нагрузки. Стоит отметить, что как увеличение нелинейной нагрузки от рассчитанной может привести к невозможности обеспечивать активным фильтром допустимых по нормам ПКЭ, так и слишком низкая загрузка может отрицательно отразиться на работе системы.

4. Исследование параметров нелинейной нагрузки. Следующим шагом необходимо получить данные о параметрах нелинейной нагрузки для дальнейшего расчета необходимых параметров АФГ. При этом необходимо

учитывать, что к расчету необходимо принимать параметры самых мощных и нагруженных электроприводов.

5. Выбор индуктивности реактора двухуровневого активного фильтра по предложенному выражению (4.7), при учете параметров нелинейных потребителей и возможного изменения уровня нелинейно нагрузки. При выборе индуктивности реактора активного фильтра по предложенному выражению коэффициент ( $k$ ) выбирается из технологических возможностей и при учете анализа, проведенного в 3 пункте. Наилучшие показатели достигаются при  $k = 515 \text{ мГн} \cdot \text{А}$ , снижение этой величины приводит к снижению мощности коррекции активным фильтром. Такое решение может быть оправданным в случае, если нелинейная нагрузка часто снижается ниже расчетной. Высокие значения  $k$  ( $515 \div 927$ ) целесообразно выбирать с целью завышения расчетной мощности компенсации активным фильтром.

6. Выбор коэффициентов  $K_1$  и  $K_2$  регулятора напряжения АФГ при учете возрастания необходимой емкости накопительного конденсатора АФГ пропорционально коэффициенту  $K_1$ . Оптимальные показатели достигаются при  $K_1 = 3 \div 4$ , снижение этой величины приводит к росту отклонения напряжения на конденсаторе АФГ и снижению необходимой емкости, увеличение к большей точности регулирования и большей необходимой емкости.

7. Расчет емкости накопительного конденсатора активного фильтра по предложенному выражению (4.18) при учете параметров нелинейных потребителей.

8. На заключительном этапе выбранный активный фильтр проверяется на имитационной модели электроснабжения участка с частотно-регулируемыми электроприводами при изменении величины и характера нелинейных нагрузок, а также параметров питающей сети. Полученный положительный результат на модели позволяет обосновать применение АФГ на реальном объекте.

#### **Выводы к главе 4**

В данной главе выполнены исследования, на основании которых разработана методика выбора параметров АФГ и доказана эффективность регулирования напряжения на конденсаторе АФГ.

Предложен метод выбора параметров активного фильтра гармоник. Предложенный способ регулирования напряжения конденсатора активного фильтра не только регулирует и стабилизирует напряжение на конденсаторе АФГ, но и дает возможность применения АФГ для снижения ВГС от электроприводов без выходных реакторов.

Предложенный метод выбора параметров АФГ и регулирования напряжения на накопительном конденсаторе активного фильтра обеспечивает эффективную работу такого устройства при существенном изменении параметров электропривода и величины нагрузки.

Проведенные исследования на модели показывают высокое влияние параметров питающей сети на работу активного фильтра без алгоритма регулирования напряжения на накопительном конденсаторе. Но применение регулятора напряжения на емкостном звене АФГ, существенно расширяет диапазон допустимых параметров питающей сети для эффективной работы активного фильтра.

## ГЛАВА 5. ПРИМЕНЕНИЕ АКТИВНЫХ ФИЛЬТРОВ ГАРМОНИК С ТРЕХУРОВНЕВОЙ СТРУКТУРОЙ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

### 5.1 Общие положения

Перспективным средством снижения передаваемых в сеть высокочастотных помех от АФГ является снижение амплитуд компенсационных сигналов при повышении частот коммутаций за счет применения многоуровневых инверторов с соответствующими системами управления.

Подобное решение позволяет формировать «многоступенчатый» выходной сигнал, что приводит к снижению уровня гармонических искажений и отказу от дорогостоящих и громоздких выходных фильтров.

Частным случаем многоуровневой топологии является трехуровневая схема с фиксированной нейтралью. Поскольку в цепи коммутации участвуют четыре *IGBT* (рисунок 5.1), потери проводимости у такого инвертора несколько выше, чем у традиционного двухуровневого. Однако существенное снижение потерь переключения позволяет уменьшить общее значение рассеиваемой мощности примерно на 40%, и это достоинство особенно ярко проявляется на высоких частотах коммутации [89].

Эффективность установки устройств корректировки параметров качества электроэнергии построенных на активных фильтрах гармоник с трехуровневой топологией силовой части оценивается на примере системы электроснабжения, представленной на рисунке 2.6.

В отличие от двухуровневого АФГ, трехуровневый имеет два накопительных конденсатора, энергия с которых, снимается независимо друг от друга. Индуктивность реактора играет в таком случае ту же роль что и при классической двухуровневой структуре, но так как, при добавлении уровней модуляции, увеличивается частота коммутаций, время на каждую компенсацию уменьшается. Поэтому методика выбора параметров активного фильтра от двухуровневого, не подходит к трехуровневому.

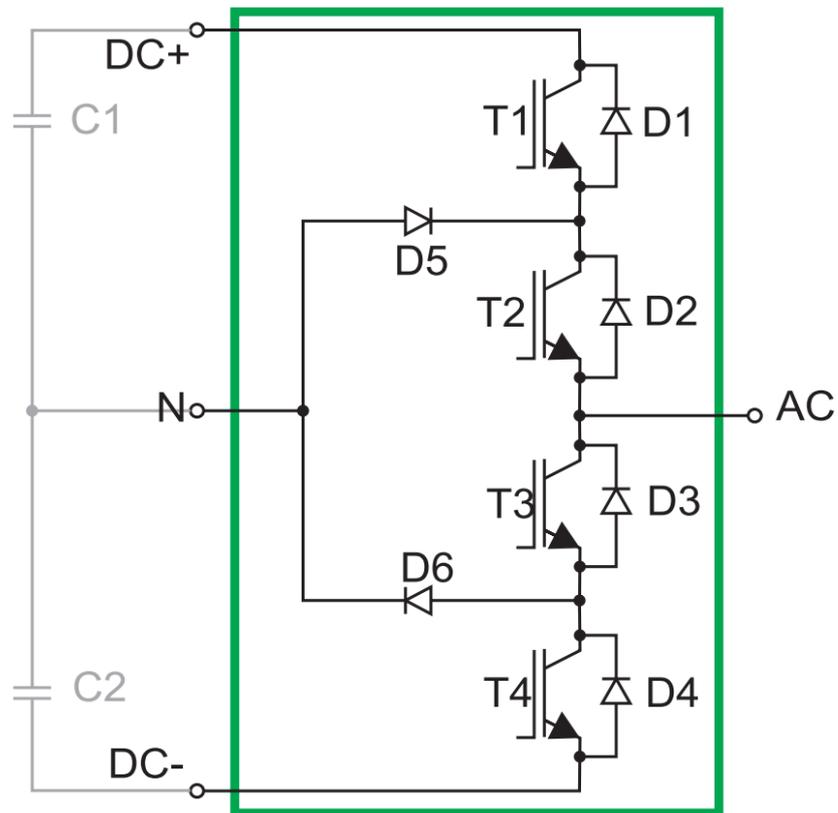


Рисунок 5.1 - Принципиальная схема фазной стойки трехуровневого инвертора

На рисунке 5.2 представлена функциональная схема активного фильтра гармоник с трехуровневой структурой. Отличие такой схемы от классического двухуровневого активного фильтра заключается в структуре инвертора и добавленном для создания дополнительного уровня, делителя напряжения, построенного на конденсаторах.

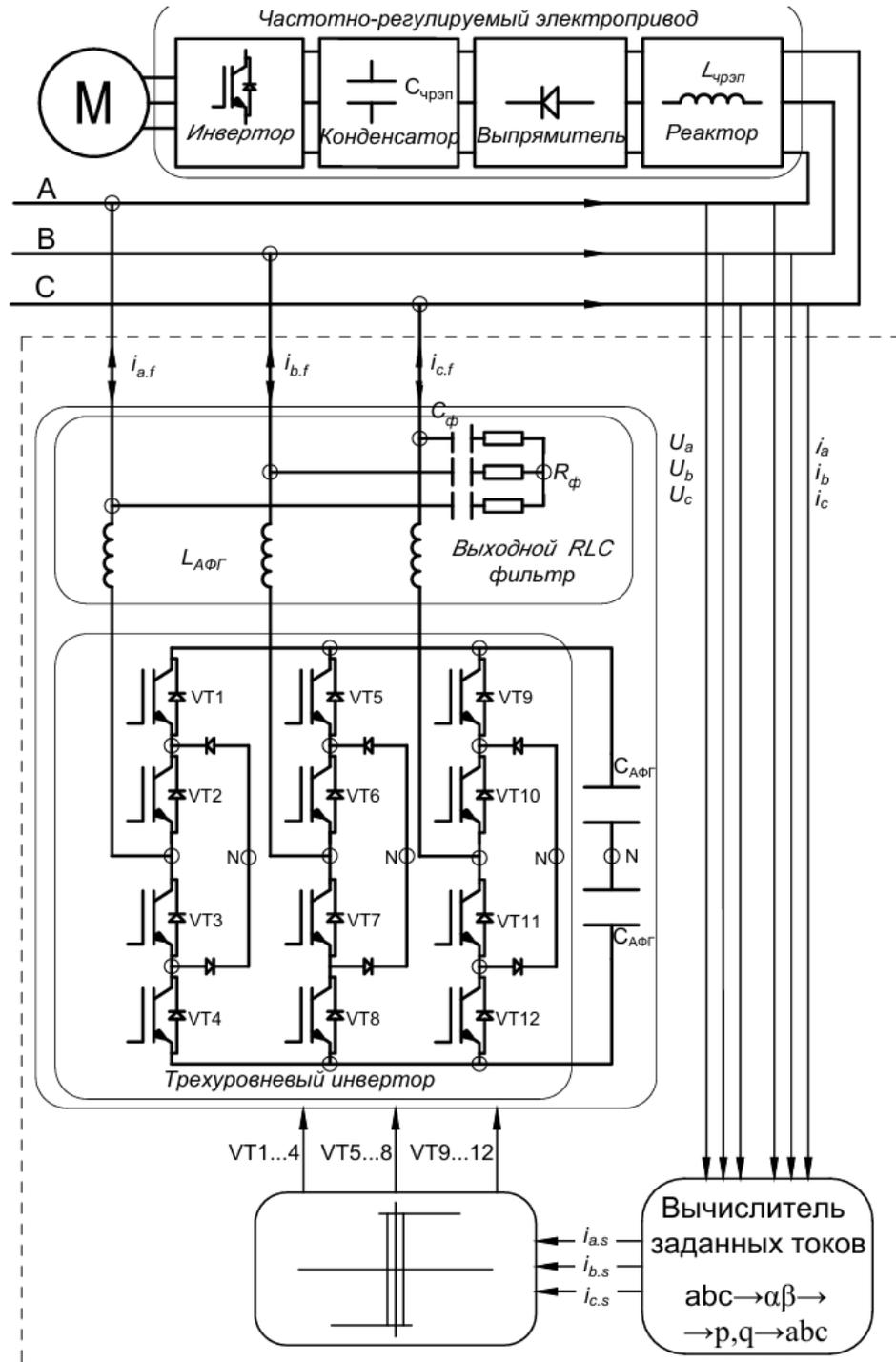


Рисунок 5.2 - Функциональная схема параллельного АФГ с трехуровневой структурой силовой части

Оценить эффективность применения активного фильтра с трехуровневой силовой структурой, невозможно без методики выбора параметров АФГ.

К параметрам трехуровневого активного фильтра гармоник, влияющих на эффективность компенсации ВГС, относятся следующие:

3. Параметры выходного  $RLC$  фильтра (см. рисунок 5.2):
  - Индуктивность реактора  $L_{abc}$
  - Емкость конденсаторов  $C_{abc}$
  - Активное сопротивление  $R_{abc}$ ;
4. Емкость конденсаторов звена постоянного тока (см. рисунок 5.2);

Также на эффективность компенсации ВГС фильтром влияют такие внешние факторы как:

5. Параметры питающей сети;
6. Высшие гармонические составляющие питающей сети;
7. Параметры линий питания нелинейных потребителей;

Параметры нелинейных потребителей (см. рисунок 5.2).

## **5.2 Исследование влияния параметров активного фильтра гармоник на эффективность фильтрации высших гармонических искажений**

Параметры качества электроэнергии при изменении емкости конденсатора и активного сопротивления выходного фильтра приведены в таблицах 38 и 39 (приложение 1), данные приведены для нагрузки 1050 А ( $\beta_{нл} = 0,74$ ) и 256 А ( $\beta_{нл} = 0,18$ ). Выполненные расчёты на модели позволили получить зависимости коэффициента  $K_u$  при изменении емкости конденсаторов и активных сопротивлений выходного фильтра, которые приведены на рисунке 5.3. Также на рисунке 5.3 черными пунктирными линиями обозначены, полученные, эмпирически, параметры выходного  $RC$  фильтра для трехуровневого АФГ, при которых такой фильтр обеспечивает фильтрацию создаваемых активным фильтром высокочастотных искажений.

При сравнении полученных с модели результатов расчетов зависимостей  $K_u$  от емкости и активного сопротивления выходных фильтров трехуровневого и двухуровневого активных фильтров, можно сделать вывод о

большем достаточном активном сопротивлении ввиду создания, трёхуровневым активным фильтром, ВГС меньшей мощности.

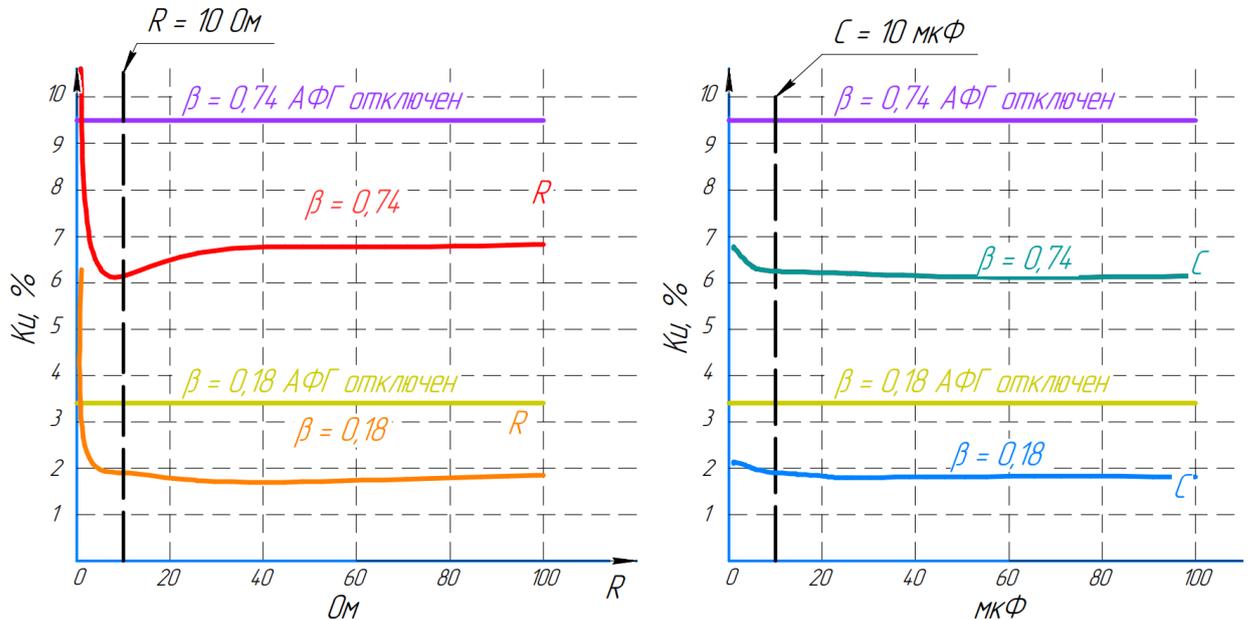


Рисунок 5.3 - Зависимости коэффициента  $K_u$  от значений  $R$  и  $C$  выходного фильтра при разных нагрузках

Как видно из рисунка 5.3, необходимым и достаточным условием для фильтрации высокочастотных помех, создаваемых трёхуровневым активным фильтром, является выполнение неравенств  $R \approx 10$  Ом и  $C \geq 10$  мкФ. Поэтому  $R \approx 10$  Ом и  $C \approx 10$  мкФ выходного фильтра, принимаются для дальнейших исследований АФГ.

Для создания методики выбора параметров АФГ, аналогично с двухуровневым АФГ, на модели проведено исследование, в ходе которого изменялась индуктивность реактора АФГ, и снимались показатели качества электроэнергии. В таблицах 40–43 (приложение 1) приведены результаты расчёта на модели коэффициента  $K_u$  при разных индуктивностях выходного реактора АФГ. Для наглядности данные из таблиц 40–43 (приложение 1) изображены в виде зависимостей напряжения конденсатора от индуктивности реактора при разных нагрузках на рисунке 5.4.

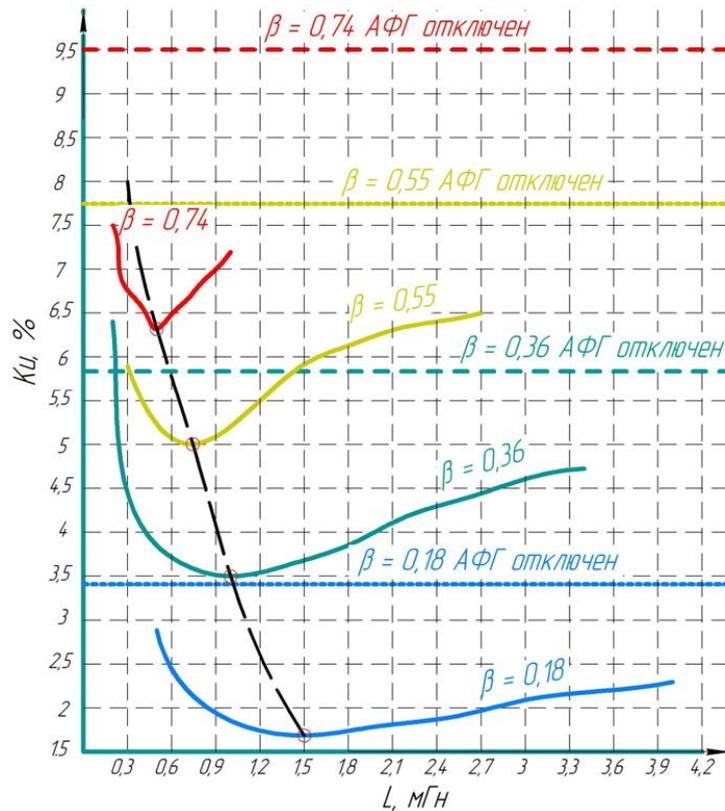


Рисунок 5.4 - Зависимости коэффициента гармонических составляющих напряжения ( $K_u$ ) от индуктивности реактора АФГ при разных нагрузках

На рисунке 5.5 изображены зависимости суммарных коэффициентов гармонических искажений от емкости накопительного конденсатора трехуровневого активного фильтра. Индуктивность реактора АФ для разных нагрузок, при этом, выбиралась по черной пунктирной линии на рисунке 5.4.

При сравнении зависимостей суммарных коэффициентов гармонических искажений от емкости накопительного конденсатора трехуровневого и двухуровневого фильтров (рисунки 3.9 и 5.5), можно отметить прирост необходимой для эффективной работы активного фильтра емкости накопительного конденсатора АФ.

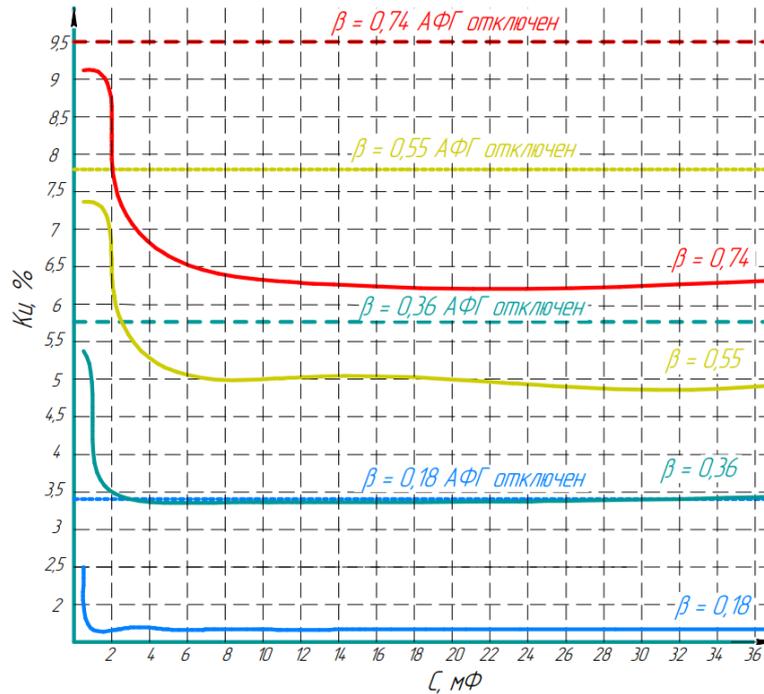


Рисунок 5.5 - Зависимости коэффициента гармонических составляющих напряжения ( $K_u$ ) от емкости конденсатора АФГ при разных нагрузках

### 5.3 Исследование влияния параметров нелинейных потребителей на эффективность фильтрации высших гармонических искажений АФ

#### Емкость сглаживающего конденсатора

В таблицах 48–50 (приложение 1) приведены результаты измерения параметров качества электроэнергии и параметры АФГ при разных удельных емкостях сглаживающих конденсаторов электроприводом нагрузки.

На рисунке 5.6 изображены зависимости коэффициента  $K_u$  от емкости ( $C$ ) сглаживающего конденсатора ЧРЭП, построенные по данным из таблиц 48–50 (приложение 1), и обозначены необходимые граничные величины для эффективной работы АФГ. При этом необходимая для работы АФГ граничная емкость сглаживающего конденсатора ЧРЭП снижается при увеличении индуктивности реактора электропривода.

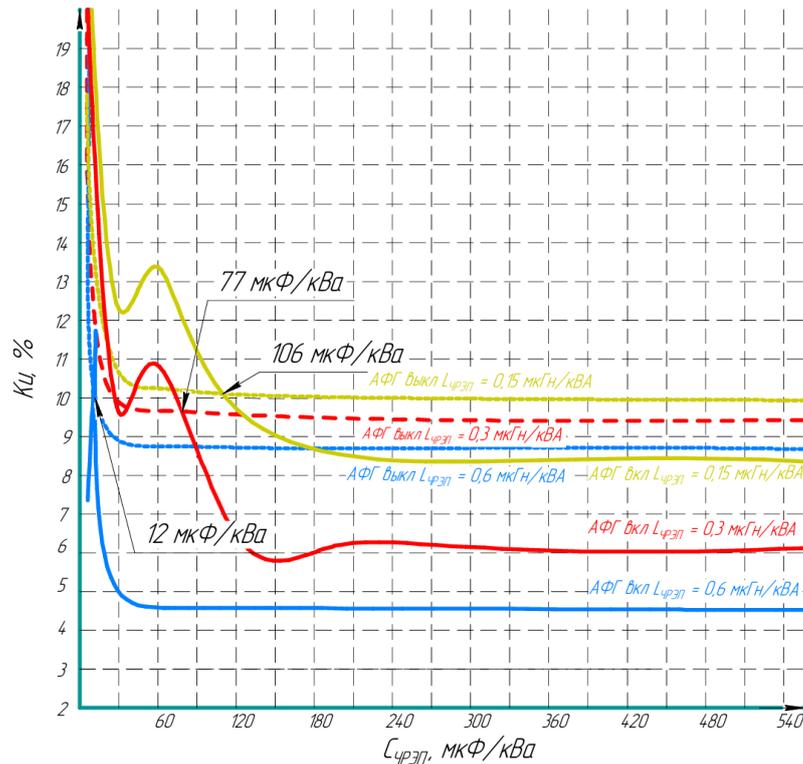


Рисунок 5.6 - Зависимость коэффициента гармонических составляющих напряжения ( $K_u$ ) от емкости ( $C_{чрЭП}$ ) сглаживающего конденсатора ЧРЭП

### Индуктивность линии нелинейных потребителей

В таблице 51 (приложение 1) приведены результаты измерения параметров качества электроэнергии и параметры АФГ при разных индуктивностях линии электроприводов нагрузки. При этом используется относительная индуктивность, то есть индуктивность линии на один кВа нагрузки.

На рисунке 5.7 приведены результаты расчёта на модели коэффициента  $K_u$  при разных, последовательно с ЧРЭП включенных, суммарных индуктивностях, имитирующих параметры линии электропередач электроприводов нагрузки и реактора.

Как видно из рисунков 5.6 и 5.7, при данном коэффициенте загрузки трансформатора, АФ не может повышать качество электроэнергии без суммарной индуктивности реактора и линии электропривода индуктивностью меньше  $0,16 \text{ мкГн/кВа}$ , но даже при значениях  $L_{чрЭП} > 0,16 \text{ мкГн/кВа}$ , необходима соответствующая емкость сглаживающего конденсатора для

стабильной работы АФГ. Такие показатели объясняются тем, что сглаживающая емкость и индуктивность ЧРЭП применяются для сглаживания пульсаций тока.

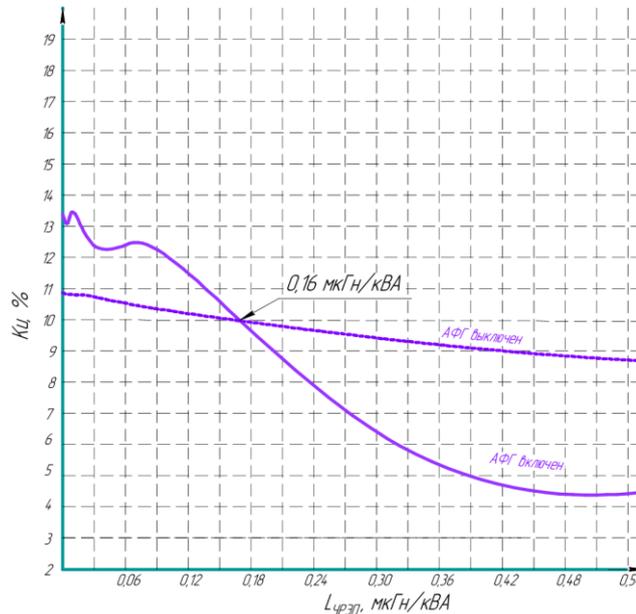


Рисунок 5.7 - Зависимость коэффициента гармонических составляющих напряжения от суммарной индуктивности ЧРЭП ( $L_{чрэп}$ )

#### 5.4 Исследование эффективности применения регулирования напряжения на конденсаторе трехуровневого активного фильтра и методика выбора параметров такого АФГ

Для регулирования напряжения на звене постоянного тока трехуровневого активного фильтра, предлагается аналогичная схема регулятора. Отличием может являться только соотношение параметров АФГ и коэффициентов регулятора.

В первую очередь выбирается, аналогично с выбором параметров двухуровневого АФ, индуктивность реактора трехуровневого активного фильтра  $L_{АФГ}$ . Определив экстремумы (минимальные значения) зависимостей  $K_u$  от индуктивности выходного реактора АФГ и отстроив от них допустимые пределы в 10 %, получается область допустимых значений индуктивности реактора АФГ, представленная на рисунке 5.8, а значения экстремумов и допустимых значений сведены в таблицу 5.1.

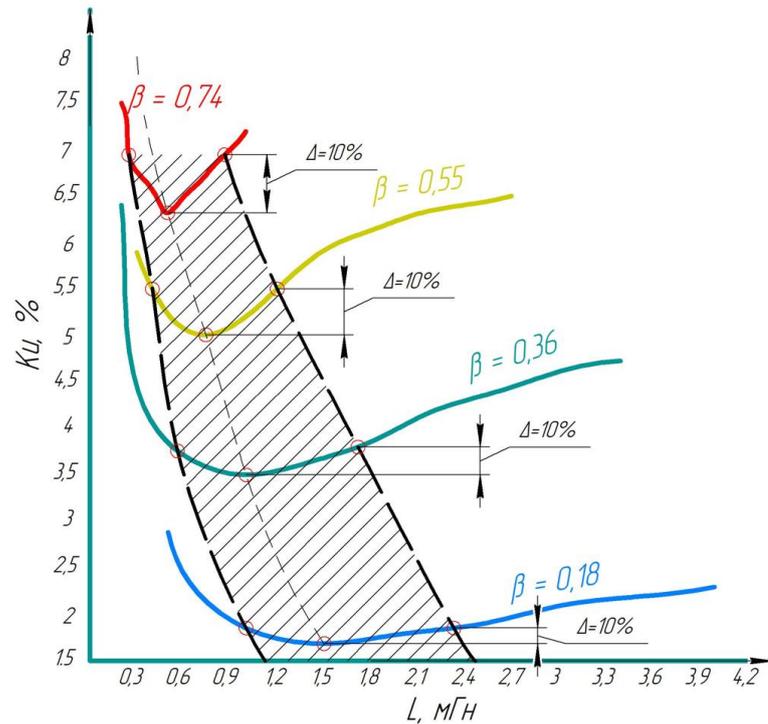


Рисунок 5.8 - Зависимости коэффициента гармонических составляющих напряжения ( $K_u$ ) от индуктивности реактора АФГ ( $L_{АФГ}$ ) в диапазоне допустимых значений

Таблица 5.1 – Допустимые значения  $L_{АФГ}$  АФГ, по условиям 10% допуска  $K_u$

$I_n, A$	$\beta_{нл}$	Экстремумы		Допустимые $L_{АФГ}$ , мГн	
		$K_u, \%$	$L_{АФГ}$ , мГн	Мин.	Макс.
1026	0,74	6,3	0,5	0,24	0,85
764	0,55	5,1	0,72	0,4	1,2
507	0,36	3,5	1	0,55	1,65
252	0,18	1,7	1,5	1	2,3

По приведенным в таблице 5.1 зависимостям индуктивностей реактора АФГ при минимальных значениях  $K_u$  от тока нелинейных потребителей, можно получить уравнение для выбора индуктивности реактора АФГ по току нелинейных потребителей. Анализ полученных зависимостей таблицы 5.1 и 4.1, показал, что, необходимая индуктивность реактора АФГ обратно пропорциональна току нелинейных потребителей. То есть функция  $L_{АФГ}$  от  $I_n$  представляет собой:

$$L_{\text{АФГ}} = \frac{k}{I_{\text{н}}}, \quad (5.1)$$

где коэффициент ( $k$ ) гиперболы определяется по данным таблицы 5.1, исходя из тока нелинейной нагрузки и экстремумам индуктивности реактора АФГ:

$$k = I_{\text{н}} \cdot L_{\text{АФГ}} = 1026 \cdot 0,5 = 513 \text{ мГн} \cdot \text{А}, \quad (5.2)$$

таким образом уравнение для вычисления индуктивности реактора АФГ по току нелинейных потребителей представляет собой:

$$L_{\text{АФГ}} = \frac{513}{I_{\text{н}}}, \text{ мГн}. \quad (5.3)$$

В качестве проверки полученного уравнения для вычисления индуктивности реактора АФГ по току нелинейных потребителей выполнено сравнение результатов, полученных на модели с показателями, рассчитанными по уравнению (таблица 5.2).

Таблица 5.2 – Проверка полученного выражения

$I_{\text{н}}, \text{А}$	$\beta_{\text{нл}}$	$L_{\text{АФГ}}, \text{мГн}, \text{расчетный}$	$L_{\text{АФГ}}, \text{мГн}, \text{экспериментальный}$	Сходимость
1026	0,74	0,5	0,5	1
764	0,55	0,67	0,72	0,94
507	0,36	1,01	1	0,99
252	0,18	2,04	1,5	0,98

Подобным образом получены значения коэффициента ( $k$ ) (выражения (5.1)) для крайних допустимых значений  $L_{\text{АФГ}}$ .

$$k_{\text{max}} = 872 \text{ мГн} \cdot \text{А}, \quad (5.4)$$

$$k_{\text{min}} = 246 \text{ мГн} \cdot \text{А}. \quad (5.5)$$

В качестве проверки полученных коэффициентов сравнены показатели, полученные на модели с показателями, рассчитанными по уравнению (5.1). Так как полученная область допустимых значений индуктивности реактора АФГ, ограниченная двумя линиями, описываемыми выражением (5.1) с

коэффициентами (5.4) и (5.5), имеет высокую сходимость с результатами расчета на модели, то его можно использовать для дальнейших расчетов.

Таким образом выражение для выбора индуктивности выходного реактора АФГ сводится к следующему виду:

$$L_{\text{АФГ}} = \frac{k}{I_{\text{н}}}, \quad (5.6)$$

где  $k = 246 \div 872 \text{ мГн} \cdot A$ , а наилучшие показатели активный фильтр может обеспечить при  $k = 513 \text{ мГн} \cdot A$ .

Для определения взаимовлияния  $L_{\text{АФГ}}$ ,  $C_{\text{АФГ}}$ , а также  $K_1$  и  $K_2$ , проведены расчеты на модели с перебором возможных коэффициентов  $K_1$  и  $K_2$ , а также  $L_{\text{АФГ}}$  и  $C_{\text{АФГ}}$ . Полученные результаты измерения ПКЭ и параметров АФГ при исследовании на модели приведены в таблицах 52–54 (приложение 1).

По данным из таблицы 52 (приложение 1) построены графические зависимости  $K_u$  от  $C_{\text{АФГ}}$  при разных коэффициентах  $K_1$  и  $K_2$  на рисунке 5.9. На этом рисунке заштрихованная область показывает значения  $K_1$  и  $K_2$  и  $C_{\text{АФГ}}$ , при которых регулятор, за счет небольшой емкости накопительного конденсатора АФГ, вводит активный фильтр в режим автоколебаний. Данные ПКЭ из этой области нельзя считать стабильными, а такие соотношения  $K_1$  и  $K_2$  и  $C_{\text{АФГ}}$ , не могут применять для эффективной работы АФГ.

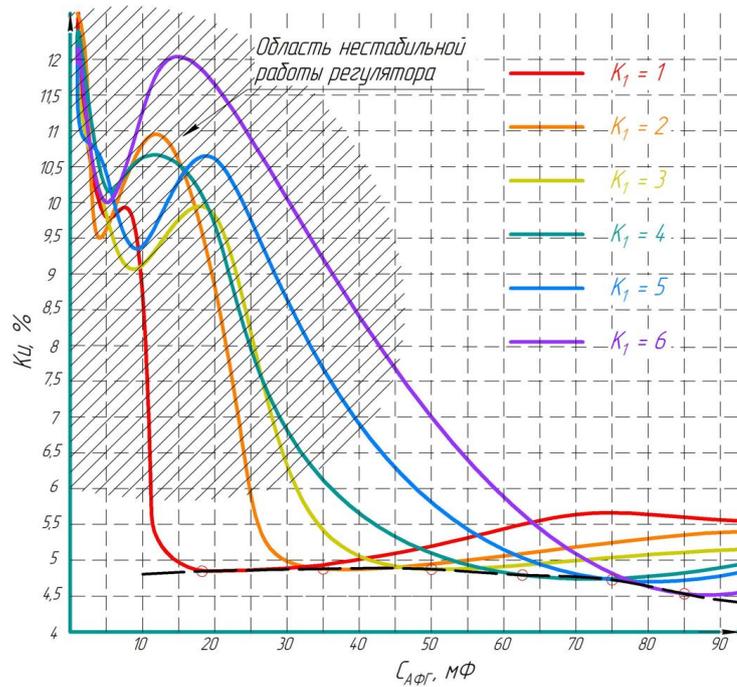


Рисунок 5.9 - Зависимости  $K_u$  от разных настроек ( $K_I$ ) регулятора и емкости накопительного конденсатора АФГ ( $C_{АФГ}$ )

На рисунке 5.9 определены и соединены черной пунктирной линией экстремумы (минимальные значения) зависимостей  $K_u$  от  $C_{АФГ}$ .

Подобные зависимости можно проследить в таблицах 51–53 (приложение 1). При этом если эти точки соединить в линии и представить в виде зависимостей  $C_{АФГ}$  от  $K_I$ , то получатся следующие зависимости, изображенные на рисунке 5.10 (сплошные линии).

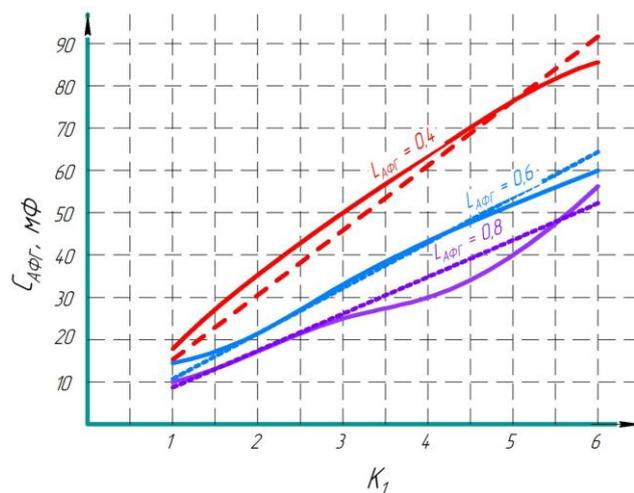


Рисунок 5.10 - Зависимости емкости накопительного конденсатора АФГ ( $C_{АФГ}$ ) от настроек ( $K_I$ ) регулятора

Из анализа представленных на рисунке 5.10 зависимостей, можно сделать вывод, что зависимости  $C_{АФГ}$  от  $K_1$  имеют линейный характер.

$$C_{АФГ} = aK_1 + b. \quad (5.7)$$

При этом от индуктивности реактора АФГ зависит наклон данной линейной зависимости. то есть коэффициент ( $a$ ).

Для индуктивности  $L_{АФГ} = 0,4$  реактора АФГ определен коэффициент « $a$ » по уравнению прямой проходящей через две точки, полученные из зависимостей, изображённых на рисунке 5.10:

$$\frac{C_{АФГ} - 30}{90 - 30} = \frac{K_1 - 2}{6 - 2}, \quad (5.8)$$

После преобразований уравнение имеет следующий вид:

$$C_{АФГ} = 15 \cdot K_1, \text{ мФ}, \quad (5.9)$$

где коэффициент  $a = 15$ , и коэффициент  $b = 0$ .

Подобным образом определены коэффициенты для остальных индуктивностей:

$$L_{АФГ} = 0,4 \text{ мГн}, a = 15.$$

$$L_{АФГ} = 0,6 \text{ мГн}, a = 10. \quad (5.10)$$

$$L_{АФГ} = 0,8 \text{ мГн}, a = 7,5.$$

Анализ полученных коэффициентов (5.10) показал, что коэффициент ( $a$ ), обратно пропорционален индуктивности реактора АФГ. То есть функция ( $a$ ) от  $L_{АФГ}$  будет иметь следующий вид:

$$a = \frac{k}{L_{АФГ}}, \text{ мГн} \quad (5.11)$$

Вычисление конфидента ( $k$ ) гиперболической зависимости:

$$k = a \cdot L_{АФГ} = 15 \cdot 0,4 = 6 \text{ мГн}. \quad (5.12)$$

Таким образом:

$$a = \frac{6}{L_{АФГ}}, \text{ мГн} \quad (5.13)$$

Заменяя в выражении (5.7) коэффициент ( $a$ ) на его функцию от  $L_{\text{АФГ}}$  из выражения (5.13), получим следующее параметрическое выражение для расчета требуемого  $C_{\text{АФГ}}$  при известных  $L_{\text{АФГ}}$  и  $K_I$ :

$$C_{\text{АФГ}} \geq \frac{6 \cdot K_1}{L_{\text{АФГ}}}, \text{ мФ}, \quad (5.14)$$

где  $L_{\text{АФГ}}$  – индуктивность реактора АФГ в мГн;  $K_1$  – коэффициент усиления регулятора.

В качестве проверки полученного уравнения для вычисления индуктивности реактора АФГ по току нелинейных потребителей сравнены показатели, полученные на модели с показателями, рассчитанными по уравнению (5.14). Минимальная сходимость результатов моделирования и расчетов по полученному выражению (5.14) превышает 0,93, поэтому предложенное выражение (5.14) можно принимать для дальнейшего исследования.

Так как предложенное выражение (5.14) выведено при определенных параметрах нелинейной нагрузки, а характер гармонических искажений меняется с их изменением, в это выражение необходимо добавить поправочный коэффициент, учитывающий суммарную индуктивность фильтрового реактора и индуктивность линии ЧРЭП.

В таблице 54 (приложение 1) сведены результаты расчетов ПКЭ при изменении удельной индуктивности линии ЧРЭП и емкости накопительного конденсатора АФ. На рисунке 5.11 изображены зависимости  $K_u$  от емкости накопительного конденсатора АФ при разных индуктивностях линиях ЧРЭП, построенные по данным из таблицы 54 (приложение 1).

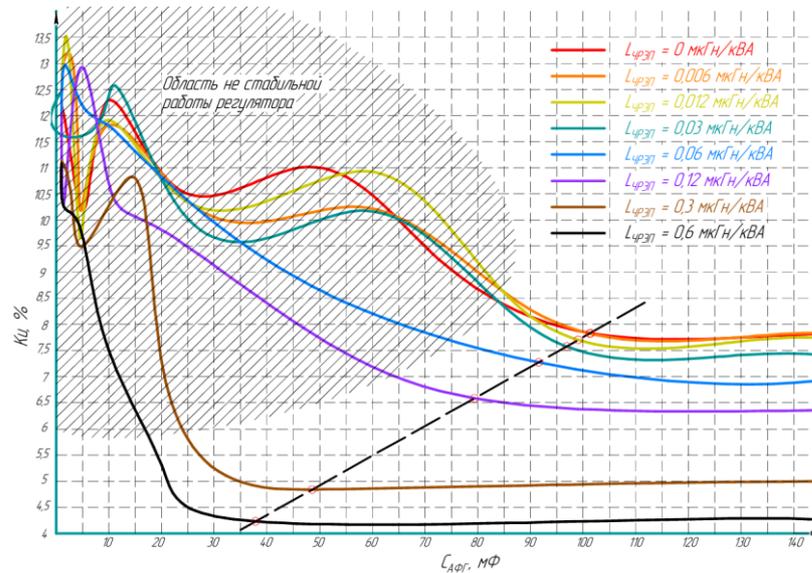


Рисунок 5.11 - Зависимости  $K_u$  от емкости накопительного конденсатора АФГ ( $C_{АФГ}$ ) при разной суммарной индуктивности линии и реактора ЧРЭП ( $L_{ЧРЭП}$ )

На рисунке 5.11 черной пунктирной линией определены и соединены точки емкости накопительного конденсатора активного фильтра достаточной для обеспечения стабильной работы АФГ, а на рисунке 5.12 построена красной линией зависимость допустимых для стабильной работы активного фильтра  $C_{афг}$  от  $L_{ЧРЭП}$ . Также на рисунке 5.12 обозначены отстроенные от минимально допустимых значений точки, значение емкости АФГ, в которых при той же индуктивности ЧРЭП на 20 % больше.

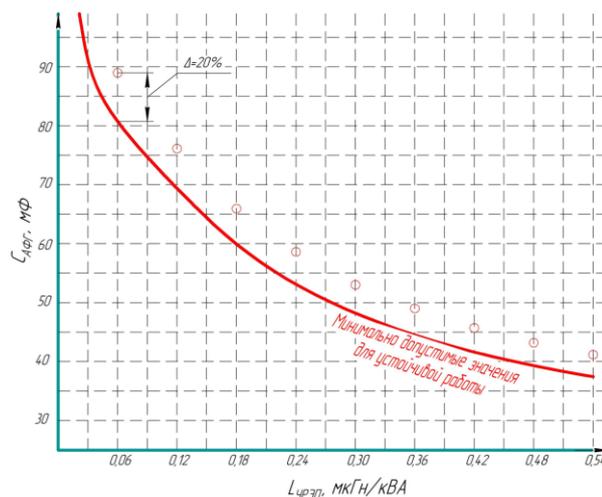


Рисунок 5.12 - Зависимость емкости накопительного конденсатора АФГ ( $C_{АФГ}$ ) от суммарной индуктивности линии и реактора ЧРЭП ( $L_{ЧРЭП}$ ) для устойчивой работы АФГ

Методом аппроксимации логарифмической функции одной переменной при помощи компьютерных расчетов [138] и полученных результатов расчетов на модели минимально допустимых значений емкости накопительного конденсатора, с учетом 20% запаса емкости (точки на рисунке 5.12), была получена функция (со средней ошибкой аппроксимации 2,4%) коэффициента  $C_{АФГ}$  от индуктивности реактора ЧРЭП:

$$C_{АФГ} \geq (27,7 - 21,6 \cdot \ln[L_{ЧРЭП}]), \text{ мФ}, \quad (5.15)$$

функция получена при определённых значениях индуктивности реактора АФГ ( $L_{АФГ} = 0,5 \text{ мГн}$ ) и коэффициенте регулятора ( $K_I = 4$ ).

Выражение для выбора емкости накопительного конденсатора АФГ при учете индуктивности реактора ЧРЭП, индуктивности реактора АФГ и коэффициента регулятора:

$$C_{АФГ} \geq \frac{(3,4 - 2,7 \cdot \ln[L_{ЧРЭП}]) \cdot K_1}{L_{АФГ}}, \text{ мФ}, \quad (5.16)$$

где  $L_{ЧРЭП}$  – удельная суммарная индуктивность ЧРЭП (мкГн/кВа),  $L_{АФГ}$  – индуктивность реактора АФГ (мГн).

На рисунке 5.13, проведена синяя линия, по которой в дальнейшем будет производиться выбор параметров активного фильтра. Эта линия описывается выражением (5.16).

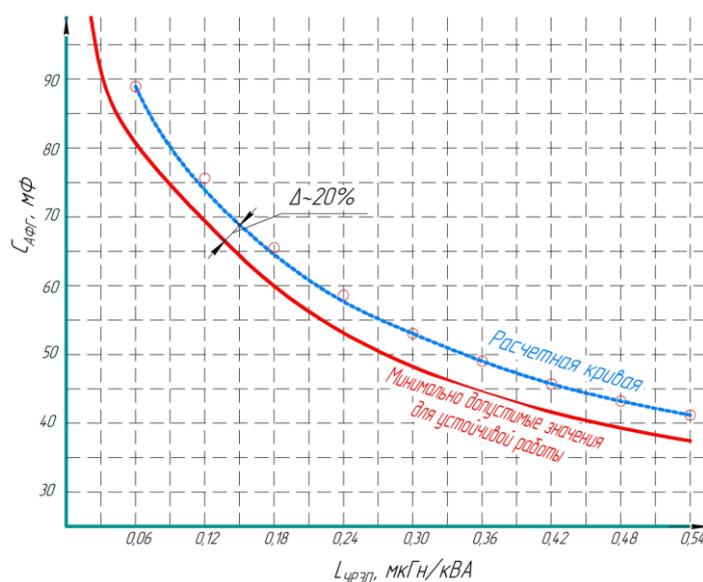


Рисунок 5.13 – Зависимости значений емкости накопительного конденсатора АФГ, от суммарной индуктивности линии и реактора ЧРЭП

В таблицы 55–58 (приложение 1) сведены параметры качества электроэнергии, сети и активного фильтра при выборе параметров АФГ по предложенной уточненной методике выбора емкости накопительного конденсатора активного фильтра. В графическом виде данные из таблиц 55 – 58 (приложение 1) представлены в виде зависимостей суммарных коэффициентов гармонических составляющих от суммарной индуктивности линии и реактора нелинейных потребителей ( $L_{чрэлл}$ ) на рисунке 5.14. Для всех нагрузок выбраны индуктивности АФГ при коэффициенте  $k = 513$  (выражение 5.6), и емкость  $C_{АФГ}$  при коэффициенте  $K_1 = 4$ .

Проведенные вычисления, данные которых представлены в таблицах 55–58 (приложение 1) и рисунке 5.14, показывают правильность предложенного выражения для выбора емкости накопительного конденсатора (5.16). Так при выборе параметров АФГ по предложенной методике существенно снижается суммарный коэффициент гармонических составляющих, регулируется напряжение, а также отсутствуют колебания напряжения на звене постоянного тока активного фильтра, что показывает правильность выбора соотношений параметров активного фильтра.

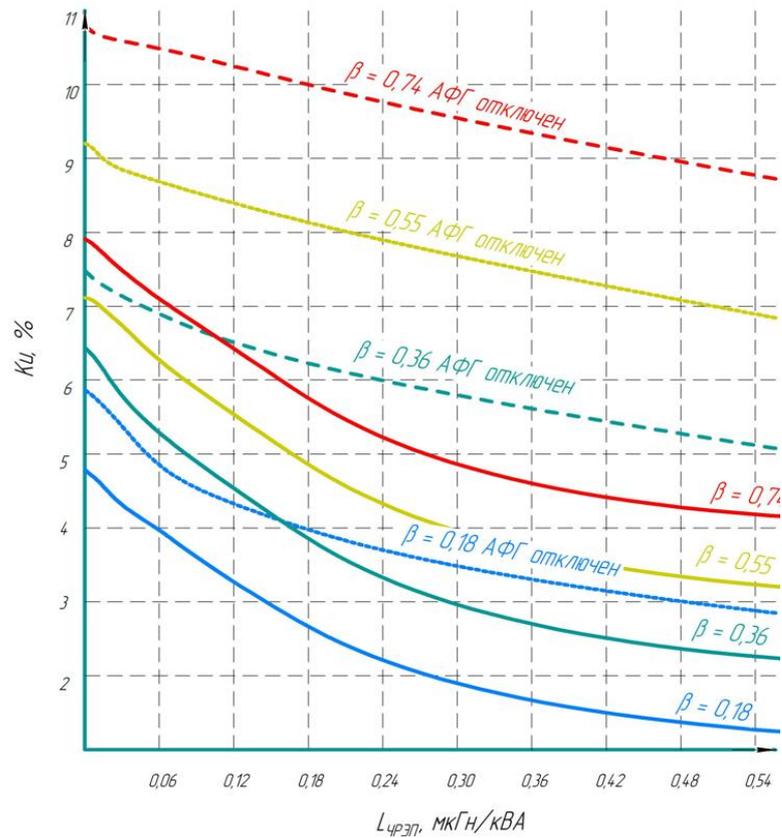


Рисунок 5.14 - Зависимость коэффициента гармонических составляющих напряжения ( $K_u$ ) от суммарной индуктивности линии и реактора нелинейной нагрузки ( $L_{чрэлп}$ )

На рисунке 5.15 для визуального сравнения приведены на одной диаграмме зависимости гармонических искажений от индуктивности линии нагрузки, для трехуровневого (сплошные линии) и двухуровневого АФГ (пунктирные линии). Сравнение полученных зависимостей показывает большую эффективность трехуровневого активного фильтра при малых искажениях кривых напряжения. Такой эффект получается ввиду меньших гармонических искажений, создаваемых многоуровневым АФ. При этом разницу в шумах, создаваемых активными фильтрами в случае с большими искажениями  $K_u$ , незаметно ввиду того, что искажения от активного фильтра и искажения от нагрузки несоизмеримы.

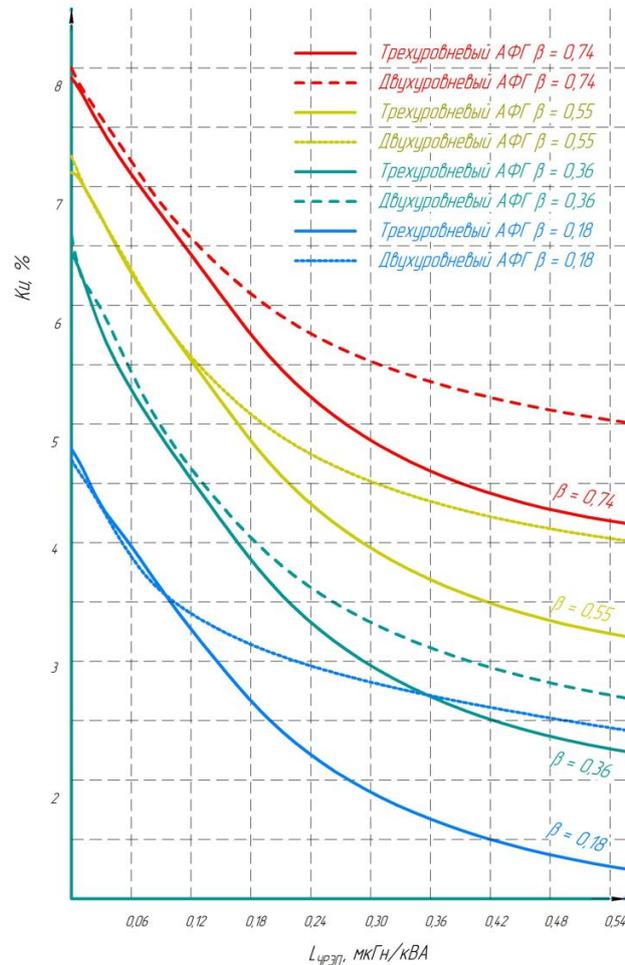


Рисунок 5.15 - Зависимости коэффициента гармонических составляющих напряжения от индуктивности реактора нагрузки трехуровневого АФГ (сплошные линии) и двухуровневого (пунктирные линии)

На рисунке 5.16 показаны зависимости необходимых для стабильной работы АФ с регулятором напряжения емкостей от суммарной индуктивности линии и реактора нелинейных потребителей трехуровневого АФГ (сплошная линия) и двухуровневого (пунктирная линия), а на рисунке 5.17 графические зависимости необходимых емкостей от индуктивности реактора активного фильтра. Как видно из рисунков разница в емкости существенная.

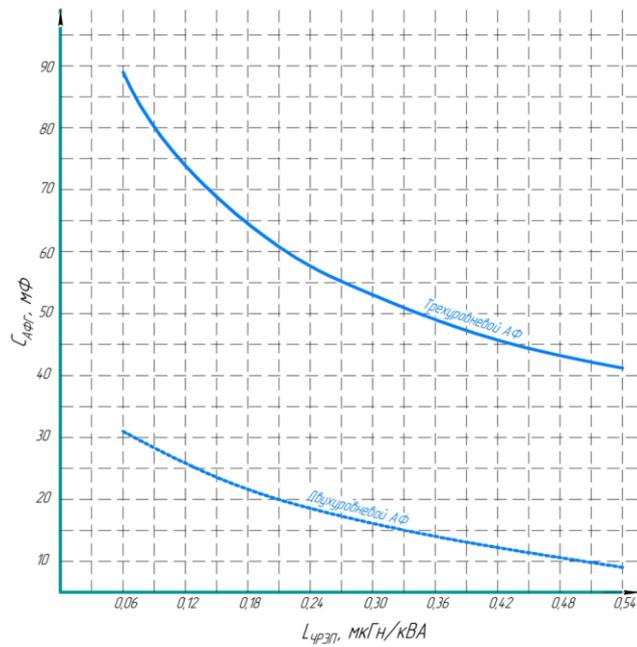


Рисунок 5.16. Сравнение необходимых емкостей трехуровневого АФГ (сплошные линии) и двухуровневого (пунктирные линии) при учете суммарной индуктивности нелинейных потребителей

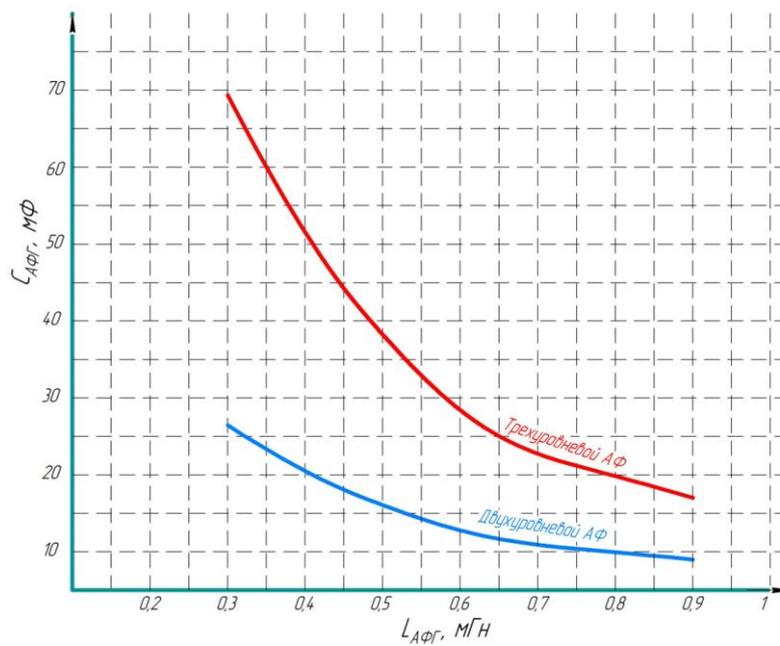


Рисунок 5.17 - Сравнение необходимых емкостей трехуровневого АФГ и двухуровневого при учете индуктивности реактора активного фильтра

Полученные выражения (4.18) и (5.16) позволяют оценить необходимый прирост емкости накопительных конденсаторов активного фильтра. Так для работы трехуровневого АФГ необходимая емкость примерно в 3 раза превышает емкость необходимую для работы двухуровневого АФ. Но при этом трехуровневый активный фильтр имеет превосходящую классический вариант эффективность при малых искажениях напряжения (рисунок 5.15).

Подобный эффект можно увидеть если провести исследования, приближенные к реальным условиям работы промышленности. В реальных условиях производства с частыми изменениями характера и уровня нагрузки заменять и настраивать элементы АФГ практически невозможно. В таблице 5.3 представлены результаты расчетов на модели ПКЭ для двухуровневого и трехуровневого активных фильтрах гармоник, настроенных на  $\beta_{нл} \approx 0,55$ , при разных величинах нелинейных нагрузок. На рисунке 5.18 проиллюстрированы данные из таблицы 5.3. Для наглядности по оси ординат используется относительное, по отношению к показателям без применения АФГ, снижение гармонических искажений « $\Delta K_u$ » от  $\beta_{нл}$ .

$$\Delta K_u = \frac{K_u - K_{u.афг}}{K_u} \cdot 100\% \quad (5.16)$$

Таблица 5.3 - ПКЭ при разных структурах АФГ в реальных режимах

	АФГ выкл		Двухуровневый АФГ вкл		Трехуровневый АФГ вкл	
	$K_u$ , %	$K_I$ , %	$K_u$ , %	$K_I$ , %	$K_u$ , %	$K_I$ , %
$\beta_{нл} = 0,1$	2,5	66,9	3,2	14,2	2,5	16,7
$\beta_{нл} = 0,18$	3,4	42,9	3,1	3,8	2,5	4,1
$\beta_{нл} = 0,36$	5,8	35,9	3,3	10,1	3	9,7
$\beta_{нл} = 0,55$	7,8	31,9	4,4	12,2	4	11,8
$\beta_{нл} = 0,74$	9,6	29	5,8	13	5,6	12,9
$\beta_{нл} = 0,92$	11,2	26,6	7,4	13,8	7,3	13,6

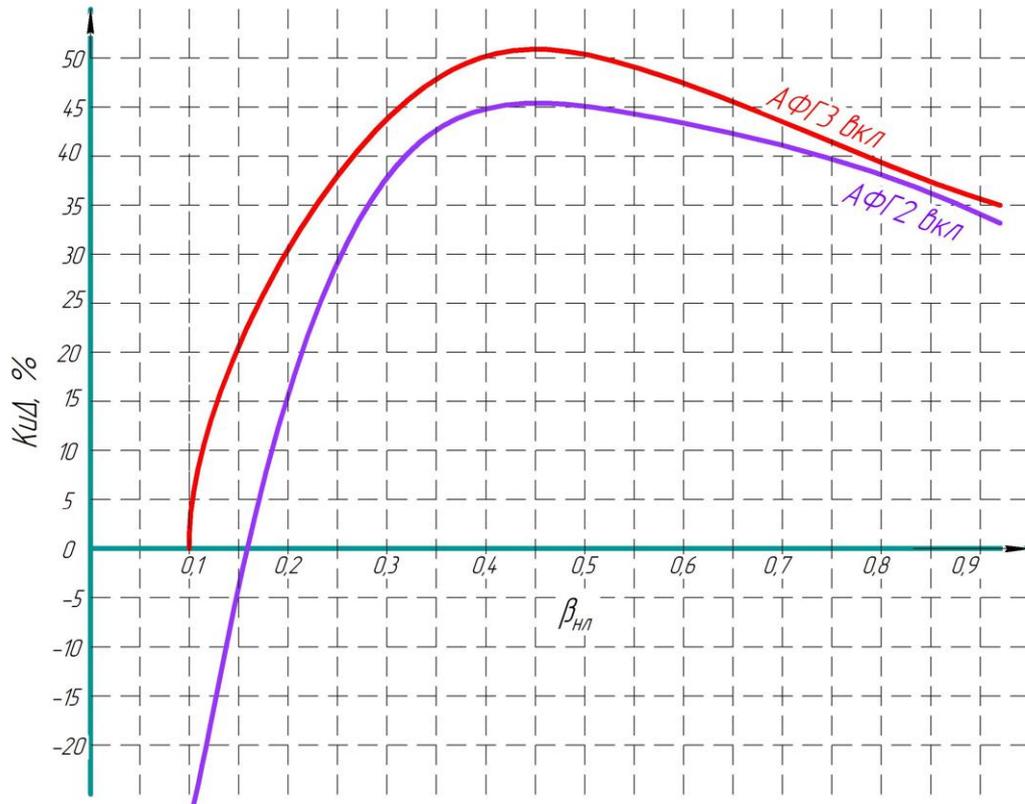


Рисунок 5.18 - Зависимости, отражающие эффективность АФГ разных структур в относительных единицах

Из рисунка 5.18 видно явное преимущество трехуровневых активных фильтров по сравнению с двухуровневыми. А именно возможность сохранять существенное снижение  $K_{и}$  при нагрузках меньше расчетных. Такой эффект достигается ввиду меньшего влияния трехуровневым АФ на сеть, что на фоне небольших искажений может составлять существенную долю искажений, как в случае с двухуровневым.

При этом необходимо понимать, что применение трехуровневого АФГ целесообразно даже при  $\beta_{нл} \approx 0,1$  на рисунке 5.18, так как хоть суммарные искажения напряжения не снижаются от работы АФ, но снижаются  $K_{и}$  на 75 %, что приводит к снижению нежелательных потерь электроэнергии.

## 5.5 Методика выбора параметров трехуровневого АФГ

Методика оценки необходимости применения трехуровневого АФГ и выбора его параметров сводится к следующим пунктам:

1. Оценка текущего состояния качества электроэнергии. На этом этапе производятся инструментальные измерения на разных участках электросистемы параметров качества электроэнергии. В число необходимых измеряемых параметров входят: суммарные коэффициенты гармонических искажений напряжения и тока (как первоисточника искажений напряжения), величины токов и напряжения, а также коэффициента мощности.

2. После проведенных инструментальных измерений параметров качества электроэнергии принимается техническое обоснование установки устройств повышения качества электроэнергии.

3. Оценка средневзвешенных значений загрузки трансформатора нелинейной нагрузкой. Исходя из полученных в первом пункте данных, рассчитывается нормальная загрузка трансформатора нелинейной нагрузкой, на величину которой, впоследствии, будет выбираться активный фильтр. При этом необходимо учитывать возможные изменения этой нагрузки. Стоит отметить, что как увеличение нелинейной нагрузки от рассчитанной может привести к невозможности обеспечивать активным фильтром допустимых по нормам ПКЭ, так и слишком низкая загрузка может отрицательно отразиться на работе системы. При этом, если ПКЭ не удовлетворяют нормам только в нечастых случаях временного включения мощного оборудования, необходимо уделить активному фильтру с трехуровневой структурой больше внимания.

4. Исследование параметров нелинейной нагрузки. Следующим шагом необходимо получить данные о параметрах нелинейной нагрузки для дальнейшего расчета необходимых параметров АФГ. При этом необходимо учитывать, что к расчету необходимо принимать параметры самых мощных и нагруженных электроприводов.

5. Выбор индуктивности реактора трехуровневого активного фильтра по предложенному выражению (5.6), при учете параметров нелинейных

потребителей и возможного изменения уровня нелинейно нагрузки. При выборе индуктивности реактора активного фильтра по предложенному выражению коэффициент ( $k$ ) выбирается из технологических возможностей и при учете анализа, проведенного в 3 пункте. Оптимальные показатели достигаются при  $k = 513$  (выражение 5.6), снижение этой величины приводит к снижению мощности коррекции активным фильтром, такое решение может быть оправданным в случае, если нелинейная нагрузка часто снижается ниже расчетной. Высокие значения  $k$  ( $513 \div 872$ ) целесообразно выбирать с целью завышения расчетной мощности компенсации активным фильтром.

6. Выбор коэффициентов  $K_1$  и  $K_2$  регулятора напряжения АФГ при учете возрастания необходимой емкости накопительного конденсатора АФГ пропорционально коэффициенту  $K_1$ . Оптимальные показатели достигаются при  $K_1 = 3 \div 4$ , снижение этой величины приводит к росту отклонения напряжения на конденсаторе АФГ и снижению необходимой емкости, увеличение к большей точности регулирования и большей необходимой емкости.

7. Расчет емкости накопительного конденсатора активного фильтра по предложенному выражению (5.16), при учете параметров нелинейных потребителей.

8. На заключительном этапе выбранный активный фильтр проверяется на имитационной модели электроснабжения участка с частотно-регулируемыми электроприводами при изменении величины и характера нелинейных нагрузок, а также параметров питающей сети. Полученный положительный результат на модели позволяет обосновать применение АФГ.

### **Выводы по пятой главе**

Предложен метод выбора параметров трехуровневого активного фильтра гармоник. Предложенный способ регулирования напряжения конденсатора активного фильтра, не только регулирует и стабилизирует напряжение на конденсаторе АФГ, но и дает возможность применения АФГ для снижения ВГС от электроприводов без выходных реакторов.

Предложенный метод выбора параметров трехуровневого АФГ и регулирования напряжения на накопительном конденсаторе активного фильтра обеспечивает эффективную работу такого устройства при существенном изменении параметров электропривода и величины нагрузки.

Целесообразность применения активных фильтров гармоник с трехуровневой структурой должна оцениваться в каждом конкретном случае отдельно. Такие устройства генерируют меньше искажений в сеть по сравнению с активными фильтрами с двухуровневой структурой и, вопреки большому количеству элементов в составе, могут быть более экономичны и эффективны в работе по сравнению с активными фильтрами с двухуровневой структурой при регулировании качества электроэнергии.

## **ГЛАВА 6. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОВЛИЯНИЯ ЧАСТОТНО РЕГУЛИРУЕМЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ И АКТИВНЫХ ФИЛЬТРОВ ГАРМОНИК ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ НА КАЧЕСТВО ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ**

### **6.1 Взаимовлияние параллельных линий электропередач на качество электроэнергии**

В третьей и четвертой главе рассмотрена эффективность применения устройств повышения параметров качества электроэнергии построенных на основе активных фильтров гармоник в распределительной сети, представленной на рисунке 2.6а. Но реальные распределительные сети имеют параллельные линии, которые могут влиять друг на друга.

На рисунке 2.6б представлена схема параллельных ветвей линий 6 кВ. В такой схеме возможно взаимовлияние параллельных ветвей. Кроме того, взаимовлияние возможно и для устройств повышения качества электроэнергии. Для оценки взаимовлияния нелинейных потребителей параллельных ветвей 6 кВ на ПКЭ смежных ветвей электроснабжения, на модели проведены имитации, в ходе которых изменялось количество ветвей и их нагрузка. Схема, показанная на рисунке 2.6б, с указанием точек (А, Б, В) измерения ПКЭ приведена на рисунке 6.1.

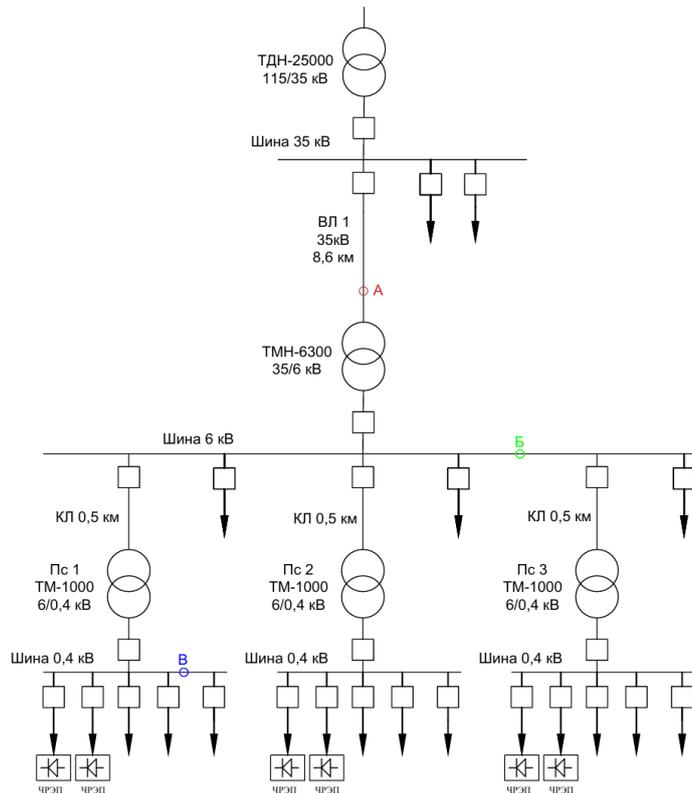


Рисунок 6.1 – Схема расположения точек измерения ПКЭ

На рисунке 6.2 изображены зависимости коэффициента гармонических составляющих ( $K_u$ ) на шинах 0,4 кВ от количества ветвей 6 кВ с разной загрузкой подстанции 6/0,4 кВ, полученные из данных таблиц 59–62 (приложение 1). То есть  $K_u$  в точке «В», в зависимости от нагрузки подстанций Пс 6/0,4 кВ и их количества.

А на рисунке 6.3 изображены зависимости коэффициента гармонических составляющих ( $K_u$ ) на шинах 6 кВ от количества ветвей 6 кВ с разной загрузкой подстанций 6/0,4 кВ. То есть  $K_u$  в точке «Б», в зависимости от нагрузки подстанций Пс 6/0,4 кВ и их количества.

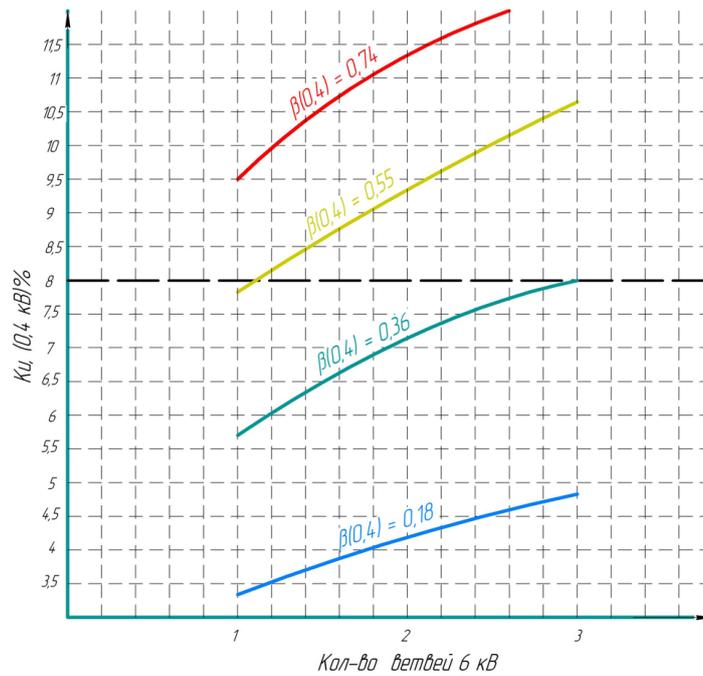


Рисунок 6.2 – Зависимости  $K_u$  на шинах 0,4 кВ от количества ветвей 6 кВ с разной загрузкой подстанции 6/0,4 кВ

Анализ зависимостей рисунка 6.2 показывает, что нагрузка трансформатора нелинейной нагрузкой, даже около трети, не исключает возможности превышения допустимых норм качества электроэнергии на шинах 0,4, кВ при подключенных смежных ветвях 6 кВ.

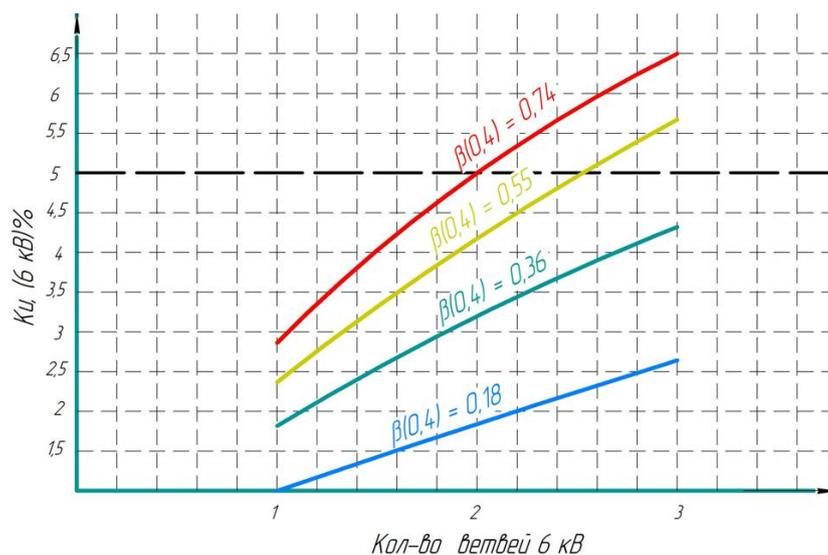


Рисунок 6.3 – Зависимости  $K_u$  на шинах 6 кВ от количества ветвей 6 кВ с разной загрузкой подстанции 6/0,4 кВ

Зависимости  $K_u$  на шинах 6 кВ от количества ветвей показывают подобный результат. При включенной одной ветви 6 кВ, питающей подстанцию Пс 6/0,4 кВ загруженной на  $\beta_{нл} = 0,74$ , суммарные искажения кривой напряжения составляют меньше 3%, то при включении дополнительных ветвей условие  $K_u < 5\%$  для 6 кВ может не выполняться уже при средней загрузке шин 0,4 кВ Пс равной  $\beta_{нл} = 0,55$  при трех включенных Пс (рисунок 6.1). Для наглядности на рисунке 6.4 данные из таблиц 59–62 (приложение 1) представлены в виде зависимости  $K_u$  на шинах 6 кВ от загрузки трансформатора 35/6 кВ.

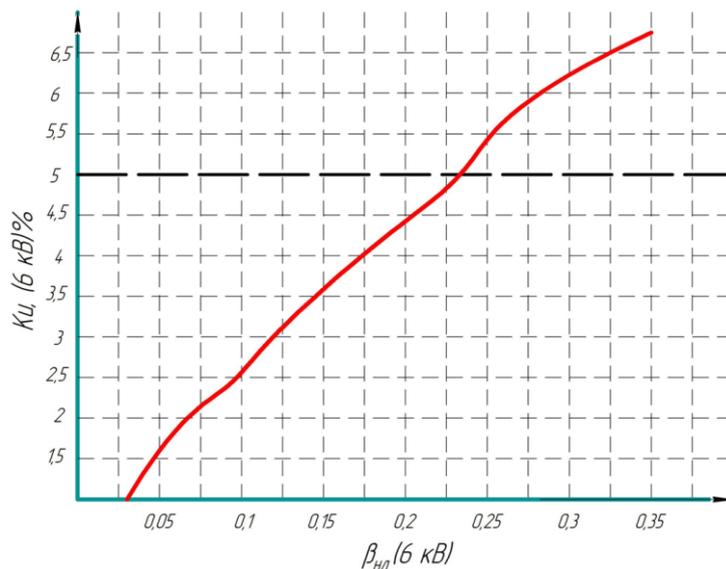


Рисунок 6.4 – Зависимости  $K_u$  на шинах 6 кВ от  $\beta_{нл}$  (6 кВ)

На рисунке 6.4 видно, что допустимый по ГОСТ 32144–2013 предел искажений напряжения в 5% превышаетея при загрузке трансформатора около  $\beta_{нл} = 0,23$ , что в реалиях повсеместного распространения частотно регулируемых электроприводов в промышленности либо ограничит мощность применяемых ЧРЭП, либо потребует увеличения мощности трансформатора.

## **6.2 Оценка эффективности внедрения устройств повышения качества электроэнергии в распределительных сетях**

Исходя из полученных результатов при исследовании влияния частотно-регулируемых электроприводов на качество электроэнергии в распределительных сетях нельзя изолированно рассматривать отдельные ветви электроснабжения отдельных участков, не учитывая влияния на качество электроэнергии в них соседних ветвей. Поэтому эффективность применения активных фильтров гармоник в распределительных сетях с частотно-регулируемыми электроприводами существенно зависит от влияния соседних ветвей на качество электроэнергии при выборе АФГ [88].

Методика оценки эффективности внедрения устройств повышения качества электроэнергии в распределительных сетях заключается в расчете суммарных коэффициентов гармонических искажений напряжения и тока в точках распределительной сети электроснабжения, изображенных на рисунке 6.5. При этом предполагается исследование влияния активных фильтров гармоник как от смежных ветвей, так и влияние устройств повышения ПКЭ шин 0,4 кВ на всю линию электропередачи. То есть, в том числе, будут рассчитываться случаи включения АФ на каждой ПС, при измерении ПКЭ в точках «А, Б, В» (рисунок 6.1).

Для оценки влияния устройств повышения ПКЭ шин 0,4 кВ на смежные линии 0,4 кВ через шины 6 кВ, на рисунке 6.5 представлена схема электроснабжения с активными фильтрами гармоник, включенными на шинах 0,4 кВ. При этом на модели будут исследованы частные случаи поочередного включения АФГ на всех ПС, а ПКЭ снимаются, в том числе, с шин 0,4 кВ Пс1 и Пс3.

Результаты расчетов суммарных коэффициентов гармонических искажений, на модели имитирующую такую схему, приведены в таблицах 63–70 (приложение 1).

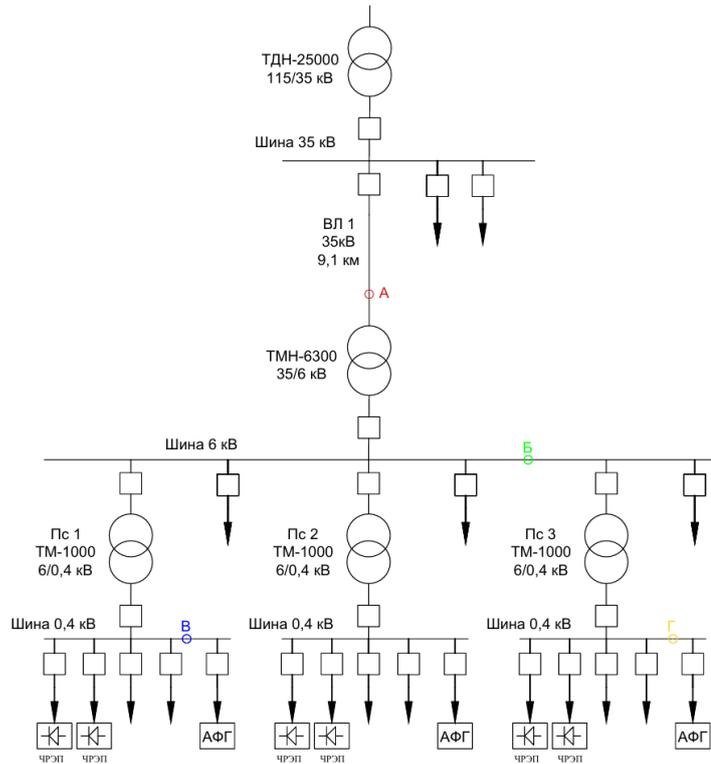


Рисунок 6.5 – Схема расположения точек измерения ПКЭ

На рисунках 6.6–6.8 представлены данные по гармоническим искажениям напряжения из таблиц 63 – 70 (приложение 1) в графическом виде.

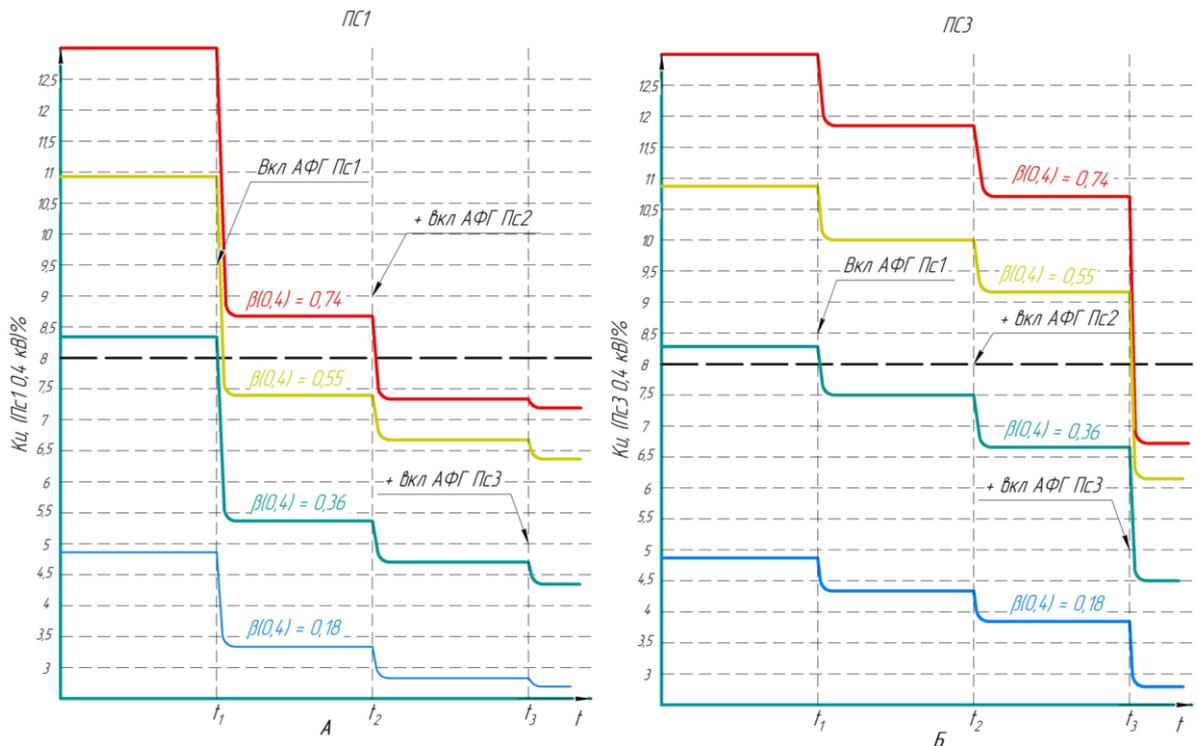


Рисунок 6.6 – Зависимости  $K_u$  на шинах 0,4 кВ ПС1 и ПС2 от конфигурации устройств повышения ПКЭ

Как видно из рисунка 6.6, включение активных фильтров гармоник влияет на показатели качества электроэнергии соседних ветвей, но при этом снижение суммарных коэффициентов гармонических искажений напряжения намного меньше, чем от активных фильтров, установленных непосредственно на шинах 0,4 кВ с которых измеряются данные показатели.

Также эти зависимости показывают, что, например, при  $\beta_{нл} = 0,36$  на шинах 0,4 кВ, возможность достижения требуемых в соответствии с ГОСТ 32144-2013 значений, благодаря влиянию устройств повышения ПКЭ соседних ветвей. Такой эффект может быть использован при проектировании предприятий с единой системой автоматического управления технологическими процессами и электропотребления для регулирования  $K_u$  на всех подстанциях за счет минимального количества находящихся в работе активных фильтров.

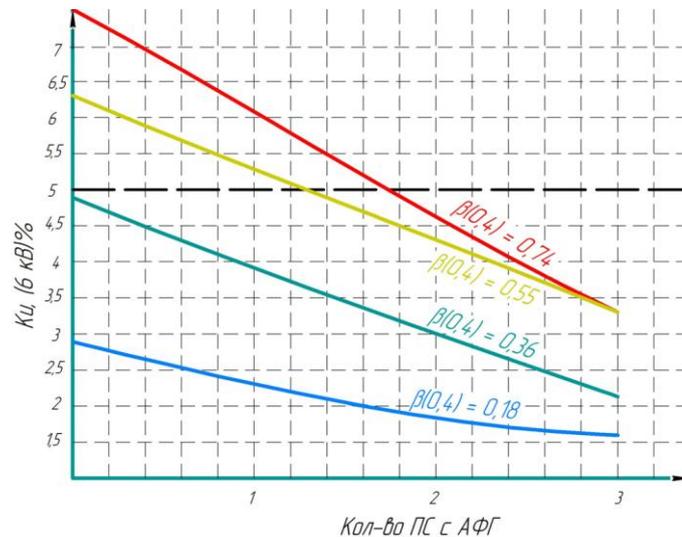


Рисунок 6.7 – Зависимости  $K_u$  на шине 6 кВ от конфигурации устройств повышения ПКЭ

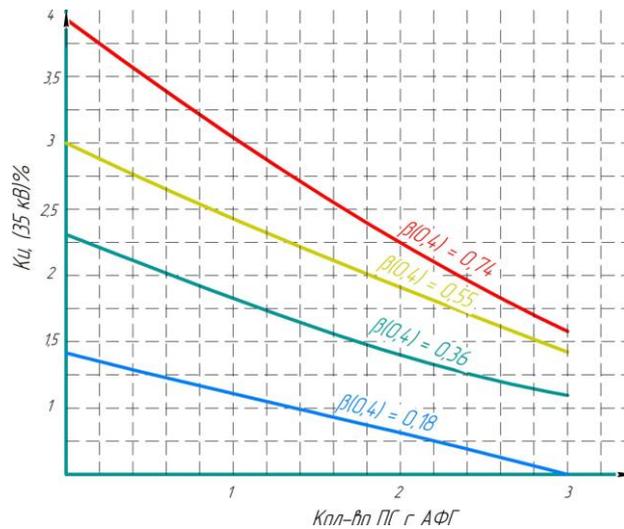


Рисунок 6.8 – Зависимости  $K_u$  на вводной шине 35 кВ от конфигурации устройств повышения ПКЭ

Полученные результаты машинных расчетов ПКЭ при описанных конфигурациях системы электроснабжения (таблицы 63–70 (приложение 1) и рисунки 6.6 – 6.8), позволяют сделать следующие выводы:

1. Устройства повышения качества электроэнергии влияют на смежные ветви электроснабжения даже без прямой электрической связи с ними.

2. Добиться допустимых значения  $K_u$  на шинах НН возможно за счет снижения гармонических искажений на шинах соседних подстанций без использования устройств повышения ПКЭ непосредственно на шинах исследуемой подстанции.

3. Установка активных фильтров на шинах НН каждой подстанции может быть неоправданным решением, если при этом есть возможность добиться допустимых значений  $K_u$  благодаря устройствам повышения ПКЭ соседних ветвей.

4. Включение АФГ на стороне 0,4 кВ приводит к снижению уровня высших гармоник как на стороне 0,4 кВ, так и на всей питающей линии. Таким образом активные фильтры гармоник снижают негативное влияние нелинейных потребителей на электрические сети.

5. При определенных условиях возможно снижение до допустимого уровня содержания высших гармоник на стороне ВН при использовании всего одного АФГ на стороне НН.

Полученные выводы показывают высокую эффективность и гибкость применения АФ с регулятором напряжения на звене постоянного тока. Однако при использовании активных фильтров без регулирования напряжения эффективность может быть в некоторых случаях выше. В таблицах 71 и 72 (приложение 1) приведены результаты расчетов на модели показателей качества электроэнергии при применении в системе электроснабжения АФ без регулятора напряжения, представленные в виде графических зависимостей  $K_u$  от количества включенных в смежных ветвях активных фильтров, на рисунке 6.9.

На рисунках 6.9–6.11 представлены данные по гармоническим искажениям напряжения из таблиц 63–72 в графическом виде.

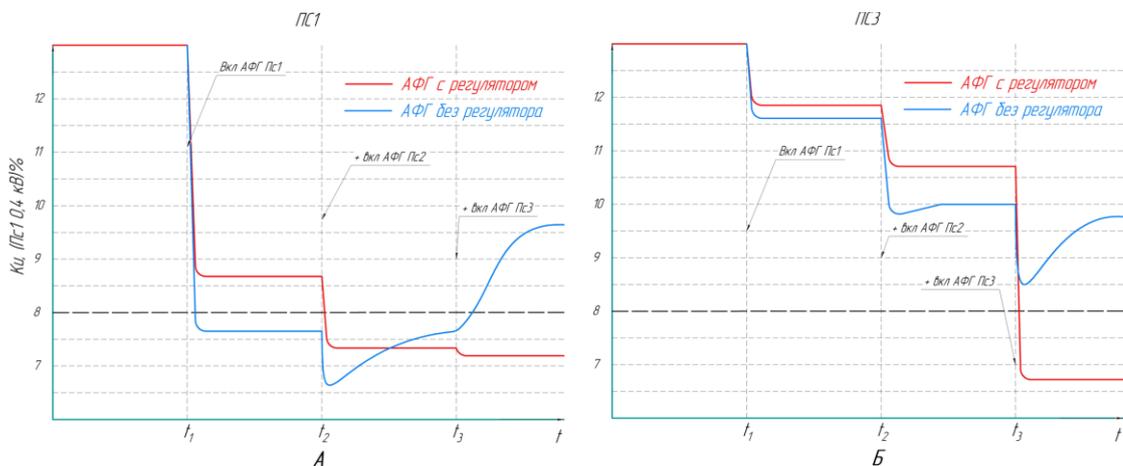


Рисунок 6.9 – Зависимости  $K_u$  на шинах 0,4 кВ ПС1 и ПС2 от конфигурации устройств повышения ПКЭ

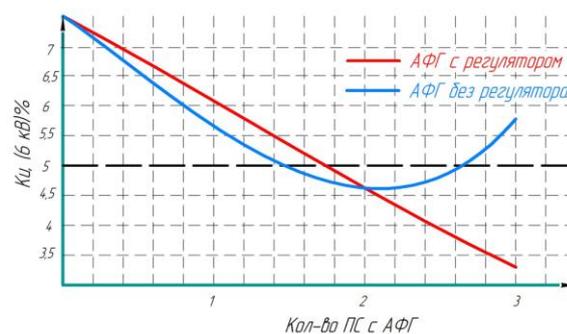


Рисунок 6.10 – Зависимости  $K_u$  на шине 6 кВ от конфигурации устройств повышения ПКЭ

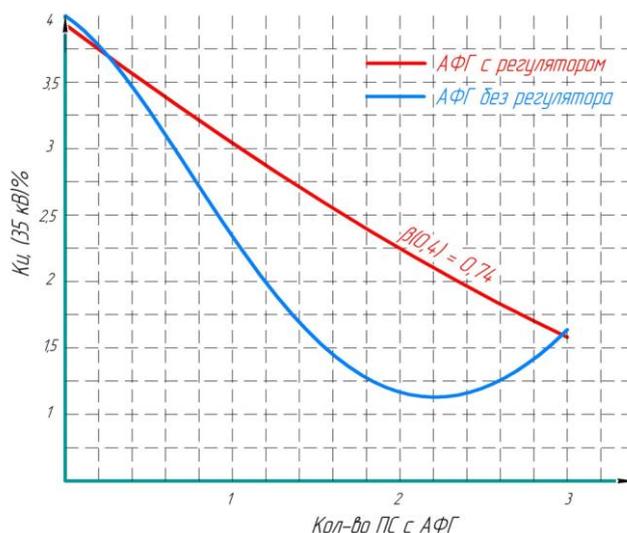


Рисунок 6.11 – Зависимости  $K_u$  на вводной шине 35 кВ от конфигурации устройств повышения ПКЭ

Как видно из рисунков 6.9–6.11, использование активного фильтра без регулятора напряжения на одной из подстанций приводит к большему снижению  $K_u$  во всех точках измерения ПКЭ электросистемы по сравнению с АФ с новым регулятором. При этом в некоторых точках  $K_u$  при АФ без регулятора остается ниже даже при включенных активных фильтрах на двух подстанциях, но разрыв прироста эффективности по сравнению с активным фильтром с регулятором напряжения снижается, а где-то и вовсе нивелируется. Однако более высокая эффективность АФ без регулятора напряжения связана исключительно с более высоким напряжением на конденсаторе активного фильтра гармоник, что приводит к большей мощности регулирования, из-за чего гармонические искажения тока становятся минимальными. При этом релейный модулятор компенсируемых токов вследствие повышения частоты, передает в сеть большее количество искажений. И если до определенного числа такие искажения незаметны, то после применения нескольких АФ в одной сети эти искажения складываются и их фон становится существенным. На рисунке 6.12 приведена амплитудно-

частотная характеристика кривых напряжения на ПС1 без использования АФ, при использовании АФ без регулирования напряжения и с АФ, включающем регулятор напряжения.

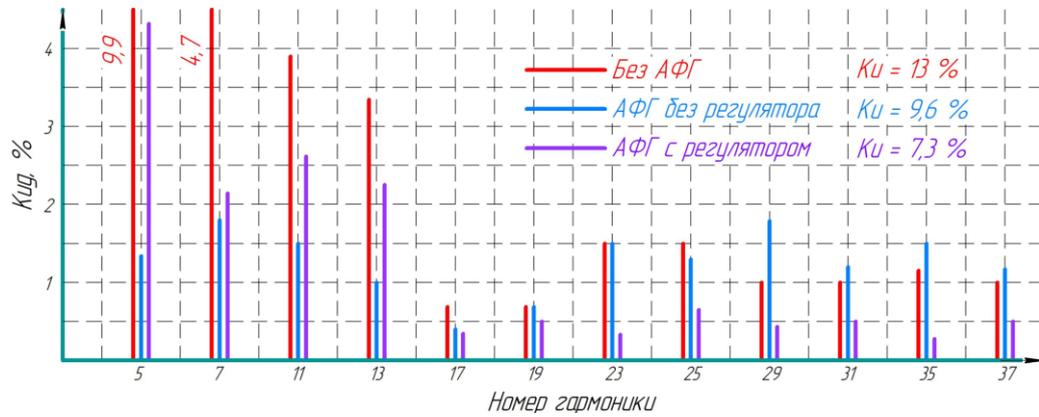


Рисунок 6.12 – Амплитудно-частотная характеристика кривых напряжения на ПС1

Как видно из рисунка 6.12 применение активных фильтров без регулирования напряжения приводит к загрязнению сетевого напряжения высокочастотными гармоническими искажениями, что перекрывает весь эффект от большей мощности коррекции за счет высокого напряжения на конденсаторе таких устройств.

### **Выводы по шестой главе**

При исследовании влияния частотно-регулируемых электроприводов на качество электроэнергии в распределительных сетях нельзя изолированно рассматривать отдельные ветви электроснабжения отдельных участков, не учитывая влияния на качество электроэнергии в них соседних ветвей. Поэтому эффективность применения активных фильтров гармоник в распределительных сетях с частотно-регулируемыми электроприводами существенно зависит от учёта влияния соседних ветвей на качество электроэнергии при выборе АФГ.

Включение АФГ на стороне 0,4 кВ приводит к снижению уровня высших гармоник как на стороне 0,4 кВ, так и на всей питающей линии. Таким образом активные фильтры гармоник снижают негативное влияние нелинейных потребителей на электрические сети.

Активные фильтры гармоник влияют на снижение уровня высших гармоник тока и напряжения не только на линии, от которой преобразователи частоты и АФГ получают питание, но и на уровень высших гармоник в параллельных ветвях сети.

Внедрение алгоритмов автоматического управления качеством электроэнергии может снизить расходы на обслуживание и ремонт устройств повышения качества электроэнергии за счет рационального использования таких установок.

Применение активных фильтров с регулятором напряжения на звене постоянного тока, предпочтительней в распределительных сетях с большим количеством активных фильтров ввиду меньшей генерации в сеть высокочастотных гармонических искажений.

## Заключение

В диссертационной работе дано новое решение актуальной научной задачи обоснования параметров активного фильтра гармоник для повышения качества электроэнергии в нефтепромысловых сетях с частотно-регулируемыми электроприводами.

В соответствии с поставленными целями и задачами получены следующие результаты:

1. Созданы имитационные модели, позволяющие количественно установить влияние АФГ на суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения и учитывающие наличие системы регулирования напряжения на конденсаторе АФГ, СЭС и нелинейной нагрузки.

2. Установлены зависимости, характеризующие влияние на суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения параметров двухуровневого АФГ при учёте свойств и особенностей системы регулирования напряжения на конденсаторе АФГ, СЭС и нелинейной нагрузки.

3. Установлены зависимости, характеризующие влияние на суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения параметров трёхуровневого АФГ при учёте свойств и особенностей системы регулирования напряжения на конденсаторе АФГ, СЭС и нелинейной нагрузки.

4. Установлены зависимости, характеризующие взаимное влияние смежных ветвей СЭС на суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения, учитывающие наличие в этих ветвях нелинейной нагрузки и АФГ.

5. На основе установленных зависимостей обоснован метод выбора параметров АФГ и регулятора напряжения на конденсаторе АФГ с целью получения нормативного суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения при наличии ЧРЭП в нефтепромысловых сетях.

6. Разработанный метод выбора активного фильтра гармоник позволяет снижать суммарный коэффициент гармонических искажений напряжения на 64 % и суммарный коэффициент гармонических искажений тока на 79 % в распределительных электрических сетях.

7. Разработанный способ регулирования напряжения на конденсаторе активно фильтра позволяет применять АФГ при значительных изменениях параметров сети и нелинейных потребителей.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рувик: Интернет-энциклопедия: Нефтяная промышленность России [Интернет-ресурс]. (Дата обращения: 14.02.24). URL: [https://ru.ruwiki.ru/wiki/Нефтяная\\_промышленность\\_России](https://ru.ruwiki.ru/wiki/Нефтяная_промышленность_России).
2. До, Т. Л. Обоснование способов повышения энергетических показателей системы электроснабжения глиноземного производства в условиях социалистической Республики Вьетнам : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / До Тхань Лич, 2022. – 155 с.
3. Мурзин Д.Б. Разработка системы электроснабжения Возейского месторождения Усинского района республики Коми : бакалаврская работа / Мурзин Д.Б. 2019 – 63с / <http://hdl.handle.net/123456789/11364>.
4. Качество напряжения в сетях электроснабжения установок погружных электронасосов / В. П. Фрайштетер, М. А. Суслов, В. А. Ведерников, Р. Р. Лопатин // Нефтяное хозяйство. – 2009. – № 4. – С. 102-104. – EDN KDRZEF.
5. Агафонов А.Д. Электроснабжение кустовых площадок Усинского нефтяного месторождения : выпускная квалификационная работа (бакалаврская работа) / Мурзин Д.Б. 2020 – 48с / <http://hdl.handle.net/123456789/14065>.
6. Исследование воздействия нарушений качества электроэнергии на функционирование специализированного электротехнического оборудования в медицинском учреждении / Р. Н. Хайруллин, С. Ю. Шигаев, Л. Н. Мухамедьяров [и др.] // Промышленная энергетика. – 2024. – № 3. – С. 41-53. – DOI 10.34831/EP.2024.63.60.006.
7. ГОСТР 54149— 2010 Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. ИПК Издательство стандартов. 2012. 16 с.
8. Митрофанов, С. В. Энергосбережение в энергетике : учебное пособие / С. В. Митрофанов, О. И. Кильметьева. — Оренбург : ОГУ, 2015. — 126 с. —

ISBN 978-5-7410-1371-7. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система.

9. ГОСТ 32144-2013 Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. ИПК Издательство стандартов. 2014. 20 с.

10. Борисов, П.А. Определение составляющих полной мощности энергосистем электротехнических комплексов / П.А. Борисов, В.С. Томасов // Математика в приложениях. – 2004. – № 1. – С. 40–44.

11. Борисов, П.А. Несимметричные режимы работы полупроводниковых преобразователей / П.А. Борисов, В.С. Томасов // Труды Международной научно практической конференции «Электронные средства и системы управления». – Томск: ТГУ, 2004. – С. 132–134. 30. Бурман, А.П.

12. Тонкаль, В.Е. Баланс энергии в электрических цепях / Тонкаль В.Е., Новосельцев А.В., Денисюк С.П., Жуйков В.Я., Стрелков М.Т., Яценко Ю.А. // Научная думкаю - 1992. - 312 с.

13. Шклярский, Я.Э. Оценка добавочных потерь мощности в электрических сетях с нелинейной и несимметричной нагрузкой / Шклярский Я.Э. Белицкий А.А. // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. - 2018. - № 7. - С. 86-93.

14. Зимин, Р. Ю. Повышение качества электроэнергии в электротехнических комплексах предприятий нефтедобычи гибридными фильтрокомпенсирующими устройствами : специальность 05.09.03 "Электротехнические комплексы и системы" : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Зимин Роман Юрьевич, 2021. – 146 с.

15. Costabeber, A. Selective compensation of reactive, unbalance, and distortion power in smart grids by synergistic control of distributed switching power interfaces./ Costabeber A., Tenti P., Caldognetto T., Verri Liberado E. // 15th

European Conference on Power Electronics and Applications (EPE). - 2013.- Vol. 1. – pp 1-9.

16. Шевырев, Ю. В. Улучшение качества электроэнергии при работе полупроводникового преобразователя частоты / Ю. В. Шевырев // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2020. – № 2. – С. 171-178.

17. Жилин, Е. В. Минимизация потерь электроэнергии в системах электроснабжения индивидуального жилищного строительства: специальность 05.14.02 "Электрические станции и электроэнергетические системы" : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Жилин Евгений Витальевич, 2018. – 181 с.

18. Герман-Галкин, С.Г. Виртуальные лаборатории устройств силовой электроники в среде Matlab-Simulink // Силовая электроника. 2015. - № 53. - С. 1-90.

19. Пронин, М. В. Электромеханотронные комплексы и их моделирование по взаимосвязанным подсистемам / Пронин М. В., Воронцов А. Г. // СПб., изд-во «Ладога», 2017 г. - 220 с.

20. Розанов, Ю.К. Основные этапы развития и современное состояние силовой электроники // Электричество.- 2005. - № 7. - С. 52-61.

21. Розанов, Ю.К. Силовая электроника. Учебник для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению подготовки «Электротехника, электромеханика и электротехнологии» / Ю. К. Розанов, М. В. Рябчицкий, 137 А. А. Кваснюк. – Москва. - 2007.- С. 636

22. Зеленкевич, А. И. О возможности применения трансформатора со схемой соединения обмоток "звезда-двойной зигзаг с нулевым проводом" для повышения качества электроэнергии / А. И. Зеленкевич, М. А. Прищепов, В. М. Збродыга // Инновации в природообустройстве и защите в чрезвычайных ситуациях : Материалы IV международной научно-практической конференции, Саратов, 29–30 мая 2018 года. – Саратов: Саратовский государственный аграрный университет им. Н.И. Вавилова, 2018. – С. 18-21.

23. Абрамов Б.И., Державин Д.А., Чуриков А.М., Новоселов Ю.Б., Суслов М.А., Шевырев Ю.В. Инструментальные исследования качества электроэнергии на нефтепромыслах в условиях широкого применения частотно-регулируемых приводов. Нефтяное хозяйство. 2016. № 1. С. 90-92

24. Абрамович, Б.Н. Перенапряжения и электромагнитная совместимость оборудования электрических сетей 6÷35 кВ / Абрамович Б.Н., Кабанов С.О., Сергеев А.М., Полищук В.В. // Новости электротехники. 2002. - №5.

25. Абрамович, Б.Н. Практические вопросы поддержания режима напряжения на предприятиях по добыче, транспортировке и переработке нефти и газа / Абрамович Б.Н., Лозовский С.Е., Тарасов Д.М. // Энергетика в нефтедобыче. 2003. - №1. - С. 8-11.

26. Абрамович, Б.Н. Проблемы проектирования подстанций, систем контроля качества электроэнергии и учета электропотребления для предприятий горной промышленности / Абрамович Б.Н., Грин А.В., Виноградов И.В., Сергеев А.М., Лозовский С.Е. - Санкт-Петербург: Сборник научных трудов СПГГИ, 1996.

27. Абрамович, Б.Н. Электромагнитная совместимость оборудования на предприятиях по транспортировке и переработке нефти и газа при наличии источников высших гармоник / Абрамович Б.Н., Гульков Ю.В., Волошкин М.М. // Энергетика в нефтегазодобыче. 2005. - №1-2. - С. 23-26.

28. Абрамович, Б.Н. Комбинированная энергетическая установка для энергоснабжения горных предприятий / Абрамович Б.Н., Сычев Ю.А., Моренов В.А. // Горное оборудование и электромеханика. 2016. - № 4 (122). - С. 36-41.

29. Абрамович, Б.Н. Комплексная система контроля и повышения качества электрической энергии в системах электроснабжения нефтедобывающих предприятий / Абрамович Б.Н., Сычев Ю.А., Устинов Д.А., Жуковский Ю.Л. // Энергобезопасность и энергосбережение. 2011. № 5. С. 37-40.

30. Абрамович, Б.Н. Повышение надежности электроснабжения предприятий минерально-сырьевого комплекса. / Абрамович Б.Н., Сычев Ю.А., Бабурин С.В., Жуковский Ю.Л. //Инженерная защита. 2016. - № 1 (12). - С. 60-68.

31. Абрамович, Б.Н. Методы и средства повышения уровня 130 энергосбережения и энергоэффективности на горных предприятиях / Абрамович Б.Н., Сычев Ю.А., Жуковский Ю.Л. // Горное оборудование и электромеханика. 2015. № 5. С. 25-30.

32. Абрамович, Б.Н. О компенсации высших гармоник тока и напряжения, создаваемых источником бесперебойного питания / Абрамович Б.Н., Сычев Ю.А., Мингазов А.С., Полищук В.В. // Нефтяное хозяйство. 2013. - № 10. - С. 126-127.

33. Абрамович, Б.Н. Повышение качества электрической энергии и обеспечение электромагнитной совместимости электрооборудования в сетях нефтедобывающих предприятий с помощью параллельного активного фильтра. / Абрамович Б.Н., Сычев Ю.А., Устинов Д.А. // Технологии электромагнитной совместимости. 2013. - № 1 (44). - С. 39-43.

34. Абрамович, Б.Н. Внедрение технологий интеллектуальных электрических сетей на нефтедобывающих предприятиях. / Абрамович Б.Н., Сычев Ю.А., Устинов Д.А. //Нефтегазовое дело. - 2011. - № 6. - С. 4-9.

35. Геворкян, В.М. Сравнение методов оценки фактического вклада субъектов электрических сетей в ухудшение качества электрической энергии / Геворкян В.М., Трошин П.В. // Промышленная энергетика 2008. - №7. – С. 46-50

36. Герман-Галкин, С.Г. Исследование спектральных характеристик многоуровневых полупроводниковых преобразователей / Герман-Галкин С.Г., Дмитриев Б.Ф. // Электротехника. 2014. - № 3. - С. 45-53.

37. 133 Герман-Галкин, С.Г. Спектральные характеристики многоуровневых преобразователей для транспортных систем электропривода / Герман-Галкин С.Г., Дмитриев Б.Ф. //Труды VIII международной (XIX

всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу АЭП-2014. - 2014. - С. 277-281.

38. ГОСТ 30372-95 Совместимость технических средств электромагнитная. Термины и определения / ИПК Издательство стандартов 1998. - 11 с.

39. ГОСТ Р 51317.3.2-99 (МЭК 61000-3-2-95). Совместимость технических средств электромагнитная. Эмиссия гармонических составляющих тока техническими средствами с потребляемым током не более 16 А (в одной фазе). Нормы и методы испытаний. – Введ. 1999-12-24. – М.: Госстандарт России: Изд-во стандартов, 1999.

40. Розанов, Ю.К. Управление потоками электроэнергии и повышение эффективности электроэнергетических систем / Розанов Ю.К., Бурман А.П., Шакарян Ю.Г. // М.: Издательский дом «МЭИ». - 2012. - 336 с.

41. Жежеленко, И.В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промышленных предприятий. – 2-е изд. М.: Энергоатомиздат, 1984. - 160 с.

42. Жежеленко, И.В. Показатели качества электроэнергии и их контроль на промышленных предприятиях. - М.: Энергоатомиздат, 1986. - 167 с. 46. Железко, Ю.С. Компенсация реактивной мощности и повышение качества электрической энергии. - М.: Энергоатомиздат, 1985.

43. Ferracci, P. Power quality //Cahier technique № 199. Schneider Electric. 2001. - 36 p.

44. Fiorina, J.N. Inverters and harmonics (case studies of non-linear loads) // Cahier technique № 159. Schneider Electric. – 1999. - 20 p.

45. Rozanov, Yu.K. Modern methods for electric power quality control by means of power electronics./ Rozanov Yu.K., Ryabchitskij M.V., Kvasnyuk A.A. // Электротехника. - 1999. - № 4. - С. 28-32.

46. Rozanov, Yu.K. Power electronics and power quality / Rozanov Yu.K., Ryabchitskij M.V., Kvasnyuk A.A., Greenberg R.P. // Электротехника. - 2002. - № 2. - С. 16-23. 143

47. Rozanov, Yu.K. Modern methods of regulating the quality of electrical energy by means of power electronics / Rozanov Yu.K., Ryabchitskii M.V., Kvasnyuk A.A. // Электротехника. -1999. - № 4. - С. 36.

48. Оценка дополнительных потерь мощности от высших гармоник в элементах систем электроснабжения / А. Г. Лютаевич, А. А. Вырва, С. Ю. Долингер [и др.] // Омский научный вестник. – 2009. – № 1(77). – С. 109-113.

49. Абрамович, Б.Н. Многоступенчатая система автоматического ввода резерва на основе источников бесперебойного питания в системах электроснабжения объектов горных предприятий / Абрамович Б.Н., Сычев Ю.А., Федоров А.В. // Горное оборудование и электромеханика. 2015. № 6 (115). С. 17-20.

50. Абрамович, Б.Н. Система гарантированного электроснабжения предприятий минерально-сырьевого комплекса с использованием альтернативных и возобновляемых источников энергии / Абрамович Б.Н., Сычев Ю.А., Устинов Д.А., Федоров А.В. // Промышленная энергетика. 2013. -№ 1. - С. 14-16.

51. Абрамович, Б.Н. Энергобезопасность предприятий минерально сырьевого комплекса / Абрамович Б.Н., Сычев Ю.А. // Горный информационно аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2015. - № S7. - С. 737-744.

52. Абрамович, Б.Н. Устройство компенсации высших гармоник и коррекции коэффициента мощности сети. / Абрамович Б.Н., Сычев Ю.А. // Патент на изобретение № 2446536, заявитель и правообладатель Санкт-Петербургский горный университет. – заявл. 26.04.2013; опубл. 10.04.2014, бюл. №10

53. Абрамович, Б.Н. Методы компенсации провалов и искажений 131 напряжения в электрических сетях нефтедобывающих предприятий / Абрамович Б.Н., Устинов Д.А., Сычев Ю.А., Шклярский А.Я // Нефтяное хозяйство. 2014. № 8. - С. 110-112.

54. Абрамович, Б.Н. Устройство компенсации высших гармоник, адаптированное к электроприводу переменного тока / Абрамович Б.Н., Сычев Ю.А., Зимин Р.Ю. // Патент на изобретение № 2619919; заявитель и правообладатель Санкт-Петербургский горный университет. – заявл. 15.06.2016: опубл. 19.05.2017, бюл. №14

55. Абрамович, Б.Н. Устройство подавления высших гармоник и коррекции коэффициента мощности / Абрамович Б.Н., Сычев Ю.А., Зимин Р.Ю. // Патент на полезную модель № 198721; заявитель и правообладатель Санкт-Петербургский горный университет. – заявл. 03.03.2020: опубл. 23.07.2020, бюл. №21

56. Герман-Галкин, С.Г. Аналитическое и модельное исследование активного полупроводникового преобразователя в системах электропривода / Герман-Галкин С.Г., Звежевич З.Ч., Поляков Н.А. // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2014. - № 3 (91). - С. 131-139

57. Мещеряков, В.Н. Система управления параллельным активным фильтрокомпенсирующим устройством на базе релейного регулятора тока в трехфазных электрических сетях / Мещеряков В.Н., Хабибуллин М.М. // Электротехнические комплексы и системы управления. – 2012. – №2. – С. 49-54.

58. Мещеряков, В.Н. Компенсация гармонических искажений и реактивной мощности в однофазных электрических сетях посредством параллельного активного фильтра электроэнергии на базе релейного регулятора тока / В.Н. Мещеряков, М.М. Хабибуллин // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. Новочеркасск. – 2013. – №4. – С. 54-57.

59. Мещеряков, В.Н. Устройство компенсации гармонических токов и реактивной мощности / Мещеряков В.Н., Хабибуллин М.М., Безденежных Д.В., Мещерякова О.В. (Россия) // заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО Липецкий государственный технический университет (RU)

60. Мещеряков, В.Н. Устройство компенсации высших гармоник, адаптированное к электроприводу переменного тока / Мещеряков В.Н., Безденежных Д.В., Хабибуллин М.М., Мещерякова О.В. (Россия) // заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО Липецкий государственный технический 135 университет (RU)

61. Мещеряков, В.Н. Компенсация высших гармоник тока и напряжения на основе активного фильтра с релейным регулированием в сетях питания радиотехнических устройств и компьютерных систем / В.Н. Мещеряков, М.М. Хабибуллин // Материалы XIX международной научно-технической конференции «Информационные системы и технологии» ИСТ-2013. – Н. Новгород: Изд-во НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – 2013. – 2 с.

62. Мещеряков, В.Н. Оптимизация системы управления параллельным активным фильтром электроэнергии для компенсации нелинейных искажений в трехфазных электрических сетях / В.Н. Мещеряков, М.М. Хабибуллин // Материалы XIX международной научно-технической конференции студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика». – Москва: Изд-во МЭИ. 2013. – 4 с.

63. Мещеряков, В.Н. Система управления параллельным активным фильтрокомпенсирующим устройством на базе релейного регулятора тока в трехфазных электрических сетях / В.Н. Мещеряков, М.М. Хабибуллин // Сборник тезисов докладов 9-й Всероссийской школы-конференции молодых ученых. Управление большими системами. – Липецк: Изд-во ЛГТУ. – 2012. – С.173-176.

64. Мещеряков, В.Н. Активный фильтр высших гармоник адаптированный к электроприводу переменного тока / В.Н. Мещеряков, Д.В. Безденежных, М.М. Хабибуллин // Сборник тезисов докладов 9-й Всероссийской школы-конференции молодых ученых. Управление большими системами. – Липецк: Изд-во ЛГТУ. – 2012. – С.164-167.

65. Пронин, М.В. Активные фильтры высших гармоник. Направления развития./ Новости электротехники. 2006. - № 2.- С. 102.

66. 2018, Abramovich, B.N. Selection of shunt active filter main parameters in conditions of centralized and distributed power supply systems / Abramovich B.N., Sychev Y.A., Zimin R.Y. // Proceedings - 2018 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM. – 2018. – Volume 1. – 8728566.

67. Abramovich, B.N. Mathematical modeling of harmonic correction by parallel active filter in conditions of distributed generation / B.N. Abramovich, Yu.A. Sychev, R.Yu. Zimin, P.A. Kuznetsov // Journal of Physics: Conference Series, DOI: 10.1088/1742-6596/1333/3/032081. – 2019. – Volume 1333. – 032081.

68. Abramovich, B.N. The Application of Series Active Filter for Improvement of Power Quality in Networks of Oil Enterprises / B.N. Abramovich, Yu.A. Sychev, 140 R.Yu. Zimin, M.E. Aladin // 2019 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon), DOI: 10.1109/FarEastCon.2019.8933900. – 2019. – Volume 1. – 8933900. (Scopus)

69. Akagi, H. Active Harmonic Filters / Proceedings of the IEEE. 2005. - Vol. 93. - №12. pp. 2128-2141.

70. Akagi, H. Instantaneous Power Theory and Applications to Power Conditioning (IEEE Press Series on Power Engineering) / H. Akagi, E. Watanabe, - M. Aredes. – New York: Wiley, 2007.

71. Akagi, H. Generalized Theory of the Instantaneous Reactive Power in Three Phase Circuits / H. Akagi, Y. Kanazawa, A. Nabae // IPEC'83 – Int. Power Electronics Conf. – Tokyo, Japan, 1983. – P. 1375–1386.

72. Akagi, H. Instantaneous Reactive Power Compensator Comprising Switching Devices without Energy Storage Components / H. Akagi, Y. Kanazawa, A. Nabae // IEEE Trans. Industry Applic. – May/June 1984. – Vol. 20. –P. 625–630.

73. Bettega, E. Active harmonic conditioners and unity power factor rectifiers. / Bettega E., Fiorina J.N. // Cahier technique № 183. Schneider Electric. - 1999. - 36 p.

74. Meshcheryakov, V.N. Active power filter with relay current regulator and common DC link for compensation of harmonic distortion in power grids / V.N.

Meshcheryakov, M.M. Khabibullin, I.S. Pavlov, S.Valtchev // IFIP Advances in Information and Communication Technology 423. Technological Innovation for Collective Awareness Systems. 5th IFIP WG 5.5/SOCOLNET Doctoral Conference on Computing, Electrical and Industrial Systems DoCEIS 2014. Lisbon. – 2014. – pp. 427-434.

75. Лютаревич, А. Г. Повышение качества электроэнергии в распределительных сетях за счет снижения несинусоидальности кривой напряжения : специальность 05.14.02 "Электрические станции и электроэнергетические системы" : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Лютаревич Александр Геннадьевич. – Омск, 2009. – 134 с.

76. Шевырев, Ю. В. Исследование и разработка методики выбора параметров и регулятора напряжения активного фильтра гармоник / Ю. В. Шевырев, П. С. Крещановский // Промышленная энергетика. – 2025. – № 1. – С. 24-31.

77. Абрамович, Б.Н. Устройство гибридной компенсации высших гармоник / Абрамович Б.Н., Сычев Ю.А., Зимин Р.Ю. // Патент на полезную модель № 176107; заявитель и правообладатель Санкт-Петербургский горный университет.

78. Абрамович, Б.Н. Устройство гибридной компенсации высших гармоник / Абрамович Б.Н., Сычев Ю.А., Зимин Р.Ю. // Патент на полезную модель № 185875; заявитель и правообладатель Санкт-Петербургский горный университет.

79. Абрамович, Б.Н.,. Оценка эффективности гибридных систем коррекции формы кривых тока и напряжения в электрических сетях с распределенной генерацией / Абрамович Б.Н., Сычев Ю.А., Зимин Р.Ю. // Промышленная энергетика. – 2015. – № 8. – С.49-53.

80. Абрамович, Б.Н.,. Оценка эффективности гибридного электротехнического комплекса для коррекции уровня несинусоидальности в автономных системах электроснабжения нефтепромыслов/ Абрамович Б.Н.,

Сычев Ю.А., Зимин Р.Ю. // Промышленная энергетика. – 2018. – № 1. – С.45-54.

81. Абрамович, Б.Н., Гибридная система коррекции уровня высших гармоник и обеспечение бесперебойного электроснабжения ответственных потребителей нефтедобычи/ Абрамович Б.Н., Сычев Ю.А., Зимин Р.Ю. // 132 Промышленная энергетика. – 2018. – № 11. – С.50-57.

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

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

84. Abramovich, B. N. Hybrid harmonic compensation device adapted for variable speed drive system / Abramovich B. N., Sychev Y. A, Zimin R. Y. // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2017. – № 87(3). – pp. 32002 – 32002.

85. Abramovich, B.N. Efficiency estimation of hybrid electrotechnical complex for non-sinusoidal signals level correction in autonomous power supply systems for oil fields / B.N. Abramovich, Y.A. Sychev, P.A. Kuznetsov, R.Yu. Zimin // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, DOI: 10.1088/1755-1315/194/5/052001. – 2018. – Volume 194. – Issue 5. – 052001.

86. Abramovich, B.N. The hybrid correction system, based on active and passive filters for harmonic compensation in networks of oil enterprises / B.N. Abramovich, Y.A. Sychev, R.Y. Zimin // 2018 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies, FarEastCon DOI: 10.1109/FarEastCon.2018.8602638. – 2018. – Volume 1. - 8602638.

87. 136 Пронин, М.В. Силовые полностью управляемые полупроводниковые преобразователи (моделирование и расчет) / Пронин М.В. Воронцов А.Г. - СПб.: ОАО «Электросила», 2003. - 172 с.

88. Шевырев, Ю. В. Оценка эффективности применения активных фильтров гармоник в распределительных сетях с частотно-регулируемыми электроприводами / Ю. В. Шевырев, П. С. Крещановский // Промышленная энергетика. – 2024. – № 11. – С. 52-59.

89. Колпаков, А. Трехуровневые инверторы: теория и практика / А. Колпаков, И. Стаудт // Силовая электроника. – 2014. – Т. 5, № 50. – С. 42-47.

90. Абрамович, Б.Н. Коррекция коэффициента мощности в сетях нефтепромыслов с помощью активного фильтра / Абрамович Б.Н., Сычев Ю.А., Медведев А.В., Старостин В.В., Аболев Е.Н., Полищук В.В. // Нефтяное хозяйство. 2008. - № 5. - С. 88-90.

91. Абрамович, Б.Н. Промышленные испытания активного фильтра в промысловых сетях ОАО "Оренбургнефть ТНК-ВР" / Абрамович Б.Н., Сычев Ю.А., Медведев А.В., Старостин В.В., Аболев Е.Н., Полищук В.В. // Промышленная энергетика. 2008. - № 10. - С. 42-46.

92. Гамазин, С.И., Применение тиристорных компенсаторов в системах электроснабжения / Гамазин С.И., Ненахов А.И. // Главный энергетик. 2014.- № 4. - С. 55-58.

93. Герман-Галкин, С.Г. Школа Matlab виртуальные лаборатории устройств силовой электроники в среде Matlab-Simulink урок 16. Исследование электрической цепи с трехфазным активным фильтром / Силовая электроника. 2013. - № 40. - С. 80-86.

94. Герман-Галкин, С.Г. Школа Matlab виртуальные лаборатории устройств силовой электроники в среде Matlab-Simulink урок 15. Исследование однофазного активного выпрямителя / Силовая электроника. 2012. - № 37. - С. 72-79.

95. Герман-Галкин, С.Г. Исследование активного полупроводникового преобразователя в среде Matlab-Simulink / Герман-Галкин С.Г., Гаврилов Р.С // Электротехника. 2011. - № 4. – с.51-56.

96. Мещеряков, В.Н. Активный фильтр электроэнергии с общим звеном постоянного тока и системой управления на основе релейного регулятора тока

/ В.Н. Мещеряков, М.М. Хабибуллин // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2014. – №7. – С. 26-33.

97. Пронин, М.В. Создание систем с электрическими машинами и полупроводниковыми преобразователями на основе комплекса быстродействующих уточненных моделей. Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук / Санкт-Петербургский государственный горный институт им. Г.В. Плеханова. - Санкт-Петербург. - 2006.

98. Пронин, М.В. Активная фильтрация напряжений и токов сети в установках с высоковольтными тиристорными преобразователями./ Пронин М.В., Воронцов А.Г. // Горное оборудование и электромеханика. 2005. - № 5. - С. 41.

99. Пронин, М.В. Система с многофазным асинхронным генератором и несколькими активными преобразователями / Пронин М.В., Воронцов А.Г. // Электротехника. 2007.- № 10. - С. 41-45.

100. Розанов, Ю.К. Современные методы улучшения качества электроэнергии (аналитический обзор) / Розанов Ю.К., Рябчицкий М.В. // Электротехника. - 1998. - № 3.

101. Розанов, Ю.К. Цифровая система управления статическим компенсатором реактивной мощности / Розанов Ю.К., Кошелев К.С., Смирнов М.И. // Электричество. - 2006. - № 7. С. - 25-30.

102. Розанов, Ю.К. О мощностях в цепях переменного и постоянного токов // Электричество. - 2009. - № 4. - С. 32-36.

103. Розанов, Ю.К. Управление потоками электроэнергии в преобразователе со сверхпроводящим индуктивным накопителем / Розанов Ю.К., Рябчицкий М. В., Лепанов М.Г., Киселев М.Г. // Электричество. - 2008. - № 8. - С. 22-27.

104. Розанов, Ю.К. Устройство регулирования качества электрической энергии для трехфазных распределительных систем электроснабжения / Розанов Ю.К., Лепанов М.Г., Киселев М.Г., Крюков К.В. // Управление

качеством электрической энергии Сборник трудов Международной научно-практической конференции. - 2014. - С. 115-122.

105. Розанов, Ю.К. Повышение эффективности систем электроснабжения с нетрадиционными источниками электроснабжения / Розанов Ю.К., Соломатин А.В., Крюков К.В. // Электротехника. 2006. № 10. С. 63а-67.

106. Розанов, Ю.К. Многофункциональный регулятор качества электроэнергии на основе силового электронного преобразователя / Розанов Ю.К., Лепанов М.Г., Киселев М.Г. // Электротехника. 2014. - № 8. - С. 51-59.

107. Решетняк, М. Ю. Повышение качества электрической энергии в подземных электрических сетях высокопроизводительных угольных шахт : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Решетняк Мария Юрьевна, 2022. – 148 с.

108. Сычев, Ю.А., Проблемы компенсации высших гармоник тока и напряжения в условиях распределенной генерации / Сычев Ю.А., Кузнецов П.А., Зимин Р.Ю., Соловьева Я.А // Вестник московского авиационного института. – 2018. – № 4(25). – С.216-228.

109. Тонкаль, В.Е. Применение обменной энергии к анализу энергетических процессов в системах с вентильными преобразователями / Тонкаль В.Е., Жуйков В.Я., Денисюк С.П. // Тезисы докладов I Всесоюзной конференции по теоретической электротехнике. – Ташкент: ТПИ, 1987. – С. 21-22.

110. Шклярский, Я.Э. К вопросу оплаты предприятиями потребляемой электроэнергии при наличии искажений в сети / Шклярский Я.Э., Пудкова Т.В., Замятин Е.О. // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. - 2019. - № 9. - С. 611-617.

111. Шклярский, Я.Э. 139 энергетической эффективности Оценка электротехнического комплекса / Шклярский Я.Э., Замятина Е.Н., Замятин Е.О. // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. - 2020. - № 3. - С. 339-347.

112. Шклярский, Я.Э. Управление активным выпрямителем напряжения в составе частотно-регулируемого привода при провалах напряжения / Шклярский Я.Э., Барданов А.И. // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. - 2018. - № 4. - С. 414-425.

113. Abramovich, B.N. Modelling and analysis of functional modes of active compensators in distributed generation systems / B.N. Abramovich, Yu.A. Sychev, R.Yu. Zimin // Journal of Physics: Conference Series, DOI: 10.1088/1742-6596/1333/6/062028. – 2019. – Volume 1333.

114. Abramovich, B.N. Efficiency estimation of hybrid electrical complex for voltage and current waveform correction in power systems of oil enterprises / B.N. Abramovich, Y.A. Sychev, R.Y. Zimin // Proceedings of the 2019 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, ElConRus 2019, DOI: 10.1109/EIConRus.2019.8657081. – 2019. – Volume 1. - pp. 401-406.

115. Buso, S. Power supply distribution system for calorimeters at the LHC beyond the nominal luminosity. // Buso S., Spiazzi G., Tenti P., Riva M., Maranesi P., Belloni F., Cova P., Menozzi R., Delmonte N., Bernardoni M., Iannuzzo F., Busatto G., Porzio A., Velardi F., Lanza A., Citterio M., Meroni C. /Journal Of Instrumentation, 2013

116. Collombet, C. Harmonic disturbances in networks, and their treatment / Collombet C., Lupin J.M., Schonek J. //Cahier technique № 152. Schneider Electric.- 1999. - 31 p. 141

117. Costabeber, A. Distributed control of smart microgrids by dynamic grid mapping / Costabeber A., Tenti P., Erseghe T., Tomasin S., Mattavelli P. // IEEE Industrial Electronics Conference Melbourne. DOI: 10.1109/IECON.2011.6119500. -2011. - pp. 1323-1328.

118. Costabeber, A. Optimization of Micro-Grid Operation by Dynamic Grid Mapping and Token Ring Control / Costabeber A., Tenti P., Mattavelli P., Erseghe T., Tomasin S. // European Power Electronics Conference (EPE), 2011. - pp.1-10

119. Costabeber, A. Distributed cooperative control of low-voltage residential microgrids / Costabeber A., Tenti P., Mattavelli P // 3rd IEEE International

Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems, 2012. - p. 457-463,

120. IEEE Std 519-2014. IEEE Recommended practices and requirements for harmonic control in electrical power systems / American national standards institute. 2014. - 29 p.

121. IEEE Std 1459-2010. IEEE Standard Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balanced, or Unbalanced Conditions / American national standards institute. - 2010. - 52 p.

122. IEEE Std. 1159-2009. IEEE Recommended practice for monitoring electric power quality / American national standards institute. - 2009. -91 p. 112. Fiorina, J.N. Harmonics upstream of rectifiers in UPS. // Cahier technique № 160. Schneider Electric. – 1999. - 20 p.

123. Lepanov, M.G. Operation modes of converters with SMES on DC-side used for improving of electrical systems efficiency. / Lepanov M.G., Rozanov Y.K. // 15th 142 International Power Electronics and Motion Control Conference and Exposition, EPE-PEMC 2012 ECCE Europe. - 2012. – p. 6397438.

124. Lepanov, M., Rozanov Y. Multifunctional regulator based on SMES and power electronic converter for increase of power quality and power supply reliability / Lepanov M., Rozanov Y. // International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives Cep. «Proceedings of 2013 4th International Conference on Power Engineering Energy and Electrical Drives, POWERENG 2013» - 2013. - pp. 1387-1391.

125. Litran, S. P. Control strategy for an interface to improve the power quality at the connection of AC microgrids /Litran S. P., Revuelta P. S., Prieto J., Valles A. P.// International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ'14). -2014. – p. 498.

126. Meshcheryakov, V.N. Active Power Filter with Common DC Link for Compensation of Harmonic Distortion in Power Grids / V.N. Meshcheryakov, M.M. Khabibullin, V.V. Pikalov, S.Valtchev // 16th International Power Electronics and

Motion Control Conference and Exposition (PEMC 2014). Antalya. – 2014. – pp. 1586-1590.

127. Pronin, M., Control system of the multistage active rectifier energizing power shovel multi-motor variable-frequency drive for mining applications. / Pronin M., Vorontsov A., Gogolev G., Shonin O. // Proceedings of the 2011 14th European Conference on Power Electronics and Applications, EPE 2011. - 2011. - p. 6020295.

128. Rozanov, Yu.K. Power electronics in systems with non-traditional power sources / Rozanov Yu.K., Baranov N.N., Antonov B.M., Efimov E.N., Solomatin A.V. // Электричество. - 2002. - № 3. - С. 20-28.

129. Sainz, L. Currents' physical components (CPC) concept in wind farm harmonic current studies / Sainz L., Cunill-Sola J. // International Conference on Renewable Energies and Power Quality. -2011. – Vol.1 doi: 10.24084/repqj09.351.

130. Salmeron, P. Improvement of the electric power quality using series active and shunt passive filters / Salmeron P., Litran S. P. // IEEE transactions on power delivery. -2010. – Vol.1.- pp 1058-1067.

131. Sychev, Yu. The assessment of the series active filter efficiency in power supply systems of oil production enterprises / R. Zimin, M. Aladin // E3S Web of Conferences.

132. Tedeschi, E. Cooperative control of electronic power processors in micro grids./ Tedeschi E., Tenti P., Mattavelli P., Trombetti D. // Eletrônica de Potência. 2009. - Vol. 14. - p. 241-249.

133. Tedeschi, E. Cooperative Design and Control of Distributed Harmonic and Reactive Compensators / Tedeschi E., Tenti P. // Przegląd Elektrotechniczny. 2008.- Vol. 6. - p. 23-27.

134. Tenti, P. Improving power quality and distribution efficiency in micro-grids by cooperative control of switching power interfaces / Tenti P., Costabeber A., Mattavelli P., // Proceedings of 2010 International Power Electronics Conference (IPEC-Sapporo 2010), Sapporo (Japan), 2010. – Vol.1.- pp. 472-479.

135. Wölfle ,W.H. Power factor correction for ac/dc converters with cost effective inductive filtering / W.H. Wölfle, W.G. Hurley, S. Arnoult // Power

Electron. Spec. Conf. (PESC'00), Galway, Ireland, June 2000. - Vol. 1. – pp. 332 - 337.

136. Wölfle, W.H. Quasi-active power factor correction with a variable inductive filter: theory, design and practice / W. H. Wölfle, W.G. Hurley // IEEE Trans. on Power Electron., Jan. 2003. - Vol. 18. - No. 1. – pp. 248 - 255.

137. Yoshida, T. An improvement technique for the efficiency of high-frequency 144 switch-mode rectifiers / T. Yoshida, O. Shiizuka, O. Miyashita, K. Ohniwa // IEEE Trans. on Power Electron., Nov. 2000. - Vol. 15. - No. 6. – pp. 1118 - 1123.

138. Онлайн калькулятор: аппроксимация функции одной переменной [Интернет-ресурс]. URL: <https://planetcalc.ru/5992/>. (Дата обращения: 9.06.25).

## ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Таблица 1 - Параметры качества электроэнергии и компонентов АФГ при разных емкостях конденсаторов выходного фильтра

$C_{\phi}$ , мкФ	$I_n$ , А		$I_{\phi}$ , А		$K_u$ , %		$K_I$ , %		$U_c$ , В	
	74 %	18 %	74 %	18 %	74 %	18 %	74 %	18 %	74 %	18 %
-	1050	256	-	-	9,5	3,4	29	42,8	-	-
1	1034	252	1,2	0,5	7,1	2,3	8	7,9	1600	1960
2	1034	253	1,5	0,6	7	2,3	7,9	8	1600	1960
5	1026	253	2	0,8	6,7	2,2	6,6	8	1600	1960
10	1026	253	2,5	1,1	6,6	2,1	6,7	8	1600	1960
25	1027	253	3,2	2,1	6,6	2,1	6,7	8,1	1600	1960
50	1026	253	4,8	3,9	6,5	2,1	6,7	8,3	1595	1940
75	1027	253	6,3	5,7	6,5	2,1	6,7	8,5	1590	1920
100	1027	253	7,9	7,5	6,5	2,1	6,8	8,9	1585	1900

Таблица 2 - Параметры качества электроэнергии и компонентов АФГ при разных активных сопротивлениях выходного фильтра

$R_{\phi}$ , Ом	$I_n$ , А		$I_{\phi}$ , А		$K_u$ , %		$K_I$ , %		$U_c$ , В	
	74 %	18 %	74 %	18 %	74 %	18 %	74 %	18 %	74 %	18 %
-	1050	256	-	-	9,5	3,4	29	42,8	-	-
1	1030	253	12	5,5	12,4	5,4	6,9	8,7	1680	2050
2	1026	253	5,5	2,1	7,9	2,5	6,6	7,9	1620	1990
5	1026	253	2,5	1,1	6,6	2,1	6,7	8	1600	1960
10	1026	253	1,6	0,9	6,8	2,2	6,7	8	1600	1950
25	1027	253	1	0,8	7	2,3	6,7	8,1	1600	1950
50	1027	253	0,8	0,8	7,1	2,3	6,6	8,2	1600	1950
75	1027	253	0,75	0,75	7,2	2,4	6,6	8,2	1600	1950
100	1027	253	0,7	0,7	7,2	2,4	6,6	8,2	1600	1950

Таблица 3 - Параметры качества электроэнергии и компонентов АФГ при разных индуктивностях выходного реактора ( $\beta = 0,74$ )

$L_p$ , мГн	$I_n$ , А	$K_u$ , %	$K_I$ , %	$U_c$ , В
-	1050	9,5	29	-
0,2	1027	7,8	1,8	1020
0,3	1028	7	2,4	1220
0,4	1029	6,8	3,8	1350
0,5	1030	6,6	5,6	1460
0,6	1031	6,7	7,3	1550
0,7	1031	6,8	8,9	1640
0,8	1030	7,1	10,2	1730
0,9	1030	7,2	11,2	1820
1	1031	7,4	12,4	1910

Таблица 4 - Параметры качества электроэнергии и компонентов АФГ при разных индуктивностях выходного реактора ( $\beta = 0,55$ )

$L_p$ , мГн	$I_n$ , А	$K_u$ , %	$K_I$ , %	$U_c$ , В
-	780	7,8	31,9	-
0,3	765	6,2	1,8	1100
0,6	766	5,3	4,4	1500
0,9	767	5,3	8,4	1740
1,2	768	5,7	11,7	1950

1,5	769	6,1	14,4	2140
1,8	770	6,3	16,1	2350
2,1	772	6,4	17,5	2550
2,4	777	6,6	18,7	2740
2,7	781	6,8	19,6	2920

Таблица 5 - Параметры качества электроэнергии и компонентов АФГ при разных индуктивностях выходного реактора ( $\beta = 0,36$ )

$L_p$ , мГн	$I_n$ , А	$K_u$ , %	$K_I$ , %	$U_c$ , В
-	516	5,8	35,9	-
0,2	506	6,9	1,2	850
0,6	508	4,1	2,3	1300
1	510	3,8	6	1610
1,4	512	3,9	10,3	1820
1,8	513	4,2	13,8	2000
2,2	516	4,5	16,8	2150
2,6	516	4,7	19	2300
3	518	4,8	20,6	2460
3,4	522	4,9	21,8	2610

Таблица 6 - Параметры качества электроэнергии и компонентов АФГ при разных индуктивностях выходного реактора ( $\beta = 0,18$ )

$L_p$ , мГн	$I_n$ , А	$K_u$ , %	$K_I$ , %	$U_c$ , В
-	256	3,4	42,8	-
0,5	252	3,3	1,4	920
1	252	2,4	1,9	1240
1,5	253	2,2	3,5	1500
2	253	2,1	6,3	1710
2,5	255	2,1	9,1	1880
3	256	2,2	12,4	2020
3,5	257	2,3	15,1	2150
4	258	2,5	17,7	2260

Таблица 7 - Параметры качества электроэнергии и компонентов АФГ при разных активных сопротивлениях цепи ( $\beta = 0,74$ )  $L = 0,5$  мГн

$R_p$ , МОм	$I_n$ , А	$K_u$ , %	$K_I$ , %	$U_c$ , В
-	1050	9,5	29	-
0,1	1026	6,6	5	1510
0,5	1025	6,6	5	1500
1	1026	6,5	5,1	1490
5	1031	6,5	5,9	1430
10	1037	6,6	6,7	1360
50	1070	6,9	10,1	1150
100	1104	7,1	11,7	1050

Таблица 8 - Параметры качества электроэнергии и компонентов АФГ при разных активных сопротивлениях цепи ( $\beta = 0,18$ )  $L = 2$  мГн

$R_p$ , МОм	$I_n$ , А	$K_u$ , %	$K_I$ , %	$U_c$ , В
-	256	3,4	42,8	-
0,1	254	2,1	6,2	1710
0,5	254	2,1	6,3	1710
1	254	2,1	6,4	1710
5	254	2,1	6,5	1700

10	254	2,1	6,7	1690
50	257	2,1	8,4	1600
100	261	2,2	10,2	1520

Таблица 9 - Параметры качества электроэнергии и компонентов АФГ при разных емкостях накопительного конденсатора АФГ ( $\beta = 0,74$ )  $L = 0,8$  мГн

$C_{афг}, мФ$	$I_H, А$	$K_u, \%$	$K_I, \%$	$U_c, В$
-	1050	9,5	29	-
0,5	1024	8,9	17,6	1430
1	1022	7,4	12	1600
2	1022	7,1	10,3	1700
5	1023	6,9	9,4	1780
10	1024	6,8	9,2	1800
20	1026	6,9	9,4	1810
40	1030	7,1	10,2	1820

Таблица 10 - Параметры качества электроэнергии и компонентов АФГ при разных емкостях накопительного конденсатора АФГ ( $\beta = 0,55$ )  $L = 0,8$  мГн

$C_{афг}, мФ$	$I_H, А$	$K_u, \%$	$K_I, \%$	$U_c, В$
-	780	7,8	31,9	-
0,5	761	6,1	13,3	1300
1	762	5,3	8,7	1500
2	764	5,3	7,4	1620
5	764	5,2	7,8	1700
10	765	5,3	6,7	1710
20	765	5,3	6,7	1710
40	766	5,3	6,7	1710

Таблица 11 - Параметры качества электроэнергии и компонентов АФГ при разных емкостях накопительного конденсатора АФГ ( $\beta = 0,36$ )  $L = 0,8$  мГн

$C_{афг}, мФ$	$I_H, А$	$K_u, \%$	$K_I, \%$	$U_c, В$
-	516	5,8	35,9	-
0,5	505	3,7	6,7	1200
1	506	3,7	4,4	1360
2	506	3,9	3,7	1450
5	507	3,9	3,5	1490
10	507	4	3,5	1500
20	507	4	3,5	1510
40	508	4	3,5	1510

Таблица 12 - Параметры качества электроэнергии и компонентов АФГ при разных емкостях накопительного конденсатора АФГ ( $\beta = 0,18$ )  $L = 0,8$  мГн

$C_{афг}, мФ$	$I_H, А$	$K_u, \%$	$K_I, \%$	$U_c, В$
-	256	3,4	42,8	-
0,5	251	2,1	1,3	960
1	252	2,3	1,5	1050
2	252	2,5	1,6	1080
5	252	2,6	1,6	1110
10	252	2,6	1,6	1110
20	252	2,6	1,7	1120
40	252	2,6	1,7	1120

Таблица 13 - Параметры качества электроэнергии и компонентов АФГ при разных емкостях накопительного конденсатора АФГ ( $\beta = 0,74$ )  $L = 0,5$  мГн

$C_{афг}, \text{мФ}$	$I_n, \text{А}$	$K_u, \%$	$K_I, \%$	$U_c, \text{В}$	$K_n, \%$
-	1050	9,5	29	-	-
0,5	1025	8,2	14,7	1100	190
1	1022	6,8	8,1	1220	78
2	1023	6,5	6	1370	29
5	1025	6,5	5,2	1470	10
10	1025	6,6	5	1500	5
20	1026	6,6	5,1	1500	3
40	1027	6,6	5,9	1500	1

Таблица 14 - Параметры качества электроэнергии и компонентов АФГ при разных емкостях накопительного конденсатора АФГ ( $\beta = 0,55$ )  $L = 0,75$  мГн

$C_{афг}, \text{мФ}$	$I_n, \text{А}$	$K_u, \%$	$K_I, \%$	$U_c, \text{В}$	$K_n, \%$
-	780	7,8	31,9	-	-
0,5	758	6,2	14,9	1190	151
1	763	5,3	7,5	1400	46
2	764	5,2	6,2	1530	20
5	764	5,2	5,6	1600	8
10	765	5,2	5,5	1600	4
20	767	5,2	5,8	1600	1
40	771	5,2	6,7	1520	0

Таблица 15 - Параметры качества электроэнергии и компонентов АФГ при разных емкостях накопительного конденсатора АФГ ( $\beta = 0,36$ )  $L = 1$  мГн

$C_{афг}, \text{мФ}$	$I_n, \text{А}$	$K_u, \%$	$K_I, \%$	$U_c, \text{В}$	$K_n, \%$
-	516	5,8	35,9	-	-
0,5	505	3,8	8,5	1350	67
1	506	3,7	6,3	1540	26
2	506	3,7	5,5	1610	11
5	507	3,8	5,2	1660	4
10	507	3,8	5,2	1660	2
20	510	3,8	6	1610	1
40	515	3,7	7,5	1520	0

Таблица 16 - Параметры качества электроэнергии и компонентов АФГ при разных емкостях накопительного конденсатора АФГ ( $\beta = 0,18$ )  $L = 2$  мГн

$C_{афг}, \text{мФ}$	$I_n, \text{А}$	$K_u, \%$	$K_I, \%$	$U_c, \text{В}$	$K_n, \%$
-	256	3,4	42,8	-	-
0,5	252	2	6,6	1620	22
1	252	2,1	5,9	1700	10
2	252	2,1	5,5	1740	5,7
5	252	2,1	5,6	1750	2
10	253	2,1	6,3	1750	1
20	253	2,1	6,4	1750	0,5
40	253	2,1	6,5	1750	0,2

Таблица 17 - Параметры качества электроэнергии и компонентов АФГ при разных емкостях сглаживающего конденсатора  $L = 0,15$  мкГн/кВА

АФГ выкл					АФГ вкл				
$S_{чрэл},$	$I_n, A$	$K_{п.чрэл},$	$K_u, \%$	$K_I, \%$	$I_n, A$	$K_u, \%$	$K_I, \%$	$U_c, B$	$K_{п.афг},$
6	1020	91	17,7	59,6	1026	22,1	43,4	1850	5
12	1066	42	13,3	42,1	1029	18,3	39,1	1850	5
30	1053	15	10,6	32,6	1025	12,5	23,9	1700	2
60	1050	17	10,3	31,2	1037	13,4	35,9	1720	9
120	1047	5	10,1	30,8	1035	9,6	18,7	1600	6
300	1047	0	10	30,4	1027	8,4	11,8	1600	2
600	1050	0	10	30,3	1029	8,3	11,4	1600	2

Таблица 18 - Параметры качества электроэнергии и компонентов АФГ при разных емкостях сглаживающего конденсатора  $L = 0,3$  мкГн/кВА

АФГ выкл					АФГ вкл				
$S_{чрэл},$	$I_n, A$	$K_{п.чрэл},$	$K_u, \%$	$K_I, \%$	$I_n, A$	$K_u, \%$	$K_I, \%$	$U_c, B$	$K_{п.афг}, \%$
6	1034	20	22,1	74	1032	19,9	36	2040	7
12	1069	10	11,8	37,1	1040	15,9	34	1890	4
30	1057	4	9,9	30,4	1024	7,4	7,1	1750	3
60	1053	2	9,7	29,4	1043	10,9	25,8	1780	7
120	1053	1	9,6	29	1026	6,6	5,1	1500	3
300	1053	1	9,5	28,7	1025	6,3	4,4	1450	3
600	1057	0	9,5	28,6	1025	6,2	4,3	1440	2

Таблица 19 - Параметры качества электроэнергии и компонентов АФГ при разных емкостях сглаживающего конденсатора  $L = 0,6$  мкГн/кВА

АФГ выкл					АФГ вкл				
$S_{чрэл},$	$I_n, A$	$K_{п.чрэл},$	$K_u, \%$	$K_I, \%$	$I_n, A$	$K_u, \%$	$K_I, \%$	$U_c, B$	$K_{п.афг}, \%$
6	1117	90	23,6	71,6	1146	7,7	2,4	1900	13
12	1075	11	10	30,7	1040	10,9	19,7	2010	4
30	1065	4	8,9	27	1027	5,3	2,1	1450	2
60	1062	2	8,8	26,5	1024	4,9	2	1330	2
120	1061	0	8,7	26,2	1023	4,8	2	1300	2
300	1065	0	8,7	26	1023	4,8	2	1290	2
600	1069	0	8,7	26	1023	4,8	2,1	1290	2

Таблица 20 - Параметры качества электроэнергии и компонентов АФГ при разных индуктивностях линии нагрузки на 1кВА ( $\beta = 0,74$ )  $C = 120$  мкФ/кВА

АФГ выкл					АФГ вкл				
$L_{чрэл}, мГн/кВА$	$I_n, A$	$K_{п.нагр}, \%$	$K_u, \%$	$K_I, \%$	$I_n, A$	$K_u, \%$	$K_I, \%$	$U_c, B$	$K_{п.афг}, \%$
0	1043	1	10,8	32,9	1027	13,5	34,2	1670	8
0,006	1043	1	10,7	32,8	1033	13,4	34,1	1670	7
0,012	1044	1	10,7	32,7	1034	13,4	34,1	1670	7
0,03	1044	1	10,6	32,4	1031	12,8	32,3	1690	7
10	1045	1	10,5	32	1033	12,4	30,2	1710	7
20	1046	1	10,2	31,1	1038	11,5	26,3	1740	7
0,3	1051	1	9,5	29	1025	6,3	4,4	1450	3
0,6	1061	0	8,7	26,2	1023	4,8	2	1300	2

Таблица 21 - ПКЭ, сети и активного фильтра при разных  $K_I$  и  $C$ ,  $L = 0,4$  мГн.

$K$	$L_p$	$C_{афг}$ , мФ	$I_n$ , А	$K_u$ , %	$K_I$ , %	$U_c$ , В
АФГ выключен			1050	9,5	29	
1	0,4	1	1035	10,1	18,1	1500
1	0,4	2	1091	9,3	20,8	1300
1	0,4	5	1022	5,2	5,9	1180
1	0,4	10	1023	5,4	6,4	1200
1	0,4	20	1023	5,6	6,8	1210
1	0,4	50	1024	5,8	7	1220
2	0,4	1	1030	10,4	20,4	1540
2	0,4	2	1021	9,6	17,8	1600
2	0,4	5	1029	8,3	15,5	1170
2	0,4	10	1022	5,1	6,6	1160
2	0,4	20	1023	5,5	7,3	1160
2	0,4	50	1023	5,8	7,7	1170
3	0,4	1	1061	10,5	24,1	1450
3	0,4	2	1057	9	20,5	1250
3	0,4	5	1015	7,7	13,8	1210
3	0,4	10	1020	5,7	8	1140
3	0,4	20	1022	5,3	7,4	1150
3	0,4	50	1022	5,7	8	1150
4	0,4	1	992	10,9	27,5	1400
4	0,4	2	1012	9,4	20,3	1300
4	0,4	5	1023	9	18,9	1300
4	0,4	10	1028	8	15,4	1150
4	0,4	20	1023	5,2	7,3	1140
4	0,4	50	1021	5,6	8,1	1140
5	0,4	1	1007	11,1	28,4	1400
5	0,4	2	1000	10,4	27,1	1300
5	0,4	5	1027	9,4	20,5	1300
5	0,4	10	1020	7	13,4	1150
5	0,4	20	1021	5	7,2	1130
5	0,4	50	1021	5,5	8,1	1130
6	0,4	1	991	11	29,5	1350
6	0,4	2	1037	10	22,7	1290
6	0,4	5	1032	9,6	21,9	1300
6	0,4	10	1016	7,7	14,8	1170
6	0,4	20	1021	4,9	7,2	1120
6	0,4	50	1021	5,5	8	1130

Таблица 22 - ПКЭ сети и активного фильтра при разных  $K_I$  и  $C$ ,  $L = 0,6$  мГн.

$K$	$L_p$	$C_{афг}$ , мФ	$I_n$ , А	$K_u$ , %	$K_I$ , %	$U_c$ , В
АФГ выключен			1050	9,5	29	
1	0,6	1	1002	8	16,7	1550
1	0,6	2	1019	7,1	13,8	1250
1	0,6	5	1021	5,1	9,3	1300
1	0,6	10	1020	5,1	9,7	1310
1	0,6	20	1020	5,2	10	1320
1	0,6	50	1022	5,2	10	1320
2	0,6	1	1065	12	28,7	1700
2	0,6	2	1033	7,1	15,7	1370

2	0,6	5	1019	5,2	10,2	1240
2	0,6	10	1019	5,3	10,6	1240
2	0,6	20	1019	5,4	10,9	1240
2	0,6	50	1019	5,4	11,2	1240
3	0,6	1	1057	11,2	28,8	1600
3	0,6	2	1030	8,2	20,6	1400
3	0,6	5	1017	5,8	11,5	1200
3	0,6	10	1019	5,3	10,9	1200
3	0,6	20	1019	5,4	11,3	1200
3	0,6	50	1019	5,5	11,6	1200
4	0,6	1	1062	11,1	28,8	1700
4	0,6	2	1064	10,6	28,2	1600
4	0,6	5	1017	6,3	12,9	1180
4	0,6	10	1019	5,4	11,2	1180
4	0,6	20	1019	5,4	11,5	1180
4	0,6	50	1019	5,5	11,9	1180
5	0,6	1	1076	10,2	26,4	1700
5	0,6	2	1057	10,1	27	1600
5	0,6	5	1031	6,7	15,5	1180
5	0,6	10	1018	5,4	11,4	1170
5	0,6	20	1018	5,5	11,6	1170
5	0,6	50	1019	5,5	12	1170
6	0,6	1	1058	10,9	28,8	1700
6	0,6	2	1056	10	26,9	1600
6	0,6	5	1023	6,7	16,3	1220
6	0,6	10	1016	5,5	11,8	1160
6	0,6	20	1019	5,5	11,7	1150
6	0,6	50	1019	5,6	12	1150

Таблица 23 - ПКЭ сети и активного фильтра при разных  $K_I$  и  $C$ ,  $L = 0,8$  мГн.

$K$	$L_p$	$C_{афз}$ , мФ	$I_n$ , А	$K_u$ , %	$K_I$ , %	$U_c$ , В
АФГ выключен			1050	9,5	29	
1	0,8	1	1005	8,2	21	1600
1	0,8	2	1020	6,1	12,2	1380
1	0,8	5	1020	5,4	11,5	1410
1	0,8	10	1019	5,5	11,7	1410
1	0,8	20	1019	5,5	11,9	1410
1	0,8	50	1020	5,6	11,9	1410
2	0,8	1	1038	8,3	21,3	1600
2	0,8	2	1020	7,2	17,7	1370
2	0,8	5	1019	5,8	12,9	1300
2	0,8	10	1019	5,9	13,1	1300
2	0,8	20	1019	5,9	13,5	1300
2	0,8	50	1019	5,9	13,9	1300
3	0,8	1	1061	10,5	28,5	1700
3	0,8	2	1016	7,7	20,2	1300
3	0,8	5	1019	6,1	13,7	1250
3	0,8	10	1019	6,1	13,8	1250
3	0,8	20	1019	6,1	14	1250
3	0,8	50	1019	6,1	14,1	1250
4	0,8	1	1062	10	28,1	1700

4	0,8	2	1041	8,3	22,3	1300
4	0,8	5	1020	6,3	14,8	1230
4	0,8	10	1019	6,2	14,2	1220
4	0,8	20	2019	6,2	14,5	1220
4	0,8	50	1019	6,2	14,6	1220
5	0,8	1	1062	9,9	27,7	1700
5	0,8	2	1063	10,4	28,8	1500
5	0,8	5	1021	6,6	15,6	1220
5	0,8	10	1018	6,2	14,5	1200
5	0,8	20	1019	6,2	14,7	1200
5	0,8	50	1019	6,2	14,9	1200
6	0,8	1	1062	10,1	28,8	1700
6	0,8	2	1084	10,1	28,3	1500
6	0,8	5	1020	6,8	16,7	1220
6	0,8	10	1019	6,3	14,7	1190
6	0,8	20	1019	6,3	14,9	1190
6	0,8	50	10206	6,3	15,1	1190

Таблица 24 - Параметры качества электроэнергии при разных  $K_I$ 

$K_I$	$L_{ДФГ}$	$C_{афг}$ , мФ	$I_n$ , А	$K_u$ , %	$K_I$ , %	$U_c$ , В
ДФГ выключен			1050	9,5	29	
1	0,5	4	1021	5,1	7,9	1240
2	0,5	8	1020	4,9	8,8	1200
3	0,5	12	1020	5	9,4	1170
4	0,5	16	1020	5	9,7	1160
5	0,5	20	1019	5	9,8	1150
6	0,5	24	1019	5,1	10	1140

Таблица 25 - Параметры качества электроэнергии при разных  $K_I$ 

$K_I$	$L_{ДФГ}$	$C_{афг}$ , мФ	$I_n$ , А	$K_u$ , %	$K_I$ , %	$U_c$ , В
ДФГ выключен			780	7,8	31,9	
1	0,7	3	760	4,4	9,2	1270
2	0,7	6	760	4,1	10,5	1220
3	0,7	9	759	4,2	11,1	1190
4	0,7	12	759	4,3	11,6	1170
5	0,7	15	759	4,3	11,8	1160
6	0,7	18	759	4,3	12	1150

Таблица 26 - Параметры качества электроэнергии при разных  $K_I$ 

$K_I$	$L_{ДФГ}$	$C_{афг}$ , мФ	$I_n$ , А	$K_u$ , %	$K_I$ , %	$U_c$ , В
ДФГ выключен			516	5,8	35,9	
1	1	2	504	3,2	10,3	1280
2	1	4	504	3,2	12	1230
3	1	6	504	3,1	12,9	1200
4	1	8	503	3,2	13,5	1180
5	1	10	503	3,2	13,8	1170
6	1	12	503	3,3	14,1	1160

Таблица 27 - Параметры качества электроэнергии при разных  $K_I$ 

$K_I$	$L_{АФГ}$	$C_{афг}$ , мФ	$I_n$ , А	$K_u$ , %	$K_I$ , %	$U_c$ , В
АФГ выключен			256	3,4	42,9	
1	2	1	251	1,9	12,9	1320
2	2	2	251	1,9	15,6	1260
3	2	3	250	1,9	17	1220
4	2	4	250	1,9	17,9	1200
5	2	5	250	2	18,4	1180
6	2	6	250	2	18,9	1170

Таблица 28 - ПКЭ, сети и активного фильтра при разных опорных напряжениях.  $K_I = 0,1$ .

$U_{он}$ , В	$I_n$ , А	$K_u$ , %	$K_I$ , %	$U_c$ , В
-	1050	9,5	29	-
700	1021	6	10,7	1620
800	1021	6,1	10,6	1660
900	1021	6,2	10,5	1700
1000	1022	6,3	10,5	1740
1100	1023	6,4	10,6	1790
1200	1024	6,5	10,7	1800
1300	1023	6,5	10,8	1820

Таблица 29 - ПКЭ сети и активного фильтра при разных опорных напряжениях.  $K_I = 0,8$ .

$U_{он}$ , В	$I_n$ , А	$K_u$ , %	$K_I$ , %	$U_c$ , В
-	1050	9,5	29	-
700	1019	6,3	15	1110
800	1019	6	13,6	1180
900	1019	5,7	12,4	1260
1000	1019	5,4	13,4	1340
1100	1019	5,4	10,4	1410
1200	1021	5,5	9,7	1470
1300	1021	5,7	9,7	1530

Таблица 30 - ПКЭ сети и активного фильтра при разных опорных напряжениях.  $K_I = 3,3$ .

$U_{он}$ , В	$I_n$ , А	$K_u$ , %	$K_I$ , %	$U_c$ , В
-	1050	9,5	29	-
700	1019	6,6	17,1	830
800	1019	6,1	14,7	910
900	1018	5,7	12,8	990
1000	1018	5,3	11,4	1080
1100	1019	5,1	10	1160
1200	1021	5	8,6	1250
1300	1022	5,1	7,3	1340

Таблица 31 - ПКЭ сети и активного фильтра при разных опорных напряжениях.  $K_I = 10$ .

$U_{он}$ , В	$I_n$ , А	$K_u$ , %	$K_I$ , %	$U_c$ , В
-	1050	9,5	29	-
700	1022	7,5	11,7	740
800	1018	6,2	11,9	820
900	1020	6	9,1	920
1000	1022	6,1	6,4	1010
1100	1025	6,2	4,5	1100
1200	1029	6,8	4,1	1200

Таблица 32 - Параметры качества электроэнергии, сети и активного фильтра при разных индуктивностях ЧРЭП на кВА и  $C_{АФГ}$ ,  $L_{АФГ} = 0,5$ ,  $K_I = 4$ .

$C_{афг}$ , мФ	АФГ ВЫКЛ				АФГ ВКЛ			
	$L_{ЧРЭП}$ , мкФ/кВА	$I_n$ , А	$K_u$ , %	$K_I$ , %	$I_n$ , А	$K_u$ , %	$K_I$ , %	$U_c$ , В
1	0	1043	10,8	32,9	1057	13,3	32,4	2000
1	0,006	1043	10,7	32,8	1054	12	32,5	2000
1	0,012	1044	10,7	32,7	1046	10,5	27,4	1900
1	0,03	1044	10,6	32,4	1056	13,1	32,1	1900
1	0,06	1045	10,5	32	983	13,6	35,7	1900
1	0,12	1046	10,2	31,1	1057	11,8	30,9	1900
1	0,3	1051	9,6	29	1062	9,7	23,1	1600
1	0,6	1062	8,7	26,2	1062	9,8	23,4	1500
2	0	1043	10,8	32,9	1050	12,5	32,6	1800
2	0,006	1043	10,7	32,8	1057	12	32,5	1700
2	0,012	1044	10,7	32,7	1049	12,4	32,5	1700
2	0,03	1044	10,6	32,4	1026	9,5	24,2	1600
2	0,06	1045	10,5	32	1055	11,9	32,7	1600
2	0,12	1046	10,2	31,1	1027	9	22,1	1600
2	0,3	1051	9,6	29	1042	9,5	23	1500
2	0,6	1062	8,7	26,2	1049	8,9	20,2	1300
5	0	1043	10,8	32,9	1037	10,7	28,4	1400
5	0,006	1043	10,7	32,8	1039	10,8	28,4	1400
5	0,012	1044	10,7	32,7	1037	10,7	28,4	1400
5	0,03	1044	10,6	32,4	1038	10,6	27,9	1400
5	0,06	1045	10,5	32	1038	10,6	28,3	1300
5	0,12	1046	10,2	31,1	1017	9,3	24,1	1300
5	0,3	1051	9,6	29	1030	7,3	14,8	1160
5	0,6	1062	8,7	26,2	1009	5,1	7,8	1150
10	0	1043	10,8	32,9	1018	11	27,2	1180
10	0,006	1043	10,7	32,8	1035	10,9	24,7	1180
10	0,012	1044	10,7	32,7	1015	10,7	26	1180
10	0,03	1044	10,6	32,4	1020	10,1	23	1180
10	0,06	1045	10,5	32	1022	9,2	20,2	1180
10	0,12	1046	10,2	31,1	1019	8,4	17,3	1180
10	0,3	1051	9,6	29	1019	5	9,5	1160
10	0,6	1062	8,7	26,2	1020	4,3	5,6	1130
20	0	1043	10,8	32,9	1021	8,9	19,8	1180
20	0,006	1043	10,7	32,8	1021	8,6	19,1	1180
20	0,012	1044	10,7	32,7	1023	8,3	18,3	1180
20	0,03	1044	10,6	32,4	1022	7,7	17,4	1180
20	0,06	1045	10,5	32	1021	7,2	16,2	1180
20	0,12	1046	10,2	31,1	1020	6,6	14,3	1180
20	0,3	1051	9,6	29	1019	5,1	9,9	1160
20	0,6	1062	8,7	26,2	1020	4,3	5,8	1130
50	0	1043	10,8	32,9	1021	8	19,2	1200
50	0,006	1043	10,7	32,8	1022	7,9	18,9	1200
50	0,012	1044	10,7	32,6	1021	7,7	18,7	1200
50	0,03	1044	10,6	32,4	1021	7,5	18	1190
50	0,06	1045	10,5	32	1021	7,1	16,9	1190
50	0,12	1046	10,2	31,1	1020	6,3	14,9	1180

50	0,3	1051	9,6	29	1020	5,3	10,5	1160
50	0,6	1062	8,7	26,2	1021	4,6	6,2	1130

Таблица 33 - Параметры качества электроэнергии при разных  $L_{чрЭП}$ 

$L_{чрЭП}$ , мГн/кВА	АФГ ВЫКЛ				АФГ ВКЛ			
	$C_{афг}$ , мФ	$I_n$ , А	$K_u$ , %	$K_I$ , %	$I_n$ , А	$K_u$ , %	$K_I$ , %	$U_c$ , В
0	67	1043	10,8	32,9	1023	8	18,6	1180
0,006	52	1043	10,7	32,8	1024	7,9	18,2	1180
0,012	46	1044	10,7	32,7	1023	7,9	17,9	1180
0,03	38	1044	10,6	32,4	1023	7,6	16,9	1180
0,06	33	1045	10,5	32	1022	7,1	15,5	1170
0,12	27	1046	10,2	31,1	1023	6,4	12,9	1160
0,3	19	1053	9,5	28,7	1022	5,2	7,8	1140
0,6	14	1061	8,7	26,2	1022	5	4,4	1100

Таблица 34 - Параметры качества электроэнергии при разных  $L_{чрЭП}$ 

$L_{чрЭП}$ , мГн/кВА	АФГ ВЫКЛ				АФГ ВКЛ			
	$C_{афг}$ , мФ	$I_n$ , А	$K_u$ , %	$C_{афг}$	$I_n$ , А	$K_u$ , %	$C_{афг}$	$I_n$ , А
0	54	776	9,1	37,4	763	7,2	24,1	1200
0,006	42	776	9,1	37,3	763	7,1	23,6	1200
0,012	37	776	9	37,1	763	7	23,1	1200
0,03	31	777	8,9	36,7	763	6,8	21,7	1190
0,06	26	777	8,8	36	763	6,3	19,6	1190
0,12	22	778	8,4	34,8	762	5,5	16,1	1180
0,3	16	780	7,8	31,9	761	4,2	8,8	1140
0,6	11	785	6,9	28,4	761	4	4,4	1100

Таблица 35 - Параметры качества электроэнергии при разных  $L_{чрЭП}$ 

$L_{чрЭП}$ , мГн/кВА	АФГ ВЫКЛ				АФГ ВКЛ			
	$C_{афг}$ , мФ	$I_n$ , А	$K_u$ , %	$C_{афг}$	$I_n$ , А	$K_u$ , %	$C_{афг}$	$I_n$ , А
0	36	515	7,4	45,9	506	6,6	35,3	1230
0,006	28	515	7,3	45,5	506	6,4	34,5	1230
0,012	25	515	7,3	45,2	506	6,3	33,6	1220
0,03	21	515	7,1	44,3	506	6	31,1	1220
0,06	18	515	6,9	43	506	5,4	27,5	1210
0,12	15	515	6,5	40,7	506	4,5	21,5	1200
0,3	10	516	5,8	35,9	506	3	10,6	1150
0,6	7	519	5	31,1	504	2,8	4,5	1110

Таблица 36 - Параметры качества электроэнергии при разных  $L_{чрЭП}$ 

$L_{чрЭП}$ , мГн/кВА	АФГ ВЫКЛ				АФГ ВКЛ			
	$C_{афг}$ , мФ	$I_n$ , А	$K_u$ , %	$C_{афг}$	$I_n$ , А	$K_u$ , %	$C_{афг}$	$I_n$ , А
0	17	259	5,9	73,9	252	4,7	52,2	1260
0,006	14	259	5,8	72,6	251	4,6	51,1	1260
0,012	12	259	5,7	71,2	251	4,6	49,9	1260
0,03	10	258	5,4	67,3	251	4,3	47	1250
0,06	9	258	4,9	62,1	251	3,9	42,5	1250
0,12	7	257	4,3	54,6	251	3,2	34,6	1230
0,3	5	257	3,4	42,9	251	1,8	14,5	1180
0,6	4	257	2,8	34,7	251	1,4	5,1	1110

Таблица 37 - Параметры качества электроэнергии, сети и активного фильтра при разных емкостях конденсатора ЧРЭП на кВА и  $C_{АФГ}$ ,  $L_{АФГ} = 0,5$  мкГн,  $K_I = 4$ ,  $L_{ЧРЭП} = 0,3$  мГн/кВА.

$C_{афг}$ , мФ	АФГ выкл				АФГ вкл			
	$C_{ЧРЭП}$ , мкФ/кВА	$I_n$ , А	$K_u$ , %	$K_I$ , %	$I_n$ , А	$K_u$ , %	$K_I$ , %	$U_c$ , В
1	6	1034	22,1	74	1057	23,5	73,5	1600
1	12	1069	11,9	37,1	1069	13	35,9	1700
1	30	1057	9,9	30,4	1055	10,4	26,6	1700
1	60	1053	9,7	29,4	1038	12,4	32,3	1700
1	120	1051	9,6	29	1062	9,7	23,1	1600
1	300	1053	9,5	28,7	1014	10,2	27,8	1500
1	600	1057	9,5	28,6	1075	9,4	22,6	1400
2	6	1034	22,1	74	1059	23,4	73,4	1500
2	12	1069	11,9	37,1	1059	12,5	34,8	1500
2	30	1057	9,9	30,4	1066	11,2	28,9	1500
2	60	1053	9,7	29,4	1034	9,3	22,9	1600
2	120	1051	9,6	29	1042	9,5	23	1500
2	300	1053	9,5	28,7	1073	12,5	28,4	1300
2	600	1057	9,5	28,6	1026	9,6	24,5	1300
5	6	1034	22,1	74	1021	7,3	13,8	1190
5	12	1069	11,9	37,1	1057	13,3	35,9	1250
5	30	1057	9,9	30,4	1072	11	30	1300
5	60	1053	9,7	29,4	1024	9	21,9	1200
5	120	1051	9,6	29	1030	7,3	14,8	1160
5	300	1053	9,5	28,7	1024	7,4	15,6	1180
5	600	1057	9,5	28,6	1042	8,2	18,1	1200
10	6	1034	22,1	74	1021	7,7	15,1	1200
10	12	1069	11,9	37,1	1033	11,6	32,2	1230
10	30	1057	9,9	30,4	1047	7,2	17,1	1190
10	60	1053	9,7	29,4	1016	7,5	16,5	1170
10	120	1051	9,6	29	1019	5	9,5	1160
10	300	1053	9,5	28,7	1018	4,8	9	1160
10	600	1057	9,5	28,6	1019	4,8	8,8	1150
20	6	1034	22,1	74	1019	7,6	15,1	1200
20	12	1069	11,9	37,1	1034	11,3	32,8	1240
20	30	1057	9,9	30,4	1023	5,9	13,7	1180
20	60	1053	9,7	29,4	1021	5,3	10,8	1160
20	120	1051	9,6	29	1019	5,1	9,9	1160
20	300	1053	9,5	28,7	1020	4,9	9,3	1160
20	600	1057	9,5	28,6	1020	4,9	9,2	1150
50	6	1034	22,1	74	1018	7,7	16,1	1200
50	12	1069	11,9	37,1	1033	11,1	32,4	1240
50	30	1057	9,9	30,4	1023	6,1	14,2	1180
50	60	1053	9,7	29,4	1021	5,4	11,5	1170
50	120	1051	9,6	29	1020	5,3	10,5	1160
50	300	1053	9,5	28,7	1020	5,1	9,9	1160
50	600	1057	9,5	28,6	1020п	5,1	9,7	1160

Таблица 38 - Параметры качества электроэнергии и компонентов трехуровневого АФГ при разных емкостях конденсаторов выходного фильтра

$C_{\phi}$ , мкФ	$I_n$ , А		$I_{\phi}$ , А		$K_u$ , %		$K_I$ , %		$U_c$ , В	
	74 %	18 %	74 %	18 %	74 %	18 %	74 %	18 %	74 %	18 %
-	1050	256	-	-	9,5	3,4	29	42,8	-	-
1	1026	252	1,3	0,5	6,7	2,1	5,8	5,2	1410	1760
2	1025	252	1,7	0,7	6,6	2,1	5,7	5,3	1410	1760
5	1025	252	2,1	0,8	6,4	2	5,7	5,3	1410	1760
10	1025	252	2,4	1,1	6,3	1,9	5,6	5,3	1410	1760
25	1025	252	3,2	2,1	6,2	1,8	5,7	5,3	1410	1760
50	1026	252	4,6	3,9	6,1	1,8	5,8	5,5	1410	1750
75	1026	252	6,2	5,7	6,1	1,8	5,8	5,7	1400	1730
100	1026	253	7,8	7,5	6,1	1,8	5,9	6	1400	1710

Таблица 39 - Параметры качества электроэнергии и компонентов трехуровневого АФГ при разных активных сопротивлениях выходного фильтра

$C_{\phi}$ , мкФ	$I_n$ , А		$I_{\phi}$ , А		$K_u$ , %		$K_I$ , %		$U_c$ , В	
	74 %	18 %	74 %	18 %	74 %	18 %	74 %	18 %	74 %	18 %
-	1050	256	-	-	9,5	3,4	29	42,8	-	-
1	1027	253	14,5	6,5	14,5	6,2	5,8	6,2	1520	1860
2	1026	252	5,5	2,1	7,5	2,4	5,8	5,5	1430	1770
5	1025	252	2,4	1,1	6,3	1,9	5,6	5,3	1420	1770
10	1025	252	1,5	0,9	6,2	1,7	5,7	5	1420	1770
25	1026	251	1	0,8	6,6	1,7	5,7	4,9	1420	1770
50	1026	252	0,8	0,8	6,8	1,8	5,7	5,1	1420	1770
75	1026	252	0,8	0,7	6,9	1,9	5,7	5,2	1420	1760
100	1026	252	0,7	0,7	6,9	1,9	5,6	5,2	1420	1760

Таблица 40 - Параметры качества электроэнергии и компонентов АФГ при разных индуктивностях выходного реактора ( $\beta = 0,74$ )

$L_p$ , мГн	$I_n$ , А	$K_u$ , %	$K_I$ , %	$U_c$ , В
-	1050	9,5	29	-
0,2	1027	7,5	1,8	970
0,3	1028	6,7	2,5	1170
0,4	1027	6,6	3,8	1330
0,5	1026	6,3	5,2	1450
0,6	1026	6,5	6,9	1570
0,7	1025	6,6	8,3	1670
0,8	1025	6,8	9,5	1770
0,9	1025	7	10,6	1880
1	1024	7,2	11,5	1980

Таблица 41 - Параметры качества электроэнергии и компонентов АФГ при разных индуктивностях выходного реактора ( $\beta = 0,55$ )

$L_p$ , мГн	$I_n$ , А	$K_u$ , %	$K_I$ , %	$U_c$ , В
-	780	7,8	31,9	-
0,3	765	5,7	1,8	1070
0,6	765	5,1	4,4	1480
0,9	764	5,1	7,9	1780
1,2	765	5,5	11	2010
1,5	766	5,9	13,5	2230
1,8	765	6,1	15,4	2420

2,1	765	6,3	16,7	2650
2,4	766	6,4	17,7	2890
2,7	768	6,5	18,6	3120

Таблица 42 - Параметры качества электроэнергии и компонентов АФГ при разных индуктивностях выходного реактора ( $\beta = 0,36$ )

$L_p$ , мГн	$I_n$ , А	$K_u$ , %	$K_I$ , %	$U_c$ , В
-	516	5,8	35,9	-
0,2	507	6,4	1,3	810
0,6	507	3,7	2,2	1280
1	507	3,5	5,2	1650
1,4	508	3,6	8,8	1920
1,8	508	3,9	12,1	2130
2,2	510	4,2	14,7	2340
2,6	511	4,4	17,2	2500
3	511	4,6	19,1	2650
3,4	511	4,7	20,4	2820

Таблица 43 - Параметры качества электроэнергии и компонентов АФГ при разных индуктивностях выходного реактора ( $\beta = 0,18$ )

$L_p$ , мГн	$I_n$ , А	$K_u$ , %	$K_I$ , %	$U_c$ , В
-	256	3,4	42,8	-
0,5	251	2,9	1	920
1	251	1,8	1,4	1240
1,5	252	1,7	2,9	1520
2	253	1,8	5,7	1740
2,5	254	1,9	8,8	1910
3	255	2,1	11,9	2050
3,5	256	2,2	14,6	2180
4	257	2,3	17	2300

Таблица 44 - Параметры качества электроэнергии и компонентов АФГ при разных емкостях накопительного конденсатора АФГ ( $\beta = 0,74$ )  $L = 0,5$  мГн

$C_{afz}$ , мФ	$I_n$ , А	$K_u$ , %	$K_I$ , %	$U_c$ , В	$K_n$ , %
-	1050	9,5	29	-	-
0,5	1028	9,1	15,3	850	359
1	1025	9,1	15,7	920	250
2	1025	8,1	14,5	1100	181
5	1024	6,6	7,5	1300	54
10	1025	6,3	5,8	1400	21
20	1026	6,3	5,3	1460	10
40	1027	6,4	5,2	1490	5

Таблица 45 - Параметры качества электроэнергии и компонентов АФГ при разных емкостях накопительного конденсатора АФГ ( $\beta = 0,55$ )  $L = 0,75$  мГн

$C_{afz}$ , мФ	$I_n$ , А	$K_u$ , %	$K_I$ , %	$U_c$ , В	$K_n$ , %
-	780	7,8	31,9	-	-
0,5	763	7,4	18	930	279
1	763	7,4	19,6	1020	206
2	764	6,5	16,9	1200	102
5	763	5,1	7,6	1500	33
10	764	5	6,6	1590	13
20	765	5	6,3	1620	6

40	766	5	6,3	1630	3
----	-----	---	-----	------	---

Таблица 46 - Параметры качества электроэнергии и компонентов АФГ при разных емкостях накопительного конденсатора АФГ ( $\beta = 0,36$ )  $L = 1$  мГн

$C_{афг}, мФ$	$I_n, А$	$K_u, \%$	$K_I, \%$	$U_c, В$	$K_n, \%$
-	516	5,8	35,9	-	-
0,5	505	5,4	19,9	930	247
1	506	4,7	17,8	1100	172
2	505	3,5	8,6	1360	66
5	506	3,4	5,8	1560	19
10	506	3,4	5,2	1630	9
20	507	3,4	5,1	1660	4
40	507	3,5	5,2	1660	2

Таблица 47 - Параметры качества электроэнергии и компонентов АФГ при разных емкостях накопительного конденсатора АФГ ( $\beta = 0,18$ )  $L = 1,5$  мГн

$C_{афг}, мФ$	$I_n, А$	$K_u, \%$	$K_I, \%$	$U_c, В$	$K_n, \%$
-	256	3,4	42,8	-	-
0,5	250	2,5	17	930	190
1	251	1,7	6,4	1200	67
2	251	1,7	3,7	1400	28
5	251	1,7	2,8	1500	7
10	251	1,7	2,6	1510	3
20	252	1,7	2,8	1520	1
40	252	1,7	3	1520	0

Таблица 48 - Параметры качества электроэнергии и компонентов АФГ при разных емкостях сглаживающего конденсатора ( $\beta = 0,74$ )  $L = 0,15$  мкГн/кВА

$C_{нагр}, мФ$	АФГ выкл				АФГ вкл				
	$I_n, А$	$K_{п.нагр}, \%$	$K_u, \%$	$K_I, \%$	$I_n, А$	$K_u, \%$	$K_I, \%$	$U_c, В$	$K_{п.афг}, \%$
1	1020	91	17,7	59,6	1042	22	43,6	1820	8
2	1066	42	13,3	42,1	1033	18,1	38,8	1820	6
5	1053	15	10,6	32,6	1024	12,2	23,6	1700	7
10	1050	17	10,3	31,2	1061	13,3	36,6	1600	9
20	1047	5	10,1	30,8	1035	9,7	19,6	1600	13
50	1047	0	10	30,4	1026	8,3	11,7	1500	8
100	1050	0	10	30,3	1026	8,2	11,6	1540	8

Таблица 49 - Параметры качества электроэнергии и компонентов АФГ при разных емкостях сглаживающего конденсатора ( $\beta = 0,74$ )  $L = 0,3$  мкГн/кВА

$C_{нагр}, мФ$	АФГ выкл				АФГ вкл				
	$I_n, А$	$K_{п.нагр}, \%$	$K_u, \%$	$K_I, \%$	$I_n, А$	$K_u, \%$	$K_I, \%$	$U_c, В$	$K_{п.афг}, \%$
1	1034	20	22,1	74	1094	20,7	42,1	2000	15
2	1069	10	11,8	37,1	1039	15,9	33,9	1820	8
5	1057	4	9,9	30,4	1041	9,6	16	1730	9
10	1053	2	9,7	29,4	1063	10,9	27,2	1650	15
20	1053	1	9,6	29	1027	6,4	5,2	1480	5
50	1053	1	9,5	28,7	1025	6,1	4,6	1430	6
100	1057	0	9,5	28,6	1025	6,1	4,4	1410	6

Таблица 50 - Параметры качества электроэнергии и компонентов АФГ при разных емкостях сглаживающего конденсатора ( $\beta = 0,74$ )  $L = 0,6$  мкГн/кВА

АФГ выкл					АФГ вкл				
$C_{нагр}$ , мФ	$I_n$ , А	$K_{п.нагр}$ , %	$K_u$ , %	$K_I$ , %	$I_n$ , А	$K_u$ , %	$K_I$ , %	$U_c$ , В	$K_{п.афг}$ , %
1	1117	90	23,6	71,6	1023	7,3	5,8	1900	11
2	1075	11	10	30,7	1049	11,1	19	2000	8
5	1065	4	8,9	27	1027	5	2,1	1420	4
10	1062	2	8,8	26,5	1024	4,6	2	1320	4
20	1061	0	8,7	26,2	1023	4,6	2	1290	4
50	1065	0	8,7	26	1023	4,6	2	1280	4
100	1069	0	8,7	26	1024	4,5	2,1	1280	4

Таблица 51 - Параметры качества электроэнергии и компонентов АФГ при разных индуктивностях линии нагрузки ( $\beta = 0,74$ )  $C = 1,20$  мкФ/кВА

АФГ выкл					АФГ вкл				
$L_{нагр}$ , мкФ	$I_n$ , А	$K_{п.нагр}$ , %	$K_u$ , %	$K_I$ , %	$I_n$ , А	$K_u$ , %	$K_I$ , %	$U_c$ , В	$K_{п.афг}$ , %
0	1043	1	10,8	32,9	1039	13,4	34,4	1630	15
1	1043	1	10,7	32,8	1039	13,2	33,9	1640	15
2	1044	1	10,7	32,7	1041	13,4	34,5	1640	15
5	1044	1	10,6	32,4	1041	12,4	32,6	1650	15
10	1045	1	10,5	32	1049	12,4	30,5	1650	15
20	1046	1	10,2	31,1	1052	11,5	26	1670	15
50	1051	1	9,5	29	1027	6,4	5,2	1480	5
100	1061	0	8,7	26,2	1023	4,6	2	1290	4

Таблица 52 - ПКЭ, сети и активного фильтра при разных  $K_I$  и  $C$ ,  $L = 0,4$  мГн.

$K$	$L_p$ , мГн	$C_{афг}$ , мФ	$I_n$ , А	$K_u$ , %	$K_I$ , %	$U_c$ , В
АФГ выключен			1050	9,5	29	
1	0,4	1	1076	16,7	27,4	2400
1	0,4	2	1049	11,2	20,2	1900
1	0,4	5	1014	9,8	21,5	1500
1	0,4	10	1010	9,7	25	1200
1	0,4	20	1024	4,9	6,3	1200
1	0,4	50	1023	5,2	6,9	1200
1	0,4	100	1024	5,5	7,2	1220
2	0,4	1	1109	12,6	25,7	1900
2	0,4	2	1011	12,1	27,8	1800
2	0,4	5	1053	9,6	20,3	1500
2	0,4	10	1035	10,8	22	1300
2	0,4	20	1038	8,8	19,5	1160
2	0,4	50	1023	4,9	7,3	1160
2	0,4	100	1022	5,3	7,8	1170
3	0,4	1	1048	12,3	29,4	1800
3	0,4	2	1070	11	25,5	1600
3	0,4	5	1037	9,8	20,9	1400
3	0,4	10	1030	9,1	19,8	1300
3	0,4	20	1074	9,8	22	1200
3	0,4	50	1023	4,8	7,3	1150
3	0,4	100	1022	5,2	7,9	1150
4	0,4	1	1060	11,9	28,8	1600
4	0,4	2	1035	11,8	28,6	1500

4	0,4	5	1023	10,2	26	1400
4	0,4	10	1083	10,6	26,5	1300
4	0,4	20	1033	9,7	21,9	1300
4	0,4	50	1024	5,2	7,9	1140
4	0,4	100	1022	5,1	8	1140
5	0,4	1	1069	11,9	28,5	1600
5	0,4	2	1080	10,9	27,2	1500
5	0,4	5	1000	10,4	27,6	1400
5	0,4	10	1093	9,4	24,4	1300
5	0,4	20	1044	10,6	26,7	1300
5	0,4	50	1014	5,8	9,5	1140
5	0,4	100	1022	5	7,9	1130
6	0,4	1	1069	11,9	28,3	1600
6	0,4	2	1073	11,4	28,1	1400
6	0,4	5	1057	10	23,5	1400
6	0,4	10	1067	11,3	28,5	1500
6	0,4	20	1064	11,6	28,7	1300
6	0,4	50	1032	7	12,8	1140
6	0,4	100	1022	4,8	7,9	1130

Таблица 52 - ПКЭ сети и активного фильтра при разных  $K_I$  и  $C$ ,  $L=0,6$  мГн.

$K$	$L_p$ , мГн	$C_{аф2}$ , мФ	$I_n$ , А	$K_u$ , %	$K_I$ , %	$U_c$ , В
АФГ выключен			1050	9,5	29	
1	0,6	1	1046	11,2	25,7	2300
1	0,6	2	1019	9,3	20,1	1900
1	0,6	5	1012	8,4	19,6	1400
1	0,6	10	1020	6,3	11,2	1250
1	0,6	20	1021	5	9,3	1300
1	0,6	50	1020	4,9	9,7	1310
1	0,6	100	1021	4,9	10	1320
2	0,6	1	1078	11,3	27,3	2200
2	0,6	2	1048	9,6	23,2	1900
2	0,6	5	1039	9,1	22	1600
2	0,6	10	1015	7	14,8	1250
2	0,6	20	1020	4,9	10,2	1230
2	0,6	50	1020	5,1	10,6	1230
2	0,6	100	1020	5,1	10,9	1230
3	0,6	1	1079	10,9	27,5	1900
3	0,6	2	1063	11,6	28,7	1700
3	0,6	5	1025	8,5	23,4	1600
3	0,6	10	1016	7,2	17,5	1400
3	0,6	20	1018	6,4	13,7	1190
3	0,6	50	1020	5,2	11	1200
3	0,6	100	1019	5,2	11,3	1190
4	0,6	1	1079	10,8	27,9	1700
4	0,6	2	1057	10,5	29	1600
4	0,6	5	1067	10,9	28,7	1400
4	0,6	10	1074	11,6	28,7	1300
4	0,6	20	1018	6,2	13,1	1190
4	0,6	50	1019	5,2	11,2	1180
4	0,6	100	1020	5,3	11,5	1180

5	0,6	1	1087	10,9	28,3	1600
5	0,6	2	1075	10,3	27,4	1600
5	0,6	5	1063	10,6	28,8	1600
5	0,6	10	1109	10,7	28,8	1700
5	0,6	20	1035	6,9	16,7	1190
5	0,6	50	1019	5,2	11,4	1170
5	0,6	100	1019	5,3	11,7	1160
6	0,6	1	1072	11,4	28,8	1600
6	0,6	2	1039	10,4	29,1	1700
6	0,6	5	1062	10,6	28,8	1700
6	0,6	10	1036	8,5	22,7	1300
6	0,6	20	1021	6,4	15,6	1210
6	0,6	50	1019	5,2	11,5	1160
6	0,6	100	1019	5,3	11,8	1150

Таблица 53 - ПКЭ сети и активного фильтра при разных  $K_I$  и  $C$ ,  $L = 0,8$  мГн.

$K$	$L_p$ , мГн	$C_{афг}$ , мФ	$I_n$ , А	$K_u$ , %	$K_I$ , %	$U_c$ , В
АФГ выключен			1050	9,5	29	
1	0,8	1	1032	10,1	24,9	2600
1	0,8	2	1019	9,3	24,4	2100
1	0,8	5	1012	7,5	17,3	1450
1	0,8	10	1019	5,3	11,2	1400
1	0,8	20	1020	5,3	11,5	1410
1	0,8	50	1019	5,3	11,8	1410
1	0,8	100	1020	5,3	11,9	1410
2	0,8	1	1053	11,1	30,4	2100
2	0,8	2	1059	10,7	28,7	2100
2	0,8	5	1026	8,1	21,1	1600
2	0,8	10	1019	6,2	14	1320
2	0,8	20	1019	5,7	12,9	1300
2	0,8	50	1019	5,7	13,2	1300
2	0,8	100	1019	5,7	13,3	1300
3	0,8	1	1057	10,8	30,1	2000
3	0,8	2	1114	11,1	28,7	2000
3	0,8	5	1067	10,4	28,7	1600
3	0,8	10	1024	6,8	17,8	1350
3	0,8	20	1018	5,9	13,7	1250
3	0,8	50	1019	5,9	13,8	1250
3	0,8	100	1019	5,9	14	1250
4	0,8	1	1060	10,3	28,8	1800
4	0,8	2	1064	9,8	27,5	1700
4	0,8	5	1050	9,3	26,2	1700
4	0,8	10	1031	8	22	1400
4	0,8	20	1020	6,2	14,7	1230
4	0,8	50	1019	6	14,2	1220
4	0,8	100	1019	6	14,4	1220
5	0,8	1	1052	10,4	28,9	1800
5	0,8	2	1080	10,4	28,3	1700
5	0,8	5	1065	9,3	26,3	1600
5	0,8	10	1030	7,8	21,2	1350
5	0,8	20	1021	6,5	15,8	1220

5	0,8	50	1019	6,1	14,5	1200
5	0,8	100	1019	6,1	14,7	1200
6	0,8	1	1085	10,1	28	1700
6	0,8	2	1063	10	28,5	1700
6	0,8	5	1139	9,8	25,8	1600
6	0,8	10	1034	8,2	23	1500
6	0,8	20	1019	6,8	17,3	1230
6	0,8	50	1019	6,1	14,7	1190
6	0,8	100	1019	6,1	14,9	1180

Таблица 54 - Параметры качества электроэнергии, сети и активного фильтра при разных индуктивностях ЧРЭП на кВА и  $C_{АФГ}$ ,  $L_{АФГ} = 0,5$ ,  $K_I = 4$ .

$C_{афг}$ , мФ	АФГ выкл				АФГ вкл			
	$L_{ЧРЭП}$ , мкФ/кВА	$I_n$ , А	$K_u$ , %	$K_I$ , %	$I_n$ , А	$K_u$ , %	$K_I$ , %	$U_c$ , В
1	0	1043	10,8	32,9	1056	12,2	32,4	2200
1	0,006	1043	10,7	32,8	1061	12,9	33,5	2200
1	0,012	1044	10,7	32,7	1055	12,4	32,4	2100
1	0,03	1044	10,6	32,4	1059	12,4	32	2100
1	0,06	1045	10,5	32	1002	11,9	33,4	2100
1	0,12	1046	10,2	31,1	1059	12,1	30,8	1900
1	0,3	1051	9,6	29	1069	11,1	28	1700
1	0,6	1062	8,7	26,2	1085	11,1	25,6	1700
2	0	1043	10,8	32,9	1010	11,7	33,5	1600
2	0,006	1043	10,7	32,8	1239	13,2	35	1600
2	0,012	1044	10,7	32,7	1060	13,5	32,2	1600
2	0,03	1044	10,6	32,4	1019	11,6	32,7	1600
2	0,06	1045	10,5	32	1074	12,9	31,2	1600
2	0,12	1046	10,2	31,1	1065	10,9	29,6	1600
2	0,3	1051	9,6	29	1082	10,9	26,6	1600
2	0,6	1062	8,7	26,2	1079	10,2	23,9	1600
5	0	1043	10,8	32,9	1056	10,2	27,7	1700
5	0,006	1043	10,7	32,8	1034	10,3	27,2	1400
5	0,012	1044	10,7	32,7	1048	9,9	26,8	1400
5	0,03	1044	10,6	32,4	1057	11,6	31,9	1400
5	0,06	1045	10,5	32	1059	12,2	31,6	1400
5	0,12	1046	10,2	31,1	1067	12,9	30,8	1400
5	0,3	1051	9,6	29	1029	9,5	24,3	1400
5	0,6	1062	8,7	26,2	1004	9,7	26,4	1400
10	0	1043	10,8	32,9	1047	12,3	32,6	1500
10	0,006	1043	10,7	32,8	1057	11,8	32,3	1500
10	0,012	1044	10,7	32,7	1053	11,9	32,4	1300
10	0,03	1044	10,6	32,4	1032	12,4	33,3	1400
10	0,06	1045	10,5	32	1054	11,8	31,8	1300
10	0,12	1046	10,2	31,1	1046	10,7	28,4	1500
10	0,3	1051	9,6	29	1065	10,3	26,1	1500
10	0,6	1062	8,7	26,2	1072	7,5	18	1300
20	0	1043	10,8	32,9	1038	10,9	29,7	1400
20	0,006	1043	10,7	32,8	1040	10,9	29,5	1300
20	0,012	1044	10,7	32,7	1040	10,7	29,1	1300
20	0,03	1044	10,6	32,4	1039	10,7	29,3	1300
20	0,06	1045	10,5	32	1051	10,8	29,1	1300

20	0,12	1046	10,2	31,1	1021	9,8	24	1200
20	0,3	1051	9,6	29	1013	7,3	15,9	1160
20	0,6	1062	8,7	26,2	1016	5,3	9,7	1150
50	0	1043	10,8	32,9	1020	11	26,1	1170
50	0,006	1043	10,7	32,8	1019	10,2	25,4	1170
50	0,012	1044	10,7	32,6	1020	10,7	24,7	1170
50	0,03	1044	10,6	32,4	1024	10	22,5	1170
50	0,06	1045	10,5	32	1013	8,6	18,6	1170
50	0,12	1046	10,2	31,1	1018	7,7	15,9	1170
50	0,3	1051	9,6	29	1020	4,7	9,5	1160
50	0,6	1062	8,7	26,2	1021	4,1	5,7	1130
100	0	1043	10,8	32,9	1022	7,8	18,8	1190
100	0,006	1043	10,7	32,8	1022	7,8	18,6	1190
100	0,012	1044	10,7	32,6	1022	7,7	18,3	1190
100	0,03	1044	10,6	32,4	1021	7,5	17,6	1190
100	0,06	1045	10,5	32	1022	7,1	16,4	1180
100	0,12	1046	10,2	31,1	1021	6,4	14,4	1180
100	0,3	1051	9,6	29	1020	4,9	10	1160
100	0,6	1062	8,7	26,2	1020	4,2	5,9	1130
150	0	1043	10,8	32,9	1023	7,8	19,1	1200
150	0,006	1043	10,7	32,8	1022	7,8	18,8	1190
150	0,012	1044	10,7	32,6	1022	7,7	18,6	1190
150	0,03	1044	10,6	32,4	1022	7,4	17,8	1190
150	0,06	1045	10,5	32	1021	7	16,7	1180
150	0,12	1046	10,2	31,1	1021	6,4	14,7	1180
150	0,3	1051	9,6	29	1020	5	10,2	1160
150	0,6	1062	8,7	26,2	1021	4,2	6	1130

Таблица 55 - Параметры качества электроэнергии при разных  $L_{чрЭП}$ 

$L_{чрЭП}$ , мГн/кВА	АФГ выкл				АФГ вкл			
	$S_{афг}$ , мФ	$I_n$ , А	$K_u$ , %	$K_I$ , %	$I_n$ , А	$K_u$ , %	$K_I$ , %	$U_c$ , В
0	120	1043	10,8	32,9	1022	7,9	18,9	1190
0,006	119	1043	10,7	32,8	1022	7,8	18,7	1190
0,012	107	1044	10,7	32,7	1021	7,7	18,4	1190
0,03	91	1044	10,6	32,4	1022	7,5	17,5	1190
0,06	79	1045	10,5	32	1022	7,1	16,3	1180
0,12	67	1046	10,2	31,1	1022	6,5	14,1	1170
0,3	51	1053	9,5	28,7	1020	4,7	9,5	1160
0,6	39	1061	8,7	26,2	1020	4,1	5,6	1130

Таблица 56 - Параметры качества электроэнергии при разных  $L_{чрЭП}$ 

$L_{чрЭП}$ , мГн/кВА	АФГ выкл				АФГ вкл			
	$S_{афг}$ , мФ	$I_n$ , А	$K_u$ , %	$K_I$ , %	$I_n$ , А	$K_u$ , %	$K_I$ , %	$U_c$ , В
0	90	776	9,1	37,4	766	7,1	24,4	1210
0,006	89	776	9,1	37,3	762	7,1	24	1210
0,012	80	776	9	37,1	762	7	23,6	1210
0,03	68	777	8,9	36,7	761	6,7	22,3	1200
0,06	59	777	8,8	36	761	6,2	20,4	1200
0,12	50	778	8,4	34,8	761	5,5	17,3	1190
0,3	38	780	7,8	31,9	759	3,8	10,8	1160
0,6	29	785	6,9	28,4	760	3,1	6	1130

Таблица 57 - Параметры качества электроэнергии при разных  $L_{чрЭП}$ 

$L_{чрЭП}$ , мГн/кВА	АФГ выкл				АФГ вкл			
	$C_{афг}$ , мФ	$I_n$ , А	$K_u$ , %	$K_I$ , %	$I_n$ , А	$K_u$ , %	$K_I$ , %	$U_c$ , В
0	60	515	7,4	45,9	505	6,4	35,6	1240
0,006	59	515	7,3	45,5	505	6,3	34,9	1240
0,012	53	515	7,3	45,2	505	6,2	34,1	1240
0,03	45	515	7,1	44,3	504	5,8	31,8	1230
0,06	39	515	6,9	43	504	5,3	28,4	1220
0,12	33	515	6,5	40,7	504	4,5	23	1210
0,3	25	516	5,8	35,9	503	2,9	13	1170
0,6	19	519	5	31,1	503	2,2	6,5	1140

Таблица 58 - Параметры качества электроэнергии при разных  $L_{чрЭП}$ 

$L_{чрЭП}$ , мГн/кВА	АФГ выкл				АФГ вкл			
	$C_{афг}$ , мФ	$I_n$ , А	$K_u$ , %	$K_I$ , %	$I_n$ , А	$K_u$ , %	$K_I$ , %	$U_c$ , В
0	30	259	5,9	73,9	251	4,8	55,1	1280
0,006	30	259	5,8	72,6	251	4,7	54,2	1270
0,012	27	259	5,7	71,2	251	4,6	53,1	1270
0,03	23	258	5,4	67,3	251	4,3	50,1	1270
0,06	20	258	4,9	62,1	251	4	45,6	1260
0,12	17	257	4,3	54,6	251	3,2	36,9	1240
0,3	13	257	3,4	42,9	250	1,8	17,5	1200
0,6	10	257	2,8	34,7	250	1,2	7,4	1140

Таблица 59 - ПКЭ распределительной сети при параллельных ветвях 6 кВ, нагрузка каждой ПП 6/0,4 нелинейной нагрузкой  $\beta_{нл} = 0,74$ 

Кол-во ветвей 6 кВ	$K_u$ , %			$K_i$ , %		
	35 кВ (А)	6 кВ (Б)	0,4 кВ (В)	35 кВ (А)	6 кВ (Б)	0,4 кВ (В)
1	1,2	2,9	9,5	28,5	28,9	29
2	2,3	5	11,2	26,3	26,5	26,4
3	3,4	6,7	12,6	25	25,2	24,5

Таблица 60 - ПКЭ распределительной сети при параллельных ветвях 6 кВ, нагрузка каждой ПП 6/0,4 нелинейной нагрузкой  $\beta_{нл} = 0,55$ 

Кол-во ветвей 6 кВ	$K_u$ , %			$K_i$ , %		
	35 кВ (А)	6 кВ (Б)	0,4 кВ (В)	35 кВ (А)	6 кВ (Б)	0,4 кВ (В)
1	1	2,4	7,7	31,2	31,8	32
2	1,9	4,3	9,3	29,3	29,5	29,6
3	2,7	5,7	10,4	28,5	28,3	27,7

Таблица 61 - ПКЭ распределительной сети при параллельных ветвях 6 кВ, нагрузка каждой ПП 6/0,4 нелинейной нагрузкой  $\beta_{нл} = 0,36$ 

Кол-во ветвей 6 кВ	$K_u$ , %			$K_i$ , %		
	35 кВ (А)	6 кВ (Б)	0,4 кВ (В)	35 кВ (А)	6 кВ (Б)	0,4 кВ (В)
1	0,8	1,8	5,7	34,6	35,6	35,9
2	1,5	3,3	7	32,8	33,3	33,7
3	1,7	4,3	8	31,3	31,7	31,5

Таблица 62 - ПКЭ распределительной сети при параллельных ветвях 6 кВ, нагрузка каждой ПП 6/0,4 нелинейной нагрузкой  $\beta_{нл} = 0,18$

Кол-во ветвей 6 кВ	$Ku, \%$			$Ki, \%$		
	35 кВ (А)	6 кВ (Б)	0,4 кВ (В)	35 кВ (А)	6 кВ (Б)	0,4 кВ (В)
1	0,5	1	3,4	39,6	42,1	42,8
2	0,9	2	4,1	38,1	39,2	40,5
3	1,3	2,7	4,8	37,4	38,2	38,6

Таблица 63 - ПКЭ на шинах 0,4 кВ в точках В и Г, нагрузка каждой Пс  $\beta_{нл} = 0,74$

Подстанции			$I_n, A$		$Ku, \%$		$Ki, \%$	
Пс 1	Пс 2	Пс 3	В	Г	В	Г	В	Г
АФГ -	АФГ -	АФГ -	1079	1079	13	13	23,9	23,9
АФГ +	АФГ -	АФГ -	1042	1078	8,6	11,9	7,9	25,2
АФГ +	АФГ +	АФГ -	1036	1073	7,4	10,7	7,9	27,1
АФГ +	АФГ +	АФГ +	1037	1029	7,2	6,7	8,4	8,3

Таблица 64 - ПКЭ в точках А и Б, нагрузка каждой Пс  $\beta_{нл} = 0,74$

Подстанции			$I_n, A$		$Ku, \%$		$Ki, \%$	
Пс 1	Пс 2	Пс 3	А	Б	А	Б	А	Б
АФГ -	АФГ -	АФГ -	35	216	3,9	7,5	23,8	23,9
АФГ +	АФГ -	АФГ -	35	212	3	6,1	19,3	19,4
АФГ +	АФГ +	АФГ -	34	209	2,2	4,5	13,9	14
АФГ +	АФГ +	АФГ +	34	206	1,6	3,4	8,3	8,3

Таблица 65 - ПКЭ на шинах 0,4 кВ в точках В и Г, нагрузка каждой Пс  $\beta_{нл} = 0,55$

Подстанции			$I_n, A$		$Ku, \%$		$Ki, \%$	
Пс 1	Пс 2	Пс 3	В	Г	В	Г	В	Г
АФГ -	АФГ -	АФГ -	792	792	10,9	10,9	27,3	27,3
АФГ +	АФГ -	АФГ -	771	797	7,4	10	10,5	28,5
АФГ +	АФГ +	АФГ -	768	793	6,7	9,1	10,6	29,8
АФГ +	АФГ +	АФГ +	764	764	6,4	6,4	10,9	11

Таблица 66 - ПКЭ в точках А и Б, нагрузка каждой Пс  $\beta_{нл} = 0,55$

Подстанции			$I_n, A$		$Ku, \%$		$Ki, \%$	
Пс 1	Пс 2	Пс 3	А	Б	А	Б	А	Б
АФГ -	АФГ -	АФГ -	26	159	3	6,3	27	27,2
АФГ +	АФГ -	АФГ -	26	157	2,4	5,2	22,2	22,4
АФГ +	АФГ +	АФГ -	25	155	1,9	4,3	16,7	16,8
АФГ +	АФГ +	АФГ +	25	153	1,4	3,4	10,9	11

Таблица 67 - ПКЭ на шинах 0,4 кВ в точках В и Г, нагрузка каждой Пс  $\beta_{нл} = 0,36$

Подстанции			$I_n, A$		$Ku, \%$		$Ki, \%$	
Пс 1	Пс 2	Пс 3	В	Г	В	Г	В	Г
АФГ -	АФГ -	АФГ -	521	521	8,3	8,3	31,9	31,9
АФГ +	АФГ -	АФГ -	508	522	5,4	7,5	10,2	32,9
АФГ +	АФГ +	АФГ -	507	520	4,7	6,6	10,5	34,1
АФГ +	АФГ +	АФГ +	507	507	4,4	4,5	11,4	11,5

Таблица 68 - ПКЭ в точках А и Б, нагрузка каждой Пс  $\beta_{нл} = 0,36$ 

Подстанции			$I_n, A$		$Ku, \%$		$Ki, \%$	
Пс 1	Пс 2	Пс 3	А	Б	А	Б	А	Б
АФГ -	АФГ -	АФГ -	17	105	2,3	4,9	31,4	31,7
АФГ +	АФГ -	АФГ -	17	104	1,8	3,9	25	25,2
АФГ +	АФГ +	АФГ -	17	102	1,3	3	18	18,1
АФГ +	АФГ +	АФГ +	17	103	1,1	2,6	15,7	15,8

Таблица 69 - ПКЭ на шинах 0,4 кВ в точках В и Г, нагрузка каждой Пс  $\beta_{нл} = 0,18$ 

Подстанции			$I_n, A$		$Ku, \%$		$Ki, \%$	
Пс 1	Пс 2	Пс 3	В	Г	В	Г	В	Г
АФГ -	АФГ -	АФГ -	257	257	4,9	4,9	38,9	38,9
АФГ +	АФГ -	АФГ -	252	257	3,3	4,4	14,3	39,4
АФГ +	АФГ +	АФГ -	251	256	2,8	3,9	15	40,6
АФГ +	АФГ +	АФГ +	251	251	2,7	2,8	15,8	15,9

Таблица 70 - ПКЭ в точках А и Б, нагрузка каждой Пс  $\beta_{нл} = 0,18$ 

Подстанции			$I_n, A$		$Ku, \%$		$Ki, \%$	
Пс 1	Пс 2	Пс 3	А	Б	А	Б	А	Б
АФГ -	АФГ -	АФГ -	9	52	1,4	2,9	37	38
АФГ +	АФГ -	АФГ -	8	51	1,1	2,3	30,2	30,8
АФГ +	АФГ +	АФГ -	8	51	0,8	1,7	22,9	23,3
АФГ +	АФГ +	АФГ +	8	51	0,5	1,6	15,6	15,8

Таблица 71 - ПКЭ на шинах 0,4 кВ в точках В и Г, нагрузка каждой Пс  $\beta_{нл} = 0,74$ 

Подстанции			$I_n, A$		$Ku, \%$		$Ki, \%$	
Пс 1	Пс 2	Пс 3	В	Г	В	Г	В	Г
АФГ -	АФГ -	АФГ -	1083	1083	13	13	23,9	23,8
АФГ +	АФГ -	АФГ -	1046	1079	7,6	11,6	1,9	26,1
АФГ +	АФГ +	АФГ -	1040	1074	7,6	10	3	28,6
АФГ +	АФГ +	АФГ +	1032	1034	9,6	9,8	5,5	5,8

Таблица 72 - ПКЭ в точках А и Б, нагрузка каждой Пс  $\beta_{нл} = 0,74$ 

Подстанции			$I_n, A$		$Ku, \%$		$Ki, \%$	
Пс 1	Пс 2	Пс 3	А	Б	А	Б	А	Б
АФГ -	АФГ -	АФГ -	35	217	4	7,5	23,7	23,8
АФГ +	АФГ -	АФГ -	35	213	2,3	5,6	17,7	17,7
АФГ +	АФГ +	АФГ -	34	209	1,2	4,6	10,4	10,4
АФГ +	АФГ +	АФГ +	34	208	1,6	5,8	5,8	5,8

## ПРИЛОЖЕНИЕ 2

## Приложение 2.1

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



## СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2025611698

**Программа для оценки эффективности активного  
фильтра гармоник с регулятором напряжения в  
распределительной сети с нелинейными потребителями**

Правообладатель: *Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Национальный исследовательский технологический  
университет «МИСИС» (RU)*

Авторы: *Шевырёв Юрий Вадимович (RU), Крещановский  
Павел Сергеевич (RU)*

Заявка № 2024692168

Дата поступления 19 декабря 2024 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 22 января 2025 г.



Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности

Ю.С. Зубов

## Приложение 2.2

«Утверждаю»

Генеральный директор  
ООО «Электротехническая промышленная компания»,  
действительный член Академии электротехнических наук



  
Б. И. Абрамов

23 мая 2025 г.

### АКТ

внедрения результатов диссертационной работы  
Крещановского Павла Сергеевича на тему  
«Повышение качества электроэнергии в нефтепромысловых сетях с  
частотно-регулируемыми электроприводами»,  
представленной на соискание учёной степени кандидата технических наук по  
специальности 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы

В научно-технических разработках ООО "Электротехническая промышленная компания" при решении задачи повышения качества электроэнергии в распределительных электрических сетях с частотно-регулируемыми электроприводами внедрены и используются следующие результаты диссертационной работы Крещановского П.С.

1. Методика выбора параметров двухуровневого активного фильтра гармоник.
2. Методика выбора параметров трехуровневого активного фильтра гармоник.
3. Имитационные модели для исследования влияния активного фильтра гармоник на суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения при комплексном учете параметров в распределительных электрических сетях.

При помощи предложенных программных средств и методик на стадии опытно-конструкторских работ осуществляется выбор параметров активных фильтров гармоник в распределительных электрических сетях с частотно-регулируемым электроприводом, обеспечивающих повышение качества электроэнергии, что позволяет исключить аварийные ситуации, связанные с преждевременным выходом электрооборудования из строя, и тем самым избежать материального ущерба, риска для жизни и здоровья людей.

Зам. Генерального директора  
по развитию бизнеса, кандидат техн. наук



Иванов А.Г.