

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Санкт-Петербургский горный университет»

На правах рукописи

Сериков Владимир Александрович



ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ АКТИВНЫМИ
ФИЛЬТРОКОМПЕНСИРУЮЩИМИ УСТРОЙСТВАМИ В ПРОМЫШЛЕННЫХ
ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСАХ С НЕЛИНЕЙНОЙ НАГРУЗКОЙ И
КОНДЕНСАТОРНЫМИ УСТАНОВКАМИ ПРИ РЕЗОНАНСНЫХ РЕЖИМАХ

Специальность 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, доцент
Сычев Ю.А.
доктор технических наук, профессор
Абрамович Б.Н.

Санкт-Петербург – 2023

ОГЛАВЛЕНИЕ

| | |
|--|----|
| ВВЕДЕНИЕ | 4 |
| ГЛАВА 1 ПРОБЛЕМЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСАХ ПРОМЫШЛЕННЫХ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ | 13 |
| 1.1. Влияние высших гармоник на показатели качества электроэнергии..... | 13 |
| 1.2. Источники высших гармоник в системах электроснабжения..... | 24 |
| 1.3. Влияние высших гармоник на режимы работы устройств системы электроснабжения | 29 |
| 1.4. Выводы к главе 1..... | 33 |
| ГЛАВА 2 МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕСИНУСОИДАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ В ТИПОВОЙ ПРОМЫШЛЕННОЙ СИСТЕМЕ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ С НЕЛИНЕЙНОЙ НАГРУЗКОЙ И КОНДЕНСАТОРНЫМИ УСТАНОВКАМИ | 35 |
| 2.1. Анализ влияния высших гармоник на конденсаторные установки..... | 35 |
| 2.2. Резонансные режимы работы системы электроснабжения с конденсаторными установками и нелинейной нагрузкой | 44 |
| 2.3. Оценка влияния резонансного режима работы системы электроснабжения на уровень качества напряжения сети | 51 |
| 2.4. Имитационное моделирование режимов системы электроснабжения трансформатора 10/0,4 кВ по однофазной схеме замещения..... | 54 |
| 2.5. Физическое моделирование резонансных режимов работы системы электроснабжения с нелинейной нагрузкой и конденсаторной установкой | 57 |
| 2.6. Резонансные режимы работы типовых промышленных систем электроснабжения на примере обогатительных фабрик и хвостовых хозяйств с нелинейной нагрузкой и конденсаторными установками | 62 |
| 2.7. Выводы к главе 2..... | 68 |
| ГЛАВА 3 АНАЛИЗ ОСНОВНЫХ ТИПОВ ФИЛЬТРОКОМПЕНСИРУЮЩИХ УСТРОЙСТВ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ | 70 |

| | |
|---|------------|
| 3.1. Классификация фильтрокомпенсирующих устройств..... | 70 |
| 3.2. Пассивные фильтрокомпенсирующие устройства | 78 |
| 3.3. Активные фильтрокомпенсирующие устройства..... | 85 |
| 3.4. Гибридные фильтрокомпенсирующие устройства..... | 94 |
| 3.5. Специализированные устройства на основе активных преобразователей .. | 97 |
| 3.7. Выводы по 3 главе..... | 103 |
| ГЛАВА 4 ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ С НЕЛИНЕЙНОЙ НАГРУЗКОЙ И КОНДЕНСАТОРНЫМИ УСТАНОВКАМИ | 104 |
| 4.1. Цели и задачи имитационного моделирования..... | 104 |
| 4.2. Имитационная модель типовой промышленной системы электроснабжения с линейной и нелинейной нагрузками, конденсаторными установками и фильтрокомпенсирующими устройствами..... | 105 |
| 4.3. Имитационная модель типовой промышленной системы электроснабжения с линейной и нелинейной нагрузками, конденсаторными установками и активным фильтром с выходным пассивным активно-емкостным фильтром..... | 117 |
| 4.4. Разработка алгоритма выбора параметров активно-емкостного фильтра на выходе параллельного активного фильтра | 136 |
| 4.5. Техничко-экономическая оценка применения активно-емкостного фильтра на выходе параллельного активного фильтра | 139 |
| 4.6. Выводы по 4 главе | 141 |
| ЗАКЛЮЧЕНИЕ | 143 |
| СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ..... | 146 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ А Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ..... | 169 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ Б Акты о внедрении результатов диссертации..... | 170 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ В Учебно-методические пособия | 174 |

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования

Нелинейная нагрузка является неотъемлемым элементом современных промышленных систем электроснабжения, а также основным источником высших гармоник, которые приводят к несоответствию уровня качества электрической энергии нормам отечественного и международных стандартов. Данная особенность характерна практически для всех отраслей промышленности, включая горную и нефтегазовую, где присутствуют системы регулируемого электропривода технологических установок и комплексов [12, 60, 66, 79, 83, 91].

Высшие гармоники тока и напряжения несут в себе ряд негативных последствий для элементов систем электроснабжения, включая дополнительные потери в воздушных и кабельных линиях, силовых трансформаторах, сокращение срока службы электрооборудования, некорректную работу релейной защиты, дополнительную вибрацию в электромеханических системах [67, 74].

Для повышения качества электроэнергии успешно применяется ряд технических средств, включая пассивные, активные, гибридные фильтры, антирезонансные дроссели, а также схемные решения по изменению конфигурации систем электроснабжения и силовой части нелинейной нагрузки. Однако, теория и практика применения указанных средств и решений не в полной мере учитывает наличие резонансных явлений, обусловленных конденсаторными установками компенсации реактивной мощности и питающими трансформаторами за счет присутствия нелинейной нагрузки. Типовые системы электроснабжений промышленных предприятий, в частности обогатительных фабрик, содержат конденсаторные установки, подключенные к шинам 6(10) кВ комплексных распределительных устройств, и нелинейной нагрузки частотно-регулируемых электроприводов, сосредоточенную на стороне 0,4 кВ, где также могут быть установлены различные фильтрокомпенсирующие устройства, включая активные фильтры. При возникновении резонансных явлений в указанных условиях конденсаторные установки подвергаются недопустимой перегрузке, а активные фильтры могут работать некорректно, что указывается и

обосновывается в ряде отечественных и зарубежных научных трудов. Эти устройства, работая одновременно и реализуя свои функции, оказывают взаимное влияние друг на друга, характер которого должен учитываться при повышении качества электроэнергии в промышленных системах электроснабжения, а также при выборе структуры и основных параметров конденсаторных установок компенсации реактивной мощности и активных фильтров.

Актуальность задачи повышения качества электроэнергии в промышленных системах электроснабжения различными методами и средствами обоснована в многочисленных научных трудах отечественных и зарубежных ученых, включая Б.Н. Абрамовича, Дж. Арриллага, Дж. Бредли, И.В. Жежеленко, Ю.Г. Шакаряна, Ю.К. Розанова, С.И. Гамазина, А.Е. Козярука, А.В. Ляхомского, Л.А. Плащанского, Д.С. Осипова, Ю.А. Сычева, В.П. Довгуна, Б.Ф. Дмитриева, М.В. Пронина, В.И. Зацепиной, Р.Т. Шрейнера, Ю.В. Шевырева, А.А. Ефимова, С.Г. Германа-Галкина, М.С. Ершова, А.И. Чивенкова, А.Н. Шпигановича, О.В. Носа, В.Н. Костина, Я.Э. Шклярского, Е.Н. Сосниной.

Степень проработанности исследуемого направления

Причины возникновения высших гармоник, их влияние на качество напряжения сети, срок службы электрооборудования, а также теоретические основы анализа сложных несинусоидальных режимов изложены в работах Б.Н. Абрамовича, Дж. Арриллага, И.В. Жежеленко, Ю.С. Железко, К.С. Демирчяна, В.Е. Тонкаля, В.П. Ильяшова, А.К. Шидловского и др.

Проблемы обеспечения качества электроэнергии в промышленных системах электроснабжения описаны в работах Б.Н. Абрамовича, Ю.В. Шевырева, Д.С. Осипова, Ю.К. Розанова, С.И. Гамазина, Ю.А. Сычева, Г.Г. Налбандян, В.К. Лозенко, О.А. Суржиковой и др.

Способы компенсации высших гармоник тока и напряжения в промышленных системах электроснабжения методами схемных решений по построению электрических сетей, а также применению специальных устройств приведены и обоснованы в работах Б.Н. Абрамовича, Ю.Г. Шакаряна,

Ю.К. Розанова, С.И. Гамазина, Ю.А. Сычева, И.В. Жежеленко, Д.Э. Егорова, С.Г. Германа-Галкина, М.В. Пронина, В.И. Зацепиной, Р.Т. Шрейнера и др.

В приведенных работах также показана актуальность проблемы обеспечения качества электроэнергии в промышленных системах электроснабжения путем компенсации высших гармоник тока и напряжения с помощью комплексного внедрения фильтрокомпенсирующих устройств различного типа и конфигурации. Однако необходимо оценить эффективность работы таких устройств, с учетом особенностей, режимов работы и параметров типового промышленного электротехнического комплекса, наличия резонансных явлений в нем, выбрать и обосновать его структуру и параметры по ряду показателей, отражающих уровень эффективности повышения качества электроэнергии, что и определяет цель и задачи диссертационного исследования.

Объект исследования – электротехнический комплекс промышленных систем электроснабжения с нелинейной нагрузкой, конденсаторными установками компенсации реактивной мощности и активными фильтрами.

Предмет исследования – параметры, характеристики и закономерности формирования несинусоидальных режимов в электротехнических комплексах промышленных систем электроснабжения с нелинейной нагрузкой, конденсаторными установками и активными фильтрами.

Цель работы - Повышение качества электроэнергии в промышленных системах электроснабжения с нелинейной нагрузкой и конденсаторными установками компенсации реактивной мощности при наличии резонансных режимов.

Идея работы

Компенсацию высших гармоник тока и напряжения в промышленных системах электроснабжения с нелинейной нагрузкой и конденсаторными установками при резонансных режимах необходимо осуществлять параллельным активным фильтром, на выходе которого устанавливается пассивный фильтр, параметры которого выбираются для смещения резонансной частоты в область

между основной составляющей и минимальным порядком канонической гармониками.

Задачи исследования

1. Анализ основных источников высших гармоник в условиях промышленных систем электроснабжения, их влияния на уровень качества электрической энергии и потери в электрооборудовании и элементах сети, а также отечественной и международной нормативной базы в области качества электроэнергии.

2. Моделирование и анализ несинусоидальных режимов в промышленных системах электроснабжения различной структуры с линейной и нелинейной нагрузками, конденсаторными установками в условиях возникновения и протекания резонансных явлений с целью оценки их влияния на показатели качества электрической энергии в части несинусоидальности напряжения, амплитуд высших гармоник тока, а также степень токовой перегрузки конденсаторов.

3. Анализ параметров, характеристик, методов управления, области применения, достоинств и недостатков фильтрокомпенсирующих устройств различного типа и структуры, а также специализированных устройств на основе активных преобразователей.

4. Имитационное моделирование режимов работы фильтрокомпенсирующих устройств различного типа с оценкой эффективности их работы в промышленной системе электроснабжения с линейной и нелинейной нагрузками, конденсаторными установками при резонансных явлениях для выбора наиболее рационального технического решения для повышения качества электрической энергии при указанных условиях.

5. Разработка алгоритма выбора основных параметров пассивного фильтра, устанавливаемого на выходе параллельного активного фильтра, с целью повышения эффективности компенсации высших гармоник для условий несинусоидальных режимов промышленных системах электроснабжения с линейной и нелинейной нагрузками, конденсаторными установками с учетом

резонансных явлений в соответствии с выявленными зависимостями и закономерностями.

Научная новизна

Выявленные в работе зависимости и закономерности, связанные с вариацией амплитуд высших гармоник тока нелинейной нагрузки, уровня искажения напряжения при изменении мощности конденсаторных установок и коэффициента их перегрузки высшими гармониками тока при резонансе, а также обоснованные на их базе ограничения и допущения являются теоретической основой моделирования и анализа сложных несинусоидальных режимов для надлежащего выбора технического средства или решения с целью повышения качества электрической энергии в промышленных систем электроснабжения.

Получены закономерности, отражающие влияние параметров активно-емкостного пассивного фильтра, установленного на выходе активного фильтра, на степень эффективности компенсации высших гармоник тока и напряжения в условиях резонанса в системах электроснабжения с нелинейной, линейной нагрузками и конденсаторными установками компенсации реактивной мощности.

Установлено свойство пассивного активно-емкостного фильтра, установленного на выходе параллельного активного фильтра, сдвигать резонансные частоты в область между основной составляющей и минимальным порядком канонической гармоники, создаваемой нелинейной нагрузкой, что позволяет обеспечить надлежащий уровень качества электрической энергии при наличии конденсаторной установки компенсации реактивной мощности в резонансных режимах.

Теоретическая и практическая значимость

Выявленные закономерности, ограничения и допущения являются теоретической основой анализа и моделирования сложных несинусоидальных режимов в промышленных систем электроснабжения с нелинейной и линейной нагрузками и конденсаторными установками.

Разработана программа для ЭВМ (приложение А), которая по заданным значениям линейной нагрузки, $\cos \varphi$ и диапазону изменения частоты сети

позволяет построить график амплитудно-частотной характеристики системы, определяющий резонансную частоту между сетью и конденсаторной установкой.

Разработан алгоритм выбора параметров активно-емкостного фильтра на выходе параллельного активного фильтра при резонансных режимах в промышленных системах электроснабжения с нелинейной нагрузкой и конденсаторными установками, который в качестве технических предложений и рекомендаций может быть принят к внедрению для реализации методик расчета и моделирования несинусоидальных режимов работы систем электроснабжения.

Для учебного процесса - при изложении вопросов повышения качества электрической энергии в циклах дисциплин «Актуальные аспекты электроснабжения», «Математическое моделирование электротехнических систем», «Современные проблемы электротехнических наук».

Акт внедрения результатов диссертации в ООО «ЭИС» утвержден генеральным директором ООО «ЭИС» Лозовским С.Е. 17 апреля 2023 г. Акт внедрения результатов диссертации в ООО «ГЦЭ-энерго» утвержден генеральным директором ООО «ГЦЭ-энерго» Павлюченко И.Ю. 21 апреля 2023 г. (приложение Б).

Методология и методы исследований

Исследования основывались на результатах анализа теоретических и экспериментальных данных в области качества электрической энергии и электромагнитной совместимости электрооборудования для условий промышленных СЭС. Экспериментальные исследования выполнялись с использованием имитационного моделирования электротехнических комплексов в средах *Multisim* и *Simulink*, а также с использованием результатов, полученных на физической модели в лабораторных условиях. Теоретические исследования осуществлялись с применением методов фазовых преобразований, анализа несинусоидальных режимов, теории преобразовательной техники, математического моделирования и анализа электромагнитных процессов в электротехнических комплексах и системах, анализа амплитудно-частотных характеристик при резонансных режимах.

Положения, выносимые на защиту

1. Выбор типа и структуры фильтрокомпенсирующего устройства для повышения качества электрической энергии в промышленных системах электроснабжения с линейной, нелинейной нагрузками и конденсаторными установками необходимо осуществлять на основе выявленных закономерностей, отражающих характер и условия возникновения резонансов и перегрузки конденсаторов токами высших гармоник, ограничений и допущений, связанных с моделированием и анализом сложных несинусоидальных режимов.

2. Повышение качества электрической энергии в части уровня высших гармоник тока и напряжения в промышленных системах электроснабжения с линейной, нелинейной нагрузками и конденсаторными установками компенсации реактивной мощности в условиях резонансных явлений необходимо производить параллельным активным фильтром с выходным активно-емкостным фильтром, параметры которого выбираются с учетом уровня потерь напряжения в нем и степени увеличения потребляемого тока согласно выявленным закономерностям.

Степень достоверности результатов исследования обусловлена достоверностью научных положений, выводов и рекомендаций подтверждается корректным применением известных теорий и методов силовой преобразовательной техники, математического моделирования электротехнических комплексов, а также качественной сходимостью результатов имитационного моделирования и экспериментальных исследований на физической модели.

Апробация результатов. Основные положения диссертационного исследования докладывались и получили положительную оценку на: III Международной молодежной конференции 2021 года по радиоэлектронике, электротехнике и энергетике «REEPE 2021» (г. Москва, 2021 г.); Международном научном симпозиуме «Неделя Горняка-2023» (г. Москва, 2023 г.).

Личный вклад автора заключается в постановке цели, задач диссертационного исследования, защищаемых научных положений и в непосредственном участии во всех этапах исследования в рамках поставленных

целей и задач. Соискателем ученой степени: созданы имитационные модели электротехнических комплексов промышленных систем электроснабжения, позволяющие выявить зависимости и закономерности, связанные с вариацией амплитуд высших гармоник тока нелинейной нагрузки, уровня искажения напряжения при изменении мощности конденсаторных установок и коэффициента их перегрузки высших гармоник тока при резонансе; создана физическая модель промышленной системы электроснабжения с нелинейной нагрузкой и конденсаторной установкой; выполнено математическое и имитационное моделирование режимов работы параллельного активного фильтра в промышленной системе электроснабжения с нелинейной, линейной нагрузками и конденсаторными установками при резонансных режимах; разработан алгоритм выбора структуры и основных параметров параллельного активного фильтра для условий несинусоидальных режимов промышленных систем электроснабжения с нелинейной нагрузкой и конденсаторными установками.

Публикации

Результаты диссертационной работы в достаточной степени освещены в 11 печатных работах (пункты списка литературы №11, №53, №55, №59, №60, №135, №136, №146, №154, приложение В), в том числе в 4 статьях - в изданиях из перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (далее - Перечень ВАК), в 2 статьях - в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus, получено свидетельство на регистрацию программы для ЭВМ (приложение А).

Структура диссертации

Диссертация состоит из оглавления, введения, четырех глав, с выводами по каждой их них, заключения, списка литературы, включающего 171 наименование. Диссертация изложена на 177 страницах машинописного текста, содержит 80 рисунков и 24 таблицы, 3 приложения.

Благодарности

Автор выражает глубокую благодарность и искреннюю признательность профессору кафедры электроэнергетики и электромеханики Абрамовичу Б.Н., доценту кафедры электроэнергетики и электромеханики Костину В.Н. и доценту кафедры электроэнергетики и электромеханики Кривенко А.В. за неоценимую помощь и вклад в подготовку и проведение научных исследований по диссертации.

ГЛАВА 1 ПРОБЛЕМЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСАХ ПРОМЫШЛЕННЫХ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

1.1. Влияние высших гармоник на показатели качества электроэнергии

Обеспечение нормируемого уровня качества электроэнергии и электромагнитной совместимости работы электрооборудования в промышленных системах электроснабжения является одной из важной проблемы электроэнергетики [15-26, 29, 72].

Электротехнический комплекс представляет собой электромагнитную среду, в которой функционируют и взаимодействуют электроустановки, производящие, передающие и потребляющие электроэнергию. Совокупность свойств электромагнитной среды, влияющей на нормальное функционирование электрооборудования и уровень электромагнитных помех, системы электроснабжения характеризуется качеством электроэнергии [100].

Качество энергии определяется совокупностью нормированных показателей, которые характеризуют режим работы электрической сети и ее влияние на работу электрооборудования. На территории России нормированные показатели качества электроэнергии регламентируются ГОСТ 32144-2013. Указанный ГОСТ устанавливает показатели качества электроэнергии, связанные с характеристиками напряжения электропитания, которые могут изменяться под действием кондуктивных электромагнитных помех, создаваемых электрооборудованием в точках передачи электроэнергии [30]. «Эта точка является линией раздела объектов электроэнергетики между разными владельцами, определенные в процессе технологического присоединения» [30]. Например, такими владельцами могут являться сетевая организация, обязующаяся поставлять качественную электроэнергию на распределительные шины потребителя и сам потребитель, который обязуется не ухудшать качество электроэнергии работой своего электрооборудования на стороне электросетевого хозяйства сетевой компании.

Одним из основных параметров, определяющих качество электроэнергии, является несинусоидальность формы напряжения, возникающая при протекании в распределительной сети гармонических составляющих тока и напряжения. Нормируются следующие показатели, относящиеся к гармоническим составляющим напряжения до 40-го порядка [30]:

- $THD_U(n)$ - коэффициенты гармонических составляющих напряжения, определяемого по выражению (1.1):

$$THD_{U(n)} = \frac{U_{(n)}}{U_1} \cdot 100\% \quad (1.1)$$

- $THD_U \%$ – суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения, определяемого по выражению (1.2):

$$THD_U \% = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{40} U_n^2}}{U_1} \cdot 100\% \quad (1.2)$$

ГОСТ-32144-2013 нормирует коэффициенты гармонических составляющих напряжения, которые приведены в таблицах 1.1-1.3.

Таблица 1.1 - Значения коэффициентов нечетных гармонических составляющих напряжения [30]

| Порядок гармонической составляющей n | Значение коэффициент гармонических составляющих напряжения $THD_U(n)$, % U_1 | | | |
|--|---|------|-----|---------|
| | Напряжение 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 [30]

| Порядок гармонической составляющей n | Значение коэффициент гармонических составляющих напряжения $THD_U(n)$, % U_1 | | | |
|--|---|------|-----|---------|
| | Напряжение 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 напряжения четных гармонических составляющих напряжения [30]

| Порядок гармонической составляющей n | Значение коэффициент гармонических составляющих напряжения $THD_U(n)$, % U_1 | | | |
|--|---|------|-----|---------|
| | Напряжение 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 | 0,3 | 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 |

Для суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения такие показаны в таблице 1.4.

Таблица 1.4 - Значения суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения [30]

| | Значение суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения THD_U , % U_1 | | | |
|-------------------------------|--|------|----|---------|
| | Напряжение электрической сети, кВ | | | |
| | 0,38 | 6-25 | 35 | 110-220 |
| Допустимые значения | 8 | 5 | 4 | 2 |
| Предельно допустимые значения | 12 | 8 | 6 | 3 |

На территории европейского союза принят стандарт *EN 50160:2010* (Характеристики напряжения электричества, поставляемого общественными распределительными сетями) [94]. В работе [13] показано, что российский стандарт ГОСТ 32144-2013 разработан с учетом положений европейского стандарта *EN 50160:2010* в рамках гармонизации межгосударственных стандартов с целью поддержать необходимые условия работы и повысить эффективность эксплуатации электрического и электронного оборудования, произведенного на территории ЕС и России, рассчитанного на работу с учетом действующих норм и правил страны производителя.

В США действует стандарт качества электроэнергии: *IEEE Std 519-2014* [95]. В отличие от отечественного стандарта, американский документ регламентирует пределы гармоник как по уровню искажения сетевого напряжения, приведенные в таблице 1.5, так и сетевого тока, приведенные в таблице 1.6.

Коэффициент короткого замыкания (*SCR*) определяется по выражению (1.3):

$$SCR = (I_{SC} / I_L) \quad (1.3)$$

где I_{SC} – ток короткого замыкания, А,

I_L – максимальный потребляемый ток в точке общего пользования в системе электроснабжения, А.

Стандарт регламентирует предельные значения гармоник тока и напряжения для всех уровней напряжения систем электроснабжения промышленных и административных предприятий с учетом режимов работы входящих в них линейных и нелинейных нагрузок. Необходимость нормирования величины гармоник тока в точке общего присоединения связано с тем, что они способствуют повышению активных потерь в электросетях и на электрооборудовании, а также увеличению падения напряжения на импедансе энергосети. В материале [122] показано, что обеспечения нормируемого качества напряжения на шинах распределительных сетей не гарантирует обеспечения его на шинах нелинейной нагрузки, что может приводить к выходу

из строя находящейся с ней рядом чувствительной нагрузки. Применение же ограничений на уровень гармонических искажений тока на клеммах нелинейной нагрузки позволит повысить эффективность регулирования уровня гармонических искажений во всех узлах систем электроснабжения потребителя энергии.

Таблица 1.5 - Значения суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения по стандарту *IEEE Std 519-2014* [95]

| Пределы искажения напряжения в стандарте <i>IEEE Std 519-2014</i> | | |
|---|---|--|
| Напряжение сети, кВ | Предельное значение коэффициента гармонических составляющих напряжения $THD_U(n), \% U_1$ | Предельное значение суммарного коэффициента искажения напряжения $THD_U, \% U_1$ |
| до 1 кВ | 5 | 8 |
| 1 кВ - 69 кВ | 3 | 5 |
| 69 кВ - 161 кВ | 1,5 | 2,5 |
| > 161 кВ | 1 | 1,5 |

Таблица 1.6 - Значения суммарного коэффициента гармонических составляющих тока по стандарту *IEEE Std 519-2014* [95]

| Пределы искажения тока в стандарте <i>IEEE Std 519-2014</i> | | | | | | |
|---|-----------------|------------------|------------------|------------------|---------------------|----------|
| Предельное значение суммарного коэффициента искажения тока $TDD, \% I_L$ | | | | | | |
| Предельное значение коэффициента гармонических составляющих тока $THD_I(n), \% U_1$ | | | | | | |
| $SCR = (I_{sc}/I_L)$ | $3 \leq n < 11$ | $11 \leq n < 17$ | $17 \leq n < 23$ | $23 \leq n < 35$ | $35 \leq n \leq 50$ | $TDD \%$ |
| < 20 | 4 | 2 | 1,5 | 0,6 | 0,3 | 5 |
| 20-50 | 7 | 3,5 | 2,5 | 1 | 0,5 | 8 |
| 50-100 | 10 | 4,5 | 4 | 1,5 | 0,7 | 12 |
| 100-1000 | 12 | 5,5 | 5 | 2 | 1 | 15 |
| >1000 | 15 | 7 | 6 | 2,5 | 1,4 | 20 |

Гармонические составляющие тока, нормируемые международным стандартом *IEEE Std 519-2014*, определяются по следующим выражениям [95]:

- $THD_I(n)$ - коэффициенты гармонических составляющих тока определяются по выражению (1.4):

$$THD_{I(n)} = \frac{I_{(n)}}{I_1} \cdot 100\% \quad (1.4)$$

- THD_I , % – суммарный коэффициент гармонических составляющих тока определяется по выражению (1.5):

$$THD_I \% = \frac{I_{(n)}}{I_1} \cdot 100\% \quad (1.5)$$

В стандарте *IEEE Std 519-2014* также регламентируется показатель «полного искажения потребляемой мощности (TDD)», который вычисляется по следующему выражению (1.6):

$$TDD = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{50} I_n^2}}{I_L} \cdot 100\% \quad (1.6)$$

где I_L – максимальный потребляемый ток в точке общего пользования в системе электроснабжения.

Величина THD_I , % может увеличиваться при уменьшении доли нелинейной нагрузки в узле потребителя [122]. При этом фактические значения амплитуд гармоник тока будут уменьшаться. Снижение амплитуд гармоник приведет и к снижению их негативного влияния на режим работы электротехнического комплекса, а именно на степень перегрева электрооборудования, на степень усиление уровня искажения сетевого напряжения. Получается, что значение THD_I , % не всегда отражает реальный уровень гармонических искажений сетевого тока.

Введение коэффициента TDD устраняет недостаток THD_I , %, поскольку его значение зависит от максимального потребляемого тока. При снижении доли нелинейной нагрузки будет снижаться и TDD . Значит, чем выше значение коэффициента TDD , тем сильнее негативный эффект высших гармоник тока. Именно поэтому стандарт США ограничивает суммарную величину значений гармоник тока по величине коэффициента TDD , приведенные в таблице 1.6.

В КНР показатели качества электроэнергии нормируются группой стандартов: Отклонение частоты в *GB/T 15945-2008*; Отклонение напряжения в

GB/T 12325-2008; Колебания напряжения и фликер в GB12326-2008; Несимметрия напряжений в трехфазных системах в GB/T 15543-2008; Гармоника в коммунальной электросети в GB/T 14549-1993; Интергармоника в коммунальной электросети в GB/T 2433-2009.

Сравнительный анализ требований к показателям качества электроэнергии китайских и российского стандартов сведен в таблицу 1.7.

Таблица 1.7 - Сравнительный анализ требований к показателям качества электроэнергии китайских и российского стандартов

| Нормируемый показатель | Стандарт ПКЭ России | | Стандарт ПКЭ Китая |
|--|---|---|---|
| Отклонение основной частоты напряжения | В синхронных системах: ± 0,2 Гц (95% времени недели); ± 0,4 Гц (100% времени недели). В изолированных системах: ± 1 Гц (95% времени недели); ± 5 Гц (100% времени недели). | | При нормальной работе энергосистемы - ± 0,2 Гц; При малой емкости системы - ± 0,5 Гц; Отклонение из-за ударной нагрузки - ± 0,2 Гц. |
| Медленные изменения напряжения в точке передачи электроэнергии | ± 10% (100% времени) | | В сетях 35 кВ и выше - ± 10%; В сетях 20 кВ и ниже - ± 7%; Напряжение однофазного источника питания 220 В: + 7%, -10%. |
| Суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения | (95% времени недели): 8% - 0,38 кВ; 5% - 6-25 кВ; 4% - 35 кВ; 2% - 110-220 кВ. | (100% времени недели): 12% - 0,38 кВ; 8 - 6-25 кВ; 6% - 35 кВ; 3% - 110-220 кВ. | 95% времени 5% - 0,38 кВ; 4% - 6-10 кВ; 3% - 35-66 кВ; 2% - 110 кВ. Нормируются уровни значений интергармоник |
| Коэффициент несимметрии | По обратной и нулевой последовательности: 2% - (95% времени недели) 4% - (100% времени недели) | | По обратной последовательности: 2% - (95% времени недели) 4% - (100% времени недели) Значение дисбаланса напряжений обратной последовательности от 1,3 до 2,6% за короткое время |
| Колебания напряжения | Доза фликера: кратковременная Pst < 1,38, длительная Plt < 1/ | | Длительная Plt < 1 - 110 кВ; Длительная Plt < 0,8 - более 110 кВ; |

Сравнительный анализ показал, что по уровню отклонения частоты российский стандарт является более строгим, чем зарубежные стандарты. ГОСТ 32144-2013 уделяет больше внимания значениям гармонических

составляющих напряжения сети и нормирует коэффициент нулевой последовательности напряжения, однако китайский стандарт предъявляет более строгие требования к уровню изменения напряжения сети.

При этом, необходимо отметить, что зарубежные стандарты определяют и нормируют показатели качества электрической энергии, связанные с формой кривой потребляемого тока, чего отечественный стандарт не предусматривает. Данный факт отражен во многих отечественных публикациях, где указывается актуальность и необходимость нормирования показателей качества потребляемого тока, так как последний является косвенной причиной наличия искажений сетевого напряжения.

Причиной появления в электрических сетях высших гармоник тока и, следовательно, причиной искажения кривых тока и напряжения являются потребители энергии с нелинейной вольт-амперной характеристикой. Растекание гармоник тока по распределительной сети, имеющей сопротивление, обуславливает появление высших гармоник напряжения и, соответственно, искажение формы напряжения, показанной на рисунке 1.1.

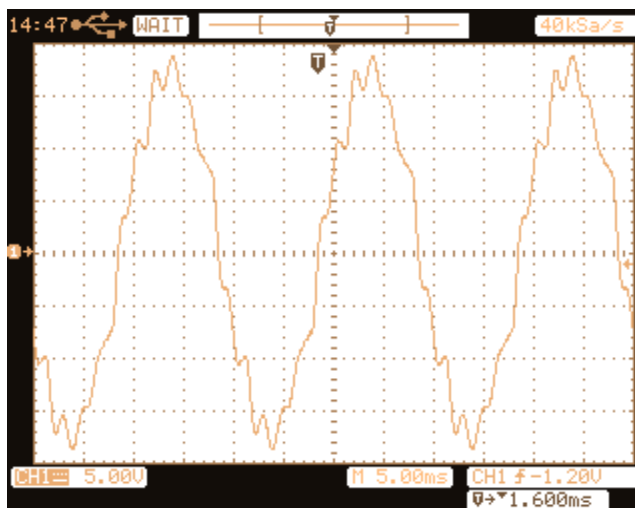


Рисунок 1.1 - Несинусоидальный сигнал напряжения

На практике, для количественной оценки влияния нелинейной нагрузки, несинусоидальный сигнал напряжения и тока раскладывают на отдельные гармоники – сигналы, изменяющиеся по закону синуса, но с частотой большей

в n раз основной частоты. Гармонический анализ сигнала осуществляется методом разложения функции в ряд Фурье, который приведен на рисунок 1.2.

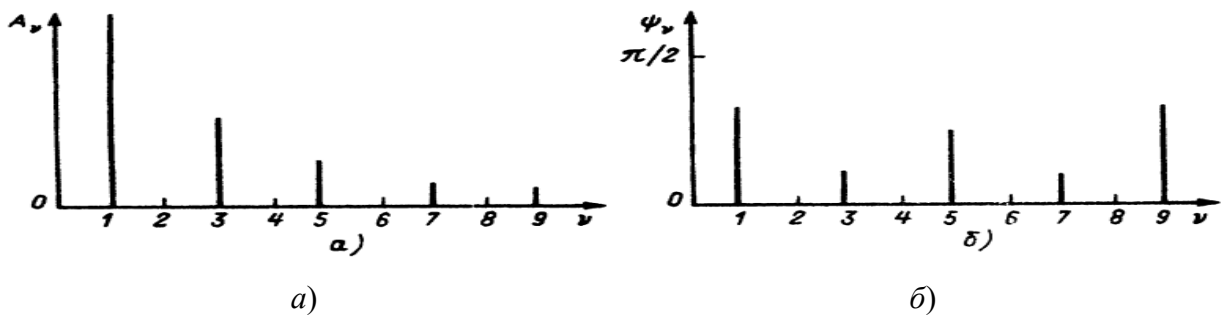


Рисунок. 1.2 - Гармонический анализ сигнала: а) амплитудный, б) фазовый

Выражение для n -гармоники тока и напряжения имеет вид (1.7):

$$i_n(t) = I_{n \max}(t) \sin(n\omega t + \Psi_n) \text{ и } u_n(t) = U_{n \max}(t) \sin(n\omega t + \varphi_n) \quad (1.7)$$

где, $I_{n \max}$, $U_{n \max}$ – амплитуда гармоники тока и напряжения соответственно,

$\omega = 2\pi f$ – промышленная частота,

Ψ_n – начальная фаза гармоники.

Порядок высших гармоник, протекающих в сети, определяются типом нелинейной нагрузки (источником гармоник). Источниками канонических гармоник являются полупроводниковые преобразователи. Порядок гармоники определяется формулой $n = mk \pm 1$, где m – пульсность преобразователя, $k = 0, 1, 2, \dots$. Для трехфазного мостового выпрямителя $n = 5, 7, 11, 13, 17, 19, \dots$. Неканонические гармоник (не соответствующие числу пульсаций выпрямленного тока) могут возникать при питании вентильного преобразователя несимметричным напряжением или при несимметрии управляющих импульсов систем импульсно- фазового управления преобразователя [14, 38].

Гармоники создают магнитные поля прямой, обратной и нулевой последовательности. По выражению (1.3) рассмотрим гармонику тока порядка n функции $f(t)$ во всех трех фазах сети электроснабжения.

Пусть гармоника тока фазы А: $i_{An} = I_{n \max} \sin(n\omega t + \psi_n)$, тогда

гармоника тока фазы В: $i_{Bn} = I_{n \max} \sin(n\omega t + \psi_n - 2n\pi/3)$;

гармоника тока фазы С: $i_{Cn} = I_{n \max} \sin(n\omega t + \psi_n + 2n\pi/3)$.

Сравнивая последние выражения для различных значений n , нетрудно видеть, что токи гармоник порядка, кратного трем ($n = 3k$, где $k = 1, 2, 3, \dots$) образуют систему нулевой последовательности.

Гармоники, кратные $n = 3k + 1$, где $k = 1, 2, 3, \dots$, образуют симметричную систему токов, чередование фаз в которой (А, В, С) совпадает с чередованием фаз первой (основной) гармоники (А, В, С). Следовательно, гармоники, кратные $n = 3k + 1$, образуют систему прямой последовательности. Порядок гармоник прямой последовательности: 1, 4, 7, 10, 13...

Гармоники, кратные $n = 3k - 1$, где $k = 1, 2, 3, \dots$, образуют симметричную систему токов, чередование фаз в которой (А, С, В) обратное по сравнению с чередованием фаз первой (основной) гармоники (А, В, С). Порядок гармоник обратной последовательности: 2, 5, 8, 11, 14...

«Из теоретической электротехники известно, что мгновенное значение напряжения сети равно сумме мгновенных значений напряжения отдельных гармоник» [14], которое определяется по выражению (1.8):

$$u(t) = U_{1\max} \sin(\omega t + \varphi_1) + U_{2\max} \sin(2\omega t + \varphi_2) + \dots + U_{n\max} \sin(n\omega t + \varphi_n) \quad (1.8)$$

Действующее значение напряжения выражается через его мгновенные значения $u(t)$ по выражению (1.9) [13]:

$$U_{\text{д}}^2 = \frac{1}{T} \int_0^T u^2(t) dt, \quad (1.9)$$

где $T = 2\pi$ – период сигнала напряжения.

Если в выражение (1.3) подставить мгновенное значение напряжение $u(t)$, то пропуская промежуточные преобразования, получим (1.10):

$$U_{\text{д}} = \sqrt{U_1^2 + U_2^2 + \dots + U_n^2} = \sqrt{U_1^2 + \sum_{k=1}^n U_k^2} \quad (1.10)$$

где U_1 - действующие значения первой (основной);

U_2, \dots, U_n – высшие гармоники напряжения.

Аналогично напряжению, мгновенное значение тока (1.11):

$$i(t) = I_{1\max} \sin(\omega t + \Psi_1) + I_{2\max} \sin(2\omega t + \Psi_2) + \dots + I_{n\max} \sin(n\omega t + \Psi_n) \quad (1.11)$$

и действующее значение несинусоидального тока (1.12):

$$I_d = \sqrt{I_1^2 + I_2^2 + \dots + I_n^2} = \sqrt{I_1^2 + \sum_{k=1}^n I_k^2} \quad (1.12)$$

Следовательно, действующее значение несинусоидального напряжения и тока равно корню квадратному из суммы квадратов действующих значений отдельных гармоник. От углов сдвига фаз действующее значение напряжения не зависит.

Активная мощность несинусоидального тока есть среднее значение мгновенной мощности за период T первой гармоники (1.13) [14]:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T u(t)i(t)dt \quad (1.13)$$

Если в выражение (1.13) подставить напряжение u и ток i , представленные рядами Фурье (выражения 1.7 и 1.8), то, пропуская промежуточные преобразования, получим (1.14):

$$P = U_1 I_1 \cos\varphi_1 + U_2 I_2 \cos\varphi_2 + \dots + U_n I_n \cos\varphi_n \quad (1.14)$$

Следовательно, активная мощность несинусоидального тока равна сумме активных мощностей отдельных гармоник.

Полная мощность S несинусоидального тока есть произведение действующих значений несинусоидальных напряжения U и тока I (1.15):

$$S = U \cdot I \quad (1.15)$$

В отличие от синусоидального тока, мощность которого определяется только активной P и реактивной Q составляющими, в несинусоидальном токе появляется еще одна составляющая- мощность искажения T . Мощность искажения характеризует бесполезные колебания энергии высших гармоник между источником энергии и преобразователем [101].

Полная мощность S несинусоидального тока будет определяться по выражению (1.16):

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2 + T^2} \quad (1.16)$$

Важным энергетическим параметром является коэффициент мощности, определяемый по выражению (1.17):

$$K_m = \frac{P}{S} \quad (1.17)$$

По выражениям (1.16) и (1.17) видно, что наличие мощности искажения в сигнале тока уменьшает коэффициент мощности.

Коэффициент мощности для неуправляемых преобразователей численно равен коэффициенту искажения, который определяется отношением первой (основной) гармоники тока к действующему значению тока (1.18):

$$K_m = \nu = \frac{I_1}{I_d} \quad (1.18)$$

Повышение коэффициента мощности преобразователей является одной из основных задач силовой электроники. Для этих целей могут применяться следующие решения:

- Увеличение пульсности схемы преобразователя: так коэффициент мощности двухполупериодного мостового выпрямителя $K_m = 0,9$, а трехфазного мостового выпрямителя $K_m = 0,955$, что связано с исключением в составе сетевого тока гармоник, кратных трем;

- применение активных и пассивных компенсаторов высших гармоник, характеристики и их влияние на сеть которых будут рассмотрены в данной работе.

1.2. Источники высших гармоник в системах электроснабжения

Актуальность проблемы ухудшения качества электроэнергии в распределительных сетях связано с массовым внедрением электроустановок на базе силовой электроники с нелинейной вольт-амперной характеристикой в промышленных системах электроснабжения [27, 98-101, 115-119, 122]. К нелинейным электроустановкам, в частности, относятся:

- полупроводниковые преобразователи (преобразователи частоты частотно- регулируемого электропривода, выпрямители, инверторы и т.д.);
- источники бесперебойного питания;
- офисное и бытовое оборудования (компьютерная техника, устройства, устройства хранения, передачи и обработки информации, мониторы, светодиодные лампы и т.д.);
- индукционные и электродуговые печи и т.д.

Широкое распространение и увеличение доли нелинейной нагрузки в суммарной нагрузке потребителей связано с их лучшими техническими, энергетическими и массогабаритными характеристиками, по сравнению с электроустановками с линейной вольт- амперной характеристикой. Развитие силовой электроники позволило решить множество задач по эффективным принципам управления потоками электроэнергии и повышения ее качества. Силовые устройства широко применяются в различных отраслях промышленного производства: в системах управления асинхронными двигателями электропривода, электродвигателях транспорта, в том числе железнодорожного транспорта. Полупроводниковые устройства позволяют создавать системы распределенной генерации и интегрировать в нее большое количество возобновляемых и низкоуглеродных источников энергии малой мощности. Развитие новых устройств систем связи и управления было бы невозможно без развития элементной базы силовой электроники. Стоит отметить и широкое распространение в промышленности и в городских сетях светодиодных источников света, которые имеют наилучших технические и энергетические характеристики, по сравнению с другими известными источниками света.

Однако, повсеместное использование устройств преобразовательной техники внесло наибольший вклад в искажение формы токов и напряжений в системах электроснабжения [103-108, 150, 151]. Причиной этих искажений является потребление элементами преобразовательной техники кривой тока, отличной от синусоидальной. В результате от искаженного гармониками

напряжения могут получать питание и другие промышленные и бытовые потребители, подключенные к одной распределительной сети вместе с нелинейными нагрузками.

Вентильными преобразователями являются выпрямители, инверторы, преобразователи частоты и др., т.е. устройства, которые выполнены на базе силовых диодов (неуправляемые преобразователи), тиристоров или транзисторов (управляемые преобразователи). Работа выпрямителя происходит при естественной коммутации тока с одного вентиля на другой при открытии очередного вентиля.

Блок-схема обобщенного выпрямителя представлена на рисунке 1.3

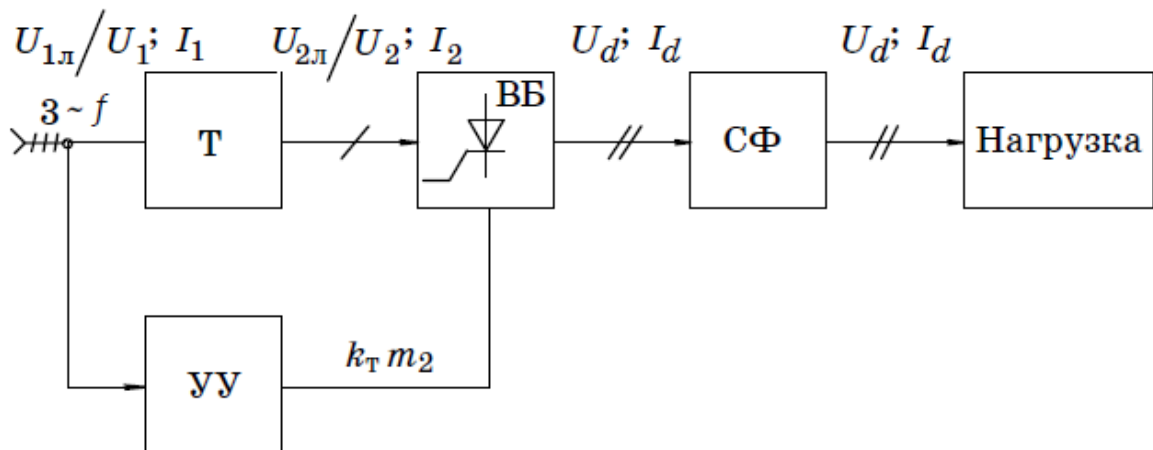


Рисунок 1.3 - Структурная схема управляемого выпрямителя: T – трансформатор; $ВБ$ – вентильный блок преобразователя; $СФ$ – сглаживающий фильтр; $УУ$ – устройство управления

Вентильные преобразователи широко применяются в промышленности для регулируемого электропривода, электролизных установок, гальванических ванн и других электротехнологических установок, а также на электрифицированном железнодорожном транспорте.

Среди вентильных преобразователей наиболее широко используется трехфазная мостовая схема выпрямления, приведенный на рисунке 1.4 а [113]. Для пояснения природы возникновения гармоник тока на рисунке 1.4 б приведены схема и временные диаграммы фазного тока и напряжения, показанные в идеализированном виде:

- диоды VD с идеальной вольт-амперной характеристикой;

- $L_d = \infty$ сглаживающая индуктивность в цепи постоянного тока;
- i_d – выпрямленный ток, определяемый величиной сопротивления R_d ;
- источник напряжений u_a , u_b и u_c бесконечной мощности, что обуславливает мгновенный переход тока i_d с одного вентиля на другой.

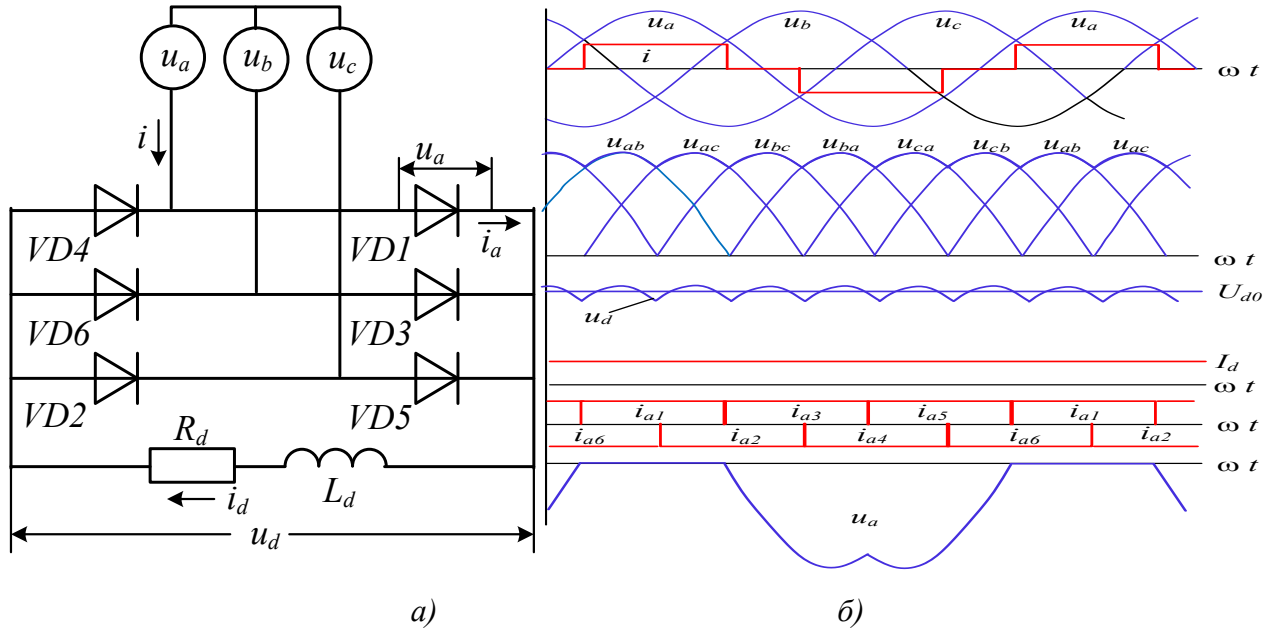


Рисунок 1.4 - а) трехфазная мостовая схема выпрямителя и б) временные диаграммы фазного тока и напряжения

Если выпрямленный ток i_d сглажен и переключение вентилей происходит без угла коммутации, то фазный ток будет иметь прямоугольную форму с чередующимися знаками. Интервал проводимости одной полуволны составляет 120° . Тогда ток будет определяться по выражению (1.19):

$$i = \frac{2\sqrt{3}i_d}{\pi} \left(\cos \omega t - \frac{1}{5} \cos 5\omega t + \frac{1}{7} \cos 7\omega t - \frac{1}{11} \cos 11\omega t + \dots \right) \quad (1.19)$$

Фазный ток выпрямителя содержит высшие гармоники. Амплитуды этих канонических гармоник определяются в долях от первой гармоники обратно-пропорциональны номерам гармоник (1.20):

$$I_n = \frac{I_1}{n} \quad (1.20)$$

В реальных вентильных преобразователях естественная коммутация тока осуществляется в течение интервала времени угла коммутации γ , из-за которого форма фазного тока отличается от прямоугольной, что видно по рисунку 1.5.

При этом в реальной кривой фазного тока также будут превалировать канонические гармоники.

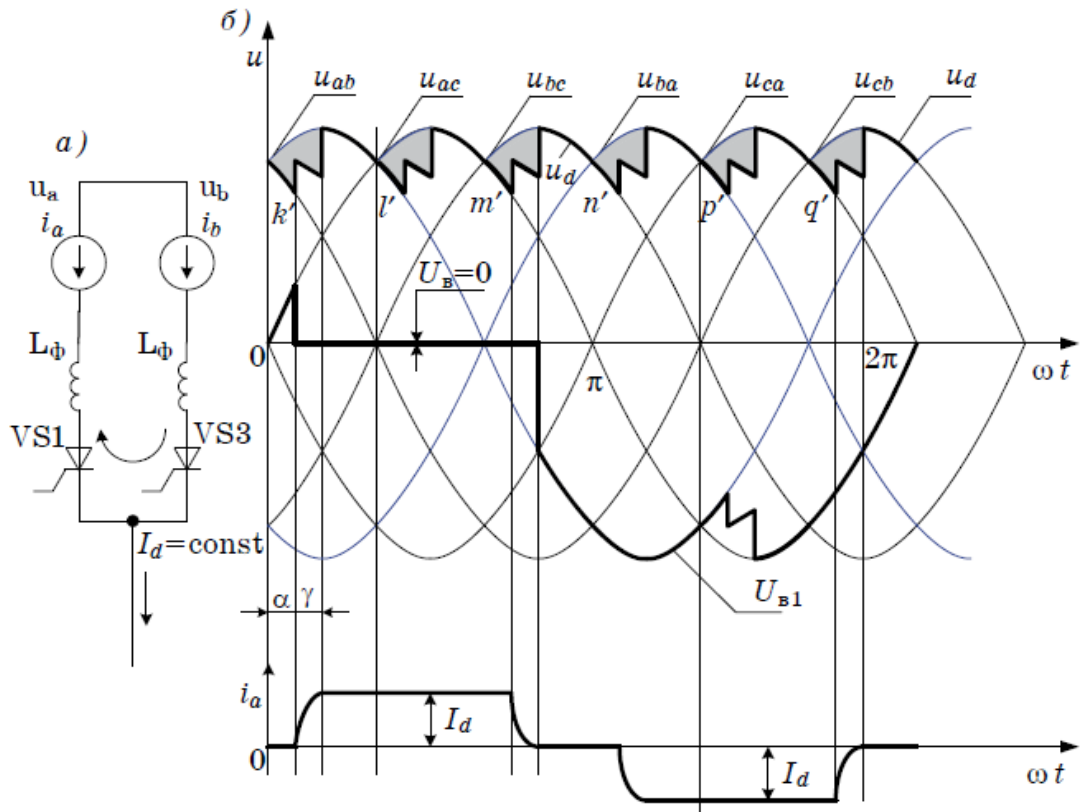


Рисунок 1.5 - а) короткозамкнутый контур коммутации и б) временные диаграммы напряжения, поясняющие процесс

Видно, что процесс коммутации приводит к искажению кривых форм тока и напряжения. В зависимости от величины угла коммутации гармонические составляющие n -ой гармоники напряжения могут быть определены по выражению (1.21) [61]:

$$U_n^* = \frac{P_d}{S_{кз}} \cdot \frac{\sin(n\frac{\gamma}{2})}{n\frac{\gamma}{2}} \quad (1.21)$$

Гармонический состав тока, потребляемый выпрямителем из сети (1.22):

$$i_{1(n)} = \frac{6\sqrt{3}}{\pi^2 k_{тр}} \cdot (\sin \omega t - \frac{1}{5^2} \sin 5\omega t + \frac{1}{7^2} \sin 7\omega t - \frac{1}{11^2} \sin 11\omega t + \dots) \quad (1.22)$$

Нелинейной нагрузкой промышленных систем электроснабжения являются потребители на основе вентильных преобразователей. К таким потребителям относятся, например, частотно-регулируемый привод, включающий преобразователь частоты, который позволяет сократить потребление электрической энергии в системах электроснабжения на 10 – 25 %. В тоже время широкое применение систем частотно-регулируемого привода технологического оборудования оказывает существенное влияние на ухудшение показателей качества электроэнергии [37, 40-51].

1.3. Влияние высших гармоник на режимы работы устройств системы электроснабжения

Несинусоидальное напряжение ухудшает эффективность работы электрооборудования и снижает срок его службы. Основными факторами негативного воздействия высших гармоник на работу элементов промышленных систем электроснабжения являются [137-145, 168-170]:

- дополнительные потери активной мощности в силовых трансформаторах, в электрических машинах и в распределительных сетях;
- могут образовываться резонансные контуры между индуктивностью системы и емкостью конденсаторной батареи на частотах высших гармоник;
- резонансные режимы значительно увеличивают значения высших гармоник тока и напряжения, что может привести к сокращению срока службы оборудования, к нарушению технологических процессов в следствие аварийного состояния оборудования;
- затрудняется выполнение компенсации реактивной мощности с помощью конденсаторных установок;
- ложные срабатывания микропроцессорных устройств релейной защиты и электросетевой автоматики.

Конденсаторные батареи

Конденсаторные батареи широко применяются в электрических сетях в качестве источника реактивной мощности. При работе конденсаторов на несинусоидальном напряжении происходит их перегрузка токами высших гармоник. Наибольшая токовая перегрузка конденсаторов имеет место при резонансных режимах работы. В работах [56-63] показано, что амплитуда гармоники тока резонирующей частоты, протекающая через конденсаторы превышает значение номинального тока конденсаторов. В результате чего токовые перегрузки конденсаторов превышают предельно допустимые значения, что приводит к перегреву и, как следствие, к отказу конденсаторов.

В тоже время резонансные явления усиливают искажения формы напряжения сети, что может оказать негативное влияние на работу остального электрооборудования.

Протекание высших гармоник через КБ приводит к дополнительным потерям в диэлектрике конденсатора ΔP_{Σ} (1.23):

$$\Delta P_{\Sigma} = \omega C \operatorname{tg} \delta \cdot \sum_{n=1} n \cdot U_n^2, \quad (1.23)$$

где $\operatorname{tg} \delta$ – тангенс угла диэлектрических потерь конденсатора,

C – емкость конденсатора, Ф.

Следует отметить, что в результате воздействия тока, частота которого превышает промышленную частоту 50 Гц, происходит более интенсивное старение диэлектрика конденсатора.

Кабельные линии

В кабельных линиях распределительных сетей гармоники тока приводят к дополнительным потерям электроэнергии $\Delta P_{\text{кл}}$ и напряжения и к старению изоляции в результате перегрева жил кабеля, обусловленных поверхностным эффектом и эффектом близости (1.24) [18, 147, 160]:

$$\Delta P_{\text{кл}} = \sum_{n=1} I_n^2 R_0 K_{\Pi}, \quad (1.24)$$

где $K_{\Pi} = 0,47\sqrt{n}$ - коэффициент увеличения активного сопротивления кабеля, обусловленного поверхностным эффектом;

R_0 – активное сопротивление кабеля на промышленной частоте.

Активное сопротивление на частоте n -ой гармоники рассчитывается по выражениям (1.25) [113]:

$$R_n = R_0\sqrt{n}; R_n = R_0(0,187 + 0,532\sqrt{n}), \quad (1.25)$$

Гармоники напряжения, воздействуя на диэлектрик, увеличивают вероятность повреждений кабеля и, соответственно, издержки на эксплуатацию [154-159].

Силовые трансформаторы

Высшие гармоники, протекая по силовым обмоткам трансформатора, вызывают увеличение нагрева их изоляции, что является причиной сокращения срока службы устройства. В работе [101] исследование процессов в трансформаторе при нелинейной нагрузке показали, что кривые магнитной индукции в стержнях магнитопровода имеют несинусоидальную форму. Перераспределение магнитного потока при наличии нелинейной нагрузки приводит к увеличению плотности вихревых токов в стали, к увеличению потерь в магнитопроводе до 200% от номинального значения потерь холостого хода, к росту добавочных потерь и температуры перегрева проводящих элементов конструкции трансформатора.

Потери активной мощности в трансформаторе при воздействии токов высших гармоник могут быть определены по выражению (1.26) [73]:

$$\Delta P_{\Sigma(n)} = 3 \sum_{n=1} I_n^2 R_k K_{\Pi\sigma}, \quad (1.26)$$

где R_k – активное сопротивление КЗ трансформатора на промышленной частоте Ом,

$K_{\Pi\sigma}$ – коэффициент увеличения сопротивления R_k из-за поверхностного эффекта и эффекта близости.

Электрические машины

В электрических машинах гармоники напряжения и тока обуславливают дополнительные потери в обмотках и стали статора и ротора. На рисунке 1.6. показаны зависимости удельных потерь от высших гармоник в синхронных и асинхронных двигателях от номера высшей гармоники [38]. По зависимостям видно, что наибольшее значения удельных потерь имеет место на частотах низкого порядка ($n = 2, 3 \dots$).

Высшие гармоники приводят к повышению общей температуры электромашины, к недопустимым уровням перегрева и к повреждению обмотки возбуждения, особенно у синхронных машин.

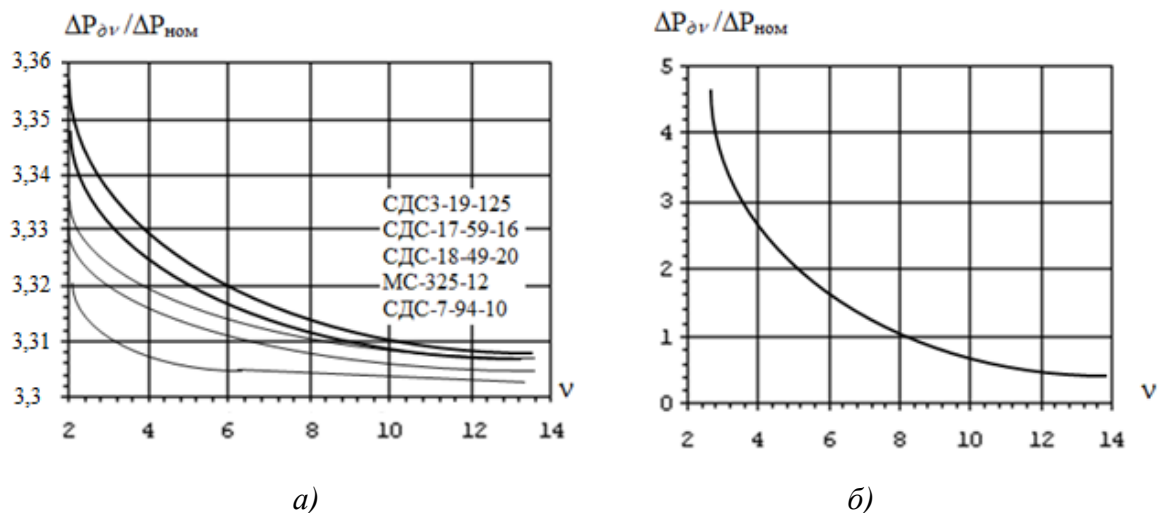


Рисунок 1.6. Зависимости удельных потерь от высших гармоник в а) асинхронных и б) синхронных двигателях

«Высшие гармоники тока в статоре машины вызывают соответствующие моменты вращения: гармоники, образующие прямую последовательность в направлении вращения ротора, а образующие обратную последовательность – в обратном направлении» [38]. Обычно эти моменты малы, но несмотря на это могут привести к вибрации вала электрической машины.

Релейная защита и автоматика и системы импульсно- фазового управления (СИФУ)

Гармоники могут нарушать работу устройств релейной защиты и автоматики или ухудшать их характеристики. Особенно чувствительны к

гармоническим искажениям цифровые реле и алгоритмы, принцип работы которых основан на анализе выборки данных. Высшие гармоники являются электромагнитными помехами, которые увеличивают вероятность отказов электронных систем.

Большинство типов реле нормально работает при коэффициенте искажения до 20%. Однако увеличение доли нелинейной нагрузки в промышленных сетях электроснабжения может привести к нарушению работы релейного устройства [28, 113].

Таким образом, цель научного исследования по решению научно-технической проблемы обеспечения качества электроэнергии в промышленных системах электроснабжения с конденсаторными установками и нелинейной нагрузкой при резонансных режимах является актуальной.

1.4. Выводы к главе 1

1. Обоснована актуальность научно-технической проблемы обеспечения качества электроэнергии и электромагнитной совместимости электрооборудования в промышленных системах электроснабжения с регулируемыми конденсаторными установками компенсации реактивной мощности и нелинейной нагрузкой.

2. Проведен анализ многочисленных отечественных и зарубежных научных трудов в данной области, по результатам которого выявлен уровень проработанности выбранного направления исследований.

3. Выявлены основные особенности, достоинства и недостатки отечественного и международных стандартов, посвященных нормированию показателей качества электрической энергии.

4. Для условий промышленных систем электроснабжения рассмотрены основные источники искажения формы кривых тока и напряжения, включая системы регулируемого электропривода, источники

бесперебойного питания, электротехнологические установки, проведен анализ создаваемых ими гармонических спектров.

5. Проведен анализ негативного влияния высших гармоник на работу электрооборудования систем электроснабжения, включая дополнительные потери в конденсаторных установках, силовых трансформаторах, кабельных линиях, ложное срабатывание релейной защиты и электросетевой автоматики.

6. Определены цель, идея, объект и предмет диссертационного исследования, а также задачи, которые необходимо решить в диссертации.

ГЛАВА 2 МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕСИНУСОИДАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ В ТИПОВОЙ ПРОМЫШЛЕННОЙ СИСТЕМЕ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ С НЕЛИНЕЙНОЙ НАГРУЗКОЙ И КОНДЕНСАТОРНЫМИ УСТАНОВКАМИ

2.1. Анализ влияния высших гармоник на конденсаторные установки

Для повышения качества электроэнергии, увеличения пропускной способности и снижения потерь электрической энергии распределительной сети в системах электроснабжения выполняется компенсация реактивной мощности – целенаправленное воздействие на баланс реактивной мощности в узле системы электроснабжения с использованием источников реактивной мощности – компенсирующих устройств.

Основными потребителями реактивной мощности на промышленных предприятиях и в сетях административных зданий являются асинхронные двигатели, силовые трансформаторы, частотные преобразователи, линии электропередачи и другие электроустановки.

Одним из способов компенсации реактивной мощности потребителей является передача ее от генераторов питающих электростанций. Однако, величина реактивной мощности, которую могут передать генераторы, ограничена оптимальным уровнем экономических затрат на ее выработку взамен генерации ими активной мощности. Поэтому разработан «Приказ Министерства энергетики Российской Федерации от 23 июня 2015 года №3802, который нормирует максимальные значения коэффициента реактивной мощности в часы потребления больших суточных нагрузок в электрических сетях» [32], приведенные в таблице 2.1.

Для исполнения положений приказа потребители электроэнергии применяют широко применяются местные источники реактивной мощности-компенсирующие устройства. В сетях до 1 кВ, а также на шинах 6-10 кВ с малой установленной мощностью электроприемников менее 5 МВт, такими устройствами являются регулируемые конденсаторные батареи [32, 59, 86].

Таблица 2.1 - Максимальные значения коэффициента реактивной мощности, потребляемой в часы больших суточных нагрузок в электрических сетях [32].

| Напряжение в точке поставки потребителю электрической энергии | $\cos\varphi$ | $\operatorname{tg}\varphi$ |
|---|---------------|----------------------------|
| 110 кВ (154 кВ) | 0,894 | 0,5 |
| 1 – 20 кВ, 35 кВ (60 кВ) | 0,928 | 0,4 |
| ниже 1 кВ | 0,944 | 0,35 |

«Они имеют сравнительно низкую стоимость, малые потери электроэнергии и возможность установки практически в любой точке системы электроснабжения» [32].

Мощность косинусных конденсаторов в данном исследовании выбиралась исходя из реактивной мощности, потребляемой в узле нагрузки, и определялась по выражению (2.1):

$$Q_k = P_n \cdot (\operatorname{tg}\varphi_n - \operatorname{tg}\varphi_d) \quad (2.1)$$

«где P_n – активная мощность в узле нагрузки;

$\operatorname{tg}\varphi_n$ – измеренное значение коэффициента реактивной мощности в распределительной сети;

$\operatorname{tg}\varphi_d$ – допустимые значение коэффициента реактивной мощности в часы больших суточных нагрузок сети» [32], приведенные в таблице 2.1.

В зависимости от режима работы системы электроснабжения промышленного предприятия рассчитывается номинальная мощность косинусных конденсаторов, обеспечивающих в узле нагрузки нормированный уровень $\operatorname{tg}\varphi$, а также рассчитывается количество и мощность рабочих ступеней компенсирующего устройства по методу, описанного в работе [32, 86].

Известно, что конденсаторные установки чувствительны к воздействию высших гармоник [32, 86]. Высшие гармоники, протекая через конденсаторную установку, увеличивают их токовую перегрузку. В случае возникновения резонансного контура между емкостью конденсаторов и индуктивностью питающей системы на частоте одной из высших гармоник, токовая перегрузка конденсаторов будет иметь наибольшее значение. Это связано с тем, что на

резонансной частоте f_{ar} контур сеть-конденсатор имеет максимальное сопротивление, что видно по рисунку 2.1. Это приводит к увеличению величины гармоники тока резонирующей частоты, протекающей через этот контур.

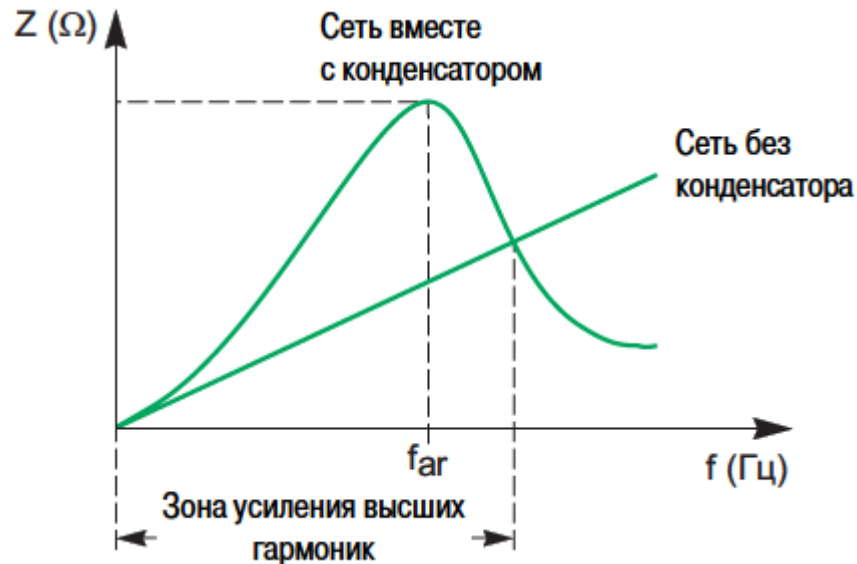


Рисунок 2.1 - Зависимость сопротивления сети от ее частоты и наличия подключенных к ней конденсаторов

Такая токовая перегрузка конденсаторов является недопустимой и приводит к сокращению срока службы батареи и к нарушению нормального режима компенсации реактивной мощности, что видно по рисунку 2.2 [8, 9, 70, 71, 77, 85, 121, 127].



Рисунок 2.2 - Выход из строя конденсатора на предприятии при резонансном режиме сети

Уровень перегрузки косинусных конденсаторов определяется коэффициентом перегрузки K_{OVL} , который находится по следующему выражению (2.2):

$$K_{OVL} = \frac{I_{к.изм}}{I_{к.ном}} \quad (2.2)$$

где $I_{к.изм}$ – значение тока, протекающего через косинусные конденсаторы, А;

$I_{к.ном}$ – номинальный ток косинусных конденсаторов, А.

Допустимый K_{OVL} для конденсаторов не должен превышать 1,3. Превышение этого значения снижает срок службы конденсаторной установки на 20-30% [38, 113]. Однако, в работе [49] приводятся зависимость кратности снижения срока службы конденсаторов от суммарного коэффициента несинусоидальности напряжения, по которой видно, что в сети до 1 кВ при $THD_U \% > 6\%$ срок службы конденсаторов снижается в 2-10 раз.

Нагрузка промышленных предприятий изменяется в широких пределах в течение суток или в течение сезона. Соответственно происходит и ступенчатое регулирование мощности конденсаторных батарей. Поэтому следует иметь в виду, что даже при отсутствии резонанса на полной мощности батареи резонансные явления могут иметь место на одной из ее ступеней.

Также компенсирующие устройства могут быть установлены на разных уровнях напряжений электросети, что связано с определением оптимальной мощности конденсаторов и места их установки на предприятии с целью минимизации потерь электроэнергии и напряжения от протекания по элементам ее системы электроснабжения реактивной мощности.

«Таким образом, задача компенсации реактивной мощности в системах электроснабжения с нелинейной нагрузкой должна решаться с учетом допустимой перегрузки конденсаторов токами высших гармоник при суточном регулировании мощности батареи, схемы распределения компенсирующих устройств на разных уровнях напряжения электросети и выполнения требований к качеству напряжения» [59].

Для понимания процессов, происходящих в сетях с конденсаторными установками и нелинейной нагрузкой, рассмотрим ниже режимы работы системы электроснабжения трансформатора 10/0,4 кВ, питающий эти электротехнические устройства.

Исследования проводились в программной среде *Multisim* по компьютерной модели, приведенной на рисунке 2.3.

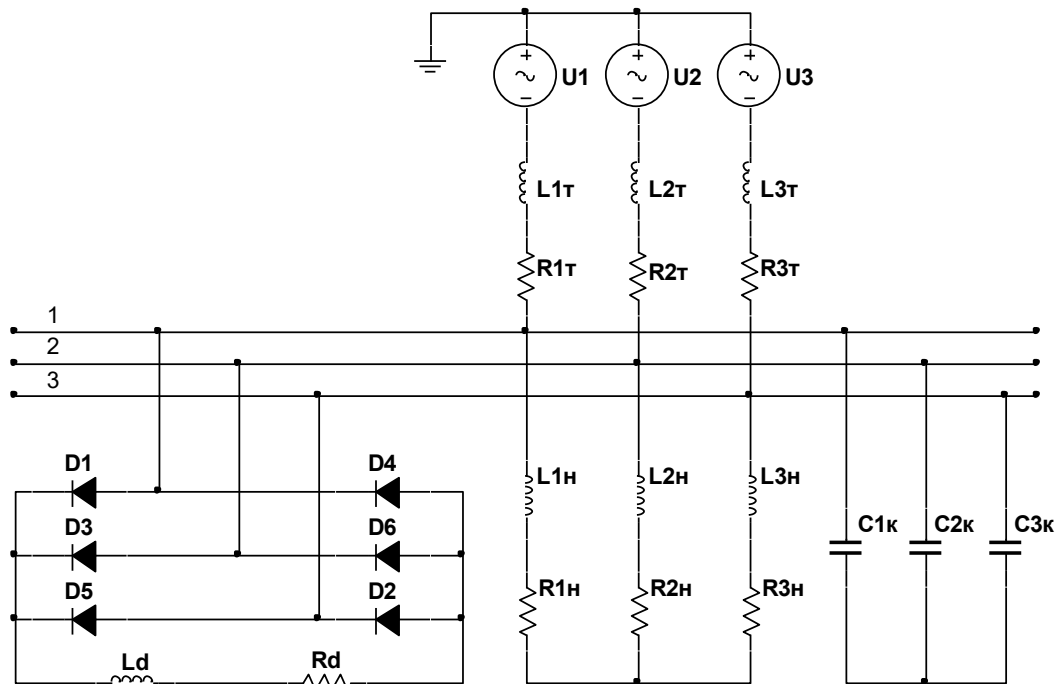


Рисунок 2.3 - Трехфазная компьютерная модель системы электроснабжения трансформатора 10/0,4 кВ

Источник энергии моделировался идеальными источниками напряжения U_1, U_2, U_3 . Трансформатор и линейная нагрузка – активными сопротивлениями и индуктивностями $R_{1T}L_{1T}, R_{2T}L_{2T}, R_{3T}L_{3T}$ и $R_{1H}L_{1H}, R_{2H}L_{2H}, R_{3H}L_{3H}$ соответственно, конденсаторная батарея – емкостями $C_{1к}, C_{2к}, C_{3к}$, нелинейная нагрузка – шестью идеальными диодами D_1-D_6 , соединенных по схеме трехфазного мостового выпрямителя, работающих на выпрямительную нагрузку R_d и сглаживающий дроссель L_d . Рассматривались режимы работы типовых трансформаторов 10/0,4 кВ номинальной мощностью $S_{T \text{ ном}} = 250..2500$ кВ·А. Регулируемые мощности нелинейной и линейной нагрузок и конденсаторной установки представлялись в относительных единицах относительно мощности питающего трансформатора: P_d^*, S_H^*, Q_K^* соответственно.

«В данном исследовании результаты моделирования приведены для трансформатора мощностью $S_{T \text{ ном}} = 1000 \text{ кВ}\cdot\text{А}$, поскольку было установлено, что для всего ряда типовых мощностей трансформаторов 10/0,4 кВ результаты моделирования имеют качественное совпадение. Однако имеется и количественное отличие результатов моделирования, которое обусловлено различным значением напряжения КЗ u_k трансформаторов, зависящего от их технических параметров» [59].

Из теоретической электротехники известно, что параллельный резонанс в электрической цепи возникает при равенстве собственной частоты некоторого LC -контура и частоты переменного напряжения, приложенного к этому контуру, т.е. частоты некоторой n -й гармоники, генерируемой нелинейной нагрузкой.

Собственная частота контура, образованного индуктивностью трансформатора L_T и емкостью батареи конденсаторов C_K (2.3):

$$\omega_c = \frac{1}{\sqrt{L_T C_K}} \quad (2.3)$$

где ω_c - частота n -й гармоники собственной частоты контура:

$$\omega_c = \omega \cdot n = 2\pi \cdot f \cdot n,$$

f – частота сети 50 Гц.

Индуктивность одной фазы трансформатора находится по выражению (2.4):

$$L_T = \frac{1}{314} \cdot \frac{u_k[\%] U_{\text{нн}}^2}{100 S_{T \text{ ном}}} \quad (2.4)$$

Емкость одной фазы батареи находится по выражению (2.5):

$$C_K = \frac{Q_k}{314 U_{\text{нн}}^2} \quad (2.5)$$

Подставляя (2.4) и (2.5) в (2.3) и выражая собственную частоту контура через номер n гармоники, после преобразования получим в относительных единицах мощность батареи конденсаторов при резонансе с индуктивностью трансформатора на n -й гармонике (2.6):

$$Q_k^* = \frac{100}{u_k[\%] \cdot n^2} \quad (2.6)$$

По формуле (2.6) определены мощности конденсаторных установок, приведенные в таблице 2.2, при которых возникают резонансные режимы на характерных гармониках.

Таблица 2.2 - Мощности конденсаторных батарей, вызывающие резонанс [59]

| $S_{T \text{ ном}}$, кВА | u_k , % | n | 5 | 7 | 11 | 13 | 17 | 19 |
|---------------------------|-----------|---------|------|------|------|------|------|------|
| 250 и 400 | 4,5 | Q_k^* | 0,89 | 0,45 | 0,18 | 0,13 | 0,08 | 0,06 |
| 630 и 1000 | 5,5 | | 0,73 | 0,37 | 0,15 | 0,11 | 0,06 | 0,05 |
| 1600 и 2500 | 6,0 | | 0,67 | 0,34 | 0,14 | 0,10 | 0,06 | 0,05 |

Значения мощностей конденсаторных установок Q_k^* , приведенные в таблице 2.2, нецелесообразно устанавливать для компенсации реактивной мощности без подключения в системе электроснабжения технических средства компенсации высших гармоник, обзор которых приведен в главе 3.

По таблице 2.2 видно, что для исследуемой системы электроснабжения наиболее вероятными будут резонансные режимы, возникающие на 11 и более высоких гармониках, поскольку они могут иметь место при мощности конденсаторной установки $Q_k^* < 0,2$ [62].

В работе оценивался коэффициент токовой перегрузки конденсаторов K_{OVL} в межрезонансных и резонансных режимах работы системы электроснабжения с нелинейной нагрузкой [37, 58].

На рисунке 2.4 а, б приведены осциллограммы тока через конденсаторы и гармонический состав фазного тока при резонансе на 11 гармонике при параметрах системы электроснабжения: $P_d^* = 0,3$; $S_n^* = 0,4$; $Q_k^* = 0,15$.

На рисунке 2.5 а, б приведены осциллограмма тока через конденсаторы и гармонический состав фазного тока в межрезонансном режиме между 7 и 11 гармониками при параметрах системы электроснабжения: $P_d^* = 0,3$; $S_n^* = 0,4$; $Q_k^* = 0,25$.

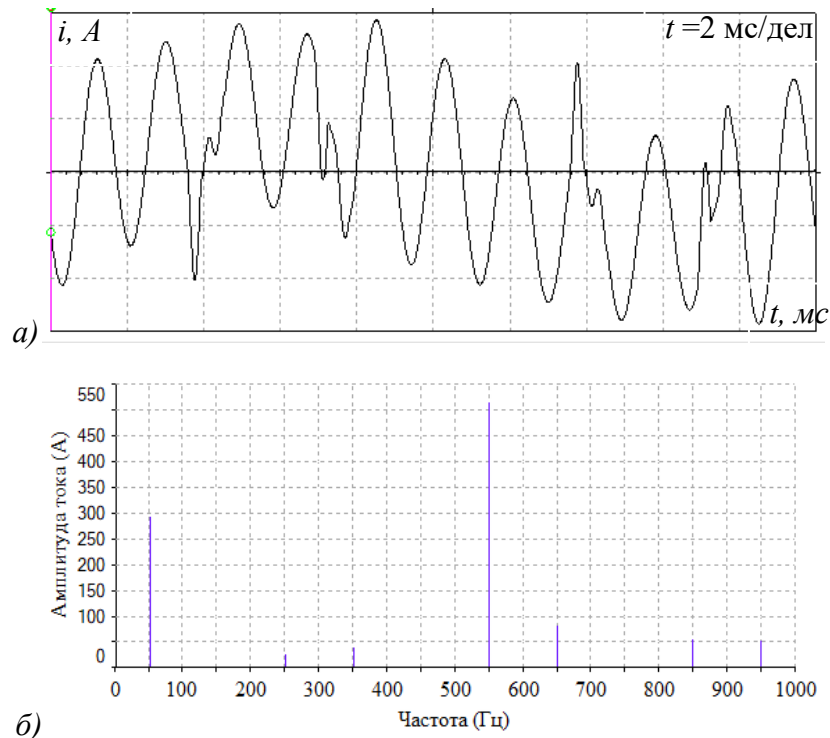


Рисунок 2.4 - Кривая фазного тока (а) и гармонический состав тока (б) через конденсаторную батарею при резонансе на 11 гармонике

(параметры системы электроснабжения: $P_d^* = 0,3$; $S_n^* = 0,4$; $Q_k^* = 0,15$)

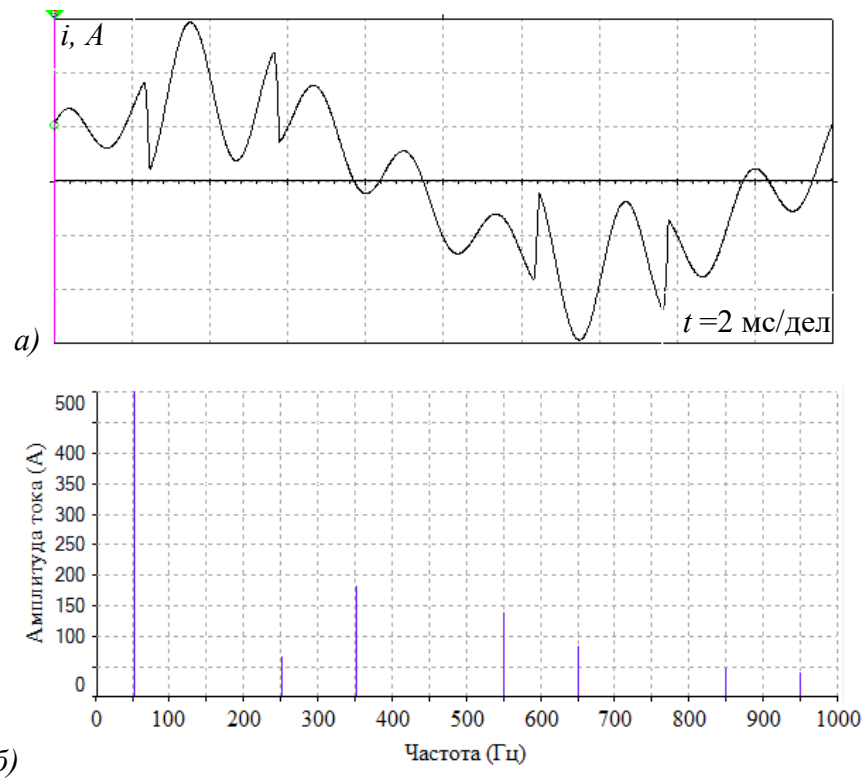


Рисунок 2.5 - Кривая фазного тока (а) и гармонический состав тока (б) через конденсаторную батарею в межрезонансном режиме между резонансами на 7 и 11 гармониках

(параметры системы электроснабжения: $P_d^* = 0,3$; $S_n^* = 0,4$; $Q_k^* = 0,25$)

Амплитуды гармоник тока конденсаторной батареи, значения суммарного тока через конденсаторы и коэффициент K_{OVL} для межрезонансных и резонансных режимов системы электроснабжения приведены в таблице 2.3.

Таблица 2.3 - Разложение в ряд Фурье фазного тока конденсаторной батареи

| Режимы | | Резонансный режим на 11 гармонике | | Межрезонансный режим между 7 и 11 гармониками | |
|---------------------|----------------|--------------------------------------|-------|--|-------|
| Параметры сети | | $P^*_d=0,3, Q^*_k=0,15, S^*_n=0,4$ | | $P^*_d=0,3, Q^*_k=0,25, S^*_n=0,4$ | |
| n | Частота, Гц | Амплитуды гармоник тока | | Амплитуды гармоник тока | |
| | | А | о.е. | А | о.е. |
| 1 | 50 | 297,7 | 1 | 506,4 | 1 |
| 5 | 250 | 26,5 | 0,089 | 64,6 | 0,127 |
| 7 | 350 | 39,8 | 0,134 | 181,8 | 0,359 |
| 11 | 550 | 483,4 | 1,624 | 136,7 | 0,270 |
| 13 | 650 | 19,6 | 0,066 | 81,2 | 0,160 |
| 17 | 850 | 37,3 | 0,125 | 47,1 | 0,093 |
| 19 | 950 | 42,1 | 0,141 | 39,3 | 0,078 |
| 23 | 1150 | 47,3 | 0,159 | 29,8 | 0,059 |
| 25 | 1250 | 48,5 | 0,163 | 26,6 | 0,052 |
| 29 | 1450 | 49,3 | 0,165 | 21,9 | 0,043 |
| 31 | 1550 | 48,9 | 0,164 | 20,1 | 0,040 |
| 35 | 1750 | 47,0 | 0,158 | 17,2 | 0,034 |
| 37 | 1850 | 45,3 | 0,152 | 16,0 | 0,032 |
| $I_{кб\ ном}, А$ | | 217 | | 361 | |
| $I_{кб\ \Sigma}, А$ | | 417 | | 397 | |
| $K_{OVL}, о.е.$ | | 1,92 | | 1,1 | |

По результатам анализа осциллограмм и гармонического состава тока конденсаторной установки при наличии высших гармоник, приведенных на рисунках 2.4 и 2.5, определено, что в резонансных режимах амплитуда гармоники тока на резонирующей частоте превышает амплитуду основной гармоники тока, а коэффициент токовой перегрузки превышает допустимое значение, которое равно 1,3 ($K_{OVL}=1,3$). В межрезонансном режиме, как и в резонансном режиме, через конденсатор протекают высшие гармоники тока. Однако коэффициент токовой перегрузки будет значительно меньше. Так, по данным приведенные в таблице 2.3, видно, что коэффициенты токовой

перегрузки при резонансе на 11 гармонике: $K_{OVL}=1,92$, в межрезонансном режиме между резонансами на 7 и 11 гармониках: $K_{OVL}=1,1$.

Таким образом, установлено, что практически невозможно избежать токовой перегрузки конденсаторов при наличии высших гармоник в сети, поскольку в системах электроснабжения промышленных предприятий применяют ступенчатые регулируемые конденсаторные установки, на ступенях которых может быть получен резонансный режим.

2.2. Резонансные режимы работы системы электроснабжения с конденсаторными установками и нелинейной нагрузкой

Рассмотрим особенности возникновения и протекания резонансных режимов в промышленных системах электроснабжения с конденсаторными установками и нелинейной нагрузкой.

Расчет амплитуды n -й гармоники тока выпрямителя производится по выражению (1.13) в соответствии с разложением фазного тока выпрямителя-меандра в ряд Фурье [8, 9, 70, 71, 77, 85]. «Однако при увеличении нагрузки выпрямителя форма фазного тока отклоняется от меандра и становится близкой к трапецеидальной вследствие увеличения интервала коммутации тока γ . Следовательно, амплитуды высших гармоник тока будут меняться по величине [38, 113]. Поэтому были оценены величины высших гармоник тока от нагрузки выпрямителя P_d^* при отключенных конденсаторах C_K » [59].

На рисунке 2.6 приведены осциллограммы фазного тока при $P_d^* = 0,01$ и $P_d^* = 0,7$, которые позволяют оценить ее форму в зависимости от мощности нелинейной нагрузки.

В случае регулирования мощности нелинейной нагрузки в диапазоне $0 < P_d^* \leq 1$ наблюдается линейное снижение относительных амплитуд гармоник тока сети I_n^* , что видно на рисунке 2.7.

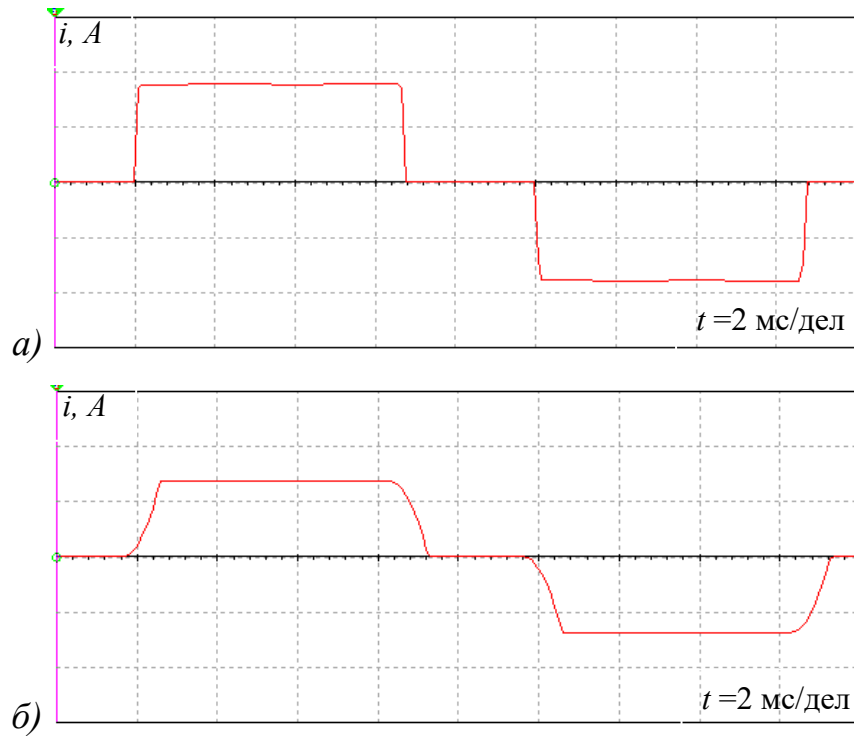


Рисунок 2.6 - Осциллограммы фазного тока на входе выпрямителя:
 а) – $P_d^* = 0,01$; б) – $P_d^* = 0,7$

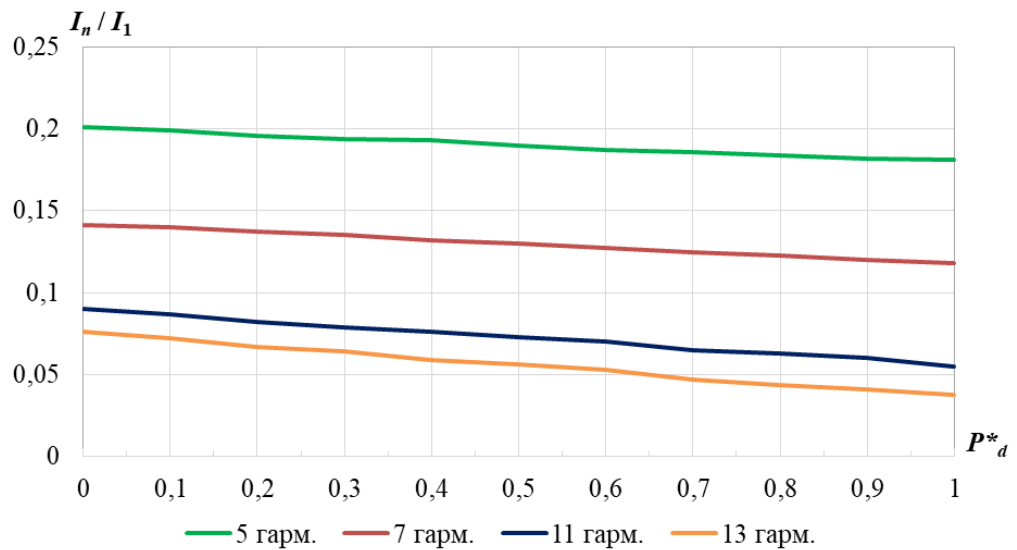


Рисунок 2.7 - Изменение амплитуд гармоник в зависимости от загрузки трансформатора

Такое уменьшение величин высших гармоник можно описать общим линейным выражением (2.7):

$$I_{n \max} = \frac{1}{n} - kP_d^* \quad (2.7)$$

где коэффициент $k = 0,02; 0,025; 0,032$ и $0,034$ для 5, 7, 11 и 13 гармоник соответственно.

В таблице 2.4 приведен спектральный состав фазного тока при $P_d^* = 0,01$ и $P_d^* = 0,7$.

Таблица 2.4 - Разложение в ряд Фурье фазного тока на входе выпрямителя при $P_d^* = 0,7$ и $P_d^* = 0,01$

| Номер гармоники | Частота, Гц | $P_d^* = 0,7$ | | $P_d^* = 0,01$ | |
|-----------------|-------------|-------------------------|-------|-------------------------|-------|
| | | Амплитуда гармоник тока | | Амплитуда гармоник тока | |
| | | А | о.е. | А | о.е. |
| 1 | 50 | 1397,73 | 1 | 20,38 | 1 |
| 5 | 250 | 263,92 | 0,189 | 4,10 | 0,201 |
| 7 | 350 | 177,66 | 0,127 | 2,88 | 0,141 |
| 11 | 550 | 94,52 | 0,068 | 1,84 | 0,090 |
| 13 | 650 | 70,72 | 0,051 | 1,55 | 0,076 |
| 17 | 850 | 39,53 | 0,028 | 1,18 | 0,058 |
| 19 | 950 | 29,33 | 0,021 | 1,05 | 0,052 |
| 23 | 1150 | 16,54 | 0,012 | 0,87 | 0,043 |
| 25 | 1250 | 13,18 | 0,009 | 0,79 | 0,039 |
| 29 | 1450 | 10,25 | 0,007 | 0,68 | 0,033 |
| 31 | 1550 | 9,59 | 0,007 | 0,63 | 0,031 |
| 35 | 1750 | 8,32 | 0,006 | 0,56 | 0,027 |
| 37 | 1850 | 7,54 | 0,005 | 0,52 | 0,026 |

При включении конденсаторной установки и возникновения резонансного режима на частоте одной из высших гармоник было определено, что происходит снижение амплитудных значений I_n^* по сравнению с величинами $I_n^* = 1/n$, «получаемых по выражениям (1.13) и (1.14) и принимаемых в технической литературе при расчетах гармоник тока в однофазной модели [1-7, 114, 152]. В таблице 2.5 приведены значения амплитуд высших гармоник тока для резонансных и межрезонансных режимах системы электроснабжения при одинаковой мощности нелинейной нагрузки» [59].

Для оценки влияния резонансных явлений на величины гармоник тока при диапазоне регулирования мощности конденсаторных установок $0 < Q_k^* \leq 1$ были построены зависимости $I_n / I_1 = f(Q_k^*)$ для мощности нелинейной нагрузки $P_d^* = 0,3$ и трансформатора 1000 кВА, которые приведены на рисунке 2.8.

По рисунку 2.8 видно, что при резонансе на каждой гармонике тока наблюдается снижение всех амплитудных значений высших гармоник, по

сравнению с значением $I_n^* = 1/n$, которое имеет место в межрезонансном режиме, в частности при $0,4 < Q_k^* < 0,7$.

Таблица 2.5 - Значения амплитуд высших гармоник тока выпрямителя

| Режимы | | Резонансный режим на 11 гармонике | | Резонансный режим на 13 гармонике | | Межрезонансный режим между 7 и 11 гармониками | |
|----------------|-------------|------------------------------------|-------|------------------------------------|-------|---|-------|
| Параметры сети | | $P_d^*=0,3, Q_k^*=0,15, S_n^*=0,4$ | | $P_d^*=0,3, Q_k^*=0,11, S_n^*=0,4$ | | $P_d^*=0,3, Q_k^*=0,25, S_n^*=0,4$ | |
| n | Частота, Гц | Амплитуда гармоник тока | | Амплитуда гармоник тока | | Амплитуда гармоник тока | |
| | | А | о.е. | А | о.е. | А | о.е. |
| 1 | 50 | 623,7 | 1 | 619,7 | 1 | 633,3 | 1 |
| 5 | 250 | 111,7 | 0,179 | 104 | 0,168 | 126,5 | 0,2 |
| 7 | 350 | 70,8 | 0,114 | 61,6 | 0,099 | 90,2 | 0,142 |
| 11 | 550 | 28,7 | 0,046 | 24 | 0,039 | 57,1 | 0,09 |
| 13 | 650 | 16 | 0,026 | 21,3 | 0,034 | 48,2 | 0,076 |
| 17 | 850 | 3 | 0,005 | 29,3 | 0,047 | 36,6 | 0,058 |
| 19 | 950 | 9,7 | 0,016 | 33,2 | 0,054 | 32,6 | 0,051 |
| 23 | 1150 | 20,1 | 0,032 | 37,6 | 0,06 | 26,6 | 0,042 |
| 25 | 1250 | 24 | 0,038 | 38,1 | 0,062 | 24,4 | 0,038 |
| 29 | 1450 | 29,8 | 0,048 | 36,7 | 0,059 | 20,7 | 0,033 |
| 31 | 1550 | 31,8 | 0,051 | 35,1 | 0,057 | 19,2 | 0,03 |
| 35 | 1750 | 14,4 | 0,055 | 31 | 0,05 | 16,8 | 0,026 |
| 37 | 1850 | 35 | 0,056 | 28,6 | 0,046 | 15,7 | 0,025 |

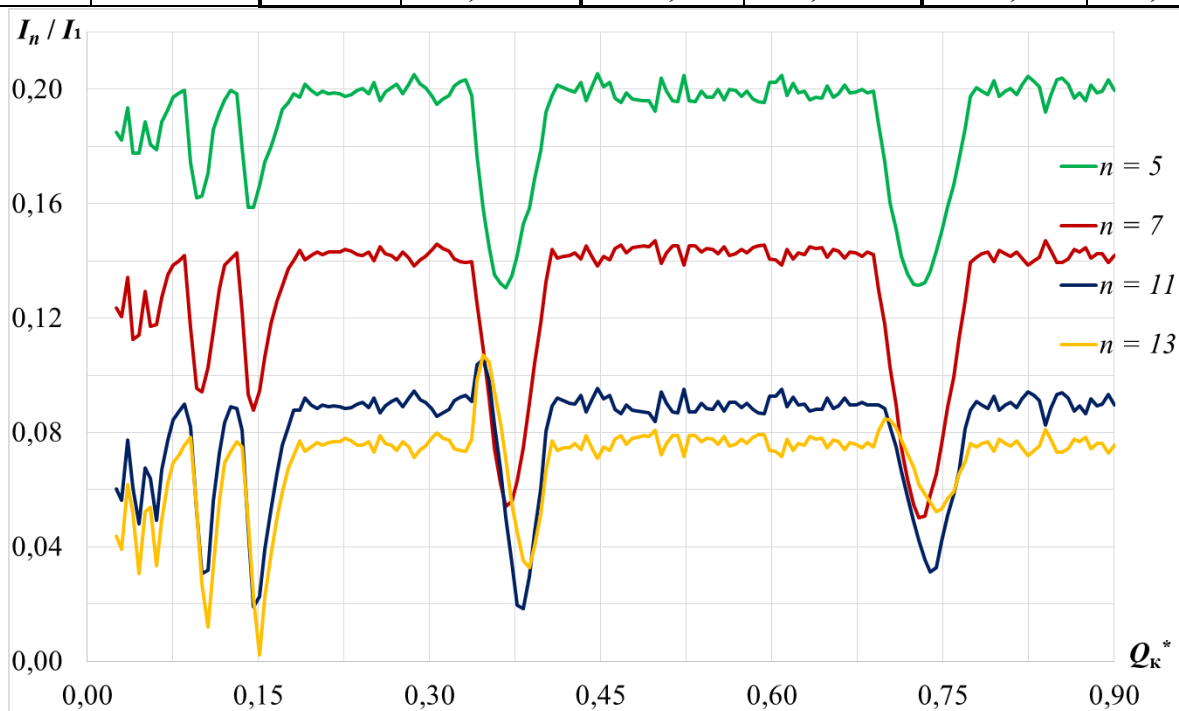


Рисунок 2.8 - Зависимости амплитуд гармоник тока от мощности батареи конденсаторов Q_k^* для трансформатора 1000 кВА

«Такое уменьшение величин высших гармоник тока при резонансных режимах, связано, вероятно, с изменением формы тока в интервале его коммутации при переключении вентилей выпрямителя [55], что видно на осциллограммах фазного тока вентиля при переходном процессе, приведенных на рисунках 2.9-2.1.

Включение очередного вентиля начинается при изменении на положительный знак линейного напряжения, приложенного к этому вентилю. При отсутствии конденсаторной батареи, как показано на рисунке 2.9, форма тока близка к трапеции; нарастание и спад тока осуществляются по синусоиде под действием линейного напряжения. Интервал коммутации тока I_d вентилями выпрямителя $\gamma = 0,5$ мс. Длительность этого интервала при заданном токе I_d обусловлена величиной индуктивности L_T трансформатора (2.8) [57]:

$$\cos \gamma = 1 - \frac{2\omega L_T I_d}{\sqrt{6U}}, \quad (2.8)$$

где $\omega = 2\pi f$ – промышленная частота; U – фазное напряжение трансформатора.

При подключении батареи, но отсутствии резонанса ($Q_k^* = 0,25$) интервал коммутации γ уменьшается практически до нулевого значения (осциллограмма на рисунке 2.10, а), а форма тока изменяется практически до прямоугольной. На осциллограмме рисунок 2.10, б красный луч соответствует току в фазе конденсаторной батареи, а черный луч – напряжению на этой фазе. Видно, что процесс коммутации тока осуществляется перезарядом емкостей конденсаторной батареи и не зависит от индуктивности трансформатора L_T . Скачки тока в конденсаторах по величине и времени соответствуют нарастанию и спаду тока в вентиле.

Таким образом, интервал коммутации γ здесь определяется лишь постоянной времени цепи конденсаторной батареи.

При резонансе ($Q_k^* = 0,15$) и близких к нему режимах процесс коммутации затягивается до $\gamma = 1$ мс включением в этот процесс колебательной составляющей на частоте резонирующей гармоники (осциллограммы на

рисунке 2.11, а). Форма тока занимает большую часть полупериода, чем в предыдущих двух случаях, и становится ближе к синусоидальной» [59].

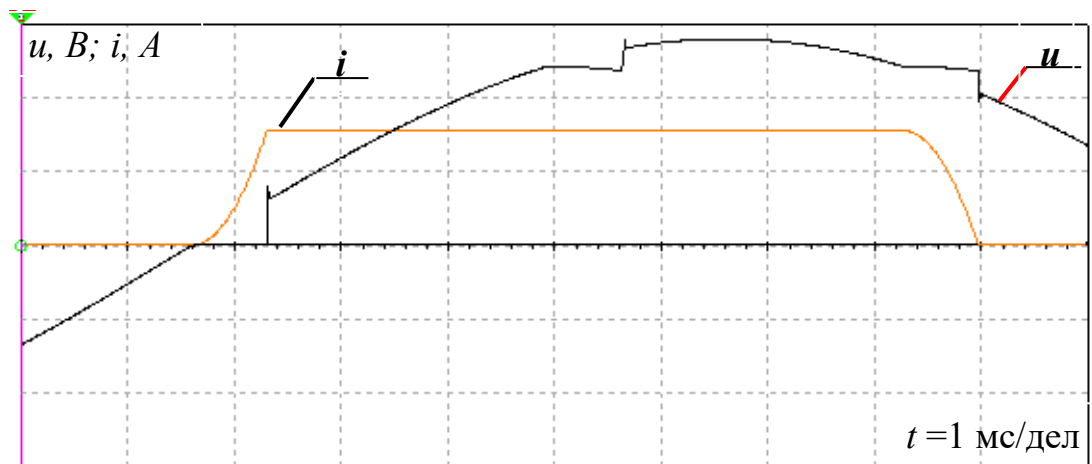
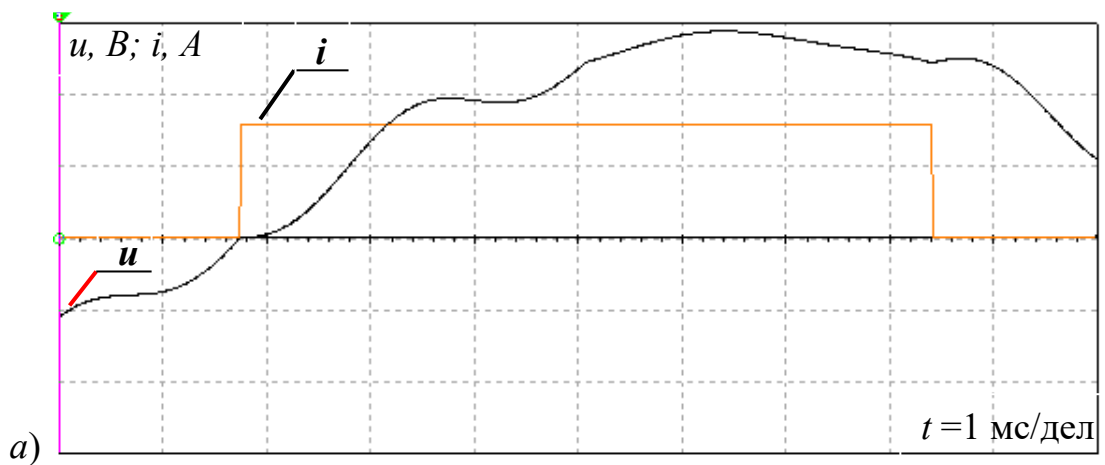
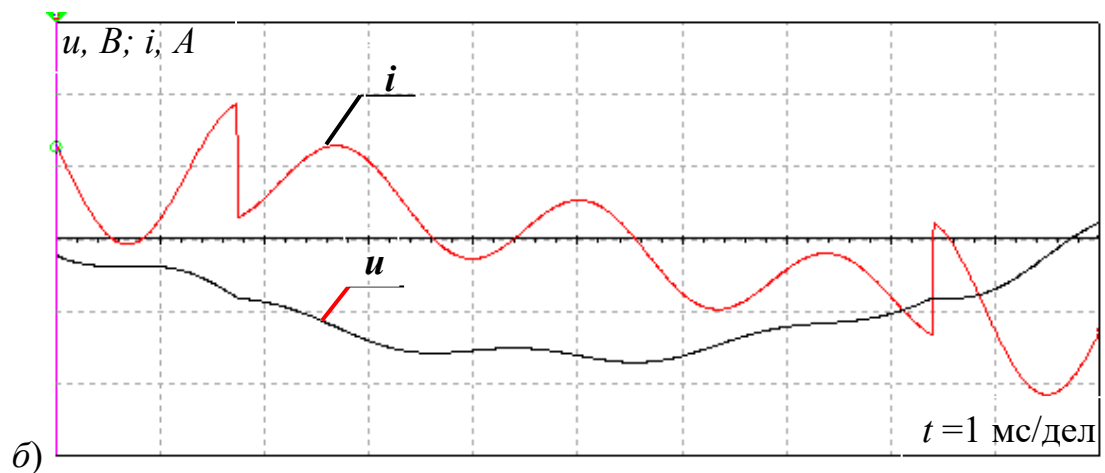


Рисунок 2.9 - Осциллограммы тока (красный цвет) и напряжения (черный цвет) на вентиле при $Q_k^* = 0$; интервал коммутации $\gamma = 0,5 \text{ мс}$



а)



б)

Рисунок 2.10 - Осциллограммы тока (красный цвет) и напряжения (черный цвет): а) на вентиле; б) на конденсаторной батарее при $Q_k^* = 0,25$; интервал коммутации $\gamma = 0 \text{ мкс}$

«Разложение такой формы тока в ряд Фурье показывает уменьшение величин токов высших гармоник, генерируемых выпрямителем, по сравнению с предыдущими случаями» [59].

Таким образом, полученные зависимости амплитуд гармоник тока от режима работы системы электроснабжения показывают значительное их снижение в резонансных режимах в следствие протекания этих гармоник тока по резонансному контур сеть-конденсатор, что и вызывает увеличение K_{OVL} .

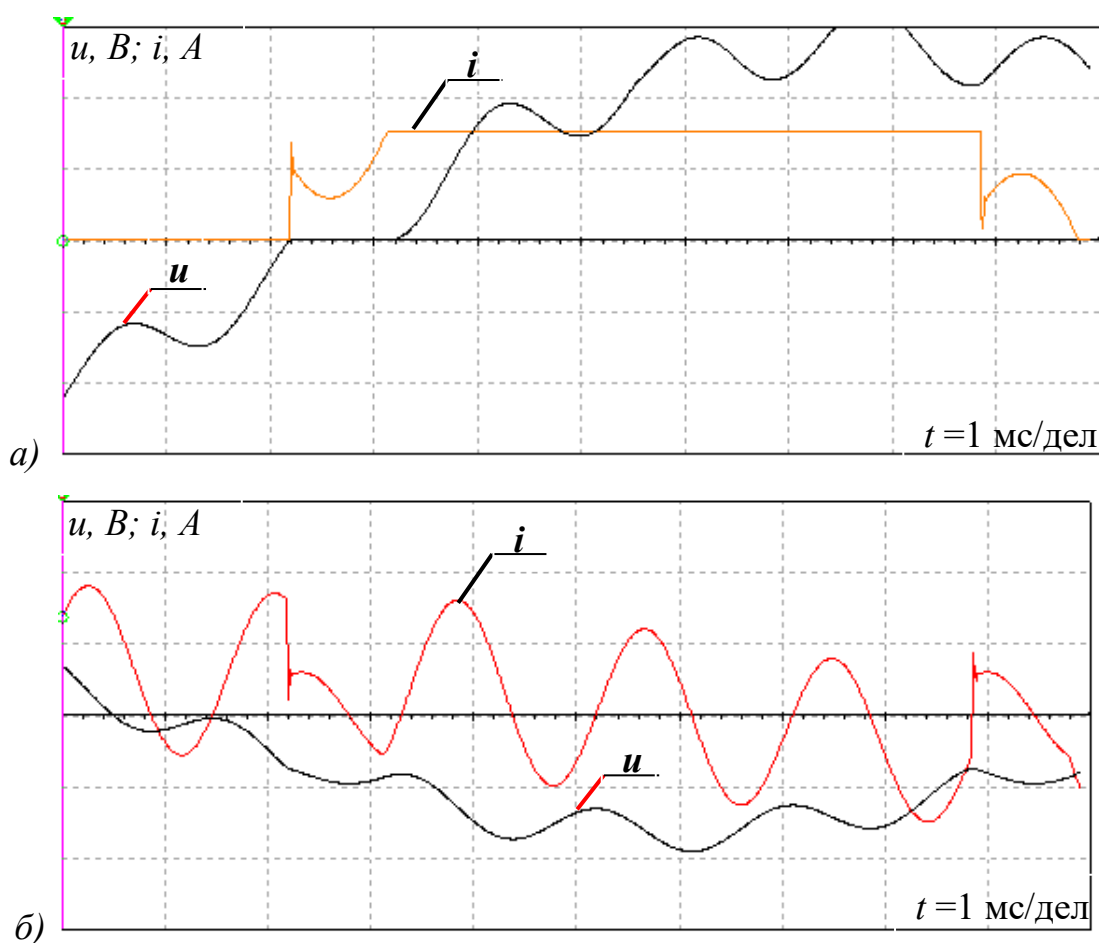


Рисунок 2.11 - Осциллограммы тока и напряжения на вентиле (а);
Осциллограммы тока и напряжения на конденсаторной батарее (б)
при $Q_k^* = 0,15$; $\gamma = 1 \text{ мс}$ (резонанс на 11-й гармонике)

2.3. Оценка влияния резонансного режима работы системы электроснабжения на уровень качества напряжения сети

На данном этапе исследования рассматривался характер влияния на показатели качества электрической энергии в части уровня высших гармоник напряжения величины мощности нелинейной нагрузки при наличии и отсутствии конденсаторных установок. Результаты моделирования при отключенных конденсаторах сведены в таблицу 2.7.

На рисунке 2.12 приведены осциллограммы фазного тока выпрямителя и фазного напряжения сети (кривая синего цвета) для нелинейных нагрузок $P_d^* = 0,01$ и $P_d^* = 0,7$. На второй осциллограмме отчетливо видно сильное искажение кривой напряжения в интервалах коммутации тока.

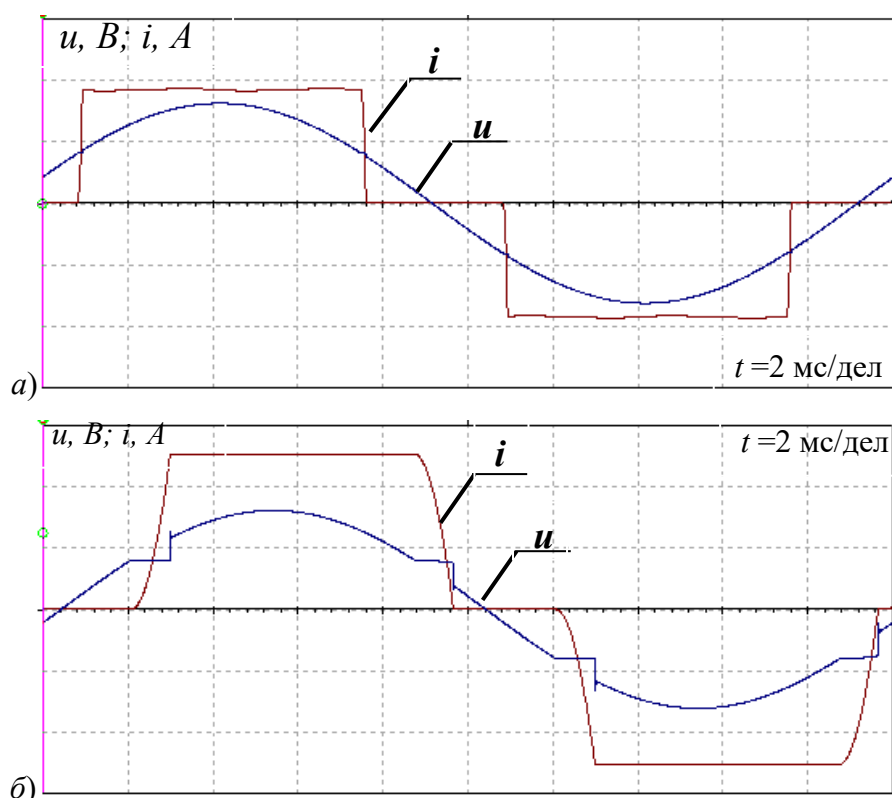


Рисунок 2.12 - Осциллограммы фазного напряжения и тока на входе выпрямителя:

а) – $P_d^* = 0,01$; б) – $P_d^* = 0,7$

По данным таблицы 2.7 установлено, что качество напряжения соответствует нормативным показателям при загрузке трансформатора мощностью нелинейной нагрузки $P_d^* < 0,7$.

Таблица 2.7 - Значения коэффициента THD_U % при отключенной конденсаторной батарее [59]

| | | | | | |
|----------------------------------|-------|------|------|------|------|
| P_d^* | 1 | 0,75 | 0,66 | 0,5 | 0,25 |
| S_H^* | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| THD_U , % | 10,25 | 9,1 | 7,15 | 6,3 | 3,6 |
| P_d^* | 1 | 0,75 | 0,66 | 0,5 | 0,25 |
| S_H^* ($\cos\varphi = 0,85$) | 0 | 0,25 | 0,33 | 0,5 | 0,75 |
| THD_U , % | 10,25 | 9,2 | 7,65 | 6,75 | 3,95 |

Для рассматриваемых режимов в таблице 2.8 сведены значения гармонических составляющих напряжения сети с указанием суммарного коэффициента несинусоидальности напряжения THD_U %.

Таблица 2.8 - Значения амплитуд высших гармоник напряжения сети

| Режимы | | Резонансный режим на 11 гармонике | | Межрезонансный режим между 11 и 13 гармониками | | Межрезонансный режим между 7 и 11 гармониками | |
|-----------------------------|-------------|------------------------------------|-------|--|-------|---|--------|
| Параметры сети | | $P_d^*=0,3, Q_k^*=0,15, S_H^*=0,4$ | | $P_d^*=0,3, Q_k^*=0,13, S_H^*=0,4$ | | $P_d^*=0,3, Q_k^*=0,25, S_H^*=0,4$ | |
| n | Частота, Гц | Амплитуды гармоник напряжения | | Амплитуды гармоник напряжения | | Амплитуды гармоник напряжения | |
| | | В | о.е. | В | о.е. | В | о.е. |
| 1 | 50 | 320,6 | 1 | 320,2 | 1 | 322,2 | 1 |
| 5 | 250 | 5,5 | 0,017 | 6,4 | 0,02 | 8,1 | 0,025 |
| 7 | 350 | 5,9 | 0,019 | 8 | 0,025 | 16,1 | 0,05 |
| 11 | 550 | 48,8 | 0,152 | 30,8 | 0,096 | 7,4 | 0,023 |
| 13 | 650 | 6,3 | 0,02 | 29,6 | 0,093 | 3,7 | 0,011 |
| 17 | 850 | 2,9 | 0,009 | 4,9 | 0,015 | 1,5 | 0,005 |
| 19 | 950 | 2,5 | 0,008 | 3,2 | 0,01 | 1,1 | 0,003 |
| 23 | 1150 | 1,9 | 0,006 | 1,7 | 0,005 | 0,6 | 0,002 |
| 25 | 1250 | 1,7 | 0,005 | 1,3 | 0,004 | 0,5 | 0,001 |
| 29 | 1450 | 1,2 | 0,004 | 0,8 | 0,003 | 0,3 | 0,001 |
| 31 | 1550 | 1 | 0,003 | 0,7 | 0,002 | 0,2 | 0,001 |
| 35 | 1750 | 0,7 | 0,002 | 0,5 | 0,001 | 0,1 | >0,001 |
| 37 | 1850 | 0,5 | 0,002 | 0,4 | 0,001 | 0,1 | >0,001 |
| THD_U % | | 15,6 | | 13,8 | | 6,2 | |

При включенной конденсаторной батарее были получены осциллограммы и гармонический состав фазного напряжения сети для режимов работы при резонансе на 11 гармонике и при межрезонансных режимах между 7 и 11 гармониками и между 11 и 13 гармониками, что показано на рисунках 2.13 – 2.14.

Таким образом, работа конденсаторных установок в системах электроснабжения с нелинейной нагрузкой ухудшает качество напряжения, особенно заметно в резонансных режимах [57].

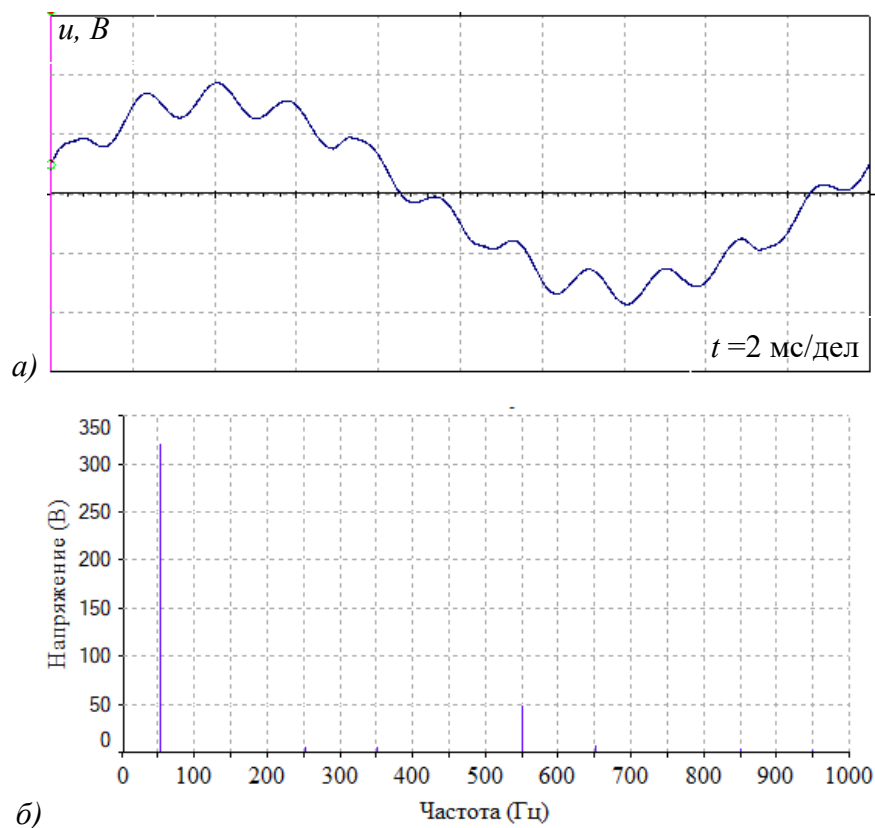


Рисунок 2.13 - Осциллограмма и гармонический состав фазного напряжения

$P_d^* = 0,3$; $S_n^* = 0,4$; $\cos\varphi = 0,8$; $Q_k^* = 0,15$ (резонанс на 11-й гармонике)

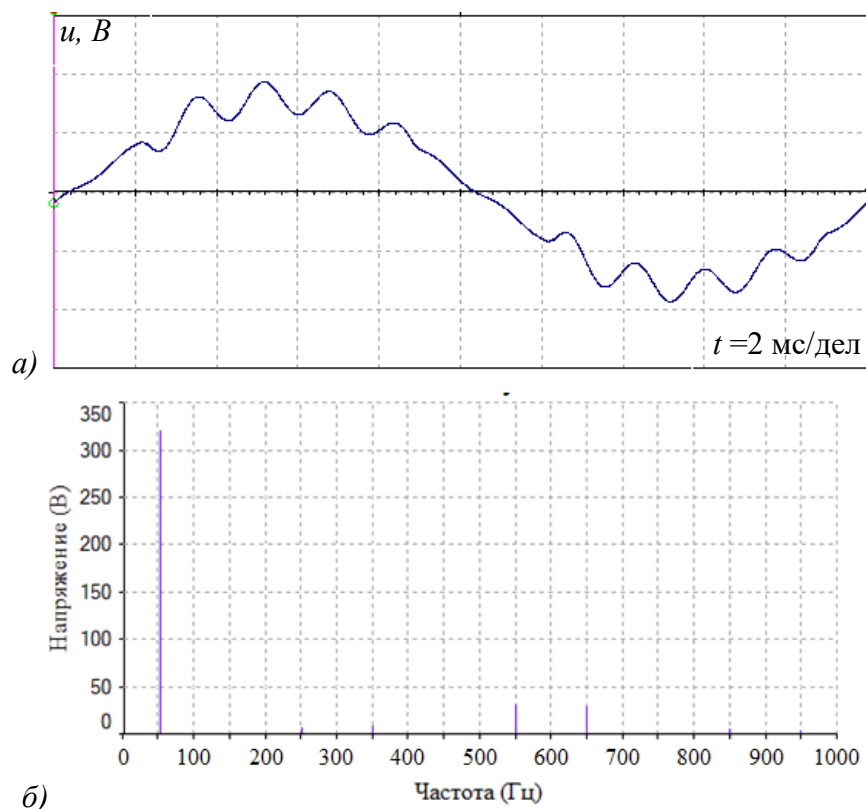


Рисунок 2.14 - Осциллограмма и гармонический состав фазного напряжения $P_d^* = 0,3$; $S_n^* = 0,4$; $\cos\varphi = 0,8$; $Q_k^* = 0,13$ (между резонансами на 11 и 13-й гармониках)

2.4. Имитационное моделирование режимов системы электроснабжения трансформатора 10/0,4 кВ по однофазной схеме замещения

Следует отметить, что в подавляющем большинстве источников, в частности в [30, 60, 62], исследование растекания высших гармоник тока в промышленной системе электроснабжения выполняется по упрощенной однофазной схеме, которая приведена на рисунке 2.15.

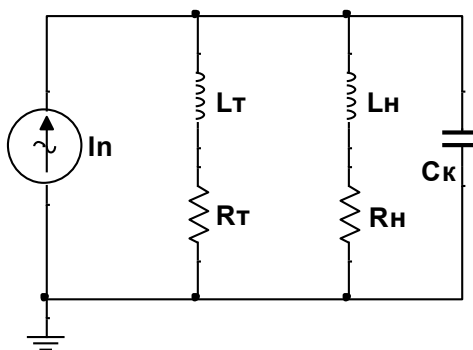


Рисунок 2.15 - Однофазная схема замещения системы электроснабжения трансформатора 10/0,4 кВ

«В этой однофазной схеме задаются величина тока n -й гармоники I_n , как правило, $I_n = I_1/n$, сопротивление фазы трансформатора $L_T R_T$, сопротивление фазы линейной нагрузки $L_H R_H$ и емкость фазы конденсаторной батареи C_K » [59]. Главным недостатком однофазной схемы является принудительное задание исследователем величины гармоники тока I_n .

Очевидным преимуществом моделирования в трехфазной схеме, приведенной на рисунке 2.3, является возможность получения всего спектра гармоник тока и напряжения, протекающих в сети и через конденсаторные установки.

В случае необходимости учета влияния на сеть нескольких гармоник, в однофазной схеме их представляют источниками тока, параллельно соединенными между собой. Однако в однофазной модели не задают первую гармонику тока, поэтому по ней трудно оценить суммарный ток конденсаторной установки.

Установлено, что в режимах межрезонансных режимах работы однофазная и трехфазная модели дают хорошее совпадение результатов по величинам токов, протекающих через конденсаторную батарею и по гармоническому составу напряжения сети. В резонансном режиме однофазная схема дает существенно завышенный результат.

В таблице 2.9 сведены результаты моделирования режимов сети по однофазной и трехфазным имитационным моделям систем электроснабжения.

По таблице 2.9 видно, что в резонансный режим получены сильно отличающиеся результаты измерений исследуемых коэффициентов: по однофазной схеме ($K_{OVL} = 3,25$ и $THD_U \% = 28,2 \%$) и по трехфазной схеме ($K_{OVL} = 1,92$ и $THD_U \% = 15,6 \%$). В режиме между резонансами значения коэффициентов соизмеримы: по однофазной схеме ($K_{OVL} = 1,12$ и $THD_U \% = 6,3 \%$) и по трехфазной схеме ($K_{OVL} = 1,1$ и $THD_U \% = 6,2 \%$).

Однофазная схема дает существенно завышенный результат коэффициентов K_{OVL} и $THD_U \%$, поскольку не учитывает снижение амплитуд рассматриваемых высших гармоник в резонансных и близких к ним режимах.

Таблица 2.9 - Результаты моделирования режимов сети по однофазной и трехфазным имитационным моделям систем электроснабжения

| Величины коэффициентов | Резонансный режим $P_d^* = 0,3, Q_k^* = 0,15, S^* = 0,4$ | Межрезонансный режим $P_d^* = 0,3, Q_k^* = 0,25, S^* = 0,4$ |
|-----------------------------------|---|--|
| Однофазная схема замещения | | |
| $THD_U \%$ | 28,2 | 6,3 |
| K_{OVL} | 3,25 | 1,12 |
| Трехфазная схема замещения | | |
| $THD_U \%$ | 15,6 | 6,2 |
| K_{OVL} | 2 | 1,1 |

Вследствие этого гармоники тока в однофазной модели должны быть представлены в виде источников тока с параллельным внутренним сопротивлением, которое может быть определено по выражению (2.9):

$$R_n = \frac{1 - k_n P_d^*}{k_n P_d^*} X_{Tn} \quad (2.9)$$

где k_n – коэффициент наклона зависимости тока гармоники от мощности нелинейной нагрузки; X_{Tn} – сопротивление трансформатора на частоте n-ой гармонике.

Установлено, что k_n , в зависимости от номера гармоники и ее амплитудного значения, принимает следующие значения:

- для 5 гармоники при $I_n^* = 0,17..0,2$ коэффициент $k_5 = 0,1-0,15$;
- для 7 гармоники при $I_n^* = 0,17..0,2$ коэффициент $k_7 = 0,18-0,28$;
- для 11-й гармоники при $I_n^* = 0,04..0,09$ коэффициент $k_{11} = 0,39-0,56$;
- для 13-й гармоники при $I_n^* = 0,02..0,04$ коэффициент $k_{13} = 0,58-0,69$.

«Изменением внутреннего сопротивления источника гармоник объясняет факт значительного снижения амплитуд характерных гармоник, как видно из рисунков 2.6 и 2.16 области резонансных режимов, когда сопротивление резонансного контура резко возрастает, по сравнению с межрезонансным режимом, и большая часть тока гармоники замыкается по внутреннему сопротивлению R_n » [11].

2.5. Физическое моделирование резонансных режимов работы системы электроснабжения с нелинейной нагрузкой и конденсаторной установкой

Результаты компьютерного моделирования, приведенные в главах 2.1-2.4, были подтверждены на физической модели лабораторной установки.

Физическое моделирование выполнялось на лабораторной модели, схема которой приведена на рисунке 2.16, с сухим трансформатором (T) напряжением 0,4/0,23 кВ мощностью 19 кВА с параметрами: напряжение и потери короткого замыкания $u_k = 10 \%$, $\Delta P_k = 0,52$ кВт. В качестве нелинейной нагрузки (B) применялся трехфазный мостовой выпрямитель VS-26MT60, который нагружался проволочными реостатами мощностью $P_d = 4,5$ кВт и индуктивностью $L_d = 100$ мГн. Линейной нагрузкой (H) служили активные сопротивления и индуктивности суммарной мощностью $S = 4$ кВА. В сеть была подключена регулируемая конденсаторная батарея (KB) максимальной мощностью 4 квар. Линией передачи от трансформатора до узла нагрузки являлся трехжильный медный проводник длиной $l = 30$ м и сечением $q = 4$ мм². Суммарный коэффициент искажения напряжения $THD_U = 0,9 \%$ до включения нелинейной нагрузки.



Рисунок 2.16 - Физическая модель системы электроснабжения: а) – схема лабораторной установки, б) элементы и приборы измерения, входящие в схему

Параметры системы электроснабжения лабораторной установки:

- трансформатор: активное сопротивление $R_T = 85$ мОм и индуктивность $L_T = 1$ мГн;
- Проводник: активное сопротивление $R_n = 115$ мОм;
- Конденсаторы: емкостью $C_k = 0 \dots 320$ мкФ с шагом ступени 10 мкФ.

Измерение режимов работы физической модели осуществлялось цифровым запоминающим осциллографом «Актаком АСК-2065», измерителем показателей качества электроэнергии *Fluke 43B* и другими лабораторными измерителями величин тока и напряжения.

Регулируемые мощности физической модели представлялись в относительных единицах по отношению к мощности питающего трансформатора [91].

В результате моделирования были установлены мощности конденсаторов $Q_k^* = 0,27; 0,13; 0,052; 0,037; 0,022$ и $0,017$, на которых возникают резонансные явления на гармониках $n=5, 7, 11, 13, 17, 19$ соответственно.

Результаты физического моделирования приведены на рисунках 2.17-2.20 и в таблице 2.9. Они были получены в результате регулирования мощности конденсаторной установки в диапазоне $Q_k^* = 0 \dots 0,2$.

На рисунке 2.17 приведены осциллограммы напряжения сети и тока конденсаторной установки при отсутствии конденсаторов и при резонансных явлениях на 7 и 11 гармониках. При $Q_k^* = 0$ видно искажение напряжения сети из-за работы нелинейной нагрузки $P_d^* = 0,25$, что видно на рисунке 2.17 а. Однако, коэффициент несинусоидальности напряжения $THD_U = 6$ % находится в допустимых пределах. В случае включения конденсаторов и возникновения резонансного режима на 11 гармонике, что видно на рисунке 2.17 б, наблюдается усиление искажения формы напряжения сети, коэффициент $THD_U = 11$ % превышает допустимые значения. Рисунок 2.17 в показывает осциллограмму тока конденсаторов при резонансе на 7 гармонике. Видно, что сигнал тока конденсаторов искажен 7 гармоникой тока, коэффициент токовой перегрузки $K_{OVL} = 1,4$ является недопустимым для работы конденсаторов.

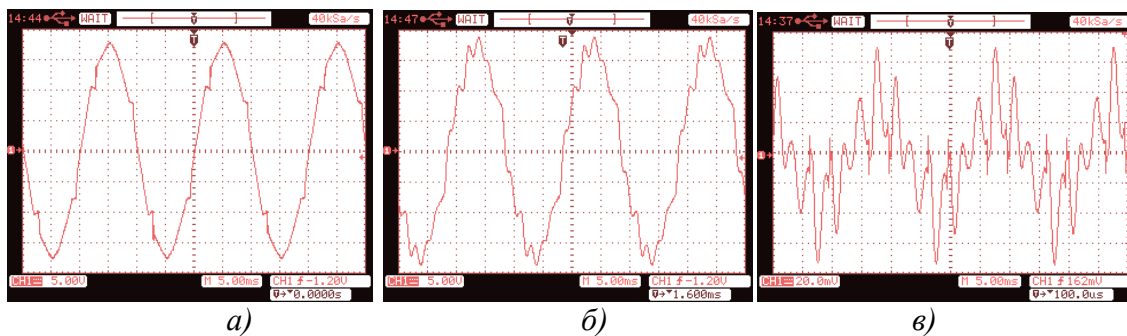


Рисунок 2.17 - Физическая модель: осциллограммы напряжения при $Q_k^* = 0$ (а) и при $Q_k^* = 0,055$ (б) и осциллограмма тока в конденсаторах при $Q_k^* = 0,13$ (в)

В физической модели были получены зависимости амплитуд гармоник I_n^* от величины мощности Q_k^* , которые приведены на рисунке 2.18.

Таблица 2.9 - Амплитуд высших гармоник тока выпрямителя в физической модели

| n | 5 | 7 | 11 | 13 | 17 | 19 |
|----------------------------|------|------|-------|-------|-------|-------|
| $I_n^* = 1/n$ | 0,2 | 0,14 | 0,091 | 0,077 | 0,059 | 0,053 |
| I_n^* при $Q_k^* = 0,1$ | 0,19 | 0,12 | 0,065 | 0,06 | 0,03 | 0,027 |
| I_n^* при $Q_k^* = 0,05$ | 0,18 | 0,11 | 0,045 | 0,04 | 0,01 | 0,005 |

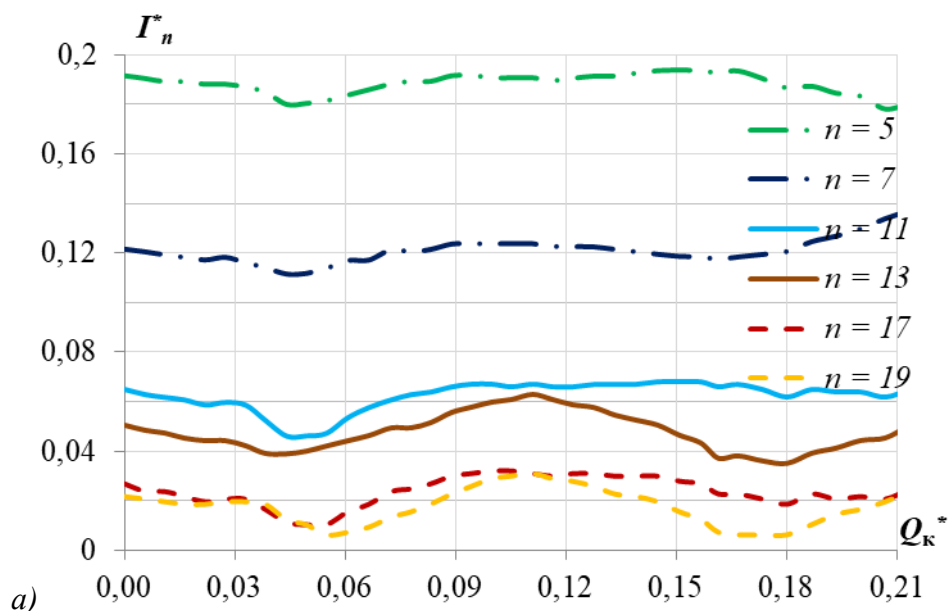


Рисунок 2.18 - Зависимости амплитуд гармоник тока от мощности конденсаторной установки в сети лабораторной установки

В таблице 2.9 приведены значения амплитуд гармоник тока при $Q_k^* = 0,05$ (резонанс на 11-й гармонике) и при $Q_k^* = 0,1$ (межрезонансный режим) на частотах $n=5, 7, 11, 13, 17, 19$.

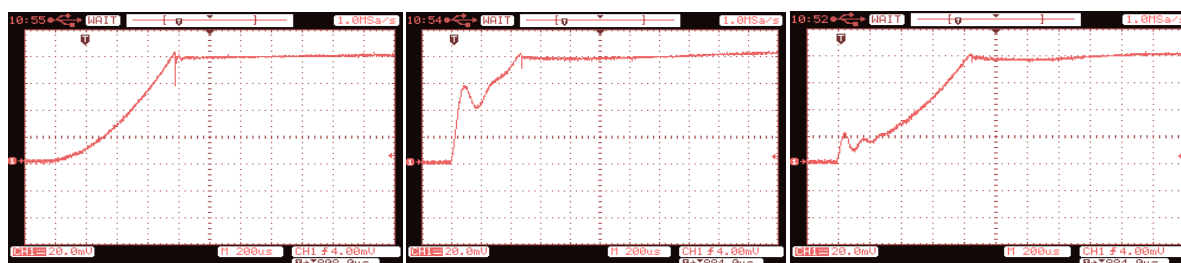
На рисунке 2.19 приведены осциллограммы фазного тока нелинейной нагрузки физической модели:

- при отсутствии конденсаторов они показаны на рисунке 2.19 а;

- при включении конденсаторов и межрезонансном режиме работы они приведены на рисунке 2.19 б);

при включении конденсаторов и резонансном режиме работы они приведены на рисунке 2.19 в).

На рисунке 2.19 видно, что интервал γ коммутации фазного тока вентилями зависит от режима работы системы электроснабжения. Наибольший интервал коммутации $\gamma = 850$ мкс имел место в резонансном режиме и связан с появлением в сигнале тока периодической составляющей тока гармоники на резонирующей частоте. Установлено, что интервал γ коммутации влияет на гармонический состав фазного тока.



а)

б)

в)

Рисунок 2.19 - Осциллограммы фазного тока на входе выпрямителя в физической модели:

а) – $Q_k^* = 0$; $\gamma \approx 780$ мкс;

б) – $Q_k^* = 0,11$ (между резонансами на 7 и 11-й гармониках); $\gamma \approx 470$ мкс;

в) – $Q_k^* = 0,04$ (резонанс на 13-й гармонике); $\gamma \approx 850$ мкс

В физической модели оценивались величины коэффициентов THD_U и K_{OVL} в зависимости от мощности конденсаторной установки, которые приведены на рисунке 2.20.

«В лабораторных условиях крайне сложно воспроизвести низкий уровень сопротивления питающих трансформаторов реальных промышленных систем

электроснабжения с заданным уровнем напряжения короткого замыкания. Однако даже с высоким уровнем активного сопротивления трансформатора физическая модель демонстрирует аналогичные результаты, что и компьютерный аналог. Это подтверждает адекватность имитационной модели и возможность ее применения для анализа сложных несинусоидальных режимов» [11].

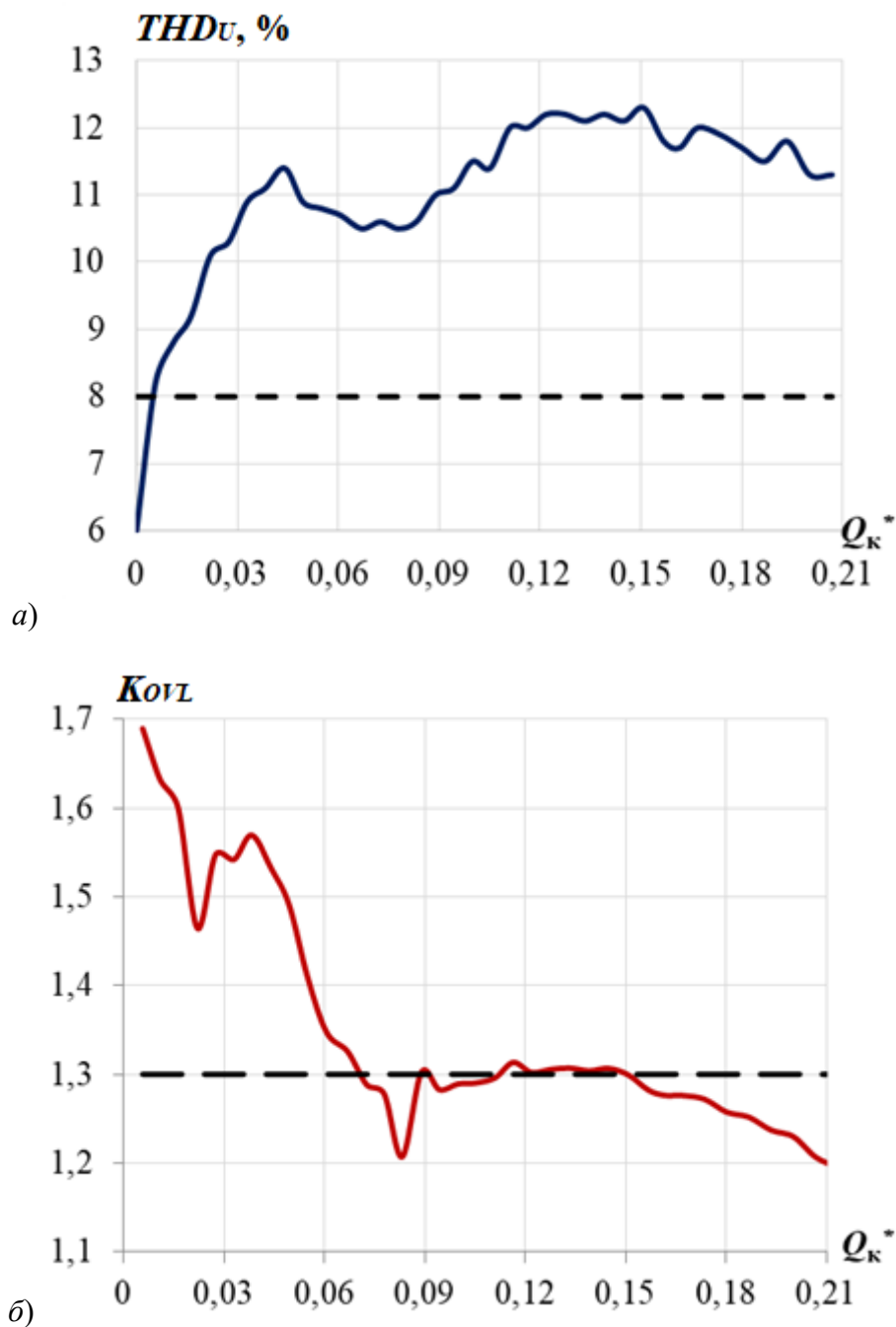


Рисунок 2.20 - Зависимости коэффициентов токовой перегрузки конденсаторов $K_{овЛ}$ (а) и искажения напряжения THD_U % (б) от мощности $Q_{к}^*$ конденсаторов

Установлено, что при мощности конденсаторной установки $Q_k^* < 0,16$ токовая перегрузка конденсаторов высшими гармониками недопустима. Во всем диапазоне изменения Q_k^* коэффициент THD_U имеет величины больше, чем при отсутствии конденсаторов и превышает допустимые пределы.

2.6. Резонансные режимы работы типовых промышленных систем электроснабжения на примере обогатительных фабрик и хвостовых хозяйств с нелинейной нагрузкой и конденсаторными установками

В работе проведено исследование режимов работы типовых промышленных систем электроснабжения на примере обогатительных фабрик и хвостовых хозяйств, приведенные на рисунке 2.21, в которых присутствовали регулируемые мощности преобразовательной нагрузки – НН, линейной нагрузки - ЛН, конденсаторной установки - КБ, подключенные к энергосистеме U посредством трансформаторов T .

На рисунке 2.21 *а* приведена система электроснабжения низкого напряжения, характерная для обогатительных фабрик небольшой мощности.

В схемах рисунка 2.21 *б* и 2.21 *в* НН питается от трансформатора T_2 10/0,4 кВ, а ЛН и КБ подключены к шинам 10 кВ, которые запитаны от трансформатора T_1 110/10 кВ, что присуще для крупных горно-обогатительных комбинатов с хвостовыми хозяйствами, где есть ряд мощных высоковольтных потребителей и большое число низковольтных электроустановок [130, 134, 140].

При имитационном моделировании были приняты следующие допущения: все активно-индуктивные элементы (трансформаторы, линии, нагрузки) учитываются индуктивностью, рассчитанной по индуктивному сопротивлению для первой гармоники. При этом индуктивное сопротивление этих элементов будет увеличиваться пропорционально увеличению номера высшей гармоники. Активные сопротивления элементов сети принимаются неизменными для всех гармоник и соответствующими первой гармонике тока.

При моделировании параметры двухобмоточных трансформаторов определялись по выражению (2.4).

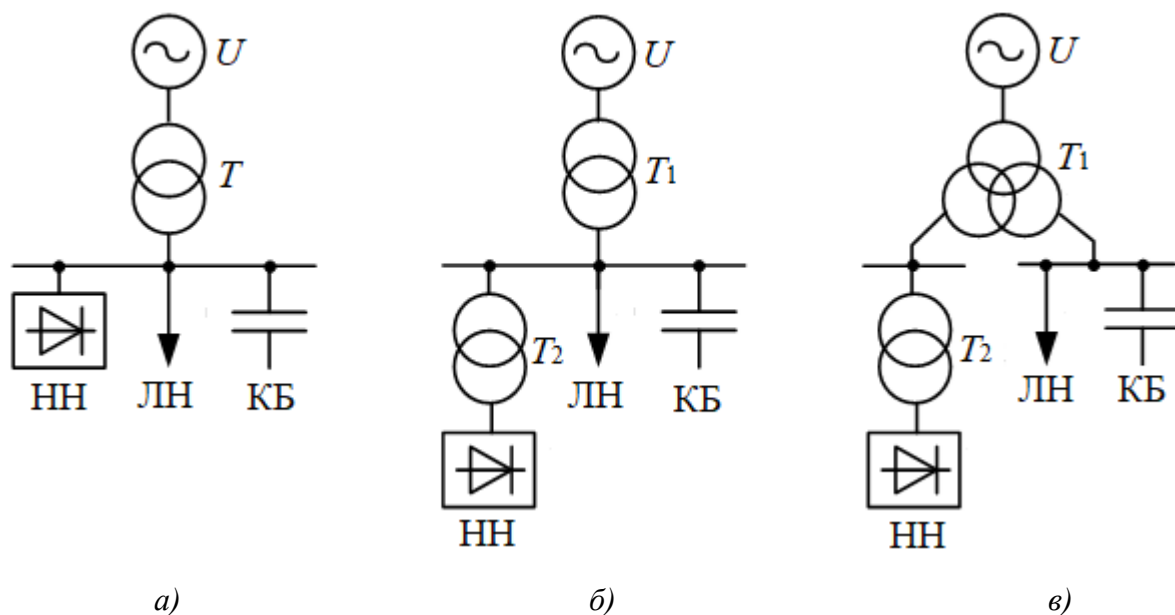


Рисунок 2.21 - Рассматриваемые типовые схемы систем электроснабжения:
 а) – система электроснабжения, в которой включается низковольтная нагрузка малой мощности;
 б) – система электроснабжения, в которой включается ряд мощных высоковольтных потребителей с общей шиной на стороне среднего напряжения;
 в) - система электроснабжения, в которой включается ряд мощных высоковольтных потребителей с расщеплением вторичной обмотки трансформатора на стороне среднего напряжения.

В процессе моделирования параметры трехобмоточных трансформаторов вычислялись по формулам (2.10)-(2.11):

$$L_{ТВ} \approx \frac{U_K}{100} \left(\frac{U_I^2}{314S_T} \right) \left(1 - \frac{k}{4} \right); L_{ТН} \approx \frac{U_K}{100} \left(\frac{U_I^2}{314S_T} \right) \left(\frac{k}{2} \right); \quad (2.10)$$

$$R_{ТВ} \approx 0,5\Delta P_K \left(\frac{U_I^2}{S_T^2} \right); R_{ТН} \approx \Delta P_K \left(\frac{U_I^2}{S_T^2} \right). \quad (2.11)$$

«В формулах (2.10) и (2.11) приняты следующие обозначения: $L_{ТВ}$ и $R_{ТВ}$ – соответственно индуктивность и активное сопротивление обмотки высшего напряжения трансформатора; $L_{ТН}$ и $R_{ТН}$ – соответственно индуктивность и активное сопротивление обмотки низшего напряжения трансформатора; $k = 3,5$

– коэффициент расщепления. Остальные обозначения аналогичны формуле (2.9).

Параметры линейной нагрузки вычислялись по формуле (2.12):

$$Z_{\text{ЛН}} = R_{\text{ЛН}} + jX_{\text{ЛН}} = \frac{U_{\text{T}}^2}{S_{\text{T}} \cdot k_{\text{T}}} \cdot \cos \varphi + j \frac{U_{\text{T}}^2}{314 S_{\text{T}} \cdot k_{\text{T}}} \cdot \sin \varphi \quad (2.12)$$

В формуле (2.12) приняты следующие обозначения: k_{T} – коэффициент загрузки трансформатора; $\cos \varphi = 0,7$ – коэффициент мощности линейной нагрузки; S_{T} – мощность питающего трансформатора, ВА; U_{T} – напряжение вторичной обмотки питающего трансформатора, В.

Емкость конденсаторной батареи определялась следующим образом (2.13):

$$C_{\text{к}} = \frac{Q_{\text{к}}}{314 U_{\text{T}}^2} \quad (2.13)$$

Все регулируемые мощности представлялись в относительных единицах. При этом за базисную величину принята номинальная мощность питающего трансформатора T или T_1 . Это позволяет обобщить полученные результаты для анализа несинусоидальных режимов для всех типовых мощностей трансформаторов, характерных для сетей низкого и среднего напряжения.

Мощность нелинейной нагрузки в относительных единицах [149]:

$$P_d^* = \frac{P_d}{S_{\text{T}}} \quad (2.14)$$

Мощность линейной нагрузки в относительных единицах:

$$S^* = \frac{S}{S_{\text{T}}} \quad (2.15)$$

Мощность конденсаторной батареи в относительных единицах:

$$Q_{\text{к}}^* = \frac{Q_{\text{к}}}{S_{\text{T}}} \quad (2.16)$$

Таким образом, выражения (2.9) – (2.16) являются теоретической основой анализа несинусоидальных режимов методом имитационного моделирования с

использованием параметров реальных промышленных систем электроснабжения» [11].

При моделировании оценивался уровень качества электроэнергии с помощью коэффициента несинусоидальности напряжения THD_U , определялась токовая перегрузка конденсаторов с помощью коэффициенту перегрузки K_{OVL} , определялись относительные величины высших гармоник тока сети при изменении мощностей линейной и нелинейной нагрузок и конденсаторных установок [128, 129, 131, 165].

Результаты моделирования с измерением THD_U и K_{OVL} приведены на рисунках 2.22-2.24.

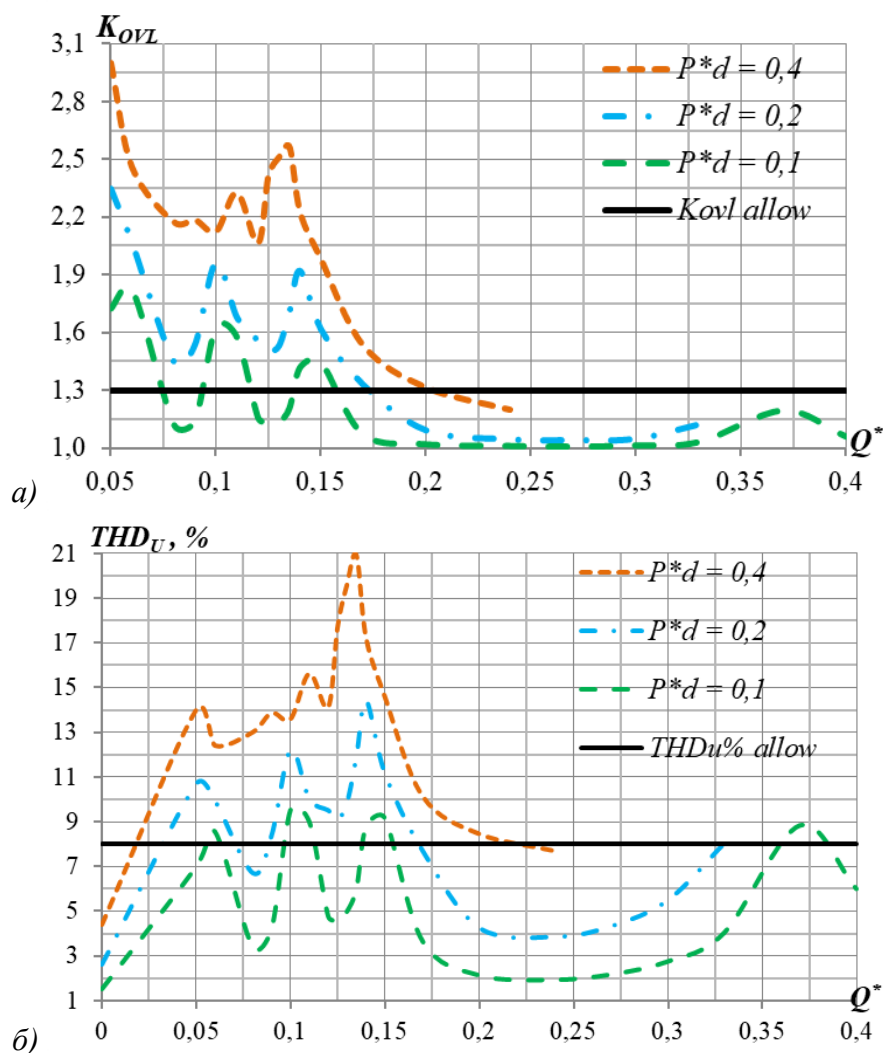
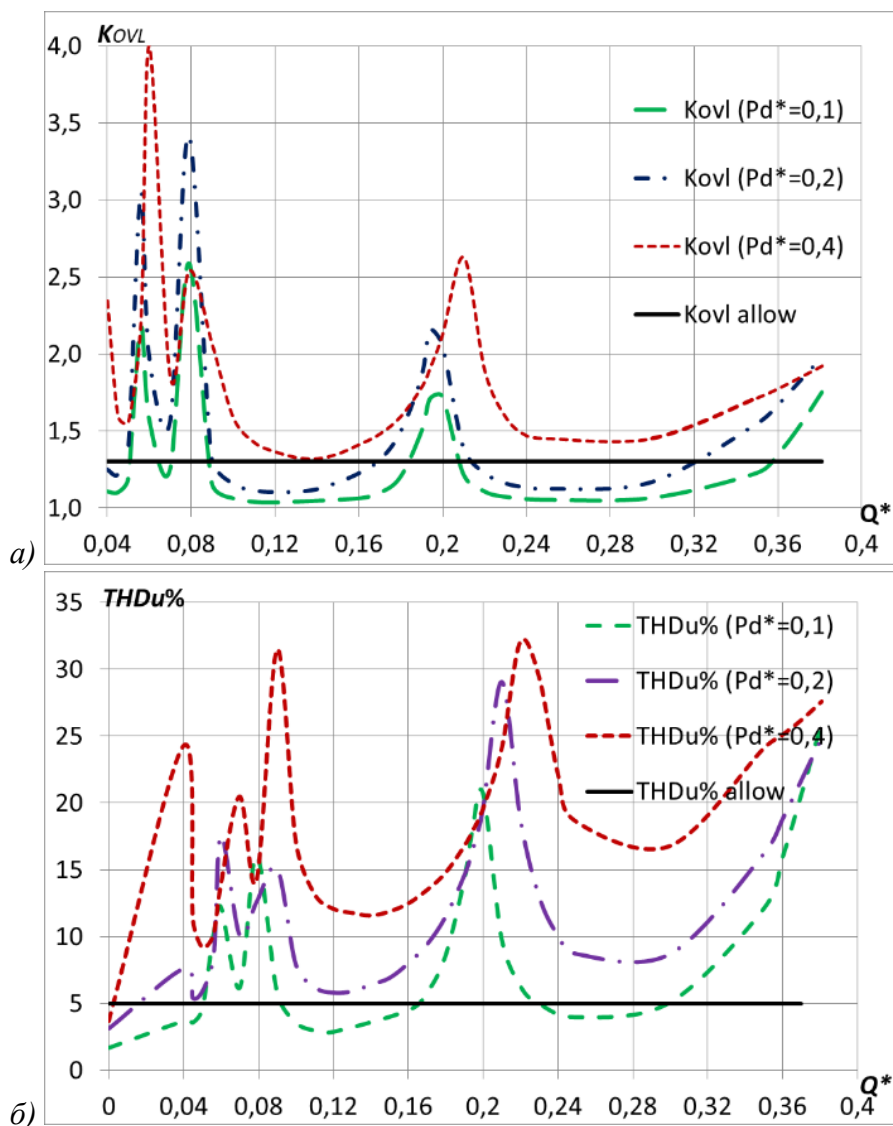


Рисунок 2.22 - Зависимости K_{OVL} и THD_U от мощности Q_k^* для схемы рисунка 2.21 а при мощности трансформатора 1000 кВА [11].

«Установлено, что во всех исследуемых схемах имели место резонансные режимы, в которых параметры THD_U и K_{OVL} значительно превышали допустимые значения» [11]

На рисунке 2.22 приведены результаты моделирования для трансформатора 10/0,4 кВ $S_T = 1000$ кВА. Подтверждена достоверность выражения (2.6) для мощности конденсаторной батареи Q_K^* , при которой достигаются резонансные режимы [6, 60].



«Рисунок 2.23 - Зависимости K_{OVL} и THD_U от мощности Q_K^* для схемы рисунка 2.21 б при мощности трансформатора 10000 кВА» [11].

«Как видно из рисунка 2.22 для низковольтной схемы, показанная на рисунке 2.21 а, очевидны проблемы в области $Q_K^* < 0,2$ и $Q_K^* > 0,35$, где

величины коэффициентов THD_U и K_{OVL} намного больше нормируемых значений уже при мощности нелинейной нагрузки $P_d^* > 0,1$ » [11].

На рисунке 2.23 приведены зависимости рассматриваемых коэффициентов K_{OVL} и THD_U для схемы двухобмоточного трансформатора T_1 110/10 кВ мощностью 10000 кВА с подключенными высоковольтными конденсаторными установками, приведенной на рисунке 2.21 б.

«В этом режиме работы сети перегрузка конденсаторов в резонансных режимах превышает допустимую ($K_{OVL} > 1,3$) при $P_d^* > 0,2$. Кроме того, качество напряжения не соответствует нормам во всем диапазоне изменения мощности конденсаторной установки Q_K^* ($THD_U > 5\%$)» [11].

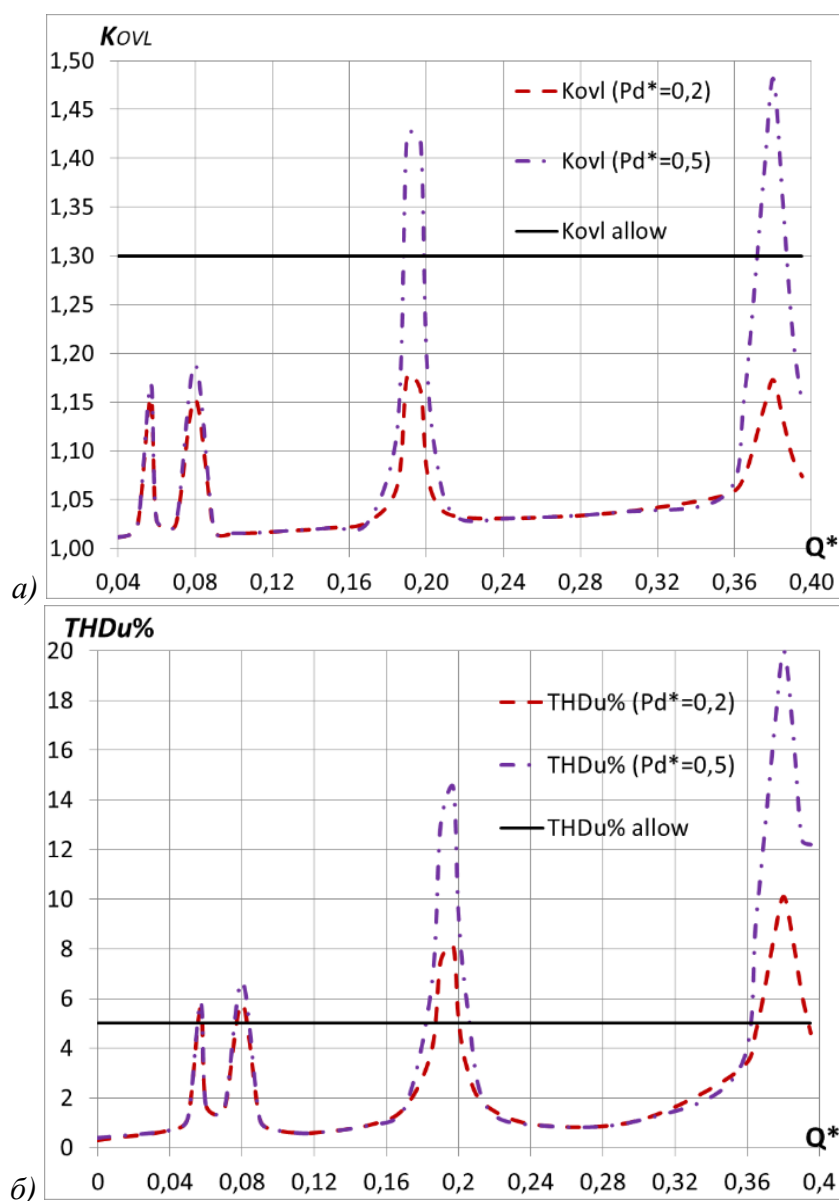


Рисунок 2.24 - Зависимости K_{OVL} и THD_U от мощности Q_K^* для схема рисунка 2.19 в трансформатора T_1 напряжением 110/10 кВ, мощностью 25000 кВА [11].

На рисунке 2.24 приведены зависимости рассматриваемых коэффициентов K_{OVL} и $THDU$ для схемы с расщепленной вторичной обмоткой трансформатора T_1 мощностью 40000 кВА напряжения 110/10 кВ с подключенными высоковольтными конденсаторами, приведенной на рисунке 2.21 в.

По результатам анализа полученных зависимостей на рисунках 2.22-2.24 выявлено, что для схемы рисунка 2.24 в резонансных режимах: недопустимая токовая перегрузка конденсаторов достигается при $P_d^* > 0,5$, недопустимый уровень качества напряжения при $P_d^* > 0,2$. В межрезонансных режимах отсутствуют проблемы как с токовой перегрузкой конденсаторов, так и с качеством напряжения при мощности нелинейной нагрузки $P_d^* > 0,5$.

По результатам исследования зависимостей коэффициентов K_{OVL} и $THDU$ для типовых схем промышленных систем электроснабжения, приведенных на рисунках 2.22 – 2.24, было выявлено, что, поскольку конденсаторная установка, регулируемая по мощности, то для всех схем электроснабжения можно определить относительные мощности конденсаторов, на которых будут возникать резонансные явления. Соответственно, в таких режимах необходимо применять технические средства и решения по компенсации высших гармоник тока и напряжения с целью защиты конденсаторов от токовой перегрузки и снижения гармонического искажения напряжения, которые необходимо выбирать с учетом выявленных закономерностей вариации параметров несинусоидальных режимов [86, 88, 92, 149, 161-164].

2.7. Выводы к главе 2

1. Выполнено моделирование режимов работы типовых схем электроснабжения промышленных систем электроснабжения различной конфигурации, напряжения и мощности, включающих изменяющиеся в течение суток мощности линейной и нелинейной нагрузок и регулируемой конденсаторной установки.

2. Для всех исследованных схем определены относительные значения мощностей регулируемых конденсаторных установок, при которых возникают резонансные режимы на частотах характерных гармоник, обусловленных работой нелинейной нагрузки, что приводит к недопустимой токовой перегрузке конденсаторов (коэффициент перегрузки более 1,3), ненадлежащему уровню качества напряжения узла нагрузки, а также вариации амплитуд гармоник тока нелинейной нагрузки.

3. Показано, что при математическом и имитационном моделировании систем электроснабжения имеющуюся нелинейную нагрузку необходимо представлять в виде источников тока ограниченной мощности, а не бесконечной мощности, как указывается во многих отечественных и зарубежных научных работах. При этом мощность таких источников необходимо выбирать исходя из мощностей нелинейной нагрузки и питающего силового трансформатора.

4. Полученные по результатам физического, математического и компьютерного имитационного моделирования зависимости и ограничения могут рассматриваться в качестве теоретической основы моделирования и анализа несинусоидальных режимов в промышленных системах электроснабжения с резонансными явлениями.

ГЛАВА 3 АНАЛИЗ ОСНОВНЫХ ТИПОВ ФИЛЬТРОКОМПЕНСИРУЮЩИХ УСТРОЙСТВ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

3.1. Классификация фильтрокомпенсирующих устройств

В научных трудах отечественных и зарубежных ученых рассмотрены различные технические средства и решения для компенсации высших гармоник тока и напряжения, а также для предотвращения возникновения резонансных явлений с целью повышения качества электроэнергии и недопущения токовой перегрузки конденсаторов.

Известными традиционными способами подавления высших гармоник тока в системе электроснабжения являются [1, 115, 152]:

- Схемные решения рационального построения распределительной сети с нелинейной нагрузкой;
- Антирезонансные дроссели и сглаживающие реакторы в цепи конденсаторов;
- Пассивные фильтрокомпенсирующие установки;
- Активные фильтры гармоник;
- Гибридные фильтрокомпенсирующие устройства.

На рисунке 3.1 приведены схемы трехфазных выпрямителей с различной пульсностью m , работающие на нагрузку R_H .

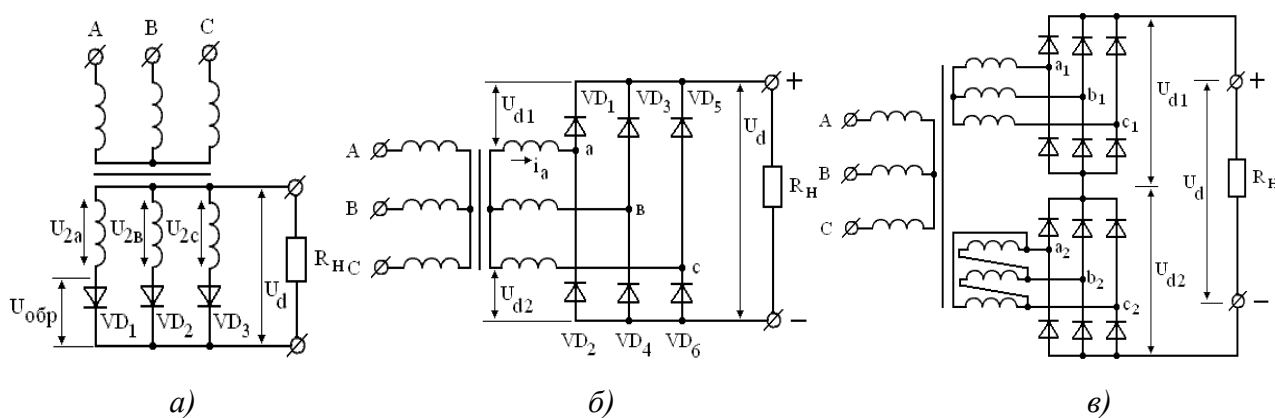


Рисунок 3.1 - Схемы выпрямителей с пульсностью m :

- а) нулевая схема выпрямителя, $m = 3$
- б) трехфазная мостовая схема выпрямителя, $m = 6$
- в) двенадцатипульсная схема выпрямителя, $m = 12$

Рассмотрим основные структурные и схемные решения построения распределительной сети с нелинейной нагрузкой. Одним из направлений здесь является увеличение числа фаз вентильных преобразователей.

Известно, что в трехфазных схемах преобразования электроэнергии кривая первичного тока выпрямителя кроме основной гармоники содержит высшие гармоники, порядок n которых определяется пульсностью схемы.

Поскольку величина n -й гармоники по отношению к величине первой I_1 гармоники (1.19), очевидно, что с увеличением пульсности амплитуды гармоник уменьшаются, а номера низших гармоник в их спектре увеличиваются. В схеме рисунка 3.1. *а* в сеть пойдут гармоники, начиная со 2-й, в схеме рисунка 3.1. *б* – начиная с 5-й, а в схеме рисунка 3.1. *в* – начиная с 11-й. Однако при увеличении пульсности увеличивается количество вентилей преобразователя и, соответственно, его стоимость, а при пульсности $m = 12$ требуется более сложный и дорогой питающий трансформатор с двумя вторичными сдвинутыми на 30° обмотками.

Среди других схемных решений можно отметить:

- электроснабжение нелинейной нагрузки от отдельной обмотки трехобмоточного трансформатора или подключение ее к питающей сети через отдельный силовой трансформатор;
- соединение обмоток питающих трансформаторов по схеме звезда-треугольник (Y/Δ).

Схема с разделением линейной и нелинейной нагрузок на разные секции шин показана на рисунке 2.21 *в* в главе 2. Результаты моделирования режимов работы схемы на рисунке 2.24. Сравнивая результаты моделирования на рисунках 2.22-2.24 для разных типовых схем электроснабжения видно, что разделение этих нагрузок позволяет улучшить качество электроэнергии, однако с ростом доли нелинейной нагрузки и при резонансном режиме работы коэффициенты несинусоидальности по току и напряжению превышали допустимые значения.

При соединении обмоток трансформаторов Y/Δ гармоники тока, кратные трем и образующие нулевую последовательность, в питающую сеть поступать не будут, однако будут растекаться по питаемой сети низшего напряжения.

Подавление высших гармоник и снижение их влияния на токовую перегрузку конденсаторных батарей может быть достигнуто расстановкой в системе электроснабжения дополнительных реакторов (дресселей) [133, 152]. Сущность этого подхода заключается в изменении амплитудно-частотной характеристики сети относительно батареи конденсаторов с целью ухода от резонансных явлений. С позиции дополнительных затрат этот способ существенно экономичнее, чем применение активных и пассивных фильтров.

В работе [152] дополнительные реакторы размещались со стороны источника питания X_{p1} , в цепи, питающей часть линейной нагрузки, нелинейную нагрузку и конденсаторную батарею X_{p2} и в цепи конденсаторной батареи X_{p3} , что показано на рисунке 3.2.

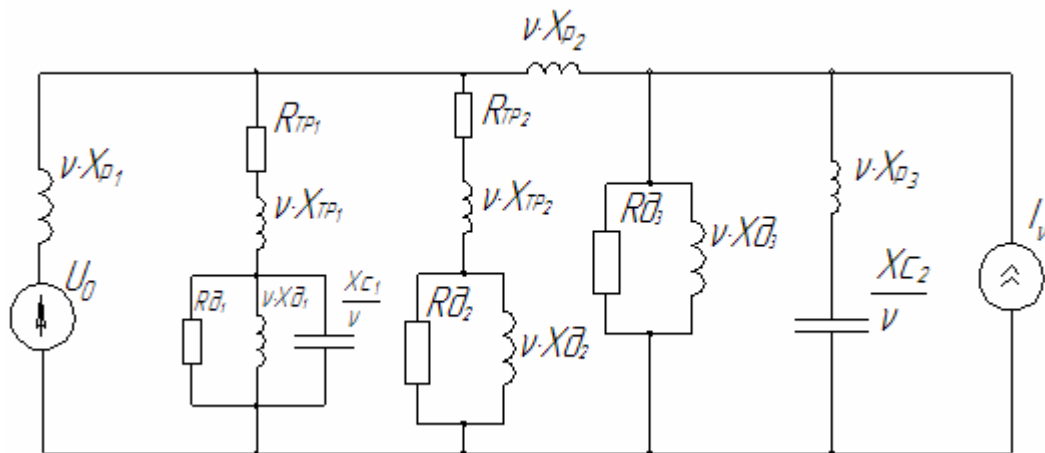


Рисунок 3.2 - Размещение реакторов X_{p1} , X_{p2} и X_{p3} в однофазной схеме

Последовательное включение с каждой ступенью конденсаторной батареи антирезонансного дросселя позволяет избежать появления резонансного или близкого к нему режима за счет смещения собственной частоты f_R контура «дроссель-конденсаторная батарея» ниже частоты наименьшей гармоники, при которой может возникнуть резонанс.

Вносимый фильтрующим дросселем коэффициент частотной расстройки определяется по выражению (3.1) [109]:

$$p = (f_1/f_R)^2 \cdot 100\%, \quad (3.1)$$

где f_1 – основная частота 50 Гц.

Принятые *VDEW* (*Association of German Power Supply Companies*) стандартные величины $p = 14\%$, 7% , $5,67\%$ и соответствуют собственной частоте $f_R = 134$ Гц, 189 Гц, 210 Гц [109]. Частота расстройки 134 Гц применяется для защиты конденсаторов от всех гармоник, начиная с 3-й; частота расстройки 189 Гц и 210 Гц – от всех гармоник, начиная с 5-й.

Поскольку частота расстроенной системы (трансформатор-дроссель-конденсаторная батарея) расположена ниже выбранного значения f_R , для присутствующих в компенсируемой цепи гармоник результирующее сопротивление системы $X = X_L - X_C$ будет индуктивным, исключая возможность резонанса на частотах высших гармоник, а на основной частоте $f_1 = 50$ Гц система будет функционировать как емкостная, обеспечивая компенсацию реактивной мощности.

Как видно из рисунка 3.3 при коэффициенте частотной расстройки $p = 7\%$ результирующее сопротивление системы X после частоты 189 Гц будет иметь индуктивный характер.

При использовании антирезонансных дросселей следует учитывать повышение напряжения на конденсаторной батарее, обусловленное суммированием напряжения питающей сети U_C и падения напряжения на дросселе U_L (3.2):

$$U_{КБ} = U_C + U_L = U_C / (1 - p). \quad (3.2)$$

Таким образом, в зависимости от выбранного значения p , номинальное напряжение батареи конденсаторов должно быть увеличено на 10-20 %.

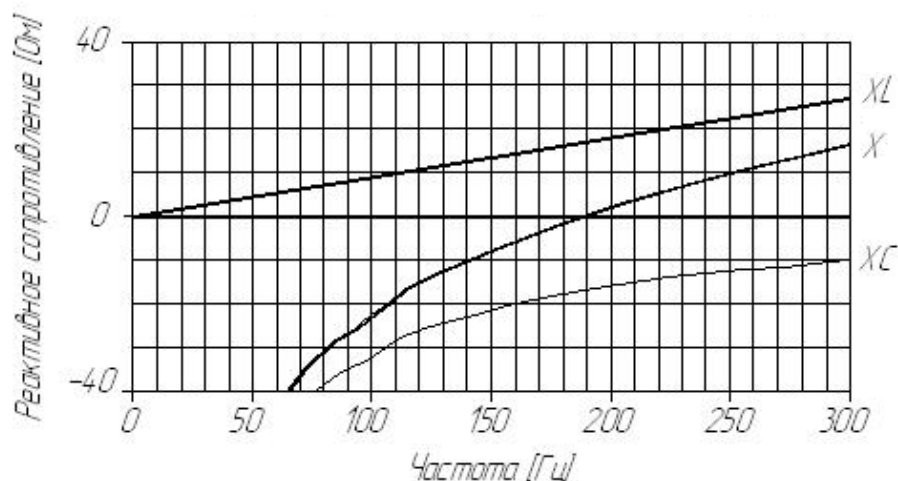


Рисунок 3.3 - Изменение сопротивлений в системе при увеличении частоты при коэффициенте частотной расстройки $p = 7\%$

Антирезонансные дроссели являются наиболее экономичным способом снижения токовой перегрузки конденсаторов, по сравнению с установкой в фильтрокомпенсирующих устройств, поскольку позволяют устранить резонансный контур на частотах высших гармоник и тем самым не допускают их усиления на резонансной частоте [133, 152]. Однако для эффективного использования антирезонансных дросселей необходимо правильно определить источник высших гармоник и его вклад в искажение форм тока и напряжения, что является актуальной научно- исследовательской задачей [152].

Общий вид конденсаторной установки на низкое напряжение 0,4 кВ с антирезонансным дросселем показан на рисунке 3.4.



Рисунок 3.4 - Общий вид конденсаторной установки с антирезонансными дросселями

В технической литературе [161-164] приводятся результаты исследований, которые показали, что не рекомендуется совместная работа активных фильтров и конденсаторных установок, даже, если они располагаются на разных ступенях напряжения, поскольку активные фильтры имеют низкую эффективность компенсации гармоник при резонансных явлениях. Установка антирезонансных дросселей решает эту проблему.

Эффективность применения антирезонансных дросселей иллюстрируется осциллограммами тока и напряжения на конденсаторной установке, приведенные на рисунке 3.5.

«Осциллограмма на рисунке 3.5 *а* соответствует резонансному режиму работы сети на 11 гармонике при отсутствии антирезонансных дросселей с параметрами сети: $S_T = 1000$ кВА, $P_d = 400$ кВт, $P_{ЛН} = 300$ кВт, $Q_{ЛН} = 300$ квар, $Q_K = 150$ квар.

Осциллограмма на рисунке 3.5 *б* соответствует резонансному режиму работы сети на 11 гармонике с такими же параметрами сети, но при включении антирезонансного дросселя» [11].

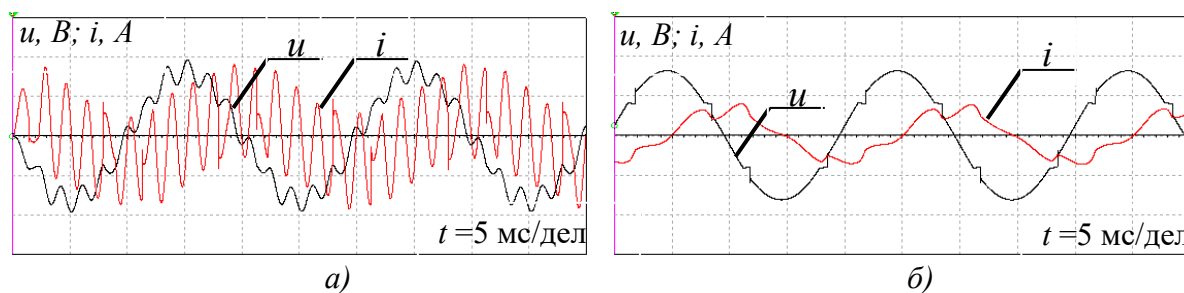


Рисунок 3.5 - Осциллограммы тока (красный сигнал) и напряжения (синий сигнал) на конденсаторной батарее в схеме рисунка 2.19, *а* –резонансный режим на 11 гармонике при отсутствии антирезонансных дросселей; *б* – то же, но с антирезонансными дросселями [11].

По рисунку 3.5 видно, что при отсутствии антирезонансных дросселей коэффициенты токовой перегрузки $K_{OVL} = 2,1$ и искажения напряжения $THD_U = 15,6$ % недопустимы. При включении антирезонансного дросселя удается избежать усиления высших гармоник тока и напряжения, тем самым

рассматриваемые коэффициенты $K_{OVL} = 1,08$, $THD_U = 3 \%$ снижаются до допустимых значений. Коэффициент $THD_U = 3 \%$ имел такое же значение при отсутствии конденсаторов и обусловлен величиной нелинейной нагрузки. Получается, что антирезонансный дроссель нивелирует увеличения величин амплитудных гармоник напряжения при включении конденсаторных установок, однако он не способен обеспечить нормируемые показатели качества электроэнергии в случае, когда искажения тока и напряжения связаны с высокой долей нелинейной нагрузки от номинальной мощности питающего трансформатора, а не с наличием резонансного режима сети.

Пассивные и активные фильтрокомпенсирующие устройства (пассивные и активные ФКУ) выполняют компенсацию высших гармоники и реактивной мощности в сети [110-112]. На рисунке 3.6 приведена классификация фильтрокомпенсирующих устройств.

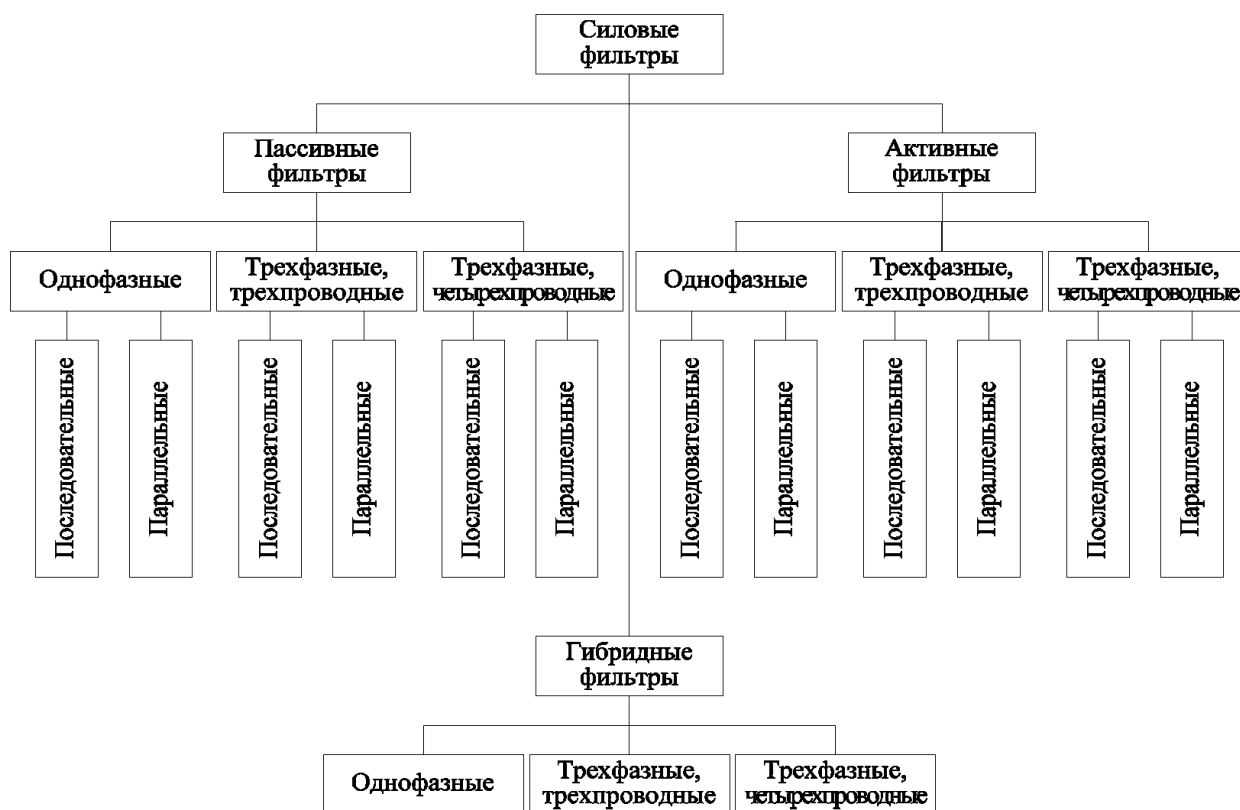


Рисунок 3.6 - Классификация фильтрокомпенсирующих устройств

Пассивные фильтры имеют структуру, состоящую из пассивных элементов (емкости C и индуктивности L) [32, 92, 109]. Параллельная или

последовательная LC -цепь настраивается на частоту одной из высших гармоник и представляет для нее очень большое или очень малое сопротивление.

Общий вид одного трехфазного комплекта пассивного фильтрокомпенсирующего устройства показан на рисунке 3.7.



Рисунок 3.7 - Общий вид пассивных фильтров

Существуют различные схемы включения пассивных фильтров:

- последовательное включение;
- параллельное включение.

Последовательные пассивные фильтры рассчитываются на полную мощность нелинейной нагрузки, что обуславливает их значительные габариты. Кроме того, повреждение одного фильтра приведет к отказу всего присоединения.

Пассивные фильтры с параллельным включением имеют меньшую мощность и, соответственно меньшие габариты и стоимость, чем последовательные. Кроме того, параллельные пассивные фильтры используются и для компенсации реактивной мощности на основной частоте.

Широкое применение пассивных фильтрокомпенсирующих устройств связано с тем, что они могут обеспечивать достаточный уровень качества электроэнергии сети при относительно низких затратах на их установку и эксплуатацию [31, 84]. Однако, эти устройства имеют ряд недостатков,

связанные с сложностью настройки параметров и компенсируемых частот блока фильтров после его установки в сети и необходимость учета конфигурации сети для недопущения резонансного режима между ней и фильтром

Альтернативой пассивным компенсирующим устройствам являются активные (АФ) и гибридные фильтры [104]. Это современные адаптивные полупроводниковые устройства на IGBT-транзисторах, работа которых осуществляется за счет методов управления состоянием транзисторных элементов фильтра. Они компенсируют высшие гармоники, осуществляют коррекцию коэффициента мощности, обеспечивают симметрию фазных напряжений, уменьшает глубину и длительность провалов напряжения в зависимости от режима сети и характера нагрузки [92].

Гибридные фильтрокомпенсирующие устройства состоят из комбинации активных и пассивных фильтров, что позволяет совместить достоинства этих двух устройств. Конфигурация гибридного фильтра позволяет повысить компенсационные характеристики активного фильтра за счет фильтрацией ее пассивной частью гармоник сети с наибольшей амплитудой, либо она позволяет осуществлять управление параметрами и характеристиками пассивных устройств за счет адаптивности ее активной части [92].

3.2. Пассивные фильтрокомпенсирующие устройства

Пассивные фильтрокомпенсирующие устройства представляют собой пассивную частотно-селективную цепь, которая позволяет уменьшить амплитудные значения высших гармоник и повысить коэффициент мощности сети [32, 92].

Они не требуют регулярной диагностики и технического обслуживания, относительно активных средств коррекции имеют небольшую капитальную стоимость, однако являются статическими устройствами, на эффективность которых влияют параметры сети и спектральный состав токов и напряжений.

Также между параметрами фильтра и питающей сети может образовываться параллельный колебательный контур на резонирующих частотах высших гармоник. Это ограничивает область применения пассивных фильтрокомпенсирующих устройств.

Для описания режимов работы сети при включении пассивных фильтров систему электроснабжения можно представить в виде Г-образного четырехполюсника, показанный на рисунок 3.8, который описывается уравнением (3.3):

$$\begin{bmatrix} \frac{I_c}{U_{\text{топ}}} \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} F_{11} & F_{12} \\ F_{21} & F_{22} \end{pmatrix} \begin{bmatrix} E_k \\ J_k \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

где E_k и J_k – источники гармоник со стороны сети и нагрузки, $F_{ij}(j\omega)$ – характеристики четырехполюсника, определяющие параметры схемы замещения и коэффициенты передачи ей k -ой гармоники тока и напряжения в сеть.

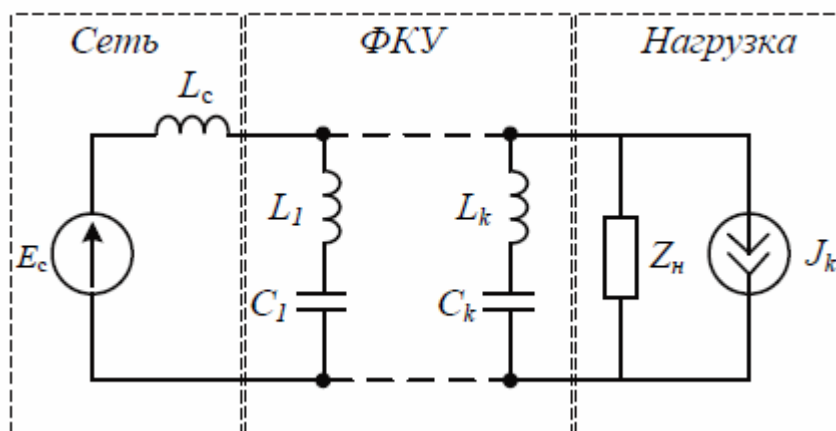


Рисунок 3.8 - Г-образная схема замещения сети при включении пассивных фильтров

Анализ параметров Г-образной схемы замещения показывает, что качество фильтрации гармоник зависит не только от параметров фильтра, но и питающей сети. Наибольший эффект фильтрации гармоник достигается при равенстве нулю значений коэффициента $F_{ij}(j\omega)$ на частоте фильтруемой гармоники тока и напряжения.

Пассивные фильтры гармоник классифицируют по следующим признакам [32, 92]:

1. Порядок фильтра, который определяется числом индуктивных и емкостных элементов;
2. Характер включения: параллельно или последовательно узлу нагрузки или их комбинированная схема включения;
3. Число фаз;
4. Частотный диапазон: узкополосные и широкополосные фильтры.

Основные конфигурации пассивных фильтров приведены на рисунке 3.9.

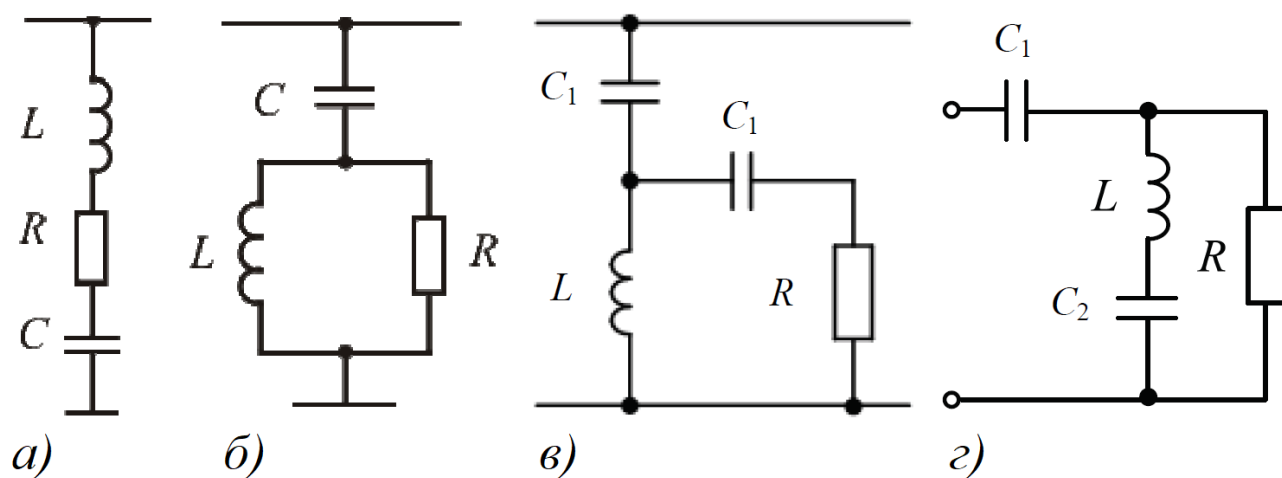


Рисунок 3.9 - Основные конфигурации пассивных фильтрокомпенсирующих устройств:

- а) Узкополосный фильтр
- б) Широкополосный фильтр 2-го порядка
- в) Широкополосный фильтр 3-го порядка
- г) Фильтр С-типа

Узкополосный фильтр (рисунок 3.9, а) – последовательный колебательный контур, настроенный на подавление одной гармоники и на компенсацию реактивной мощности на основной частоте тока сети.

Резонансная частота гармоники f_r , подавляемая узкополосным фильтром, определяется по формуле (3.4):

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (3.4)$$

где L - индуктивность фильтра, C - емкость фильтра.

Фильтр гармоник генерирует реактивную мощность, которая определяется по выражению (3.5):

$$Q_{LC} = \frac{n^2}{n^2 - 1} Q_K \quad (3.5)$$

где n – номер гармоники, на которую фильтр настроен,

Q_K – реактивная мощность конденсаторов фильтра.

Фильтр настраивается таким образом, чтобы на резонансной частоте иметь наименьшее сопротивление. Тогда резонирующая гармоника замкнется на этот фильтр. Эффективность работы фильтра определяется его добротностью q , которая рассчитывается по выражению (3.6):

$$q = \frac{X_0}{r} \quad (3.6)$$

где q – добротность резонансного контура,

X_0 – реактивное сопротивление резонансного контура,

r – активное сопротивление резонансного контура.

Зависимость сопротивления фильтра от частоты сети показана на рисунке 3.10.

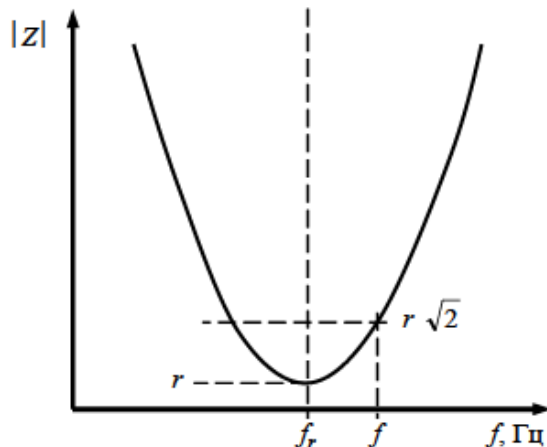


Рисунок 3.10 - Зависимость сопротивления фильтра от частоты сети

Чем выше добротность, тем более эффективен фильтр гармоник. Для узкополосных фильтров $q = 30 \dots 50$. Также фильтр определяется полосой пропускания- полоса частот, на которой изменение сопротивления фильтра в зависимости от них, уменьшает величину компенсации гармоники тока или напряжения не более чем в $\sqrt{2}$ раз по сравнению с гармоникой тока или напряжения, на которую был настроен фильтр, что видно по рисунку 3.10.

Поэтому фильтр могут настроить на частоту, которая немного меньше, чем частота подавляемой гармоники (такие фильтры называются расстроенными пассивными фильтрами).

Полоса пропускания в относительных единицах определяется по выражению (3.7):

$$\Delta = \frac{1}{q} = 2 \frac{f - f_r}{f_r} = \frac{r}{X_0} \quad (3.7)$$

где Δ – ширина полосы пропускания фильтра.

Следовательно, чем больше добротность фильтра, тем меньше его полоса пропускания.

При фильтрации гармоники, например, 7-ой гармоники напряжения, близко к которой находится 5-я гармоника напряжения, необходима установка секции из двух узкополосных фильтров, настроенных на обе эти гармоники. Это связано с тем, что узкополосный фильтр имеет частоту антирезонанса, которая меньше частоты настройки фильтра. На частоте антирезонанса увеличивается сопротивление фильтра, что приводит к усилению гармоники напряжения, совпадающей с ним по частоте. Получается, что при фильтрации только 7-й гармоники напряжения фильтр может создать антирезонанс на частоте 5-й гармоники, тем самым усилив ее и нивелируя свои фильтрующие функции.

Поскольку основной источник гармоник- преобразователь частоты, который генерирует канонические гармоники 5, 7, 11, 13..., то для их фильтрации подключают блок узкополосных фильтров, каждый из которых настроен на частоту одной из них. На рисунке 3.11. показана амплитудно-частотная характеристика сопротивления сети при включении четырех фильтров, настроенных на 5, 7, 11 и 13-ю гармоники. По рисунку 3.11 наблюдается рост величины сопротивления сети между частотами канонических гармоник. Для снижения этого роста рекомендуется применять демпфирующий фильтр, который представляет соединение узкополосного фильтра с параллельно подключенным к нему активным сопротивлением.

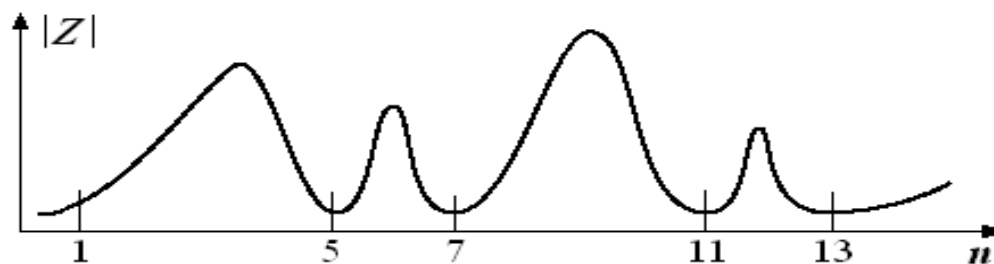


Рисунок 3.11 - Зависимость сопротивления сети при включении блока из четырех пассивных фильтров

С увеличением порядка гармоники эффективность узкополосного фильтра снижается. Установка блока этих фильтров на компенсацию величин гармоник $n > 10$ может оказаться экономически нецелесообразным. Поэтому для подавления нескольких гармоник применяют широкополосные фильтры второго и третьего порядка, показанные на рисунках 3.9 б, и 3.9 в. Добротность такого фильтра находится в диапазоне 0,5-5, что увеличивает его полосу пропускания. Однако, основным его недостатком, по сравнению с узкополосным, является высокие потери мощности на частоте основной гармоники тока. Для уменьшения потерь используют конфигурации широкополосных фильтров третьего порядка, показанного на рисунке 3.9 в или фильтра С-типа, показанного на рисунке 3.9 г [32, 92].

В исследованиях [32, 92] показано, что при проектировании блока пассивного фильтрокомпенсирующего устройства, состоящего из нескольких узкополосных фильтров, фильтры 11, 13-й гармоник этой структуры можно заменить на широкополосный фильтр, что позволяет демпфировать величину АЧХ сети близких и выше частот, повысить эффективность ослабления гармоник $n > 10$. Однако при этом несколько ухудшается результат по снижению уровня коэффициентов гармонического искажения тока и напряжения сети.

В работе проведен анализ работы пассивного фильтрокомпенсирующего устройства для типовой схемы электроснабжения горного предприятия.

Методика расчета и выбора структуры блока пассивного фильтра показана в работе [12, 31, 92]. В качестве структуры выбрана вторая схема Форестера, показанная на рисунке 3.12.

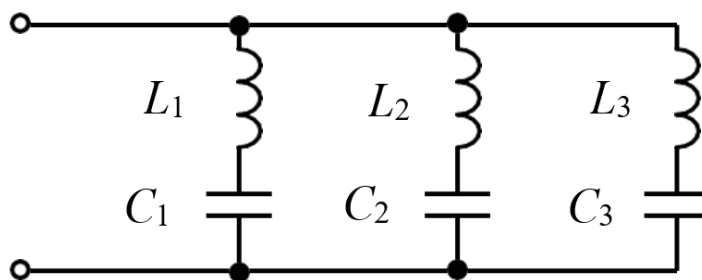


Рисунок 3.12 - Вторая каноническая схема Фостера

Расчет параметров блока фильтра в соответствии с второй канонической схемой Фостера, а также имитационное моделирование его работы в сети электроснабжения представлены в главе 4.

Таким образом, главным недостатком пассивного фильтрокомпенсирующего устройства является невозможность одновременного выполнения им плавного регулирования величины реактивной мощности сети и обеспечения требуемого уровня качества электроэнергии. Также для проектирования пассивного фильтра необходим длительный тщательный анализ конфигурации сети для выбора его оптимальной структуры и параметров. После этого необходимо учесть взаимное влияние параметров фильтра и сети, к которой он подключен, на возможность образования между ними резонансных контуров. После чего необходимо определить возможные токовые перегрузки фильтра из-за увеличения нелинейной нагрузки с повышенным содержанием гармоник и появления других источников искажений из внешней сети. Помимо этого, в сети могут протекать неканонические и аномальные гармоники, частота которых может совпадать с одной из частот антирезонанса блока пассивного фильтра, что приведет к усилению искажений тока и напряжения.

3.3. Активные фильтрокомпенсирующие устройства

С описанными в главе 3.2 недостатками пассивного фильтрокомпенсирующего устройства справляются при определенных условиях активные фильтрокомпенсирующие устройства [33-36].

Активные фильтры (АФ) являются современными полупроводниковыми управляемыми устройства на IGBT- транзисторах, которые, в отличие от пассивных фильтров, устраняют весь спектр гармоник (до 50-й включительно) в несинусоидальном сигнале тока и напряжения, тем самым, снижая уровень электромагнитных помех и обеспечивая качество электроэнергии в распределительной сети. Также активные фильтры могут осуществлять плавное регулирование потребления и генерации реактивной мощности, обеспечивать симметрию фазных напряжений, уменьшает глубину и длительность провалов напряжения в электросети [33-36, 115, 116].

Активные фильтры гармоник классифицируют по следующим признакам:

1. По типу инвертора: с индуктивным или емкостным накопителем;
2. По числу фаз;
3. По способу включения: последовательные, параллельные, комбинированные схемы включения относительно узла нагрузки;
4. Формирование компенсирующего сигнала: в частотной или во временной областях.

Активные фильтры представляет собой инвертор напряжения с выходным сглаживающим фильтром и накопительным элементом, который включается либо параллельно нагрузке (параллельный АФ), либо последовательно в рассечку линии через обмотку трансформатора (последовательный АФ). АФ компенсирует гармоники тока или напряжения за счет генерации с помощью накопительного элемента тока или напряжения заданного гармонического спектра в противофазе с ними. Сглаживающий фильтр необходим для снижения пульсаций выходного сигнала активного фильтра. Генерирование тока или напряжения осуществляется

микропроцессорным устройством управления транзисторными элементами в режиме широтно- импульсной модуляции (ШИМ). ШИМ формирует импульсы управления путем сравнение опорного пилообразного напряжения с модулирующим сигналом, частота которого равна частоте выходного напряжения, что видно на рисунке 3.13 [115, 116]. В результате возможно получить выходной сигнал с желаемыми параметрами амплитуды и частоты.

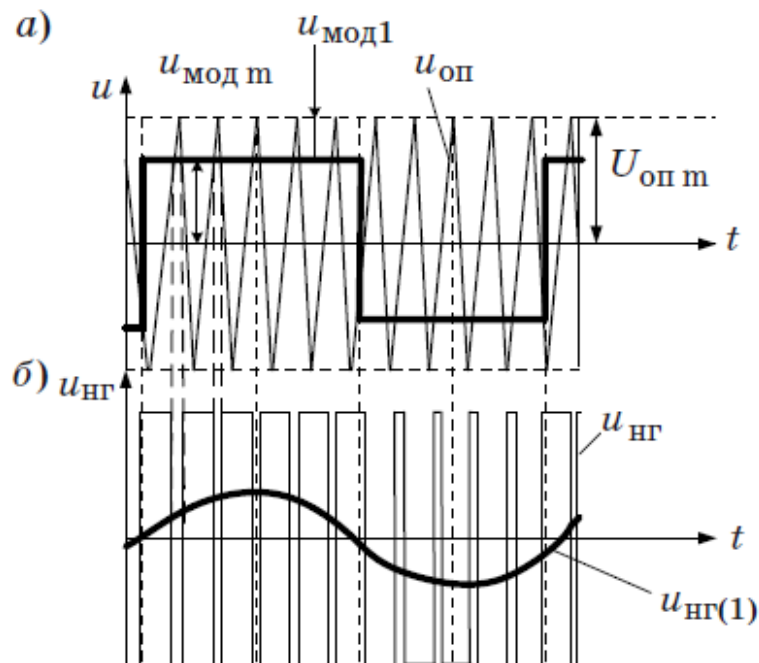


Рисунок 3.13 - ШИМ при прямоугольной форме модулирующего сигнала:

а – моделирующее и опорное напряжение; *б* – напряжение нагрузки

Последовательный АФ, приведенный на рисунке 3.14 представляет собой независимый источник переменного напряжения, который компенсирует гармонические искажения напряжения, исправляя тем самым искаженную форму напряжения.

Последовательный АФ может применяться и для изоляции чувствительный потребителей от искажений напряжения, независимо от природы их возникновения [116]. Несмотря на свои технические преимущество- непосредственное воздействие на гармонические составляющие напряжения сети и возможность регулировать напряжение у потребителя, такая схема АФ не получило широкого технического применения из-за сложности

подключения к сети и высокой стоимости, т.к. мощность последовательного АФ рассчитывается по полному току нагрузки.

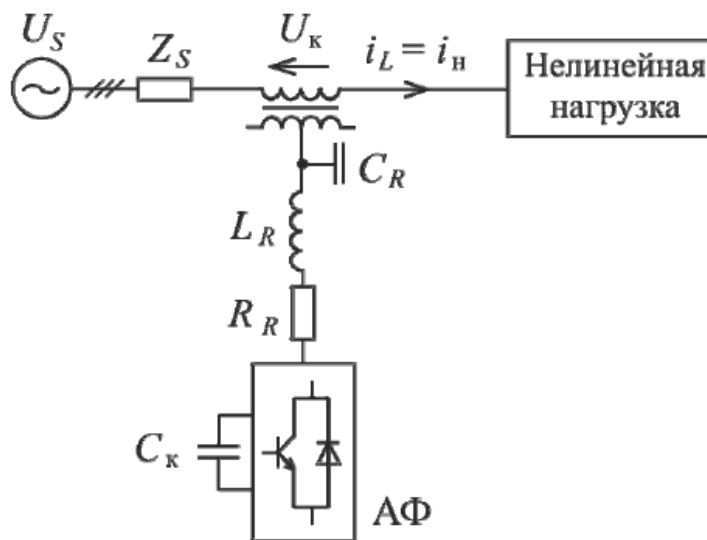


Рисунок 3.14 - Структурная схема последовательного АФ

Параллельный активный фильтр (ПАВ), приведенный на рисунке 3.15 представляет собой управляемый источник тока, корректирующий гармонические составляющие тока сети и тем самым, улучшая форму кривой напряжения, которая была искажена из-за протекания по элементам системы токов высших гармоник.

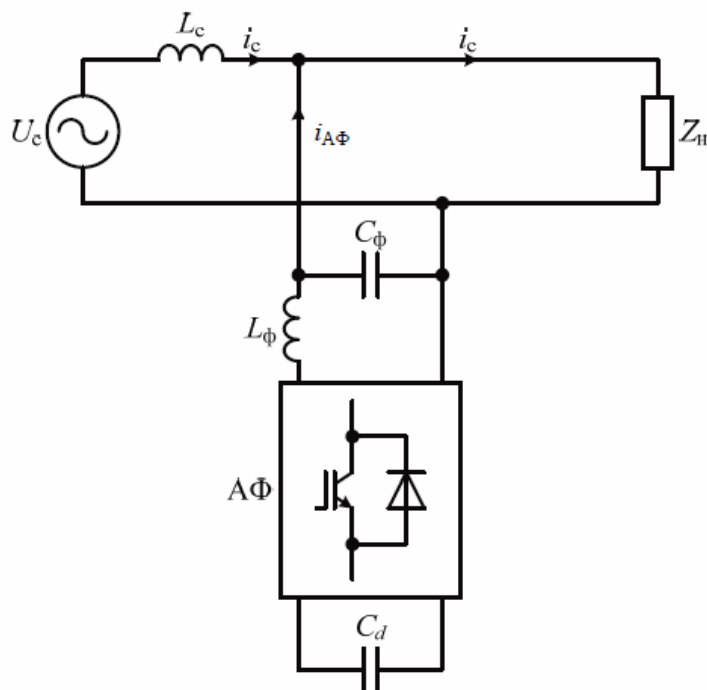


Рисунок 3.15 - Структурная схема параллельного АФ

ПАФ подключается параллельно с нагрузкой, генерирующей высшие гармоники. За счет простоты подключения в распределительную сеть и уменьшения номинальной мощности (по сравнению с последовательным АФ) получил широкое техническое применение. Поскольку ПАФ подключаются параллельно нагрузке, мощность фильтра определяется требуемым током компенсации гармоник и реактивной мощности и значительно меньше суммарного тока потребителя. Главным преимуществом ПАФ является автоматическое плавное изменение параметров компенсации, по сигналу программируемого устройства управления транзисторными элементами.

Необходимо отметить, что настройка алгоритма работы и выбор параметров АФ осуществляется от конфигурации и параметров компенсируемой электрической сети [28, 54, 69, 76, 80, 81, 114]. На рисунке 3.16 представлена функциональная схема активного фильтра, показывающая принцип его работы.

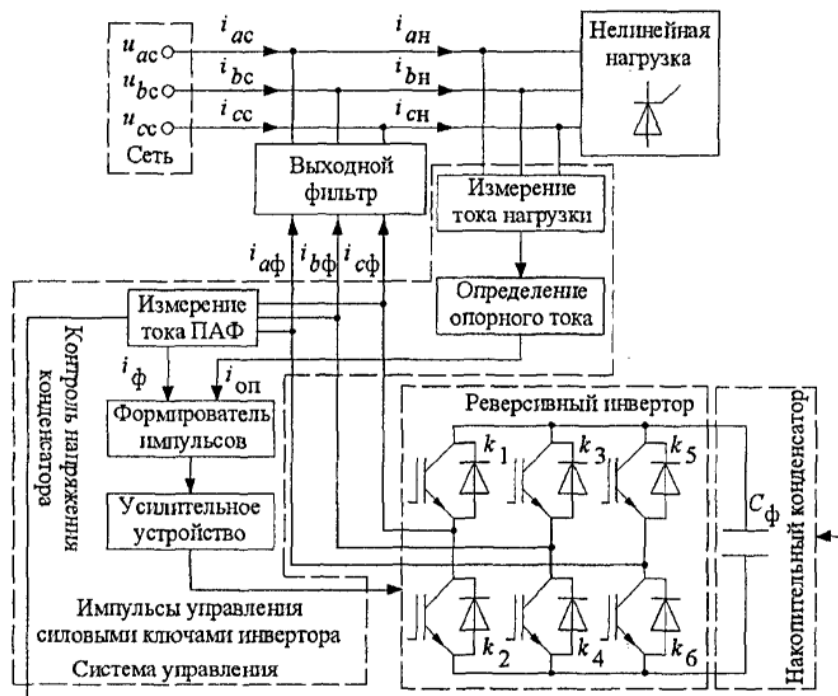


Рисунок 3.16 - Функциональная схема параллельного активного фильтра

В работах [1-7, 118, 148, 154] результаты исследования показали, что ПАФ эффективно компенсирует реактивную мощность и осуществляет

корректировку форм кривых тока и напряжения в сетях 0,4 кВ нефтепромысла. Так, применение ПАФ на Курманаевском месторождении ОАО «Оренбургнефть» позволило уменьшить значение суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения с 8,8 % до 3,5 %, значение суммарного коэффициента гармонических составляющих тока с 25,5% до 3,3% [118].

«Системы и алгоритмы управления параллельным и пассивным активным фильтром основаны на определении опорного тока или напряжения различными способами», описанными в работах [1-7, 63-65].

В данном исследовании более подробно будут рассмотрены методы управления фильтром на основе фазовых преобразований $d-q$ и теории мгновенной мощности $p-q$ Акаджи.

Структурная схема формирования опорного сигнала с использованием теории мгновенной мощности $p-q$ Акаджи показана на рисунке 3.17.

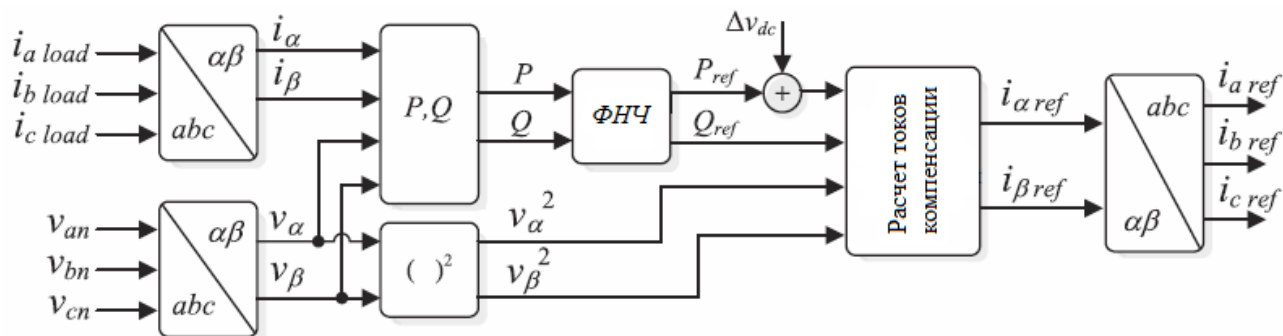


Рисунок 3.17 - Структурная схема формирования опорного сигнала с использованием теории мгновенной мощности $p-q$ Акаджи

Управление АФ по теории Акаджи основывается на прямых и обратных фазовых преобразованиях Кларка измеряемых величин тока нелинейной нагрузки и напряжения сети [120, 125, 126]. Преобразованием Парка-Кларк является переход из трехфазной системы координат $a-b-c$ в систему $\alpha-\beta-0$. В случае отсутствия нулевого проводника прямое преобразование Кларка находят по следующим выражениям (3.8) – (3.9):

- для напряжения сети (3.8):

$$\begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

- для тока нагрузки (3.9):

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

Обратное преобразование Кларка определяется по выражениям (3.10) - (3.11):

- для напряжения сети (3.10):

$$\begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

- для тока нагрузки (3.11):

$$\begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

где u_α i_α – проекции векторов напряжения и тока на ось α ;

u_β i_β – проекции векторов напряжения и тока на ось β ;

u_a i_a – напряжение и ток фазы A ;

u_b i_b – напряжение и ток фазы B ;

u_c i_c – напряжение и ток фазы C .

Проекции трехфазного сетевого тока и напряжения на осях α - β образуют пространственные вектора тока ($I_s(t)$) и напряжения ($U_s(t)$). Они в координатах α - β определяются их угловой скоростью вращения ω относительно оси, амплитудными значениями и фазовым углом φ между ними, что видно на рисунке 3.18.

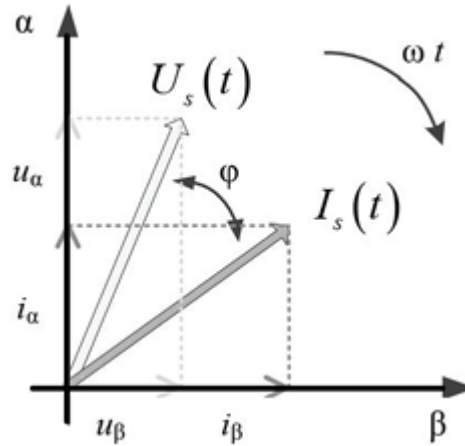


Рисунок 3.18 - Пространственные векторы сетевого тока и напряжения на координатной оси α - β

«Тогда мгновенную мощность системы можно выразить через значения пространственных векторов тока и напряжения» (3.12) [96, 97]:

$$s = \bar{u} \cdot \bar{i}^* = (u_\alpha + ju_\beta) \cdot (i_\alpha - ji_\beta) = (u_\alpha i_\alpha + u_\beta i_\beta) + j(u_\beta i_\alpha - u_\alpha i_\beta) \quad (3.12)$$

где активная часть мгновенной мощности: $p = u_\alpha i_\alpha + u_\beta i_\beta = \bar{p} + \tilde{p}$

реактивная часть мгновенной мощности: $q = u_\beta i_\alpha - u_\alpha i_\beta = \bar{q} + \tilde{q}$

\bar{p} - компонент постоянного тока мгновенной мощности p и связан с обычным основным активным током,

\tilde{p} - компонент переменного тока мгновенной мощности p , он не имеет среднего значения и связан с гармоническими токами, вызванными составляющей переменного тока мгновенной реальной мощности.

\bar{q} - постоянная составляющая мнимой мгновенной мощности q и связана с реактивной мощностью, генерируемой основными составляющими напряжений и токов.

$\tilde{\zeta}$ - составляющая переменного тока мгновенной мнимой мощности q , и она связана с гармоническими токами, вызванными составляющей переменного тока мгновенной реактивной мощности.

Для фильтрации только гармоник тока нелинейной нагрузки опорный сигнал активного фильтра должен содержать информацию о значениях \tilde{i}_1 и $\tilde{\zeta}$. Переменное значение активной мощности \tilde{i}_1 выделяется из сигнала активной мгновенной мощности за счет фильтра низких частот (например, фильтра Баттерворта 2-го порядка). При этом к компоненту \tilde{i}_1 необходимо прибавить потери активной мощности, которые расходуются на поддержание заданного уровня напряжения в звене постоянного тока АФ. Такой компонент обозначается - \tilde{i}_L .

Если же требуется осуществить и компенсацию реактивной мощности, то необходимы значения компонентов: \tilde{i}_L , \bar{q} и $\tilde{\zeta}$.

Тогда величина компенсационного тока активного фильтра, учитывающая компенсацию гармонических составляющих и реактивной мощности будет равна (3.13):

$$\begin{bmatrix} i_{c,\alpha}^* \\ i_{c,\beta}^* \end{bmatrix} = \frac{1}{u_\alpha^2 + u_\beta^2} \cdot \begin{bmatrix} u_\alpha & u_\beta \\ u_\beta & -u_\alpha \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \tilde{i}_L \\ \bar{q} \\ \tilde{\zeta} \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

Полученный вектор компенсационного тока преобразуется из координат α - β в координаты трехфазной системы a - b - c по следующему выражению (3.14):

$$\begin{bmatrix} i_a^* \\ i_b^* \\ i_c^* \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha^* \\ i_\beta^* \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

Формирование сигналов управления состоянием ключей инвертора активного фильтра обеспечивается путем сравнения расчетного

компенсационного тока с измеренным выходным током инвертора за счет подачи разности этих сигналов на релейные регуляторы тока [1-14].

По мнению автора [39] недостатком метода мгновенной мощности является большое количество математических операций и сложность реализации структурной схемы управления фильтром, что снижает точность задания сигнала управления и, как следствие, ухудшается качество фильтрации тока.

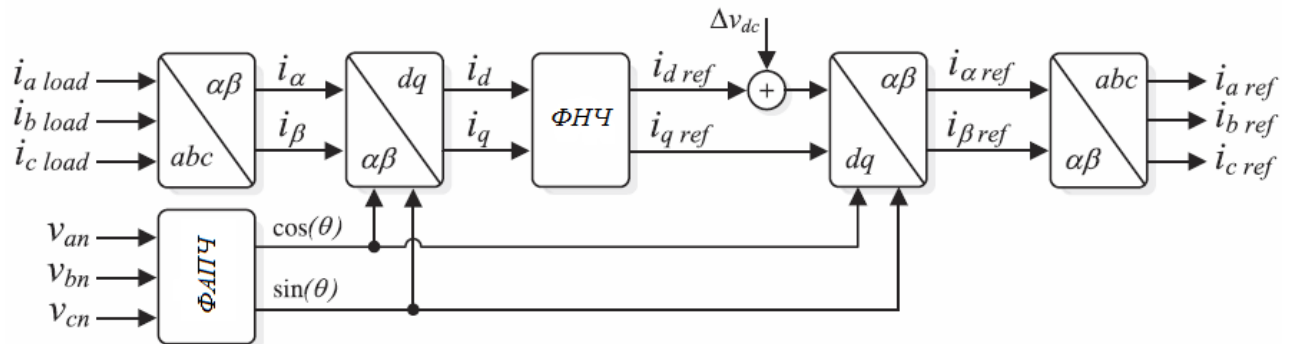


Рисунок 3.19 - Структурная схема формирования опорного сигнала с использованием d - q метода управления

Структурная схема формирования опорного сигнала с использованием q - d метода управления показана на рисунке 3.19

Метод строится на принципах преобразования тока из координат a - b - c в α - β , который был проанализирован выше. Однако, отличие d - q координат от α - β заключается в осуществлении преобразования тока нагрузки во вращающихся с его частотой осях и синхронизацией его с фазой напряжения сети. Преобразование тока определяется следующим выражением (3.15):

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\omega t) & \sin(\omega t) \\ \sin(\omega t) & \cos(\omega t) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

где i_d , i_q – проекции вектора тока на оси d - q ,

$\cos(\omega t)$, $\sin(\omega t)$ – определяют угловое положение вектора тока относительно оси α - β .

Тогда компенсированный ток активного фильтра определяется по выражению (3.16):

$$\begin{bmatrix} i_{aref} \\ i_{bref} \\ i_{cref} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & 1 & 0 \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\omega t) & -\sin(\omega t) \\ 0 & \sin(\omega t) & \cos(\omega t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_0 \\ i_{dref} \\ i_{qref} \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

где $\begin{bmatrix} i_0 \\ i_{dref} \\ i_{qref} \end{bmatrix}$ - это матрица мгновенных значений нулевой, активной и реактивной составляющих тока в координатах $d-q$.

Одной из наиболее важных характеристик этого алгоритма является то, что опорные токи получаются непосредственно из токов нагрузки без учета напряжений источника. Это важное преимущество, поскольку на генерирование опорных сигналов не влияет дисбаланс или искажения напряжения, что повышает эффективность компенсации высших гармоник активным фильтром.

В данном исследовании проведен анализ работы активного фильтра по компенсации высших гармоник в типовых промышленных системах электроснабжения на примере предприятий горной отрасли. Имитационная модель такой системы и результаты работы АФ приведены в главе 4.

3.4. Гибридные фильтрокомпенсирующие устройства

Одним из недостатков активного фильтра является его высокая стоимость, по сравнению со стоимостью пассивных фильтров или антирезонансных дросселей. Для уменьшения затрат и повышения эффективности компенсации высших гармоник применяются гибридные фильтры гармоник, состоящие из комбинации активных и пассивных фильтров.

Пассивные фильтры настраиваются на частоты гармоник, имеющие наибольшие амплитудные значения. Наиболее известные структуры гибридных фильтров приведены на рисунке 3.20.

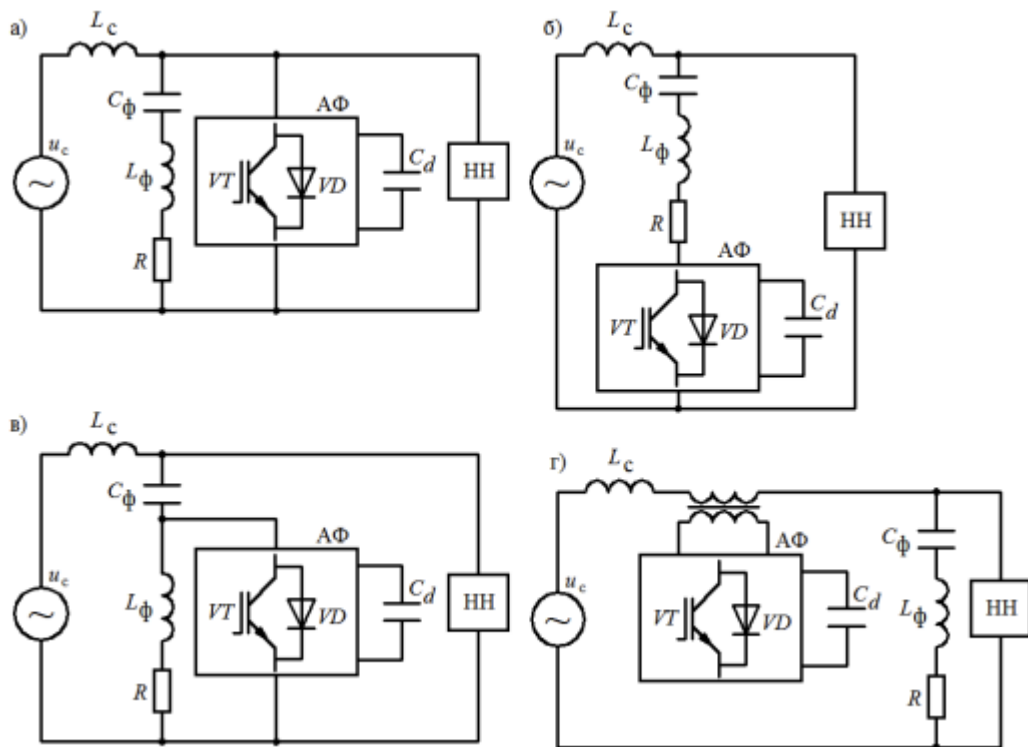


Рисунок 3.20 - Схемы гибридных фильтров [87]

- а) параллельное соединение АФ и пассивного ФКУ
 б) параллельное соединение АФ с активно-индуктивной частью пассивного ФКУ
 в) последовательное соединение пассивного ФКУ с ПАФ
 г) Последовательный АФ и параллельное соединение пассивного ФКУ

В работах [1-7, 78, 87-90] приводятся четыре основных типа гибридных фильтров, схема которых определяется типом решаемой технической задачи:

1. параллельное соединение АФ и пассивных ФКУ, показанное на рисунке 3.20 а: компенсирует гармоники со стороны нелинейных устройств. Пассивные фильтры подавляют остаточный уровень высших гармоник, тем самым, уменьшая номинальную мощность и массогабаритные показатели ПАФ;
2. пассивных ФКУ соединяется последовательно с ПАФ, как видно на рисунке 3.20 б: наиболее эффективная схема при компенсации гармоник с стороны нелинейной нагрузки. Она позволяет исключить резонансные режимы, что обеспечивает повышение эффективности работы ПАФ и компенсировать гармоники напряжения;
3. Является частным случаем п.1 типа, что видно на рисунке 3.20 в: ПАФ соединяется параллельно только с активно-индуктивной частью

пассивного ФКУ, что позволяет предотвратить резонансы на гармониках высоких частот $n > 25$;

4. Последовательный АФ и параллельное соединение пассивных ФКУ, показанное на рисунке 3.20 г: позволяет компенсировать провалы и отклонения напряжения и в тоже время компенсировать канонические высшие гармоники тока со стороны нелинейной нагрузки.

В работах [124, 132, 140] показана высокая эффективность работы гибридной фильтрокомпенсирующей системы. Так, результаты математического моделирования, приведенные в работах [154-159], показали, что включении гибридного фильтра в систему электроснабжения предприятия удастся снизить не только суммарный коэффициент искажения по напряжению- с $THD_U = 17,3\%$ до $3,8\%$, но по току- с $THD_I = 19,6\%$ до $3,7\%$.

Таким образом, приведенные выше схемы гибридных фильтров показывают лучшие технические и энергетические характеристики, по сравнению с отдельной работой пассивных и активных фильтров.

В работе проведено имитационное моделирование гибридного фильтра на основе параллельного соединения его активной и пассивной частей. Конфигурации пассивных фильтров в составе данного гибридного фильтрокомпенсирующего устройства приведены на рисунке 3.21.

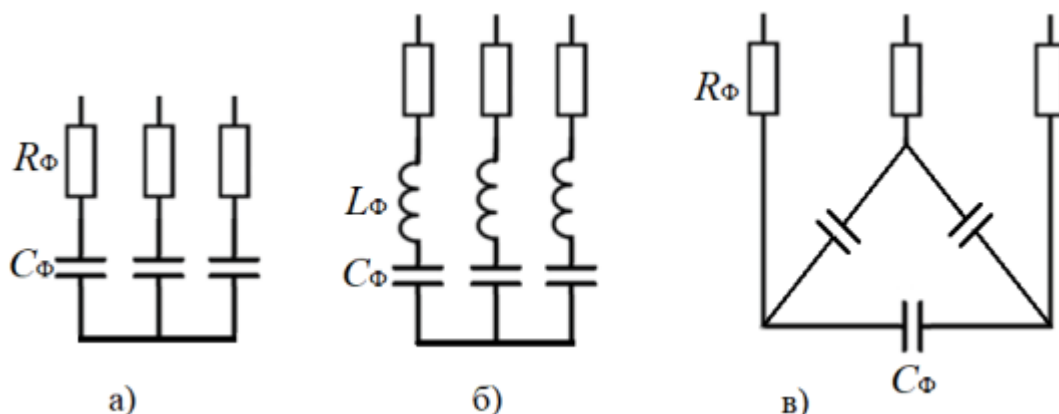


Рисунок 3.21 - Конфигурации пассивных фильтров в структуре гибридного фильтра

Результаты имитационного моделирования работы гибридного фильтрокомпенсирующего устройства с выходным активно-емкостным фильтром, показанный на рисунке 3.21 б, приведены в главе 4.

3.5. Специализированные устройства на основе активных преобразователей

Общеизвестные мировые и отечественных научные публикации [47, 49, 68, 102, 124, 141, 151, 153] описывают новый класс многофункциональных устройств на базе силовой электроники, которые позволяют обеспечить нормированные показатели качества электроэнергии. Их разработка и внедрение в электротехнические сети направлены на нивелирование недостатков устройств компенсации реактивной мощности и гармоник, рассмотренных выше.

Рассмотрим некоторые из этих типов устройств, работа которых направлена на решение задач и технических проблем, описываемых в данном исследовании: статические компенсаторы реактивной мощности (СТАТКОМ) и динамические компенсаторы искажения напряжения (ДКИН).

СТАТКОМ, с точки зрения конфигурации, максимально приближен к параллельному активному фильтру. Однако эти устройства отличаются методами управления.

СТАТКОМ выполняет функции компенсации реактивной мощности, а также устраняет колебания, несимметрию и просадку напряжения. Для подавления высших гармонических составляющих на выходе СТАТКОМ включают широкополосные фильтрокомпенсирующие устройства. Основными преимуществами СТАТКОМ, как компенсатора реактивной мощности, по сравнению с другими известными устройства, являются полная функциональность устройства при пониженном напряжении и быстрое время реагирования – 0,02-0,04 с.

Известны одноуровневые устройства *D*-СТАТКОМ, которые подключаются к шинам распределительных сетей 6-10 кВ через понижающий трансформатор и многоуровневые устройства СТАТКОМ, которые подключаются напрямую к шинам 6-35 кВ в сетях с высоким уровнем вариации нагрузки большой мощности. Многоуровневый СТАТКОМ строится по принципу каскада многоуровневых инверторов, напряжение которого определяется как суммарное напряжение на выходе отдельных модулей, входящих в общую конфигурацию устройства.

ДКИН предназначен для устранения кратковременных провалов напряжения за счет двукратного преобразования напряжения. Устройство способно длительное время держать номинальное напряжение на нагрузке при его провале до 30%, и 30 сек при провалах 31-50%, выполнять защиту от перенапряжений с уровнем до 130%, корректировать гармонические искажения напряжения при установке на его выходе фильтрокомпенсирующих устройств.

Структурная схема ДКИН приведена на рисунке 3.22.

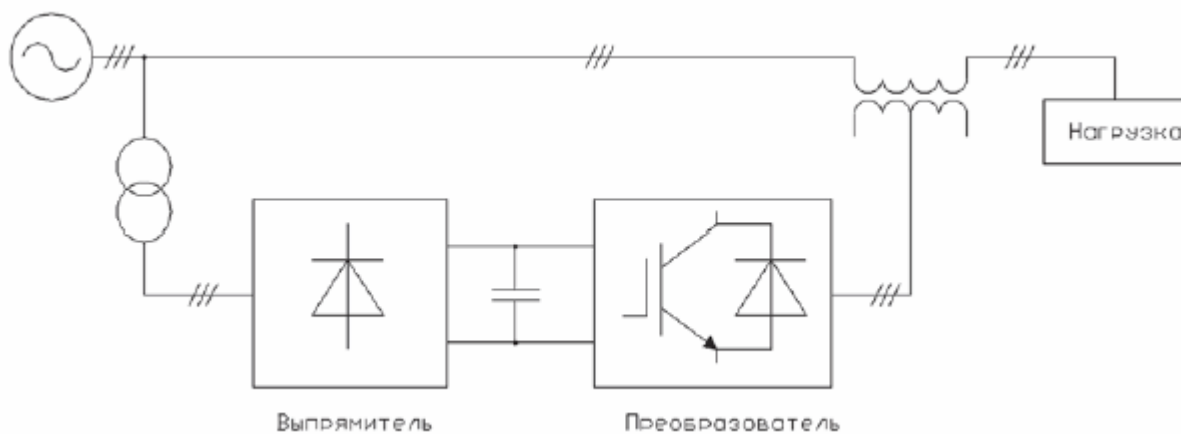


Рисунок 3.22 - Структурная схема ДКИН

Вход ДКИН подключается к сети через входной трансформатор, далее через управляемый тиристорный выпрямитель поддерживается напряжение на конденсаторной батарее, которая также подключена к преобразователю-инвертору напряжения. Инвертор напряжения преобразует постоянное напряжение в переменное. Он соединен последовательно к первичной обмотке

вольтодобавочного трансформатора, в котором наводится напряжение, компенсирующее провал напряжения в сети [84, 93, 114, 171].

Главным преимуществом ДКИН является его быстродействие – не более 3 мс до полного восстановления провала напряжения. Также это устройство является более дешевым, по сравнению с источником бесперебойного питания, поскольку в его базовой конфигурации отсутствуют аккумуляторные батареи.

3.6. Разработка алгоритма исследования промышленных систем электроснабжения при несинусоидальных режимах и резонансных явлениях

В технической литературе, в частности компанией *Schneider Electric* [27, 149], даны рекомендации применения технических средств и решения подавления гармоник при работе конденсаторных установок для схемы низкого напряжения, показанной на рисунке 2.21 *a*, в зависимости от соотношения мощности питающего трансформатора и нелинейной нагрузки, которые сведены в таблицу 3.1.

Таблица 3.1 - Рекомендации применения технических средств и решения подавления гармоник для низковольтной схемы

| Мощность нелинейной нагрузки | Рекомендации для применения технического средства или решения |
|-------------------------------------|--|
| $P_d^* < 0,15$ | Конденсаторы без фильтров |
| $0,15 < P_d^* < 0,25$ | Конденсаторы повышенного напряжения при отсутствии фильтров |
| $0,25 < P_d^* < 0,6$ | Конденсаторы повышенного напряжения при наличии антирезонансных дросселей или пассивных фильтров |
| $P_d^* > 0,6$ | Активные или гибридные фильтры |

При имитационном моделировании режимов работы низковольтной схемы электроснабжения было установлено, что при резонансных явлениях уже при мощности нелинейной нагрузки $P_d^* > 0,1$ необходимы технические средства защиты конденсаторов от токовой перегрузки. Это значение нелинейной нагрузки ниже, чем рекомендовано в технической литературе, которые показаны в таблице 3.1, поскольку при разработке рекомендаций в ней не рассматривалась работа конденсаторов при резонансных режимах.

В случае применения конденсаторов с повышенным на 20 % номинальным напряжением, которые способны работать при двухкратном коэффициенте токовой перегрузки, рекомендации технической литературы согласуются с результатами имитационного моделирования и обеспечивается работа конденсаторных установок при мощности нелинейной нагрузки $P_d^* < 0,25$. Однако, при мощности конденсаторов в диапазонах $Q_k^* < 0,15$ и $Q_k^* > 0,35$ коэффициент несинусоидальности напряжения THD_U превышает допустимые значения. Поэтому уже при $P_d^* < 0,25$ необходимо применять антирезонансные дроссели.

В данном исследовании установлено, что подключение конденсаторных установок ухудшает качество напряжения. Однако этот негативный эффект работы конденсаторов устраняется при установке антирезонансных дросселей последовательно с ними. Тогда для рассматриваемой низковольтной схемы антирезонансные дроссели позволяют обеспечить нормируемые показатели качества напряжения при $P_d^* < 0,7$, поскольку при такой мощности нелинейной нагрузки выполнялись нормативные требования к питающему напряжению в сети при отсутствии конденсаторов, как видно по данным таблицы 2.6. «При мощности нелинейной нагрузки $P_d^* > 0,7$ уже необходима установка активного фильтра» [11].

Аналогичные условия можно изложить и для других схем электроснабжения, приведенных на рисунке 2.21. В системе электроснабжения на рисунке 2.21 б нелинейная нагрузка подключена на стороне низкого напряжения, а конденсаторная установка и линейная нагрузка на стороне среднего напряжения. Для этой схемы установлено, что в случае отключения конденсаторной установки коэффициенты THD_U на шинах низкого и среднего напряжения не превышают

допустимые значения при мощности нелинейной нагрузки $P_d^* < 0,3$. Отсюда можно сделать вывод, что при включении конденсаторов и $P_d^* < 0,3$ для их защиты от токовой перегрузки и обеспечения качества электроэнергии достаточным решением является включение высоковольтных антирезонансных дросселей. При $P_d^* > 0,3$ на шинах нелинейной нагрузки необходимо применять активные фильтры. Тогда возможно использовать обычные конденсаторные установки на стороне среднего напряжения без применения антирезонансных дросселей.

В системе электроснабжения на рисунке 2.21 в нелинейная нагрузка подключается на одну расщепленную обмотку трансформатора, а линейная нагрузка и конденсаторные установки на другую. Такая схема позволяет частично изолировать конденсаторные установки от негативного влияния гармонических искажений от нелинейной нагрузки за счет большого суммарного сопротивления между двумя расщепленными обмотками. В случае отключения конденсаторной установки и вариации мощности нелинейной нагрузки $P_d^* = 0,1$ коэффициент $THDU$ не превышал 2%. В таком режиме антирезонансные дроссели обеспечивают защиту конденсаторов от токовой перегрузки и необходимый уровень качества электроэнергии без применения фильтрокомпенсирующих устройств. Следует отметить, что антирезонансные дроссели должны быть установлены только при мощности конденсаторов в диапазоне $Q_K^* = 0,2..0,4$. При остальных мощностях конденсаторов достаточным техническим решением является применение конденсаторов с повышенным номинальным напряжением.

В работе установлено, что резонансный контур, который образуется между питающим трансформатором и регулируемые конденсаторными установками можно представить в виде пассивного широкополосного фильтра для канонических гармоник тока сети, которые замыкаясь на нем, приводят к увеличению токовой перегрузки конденсаторов и амплитудных значений гармоник напряжения. При этом относительные амплитудные значения гармоник тока снижаются, что показывают полученные зависимости, приведенные на рисунках 2.8 и 2.18 в 2 главе.

На рисунке 3.23 приведен алгоритм, отражающий порядок исследования промышленных систем электроснабжения на предмет выявления потенциальных резонансных явлений и уровня качества электроэнергии для надлежащего выбора технического средства для устранения высших гармоник.

Выявленные закономерности, связанные с относительными значениями мощностей конденсаторов, при которых возникают резонансные явления, сопровождающиеся вариацией амплитуд канонических высших гармоник тока и снижением уровня качества напряжения, ограничения, касающиеся моделирования источников гармоник тока нелинейной нагрузки конечной мощности, допущения при выборе параметров схем замещения являются теоретической основой моделирования и анализа сложных несинусоидальных режимов в типовых схемах промышленных систем электроснабжения для обоснованного выбора технического средства или решения для повышения качества электроэнергии [11].

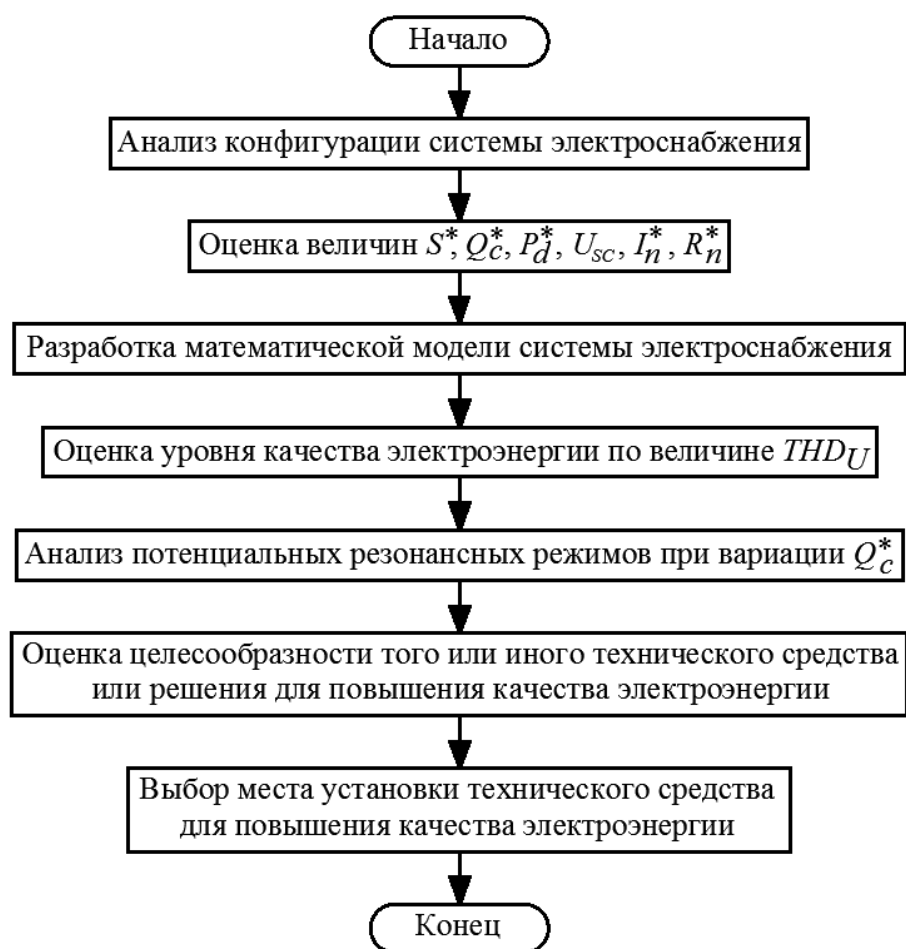


Рисунок 3.23 – Алгоритм анализа и моделирования несинусоидальных режимов для обоснованного выбора технического средства или решения по повышению качества электроэнергии [11].

3.7. Выводы по 3 главе

1. Проведен анализ основных технических средств и решений по компенсации высших гармоник тока и напряжения, включая схемные решения рационального построения распределительной сети с нелинейной нагрузкой, применение антирезонансных дросселей в цепи конденсаторных установок, пассивные, активные и гибридные фильтрокомпенсирующие устройства.
2. Рассмотрена классификация фильтрокомпенсирующих устройств исходя из их структуры, методов управления и способа подключения к компенсируемой сети.
3. Рассмотрены основные методы управления активными фильтрокомпенсирующими устройствами, включая фазовые преобразования Парка-Кларк, теорию мгновенной мощности Акаджи, указаны их особенности, достоинства и недостатки.
4. Проведен анализ специализированных систем повышения качества электроэнергии на основе активных преобразователей, включая устройства статической компенсации реактивной мощности (СТАТКОМ) и динамической компенсации искажения напряжения (ДКИН), указаны их особенности, достоинства и недостатки.
5. Даны рекомендации по применению различных методов и средств повышения качества электроэнергии в промышленных системах электроснабжения исходя из величины мощности нелинейной нагрузки по отношению к мощности питающего трансформатора.
6. Разработан обобщенный алгоритм анализа и моделирования несинусоидальных режимов для обоснованного выбора технического средства или решения по повышению качества электроэнергии для условий промышленных систем электроснабжения с нелинейной нагрузкой и конденсаторными установками.

ГЛАВА 4 ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ С НЕЛИНЕЙНОЙ НАГРУЗКОЙ И КОНДЕНСАТОРНЫМИ УСТАНОВКАМИ

4.1. Цели и задачи имитационного моделирования

В качестве метода проведения исследований предлагается использование типовых схем замещения промышленных систем электроснабжения с понижающими трансформатором, нелинейной нагрузкой, конденсаторными установками и линейной нагрузкой, приведенные на рисунке 2.21. Далее указанные схемы используются для компьютерного имитационного моделирования несинусоидальных режимов с динамическим изменением параметров для оценки эффективности принятых решений.

В качестве типовой промышленной системы электроснабжения принята система с двумя классами напряжения 10 кВ и 0,4 кВ. На стороне 10 кВ подключены конденсаторные установки компенсации реактивной мощности на частоте основной гармоники, а также линейная активно-индуктивная нагрузка. Через понижающий двухобмоточный трансформатор 10/0,4 кВ к системе подключена нелинейная нагрузка в виде трехфазного мостового неуправляемого диодного выпрямителя, на выходе которого подключена активно-индуктивная нагрузка. В качестве фильтрокомпенсирующего устройства подавления высших гармоник принят параллельный активный фильтр, на выходе которого включен пассивный активно-емкостной фильтр с регулируемыми параметрами.

Подобная конфигурация фильтрокомпенсирующего устройства принята на основании результатов теоретических и экспериментальных исследований.

Схема электроснабжения, принятая для оценки эффективности применения технических средств или решений компенсации высших гармоник приведена на рисунке 4.1. В данной схеме присутствует несколько ступеней напряжения, которые могут быть разными в зависимости от условий электроснабжения и состава потребителей.

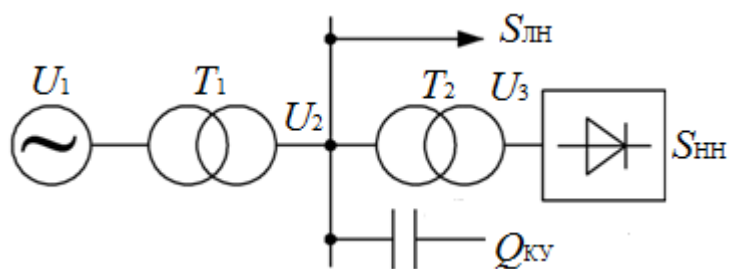


Рисунок 4.1 - Схема электроснабжения, принятая для оценки эффективности применения технических средств или решений компенсации высших гармоник

В качестве примера на рисунке 4.1 рассматривается один из наиболее распространенных случаев, когда: $U_1 = 110$ кВ, $U_2 = 10$ кВ, $U_3 = 0,4$ кВ, $S_{лн}$ – полная мощность линейной нагрузки, $Q_{кв}$ – реактивная мощность конденсаторной установки, $S_{нн}$ – полная мощность нелинейной нагрузки.

Предлагаемый метод заключается в следующем. Типовая схема настраивается на наихудший режим работы – резонанс между конденсаторной установкой и суммарной индуктивностью системы электроснабжения, которая формируется трансформаторами T_1 и T_2 с учетом генерации высших гармоник тока от нелинейной нагрузки. В узле нелинейной нагрузки на стороне 0,4 кВ моделируется работа одного из фильтрокомпенсирующего устройства, рассмотренного в главе 3. При этом параллельный активный фильтр настраивался таким образом, чтобы он работал максимально эффективно без необходимости отключения конденсаторных установок 10 кВ.

4.2. Имитационная модель типовой промышленной системы электроснабжения с линейной и нелинейной нагрузками, конденсаторными установками и фильтрокомпенсирующими устройствами

В основу имитационного моделирования положена схема замещения типовой промышленной системы электроснабжения с линейной и нелинейной нагрузками, конденсаторными установками и фильтрокомпенсирующим устройством. Имитационная модель данной системы разработана в среде

Matlab Simulink и представлена на рисунке 4.2.

В процессе имитационного моделирования параметры модели рассчитывались по выражениям (2.9 - 2.16).

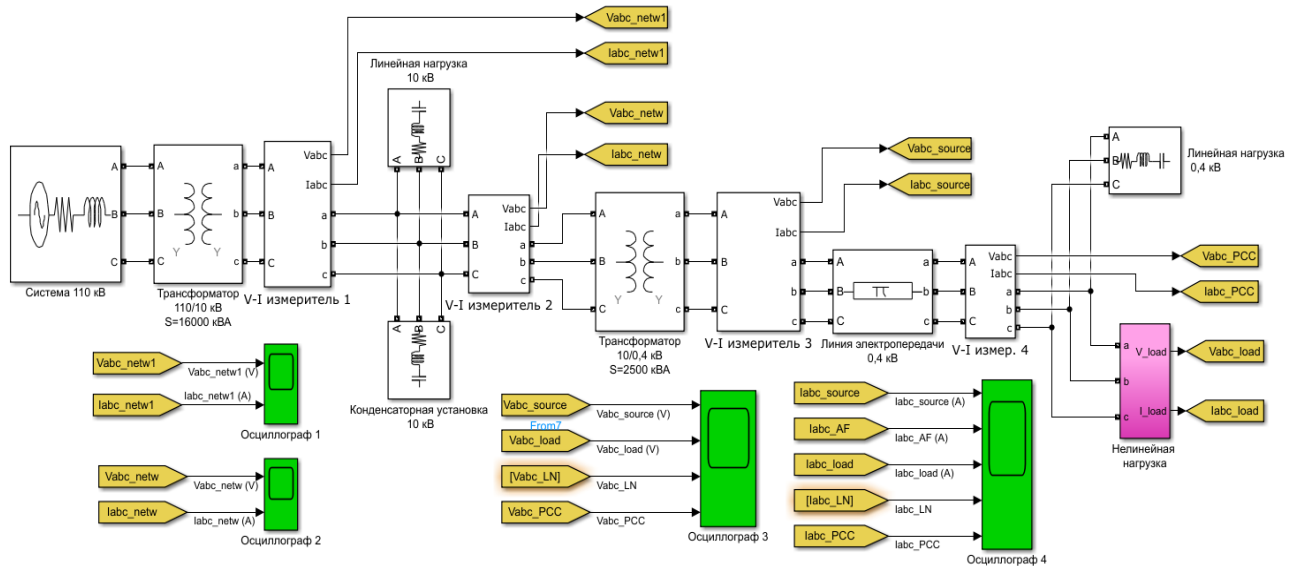


Рисунок 4.2 – Имитационная модель типовой промышленной системы электроснабжения с линейной и нелинейной нагрузками, конденсаторными установками

Мощность конденсаторной батареи выбиралась исходя из требований по обеспечению коэффициента мощности $\cos\varphi = 0,96$ в сети 10 кВ.

Нелинейная нагрузка моделировалась трехфазным мостовым выпрямителем с активно-индуктивным сопротивлением на стороне постоянного тока. Конфигурация блока нелинейной нагрузки приведена на рисунке 4.3.

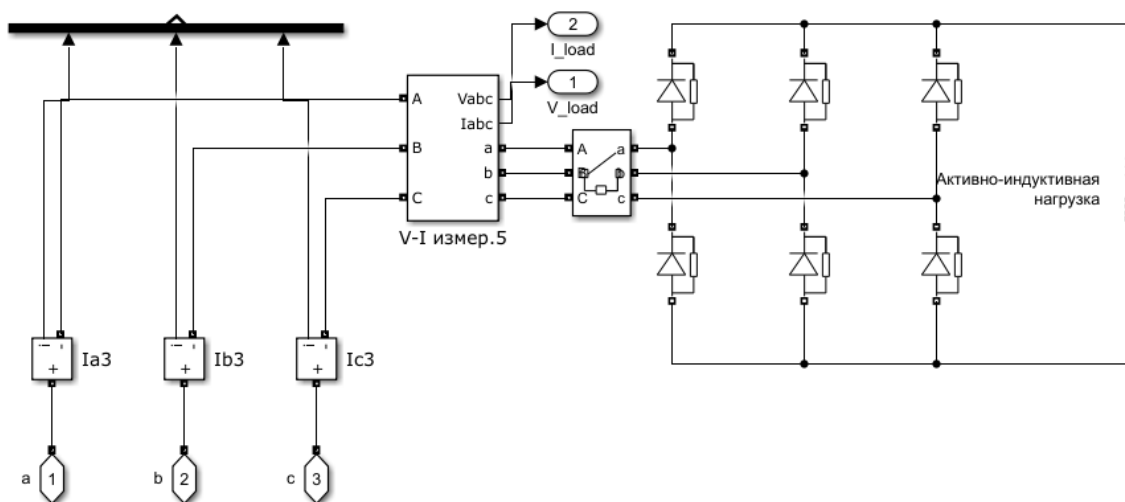


Рисунок 4.3 - Конфигурация блока нелинейной нагрузки

Измерители тока и напряжения 1-4 позволяют показать через цифровые осциллографы формы сигналов на выходе трансформаторов и на шинах 0,4 и 10 кВ, а также позволяют определить коэффициенты искажений этих сигналов.

Рассматривается схема электроснабжения 110/10 кВ двухобмоточного трансформатора $S_{T1ном}=16000$ кВА, питающего на шинах 10 кВ регулируемую линейную нагрузку максимальной мощности $S_{лн} = 10000$ кВА, $\cos\varphi=0,7$, регулируемую конденсаторную установку максимальной реактивной мощностью $Q_{ку}=2000$ квар, обеспечивающую нормируемую величину коэффициента мощности на стороне 10 кВ на всем диапазоне регулирования линейной нагрузки и понижающий трансформатор 10/0,4 кВ мощностью $S_{T2ном}=2500$ кВА, питающий узел линейной и нелинейной нагрузок суммарной мощностью $S=2000$ кВА. Конденсатор 10 кВ может создавать резонансный контур между его значением емкости и индуктивностью питающего трансформатора на частоте канонической гармоники.

Имитационное моделирование осуществлялось при разных состояниях системы электроснабжения. Сначала рассмотрим работу системы электроснабжения при отключенной конденсаторной установке. Примем, что на выходе трансформатора 10/0,4 кВ подключена только нелинейная нагрузка

мощностью $S_{\text{НН}}=2000$ кВА. Такой режим обеспечивает наибольшее искажение тока и напряжения.

Результаты моделирования сведены в таблицу 4.1.

Таблица 4.1 - Коэффициенты искажений тока и напряжения на шинах нагрузки 0,4 и 10 кВ

| Рассматриваемые режимы | THD_U (0,4 кВ) % | THD_I (0,4 кВ) % | THD_U (10 кВ) % | THD_I (10 кВ) % |
|--|-----------------------|-----------------------|----------------------|----------------------|
| Несинусоидальный режим, конденсаторы отключены | 10,9 | 23,6 | 3,1 | 6,2 |
| Несинусоидальный режим, конденсаторы включены, резонанс на 7-й гармонике | 16,3 | 21,4 | 11,8 | 27,7 |

Затем включим конденсаторную установку на стороне 10 кВ на резонансной частоте 7 гармоник и оценим коэффициенты искажений тока и напряжения в этом режиме.

Очевидно, что в несинусоидальных режимах работы сети требуется фильтрация гармоник. В главе 3 был подробно проведен анализ работы и конфигурации установок пассивной и активной фильтрации.

Произведем расчет пассивных фильтров по следующей методике, приняв, что такие фильтры будут настроены на 5, 7, 11 и 13 гармоник и установлены в сети по второй схеме Фостера, показанной на рисунке 3.6 [31, 32, 86, 92].

На первом шаге выбираем реактивную мощность каждой ветви блока фильтра $Q_{\text{Ф нач}}$, а также произвольно задаем начальную емкость конденсатора фильтра на n -й гармонике $C_{i \text{ нач}}$, которая может обеспечить необходимый уровень компенсации реактивной мощности.

Тогда начальную индуктивность фильтра $L_{i \text{ нач}}$ рассчитаем по следующему выражению (4.1):

$$L_{i \text{ нач}} = \frac{1}{C_{i \text{ нач}} \cdot (2\pi f_i)^2} \quad (4.1)$$

где f_i – частота фильтруемой гармоники.

Генерируемая реактивная мощность фильтра Q_{Φ} с параметрами $C_{i \text{ нач}}$ и $L_{i \text{ нач}}$ будет определяться по выражению (4.2):

$$Q_{\Phi} = \sum_{i=1}^m \frac{U_{\text{НОМ сети}}^2}{\frac{1}{2\pi f_{\text{сети}} C_i} - 2\pi f_{\text{сети}} L_i} \quad (4.2)$$

Далее определяется коэффициент отношения K_Q между предполагаемой мощностью Q_{Φ} и полученной при расчете фильтра по заданным параметрам по выражению (4.3):

$$K_Q = \frac{Q_{\Phi}}{Q_{\Phi \text{ нач}}} \quad (4.3)$$

Тогда окончательные параметры фильтра будут определяться с учетом коэффициента K_Q по следующему выражению (4.4):

$$\begin{cases} L_i = L_{i \text{ нач}} / K_Q \\ C_i = K_Q \cdot C_{i \text{ нач}} \end{cases} \quad (4.4)$$

В таблице 4.2 приведены параметры блока пассивного фильтра при условии, что они генерируют одинаковую реактивную мощность в соотношении 1:1:1:1.

Таблица 4.2 - Выбор параметров блока пассивных фильтров на стороне 0,4 кВ

| Выбор пассивного фильтра на стороне 0,4 кВ | | | | | | | |
|--|------------------------|-------------------------|------------|------------------|-------|-----------------|------------------|
| f , Гц | $C_{\text{нач}}$, мкФ | $L_{\text{нач}}$, мкГн | Q_{Φ} | $Q_{\text{нач}}$ | K_Q | $C_{(n)}$, мкФ | $L_{(n)}$, мкГн |
| 250 | 4500 | 90,2 | 235500 | 225000 | 1,047 | 4710,0 | 86,1 |
| 350 | 4500 | 46,0 | 230790 | 225000 | 1,026 | 4615,8 | 44,8 |
| 550 | 4500 | 18,6 | 227964 | 225000 | 1,013 | 4559,3 | 18,4 |
| 650 | 4500 | 13,3 | 227426 | 225000 | 1,011 | 4548,5 | 13,2 |
| | | | 921680 | 900000 | 1,024 | | |

Подключим блок пассивных фильтров на стороне 0,4 кВ при отключенных конденсаторах на стороне 10 кВ. Затем на втором этапе моделирования включим конденсаторы на режим резонанса на 7-й гармонике.

На рисунке 4.4 приведена имитационная модель системы электроснабжения при включении блока пассивных фильтров.

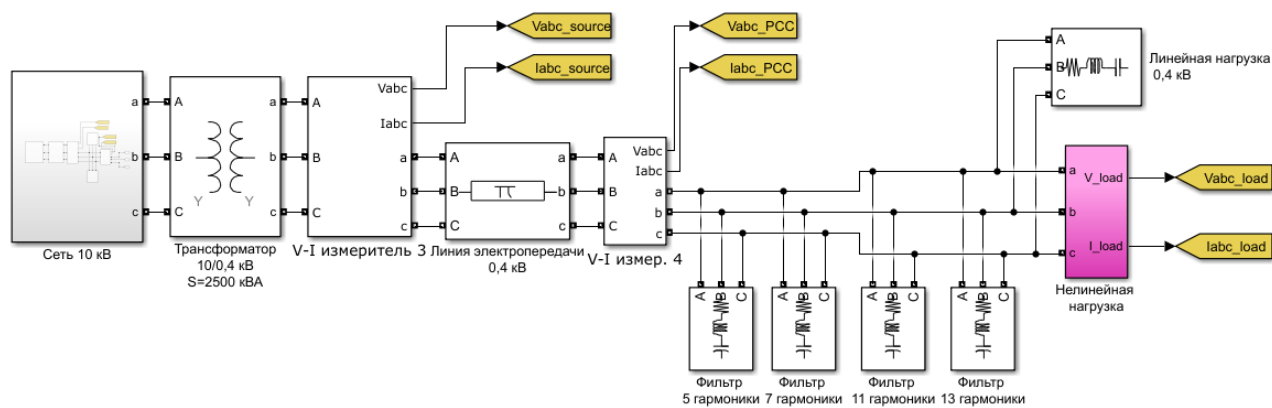


Рисунок 4.4 – Имитационная модель типовой промышленной системы электроснабжения при подключении блока пассивных фильтров

Результаты моделирования сведены в таблице 4.3.

Таблица 4.3 - Коэффициенты искажений тока и напряжения при работе блока пассивных фильтров.

| Рассматриваемые режимы | THD_U (0,4 кВ) % | THD_I (0,4 кВ) % | THD_U (10 кВ) % | THD_I (10 кВ) % |
|---|-----------------------|-----------------------|----------------------|----------------------|
| Несинусоидальный режим, конденсаторы отключены, включен блок пассивных фильтров | 1,5 | 2,8 | 0,2 | 0,3 |
| Несинусоидальный режим, конденсаторы включены, резонанс на 7-й гармонике, включен блок пассивных фильтров | 2,3 | 1 | 2,1 | 3,5 |

По таблице 4.3 видно, что блок пассивных фильтров, настроенных на 5, 7, 11 и 13 гармоники, установленный на стороне узла нелинейной нагрузки, снижает искажения сигналов тока и напряжения до допустимых величин как при отсутствии конденсаторов, так и при резонансном режиме.

Анализ амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) сети при широком диапазоне регулирования мощности конденсаторов и работе рассматриваемого блока пассивного фильтра показал, что при параметрах конденсаторов, на которых возникают резонансные режимы на гармониках $n \geq 17$, фильтрокомпенсирующее устройство неспособно эффективно осуществить коррекцию искажений тока и напряжения. Результаты моделирования работы

фильтра при резонансных режимах сети на $n = 17, 19, 23, 25$ сведены в таблицу 4.4.

Таблица 4.4 - Коэффициенты искажений тока и напряжения при работе блока пассивных фильтров при резонансе сети на гармониках $n \geq 17$

| n | Q _{ку} , квар | THD_U (0,4 кВ) % | THD_I (0,4 кВ) % | THD_U (10 кВ) % | THD_I (10 кВ) % |
|-----|---------------------------|-----------------------|-----------------------|----------------------|----------------------|
| 17 | 450 | 4,6 | 19,1 | 21,4 | 19 |
| 19 | 350 | 5,3 | 14,8 | 19,9 | 15,7 |
| 23 | 250 | 6,2 | 13,4 | 22,5 | 14,6 |
| 25 | 200 | 5,8 | 11,7 | 20,9 | 12,5 |

Следовательно, для снижения уровня искажений тока и напряжения необходима установка дополнительных узкополосных фильтров на $n \geq 17$ гармониках, либо одного широкополосного фильтра, обеспечивающих фильтрацию гармоник $n \geq 13$. Однако, в исследовании [92] показано, что блок из узкополосных фильтров более эффективно снижает гармонические искажения, по сравнению с блоком из совокупности узкополосных и широкополосного фильтра. Также необходимо оценить экономическую целесообразность установки большого числа пассивных фильтров, по сравнению с другими известными решениями фильтрации на основе активных и гибридных фильтрокомпенсирующих устройств.

В имитационной модели заменим блок пассивных фильтров на активный (ПАФ), работа которого подробно показана в главе 3. Имитационная модель системы электроснабжения при включении активного фильтра приведена на рисунке 4.5.

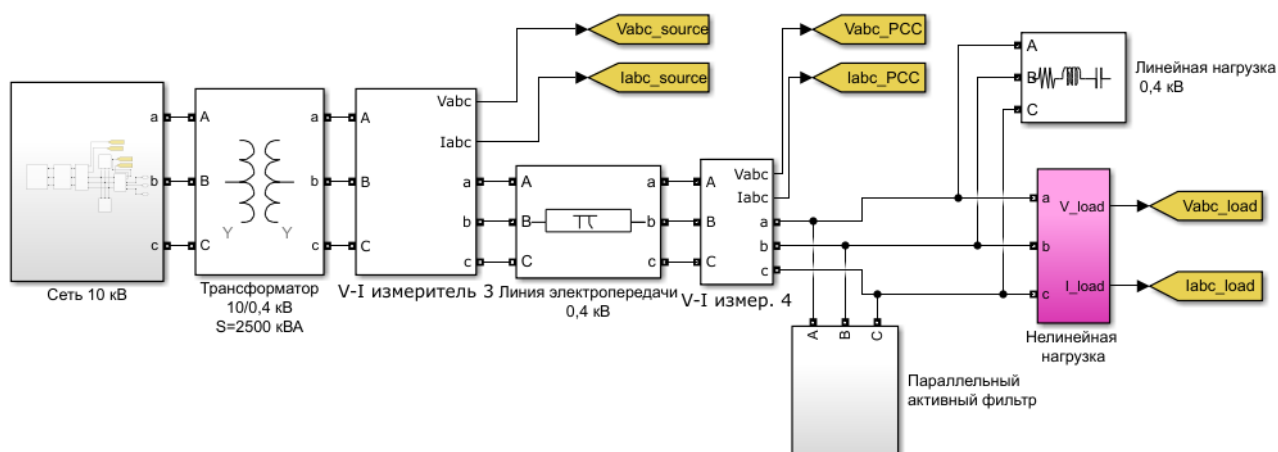


Рисунок 4.5 - Имитационная модель системы электроснабжения при включении активного фильтра

Конфигурация блока активного фильтра показана на рисунке 4.6.

«В качестве алгоритма управления параллельным активным фильтром приняты фазовые преобразования токов и напряжений» [96] в системе координат dq , принцип работы которого показан в главе 3. Формирование импульсов управления ключами осуществляется за счет релейный регуляторов тока. На стороне постоянного напряжения инвертора ПИ-регулятор обеспечивает напряжение блока конденсаторов C_1 и C_2 на уровне 850 В. Сглаживание выходного тока инвертора обеспечивается за счет включения последовательного L_{AF} фильтра.

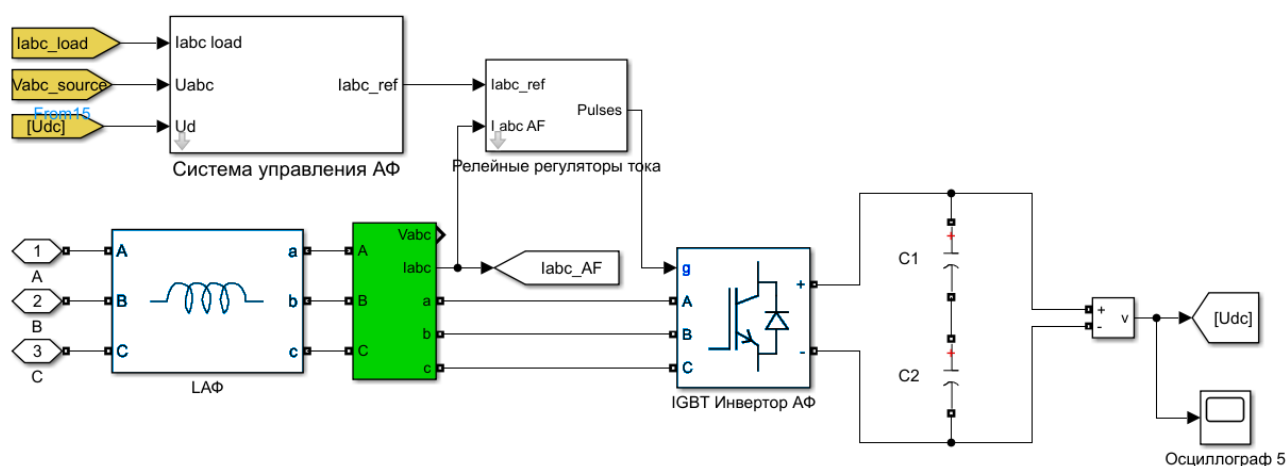


Рисунок 4.6 – Конфигурация блока активного фильтра

Выбор параметров выходной индуктивности L_{AF} и конденсаторов C_1 и C_2 осуществлялся по выражениям и результатам исследования, приведенных в

работе [82]. При имитационном моделировании работы активного фильтра его параметры: $L_{\Delta\Phi} = 0,3$ мГн, $C_1 = C_2 = 800$ мкФ.

Результаты имитационного моделирования системы электроснабжения с активным фильтром сведены в таблицу 4.5.

Таблица 4.5 - Результаты имитационного моделирования системы электроснабжения с активным фильтром

| Рассматриваемые режимы | | THD_U (0,4 кВ) % | THD_I (0,4 кВ) % | THD_U (10 кВ) % | THD_I (10 кВ) % |
|------------------------|---|-----------------------|-----------------------|----------------------|----------------------|
| 1 | Несинусоидальный режим, ПАФ и КУ отключены | 5,4 | 14,1 | 0,9 | 1 |
| 2 | Несинусоидальный режим, ПАФ включен и КУ отключен | 3,8 | 4,9 | 0,6 | 0,4 |
| 3 | Несинусоидальный режим, ПАФ отключен и КУ включен | 12,3 | 7,3 | 11,1 | 17,5 |
| 4 | Несинусоидальный режим, ПАФ и КУ включены | 8,7 | 4,7 | 7,9 | 12,7 |

По таблице 4.5 видно, что при включении конденсаторов и резонансном режиме работы сети рассматриваемые коэффициенты несинусоидальности тока и напряжения превышают их значения в режиме при отключенной конденсаторной установки. Так, при отсутствии фильтра и резонансе сети на 5 гармонике, коэффициенты искажения напряжений на стороне 0,4 кВ: $THD_U = 12,3\%$ и на стороне 10 кВ: $THD_U = 11,1\%$ превышают нормируемые значения показателей качества электроэнергии. Искажение тока на стороне 10 кВ: $THD_I = 17,5\%$ в 17 раз превышает его значение при отсутствии конденсаторов. Учитывая, что в рассматриваемой системе электроснабжения не подключается нелинейная нагрузка 10 кВ, можно сделать вывод, что такое искажение тока также является недопустимым.

На рисунках 4.7 и 4.8 приведены формы и спектральные составы напряжений и токов на шинах 0,4 и 10 кВ, по которым можно сделать выводы о степени искажений рассматриваемых сигналов.

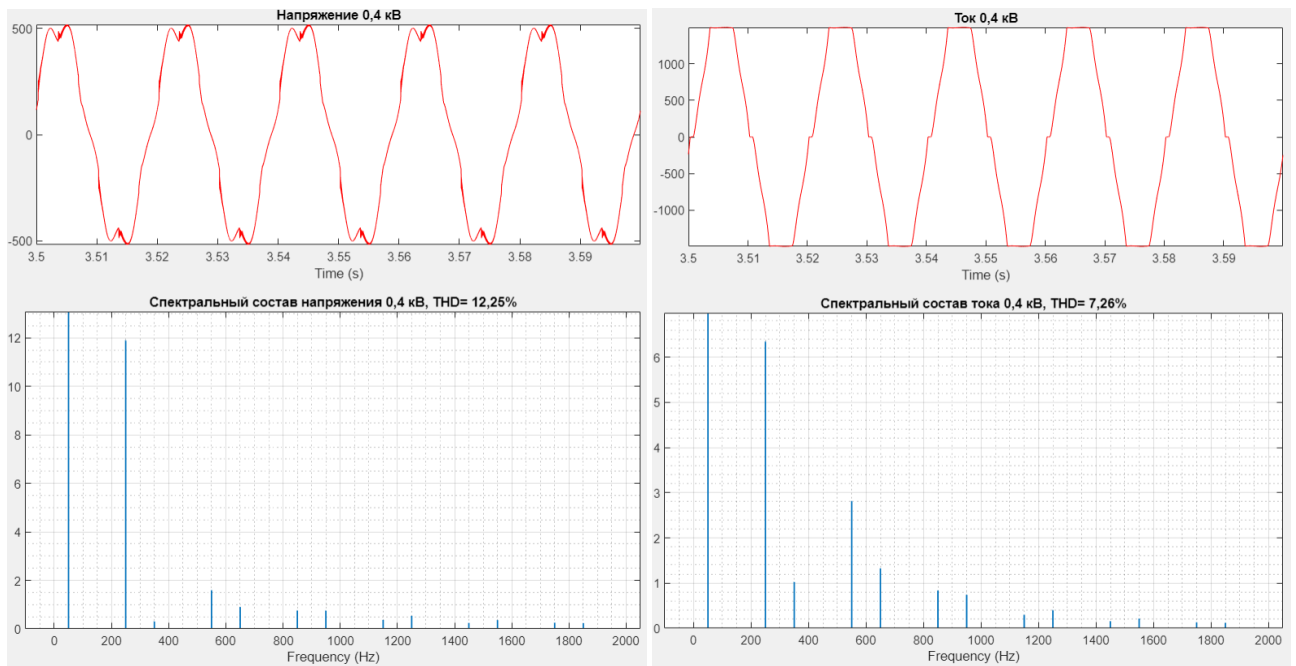


Рисунок 4.7 - Форма и спектральный состав напряжения и тока на стороне 0,4 кВ при резонансном режиме работы и отсутствии ПАФ

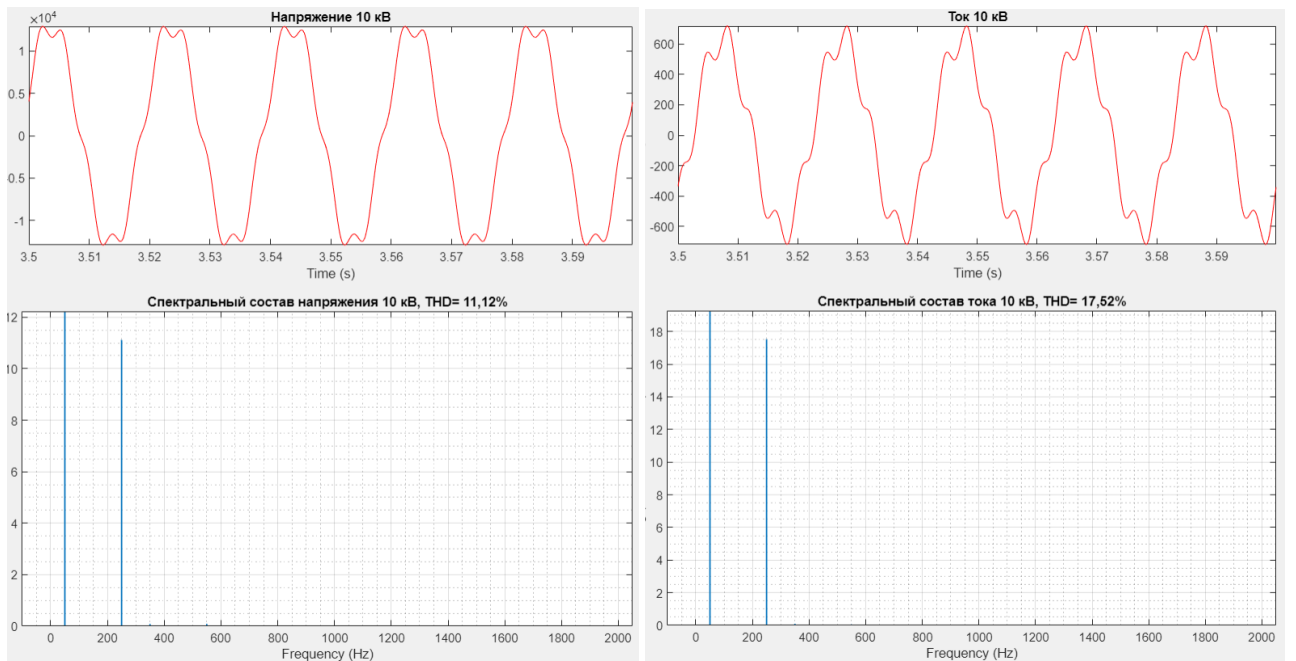


Рисунок 4.8 - Форма и спектральный состав напряжения и тока на стороне 10 кВ при резонансном режиме работы и отсутствии ПАФ

Активный фильтр позволяет улучшить качество электроэнергии как на стороне 0,4 кВ, так и на стороне 10 кВ. Наблюдается снижение коэффициентов несинусоидальности тока и напряжения, по сравнению с режимом работы сети при его отсутствии. Однако, на резонансном режиме работы активный фильтр неэффективно компенсирует гармонические искажения, и тем самым не

обеспечивает нормированный уровень качества напряжения на стороне низкого и среднего напряжения сети.

Известно, что параметры активного фильтра $L_{\text{АФ}}$, C_1 , C_2 влияют на его способность эффективно корректировать коэффициенты несинусоидальности тока и напряжения сети. В исследовании оценивались коэффициенты искажения на стороне 0,4 кВ: THD_U 0,4 кВ, THD_I 0,4 кВ и на стороне 10 кВ: THD_U 10 кВ, THD_I 10 кВ от изменения параметров активного фильтра в резонансном режиме работы сети. За базовую величину приняты параметры: $L_{\text{АФ}} = 0,3$ мГн, $C_1 = C_2 = 800$ мкФ. Параметры изменялись в следующих пределах: $L_{\text{АФ}} = 0,1 \dots 0,7$ мГн с шагом 0,05 мГн, $C_1 = C_2 = 100 \dots 1000$ мкФ с шагом 100 мкФ.

В ходе имитационного моделирования было установлено, что изменение емкости в рассматриваемом диапазоне практически не оказывало влияние на величины измеряемых коэффициентов (различие значений находится в диапазоне инженерной точности $\pm 10\%$). Поэтому, по результатам моделирования были построены зависимости THD_U 0,4 кВ, THD_I 0,4 кВ, THD_U 10 кВ, THD_I 10 кВ от изменения величины входного дросселя активного фильтра $L_{\text{АФ}}$ при базовой емкости $C_1 = C_2 = 800$ мкФ, приведенные на рисунках 4.9-4.10. На этих рисунках « THD_U (0,4 кВ) доп» и « THD_U (10 кВ) доп», выделенные точка пунктирными линиями – допустимые значения суммарных коэффициентов искажений напряжений в сетях 0,4 и 10 кВ соответственно.

На рисунках 4.9 и 4.10 видно, что для рассматриваемого активного фильтра при резонансном режиме работы сети индуктивность входного дросселя должна находиться в диапазоне $L_{\text{АФ}} = 0,3-0,4$ мГн. Отклонение параметра $L_{\text{АФ}}$ от рекомендуемой величины в меньшую сторону приводит к усилению искажения напряжения на стороне 0,4 кВ: $THD_U = 25\%$ при $L_{\text{АФ}} = 0,1$ мГн и $THD_U = 15\%$ при $L_{\text{АФ}} = 0,2$ мГн, в большую же сторону приводит к усилению искажений напряжения и тока на стороне 10 кВ: $THD_U = 6,4\%$, $THD_I = 10,3\%$ при $L_{\text{АФ}} = 0,5$ мГн.

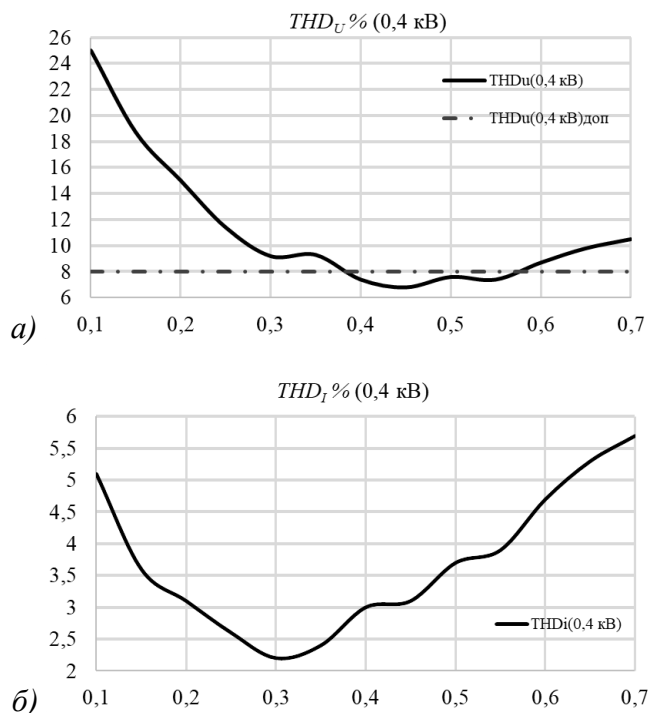


Рисунок 4.7 - Зависимости коэффициентов искажения напряжения $THD_U\%$ (а) и тока $THD_I\%$ (б) на стороне 0,4 кВ от величины индуктивности входного дросселя активного фильтра

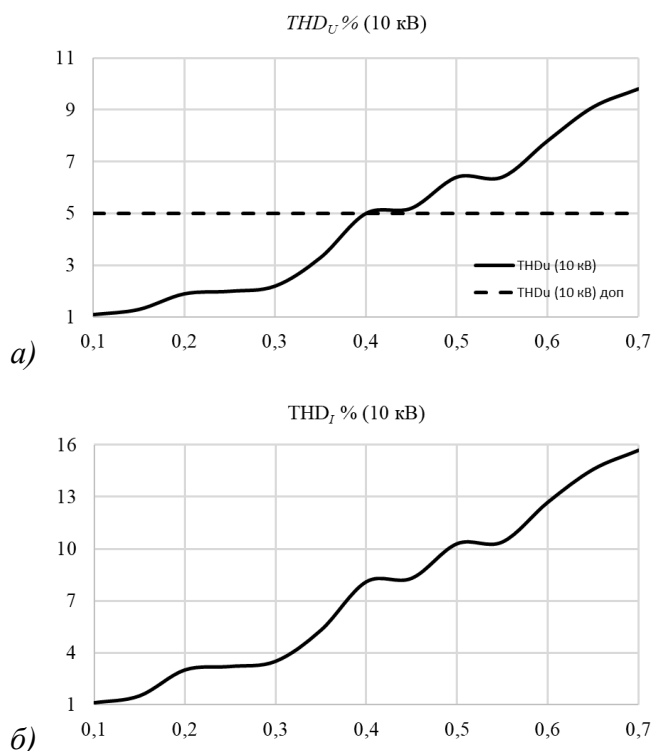


Рисунок 4.8 - Зависимости коэффициентов искажения напряжения $THD_U\%$ (а) и тока $THD_I\%$ (б) на стороне 10 кВ от величины индуктивности входного дросселя активного фильтра

Таким образом, имитационное моделирование работы активного фильтра было проведено при его наиболее рациональных параметрах $L_{АФ}$, C_1 , C_2 с точки

зрения минимизации гармонических искажений при работе активного фильтра. На основе этого можно сделать вывод, что снижение уровня качества электроэнергии до недопустимых по нормативным документам величин связано с возникновением резонансного режима на стороне 10 кВ, и не обусловлено некорректной настройкой параметров фильтра.

4.3. Имитационная модель типовой промышленной системы электроснабжения с линейной и нелинейной нагрузками, конденсаторными установками и активным фильтром с выходным пассивным активностемкостным фильтром

Для улучшения компенсационных характеристик активного фильтра в резонансных режимах сети в исследовании рассматривается гибридное фильтрокомпенсирующее устройство. Оно создано на основе активного фильтра, на выходе которого подключается пассивный RC -фильтр, показанный на рисунок 3.21 в. Конфигурация блока RC -фильтра приведена на рисунке 4.11.

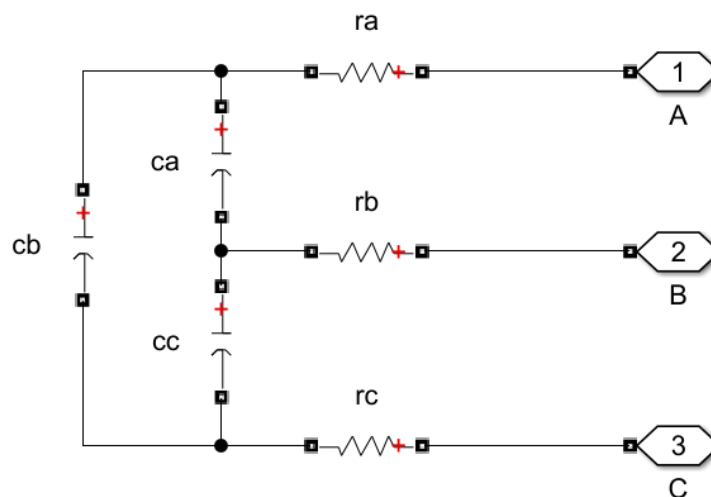


Рисунок 4.11 - Конфигурация блока RC -фильтра

Имитационная модель системы электроснабжения при включении активного фильтра с выходным RC -фильтром приведена на рисунке 4.12.

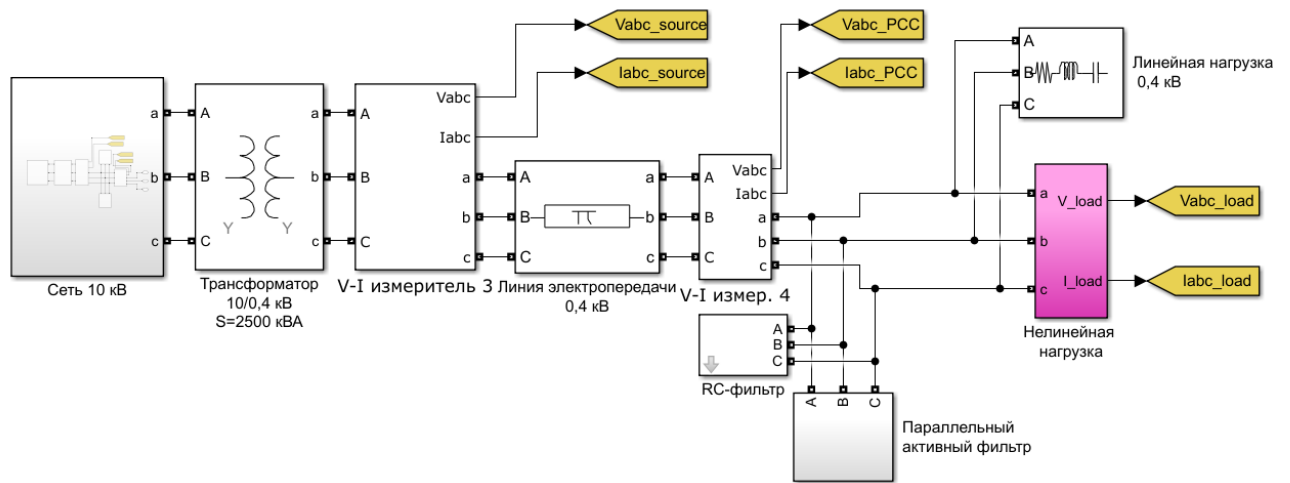


Рисунок 4.12 - Имитационная модель системы электроснабжения при включении активного фильтра с выходным активно-емкостным фильтром

В качестве параметров выходного RC -фильтра выбраны: $R = 0,8$ Ом, $C = 20$ мкФ. В результате моделирования были получены осциллограммы, спектральный состав и значения коэффициентов THD_U и THD_I на стороне 0,4 и 10 кВ, приведенные на рисунках 4.13 и 4.14.

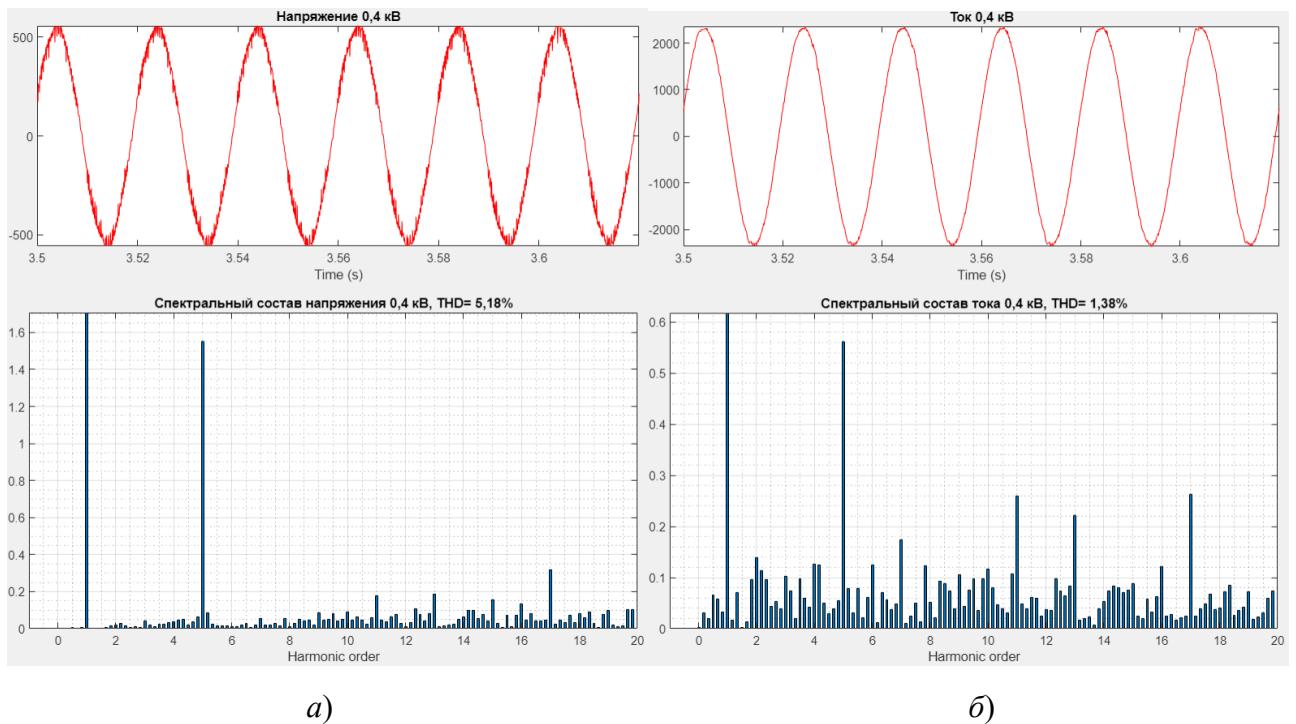
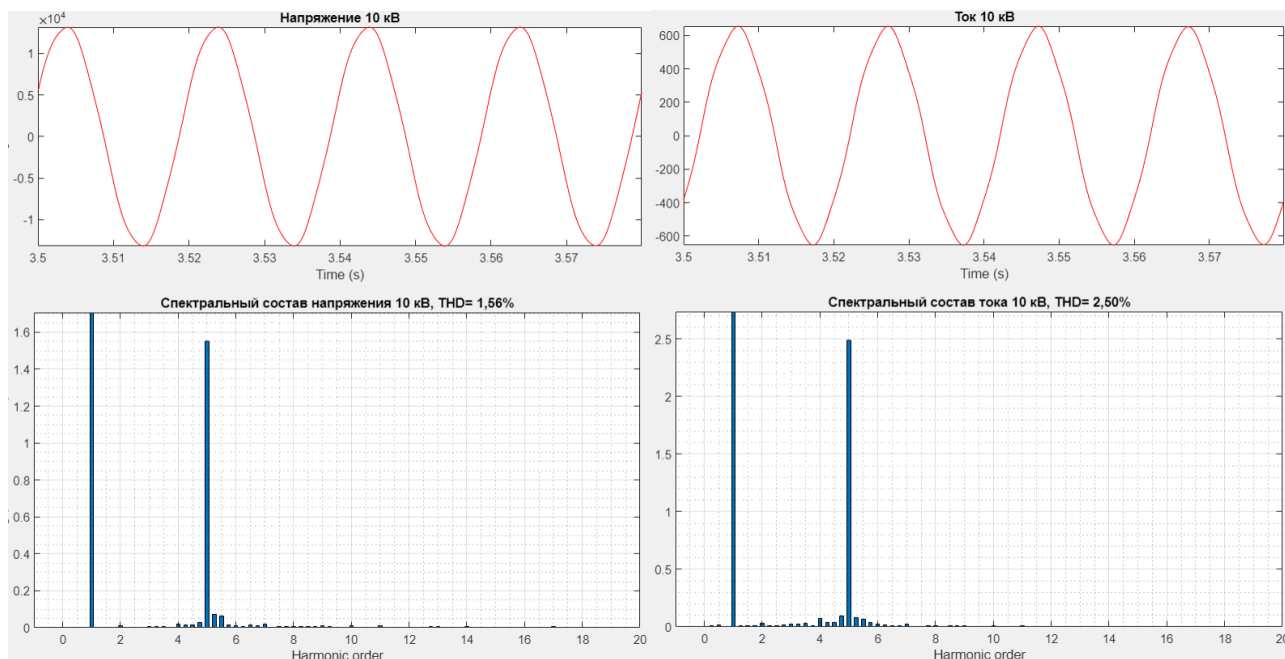


Рисунок 4.13 - Форма и спектральный состав напряжения (а) и тока (б) на стороне 0,4 кВ



а)

б)

Рисунок 4.14 - Форма и спектральный состав напряжения (а) и тока (б) на стороне 10 кВ

В качестве параметров выходного RC -фильтра выбраны: $R = 0,8$ Ом, $C = 20$ мкФ. В результате моделирования были получены осциллограммы, спектральный состав и значения коэффициентов THD_U и THD_I на стороне 0,4 и 10 кВ, приведенные на рисунках 4.13 и 4.14.

При включении RC -фильтра на выходе активного фильтра в резонансном режиме работы сети удалось снизить коэффициенты искажения тока на стороне 0,4 кВ: с $THD_I = 4,7\%$ до $THD_I = 1,4\%$, на стороне 10 кВ: с $THD_I = 12,7\%$ до $THD_I = 2,5\%$ и коэффициент искажения напряжения на стороне 0,4 кВ: с $THD_U = 8,7\%$ до $THD_U = 5,2\%$, на стороне 10 кВ: с $THD_U = 7,9\%$ до $THD_U = 1,6\%$, по сравнению с компенсацией гармонических искажений только активным фильтрокомпенсирующим устройством.

Рассмотрим влияние выходного RC -фильтра на импеданс сопротивления сети. Для этого отобразим рассматриваемую схему электроснабжения в виде однофазной схемы замещения, представленной на рисунке 4.15.

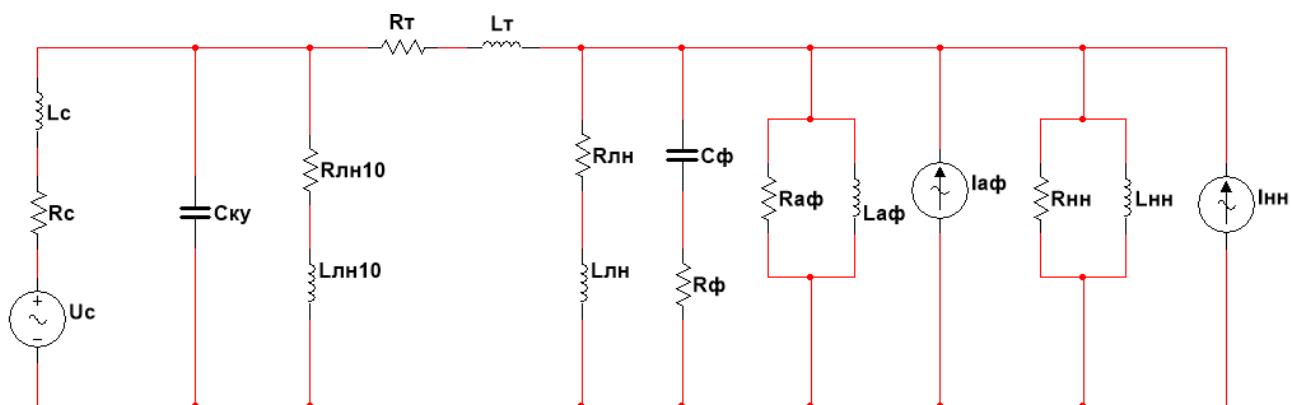


Рисунок 4.15 - Однофазная схема замещения рассматриваемой системы электроснабжения

Система 110 кВ и трансформатор 110/10 кВ моделировались последовательным активным сопротивлением и индуктивностью - R_C , L_C , линейная нагрузка 10 кВ - $R_{ЛН10}$, $L_{ЛН10}$, батарея конденсаторов 10 кВ емкостью - $C_{КУ}$, трансформатор 10/0,4 кВ- R_T , L_T , линейная нагрузка 0,4 кВ - $R_{ЛН}$, $L_{ЛН}$, выходной RC -фильтр - эквивалентным последовательным активно-емкостным сопротивлением - $R_{Ф}$, $C_{Ф}$, нелинейная нагрузка – источниками тока $I_{НН}$, имитирующие генерацию канонических гармоник и параллельным активным сопротивлением и индуктивностью - $R_{НН}$, $L_{НН}$, активных фильтр - источниками тока $I_{АФ}$, имитирующие генерацию высших гармоник и параллельным активным сопротивлением и индуктивностью - $R_{АФ}$, $L_{АФ}$. В процессе составления схемы замещения типовой системы электроснабжения все параметры приведены к базовой ступени высшего напряжения 10 кВ. Значения параметров однофазной схемы сведены в таблицу 4.6.

Оценка влияния параметров элементов сети, конденсаторов 10 кВ и RC -фильтра проводилась в *Simulink Matlab*. На рисунке 4.16 показан импеданс сети при резонансном режиме работы на 7-й гармонике ($C_K = 63$ мкФ) и при отсутствии выходного RC -фильтра. Видно, что сопротивление сети на резонансной частоте значительно превышает ее сопротивление на других частотах.

Таблица 4.6 - Параметры элементов системы электроснабжения, приведенные к напряжению 10 кВ

| Элементы системы | S , кВА | P , кВт | Q , квар | R , Ом | L , мГн | C , мкФ |
|----------------------------|-----------|-----------|------------|----------|-----------|-----------|
| Трансформатор 110/10 | 16000 | - | - | 0,06 | 3,34 | - |
| Линейная нагрузка 10 кВ | 10000 | 7000 | 7000 | 16 | 38,2 | - |
| Конденсаторы 10 кВ | - | - | 1800 | - | - | 63 |
| Трансформатор 10/0,4 кВ | 2500 | - | - | 0,42 | 7,64 | - |
| Линейная нагрузка 0,4 кВ | 1000 | 700 | 700 | 142,9 | 454,8 | - |
| Нелинейная нагрузка 0,4 кВ | 1000 | 800 | 600 | 125 | 530,8 | - |

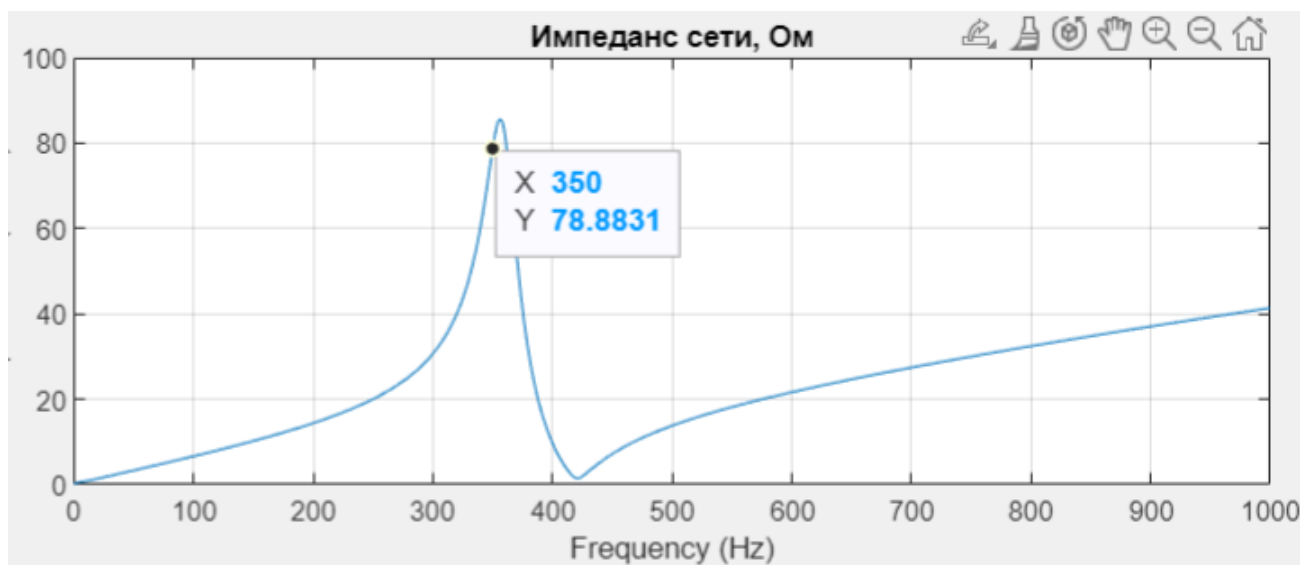


Рисунок 4.16 - Импеданс сети при резонансе на 7 гармонике ($C_K = 63$ мкФ) без RC -фильтра

Далее подключаем к сети RC -фильтр с различными параметрами емкости $C_\Phi = 10...60$ мкФ при неизменном активном сопротивлении $R_\Phi = 1,5$ Ом и оцениваем их влияние на АЧХ сопротивления сети. В качестве примера на рисунках 4.17 и 4.18 приведены импеданс сети при $C_\Phi = 30$ мкФ и $C_\Phi = 48$ мкФ.

По рисункам 4.17 и 4.18 видно, что при подключении RC -фильтра смещает резонансную частоту сети в сторону ее уменьшения, при этом также появляется дополнительный резонанс на более высокой частоте относительно

исходного резонанса, но меньший по амплитуде, связанный с параметром емкости фильтра. При $C_{\Phi} = 30$ мкФ резонанс сместился с 350 Гц на 250 Гц- на резонансную частоту 5 гармоника тока. Такой режим недопустим. При $C_{\Phi} = 48$ мкФ частота резонанса сместилась на 210 Гц, что позволяет избежать резонансных явлений на канонических гармониках тока.

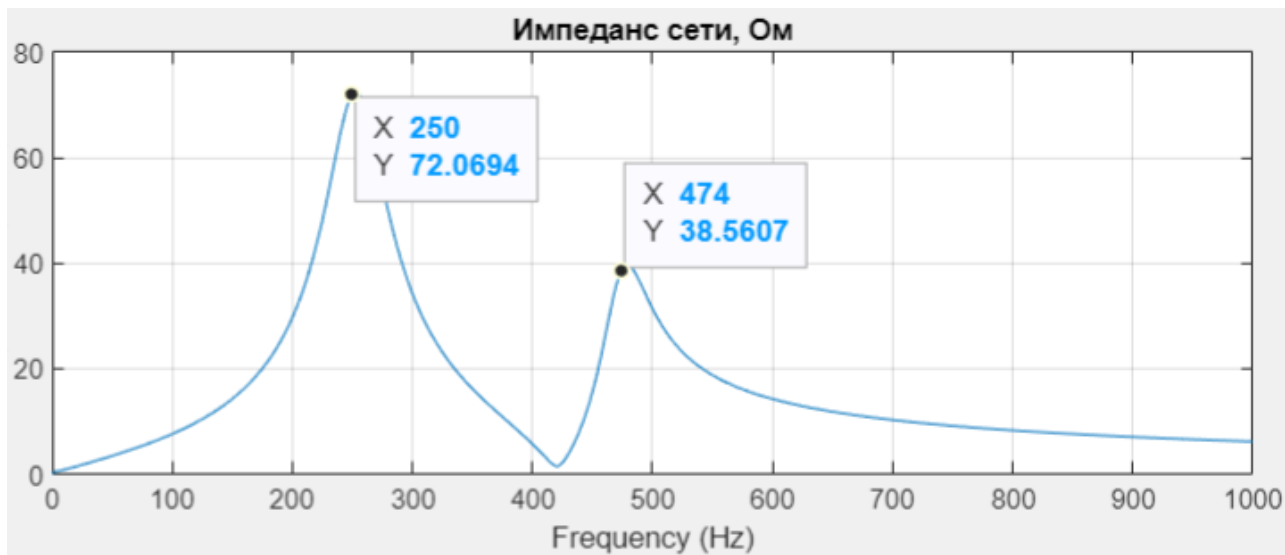


Рисунок 4.17 - Импеданс сети при резонансе на 7 гармонике и включении выходного RC -фильтра с параметром $C_{\Phi} = 30$ мкФ

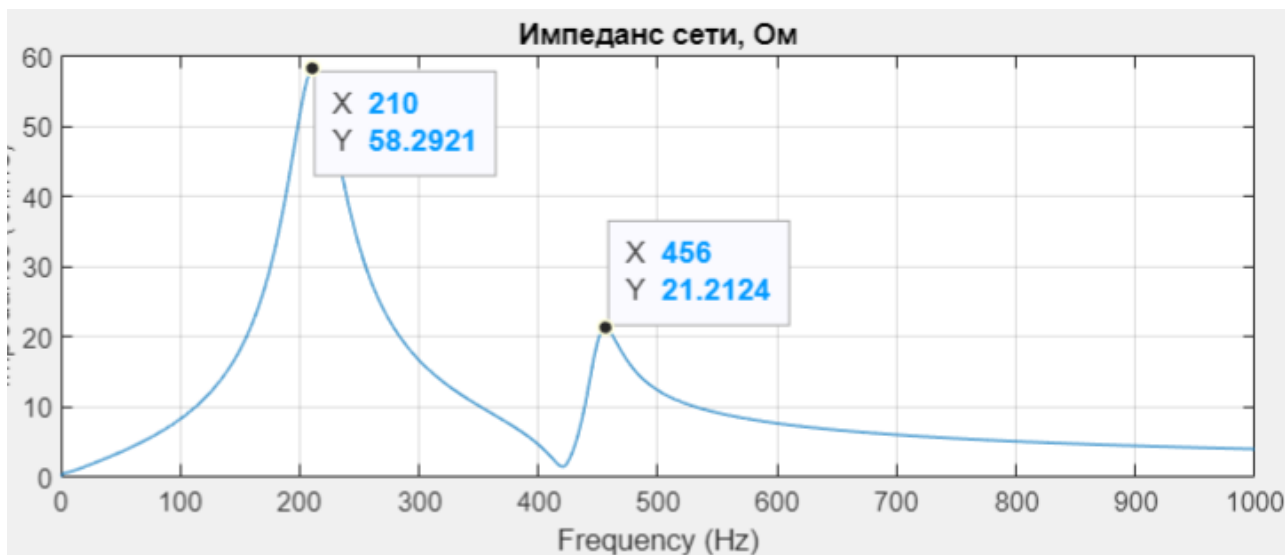


Рисунок 4.18 - Импеданс сети при резонансе на 7 гармонике и включении выходного RC -фильтра с параметром $C_{\Phi} = 48$ мкФ

Как показали результаты анализа и моделирования рассматриваемого режима сети с RC -фильтром, при $C_{\Phi} < 48$ мкФ коэффициенты искажения напряжения на сторонах 0,4 и 10 кВ являются недопустимыми, а при $C_{\Phi} > 48$

мкФ они снижаются до предельных значений, после которых не изменяются с ростом емкости фильтра.

На рисунке 4.19 приведены графики зависимостей THD_U 0,4 кВ на рисунке 4.19 а, THD_U 10 кВ на рисунке 4.19 б, THD_I 10 кВ на рисунок 4.19 в от емкости фильтра C_Φ на диапазоне 10..60 мкФ при $R_\Phi = 1,5$ Ом, по которому можно определить, что оптимальная емкость фильтра для снижения гармонического искажения - $C_\Phi = 48$ мкФ.

При плавном уменьшении емкости конденсаторных установок 10 кВ при неизменных параметрах RC -фильтра ($C_\Phi = 48$ мкФ, $R_\Phi = 1,5$ Ом) возможны резонансы на частотах 11 и более высоких гармоник, однако величина сопротивления сети на них будет меньше, чем в режиме при отсутствии выходного RC -фильтра, а значит будут и меньшие искажения напряжения. Так, при включении RC -фильтра и резонансе на 11 гармонике, сопротивление сети на резонирующей частоте $Z_{сети} = 15$ Ом, а при отключении RC -фильтра $Z_{сети} = 106$ Ом. Стоит учесть, что резонансы на частотах канонических гармоник при отсутствии и включении RC -фильтра будут возникать при разных значениях емкости конденсаторов 10 кВ.

Возникающий в результате работы RC -фильтра дополнительный резонанс на более высокой частоте относительно исходного резонанса, возможно демпфировать с помощью регулирования активного сопротивления фильтра R_Φ . Увеличение активного сопротивления позволяет снизить искажения тока и напряжения на частоте дополнительного резонансе сторонах 0,4 и 10 кВ, а также не допустить увеличения коэффициента токовой перегрузки $K_{OVL \Phi}$ конденсаторов выходного фильтра выше 1,3. Однако, увеличение R_Φ фильтра приведет и к увеличению потерь активной мощности на нем. Поэтому была проведена оценка влияния величины активного сопротивления выходного фильтра на снижение коэффициентов искажения тока и напряжения, а также коэффициентов токовой перегрузки конденсаторов RC -фильтра и на стороне 10 кВ. Базовые значения коэффициентов $K_{OVL \Phi} = 1,9$, $K_{OVL} = 1,2$.

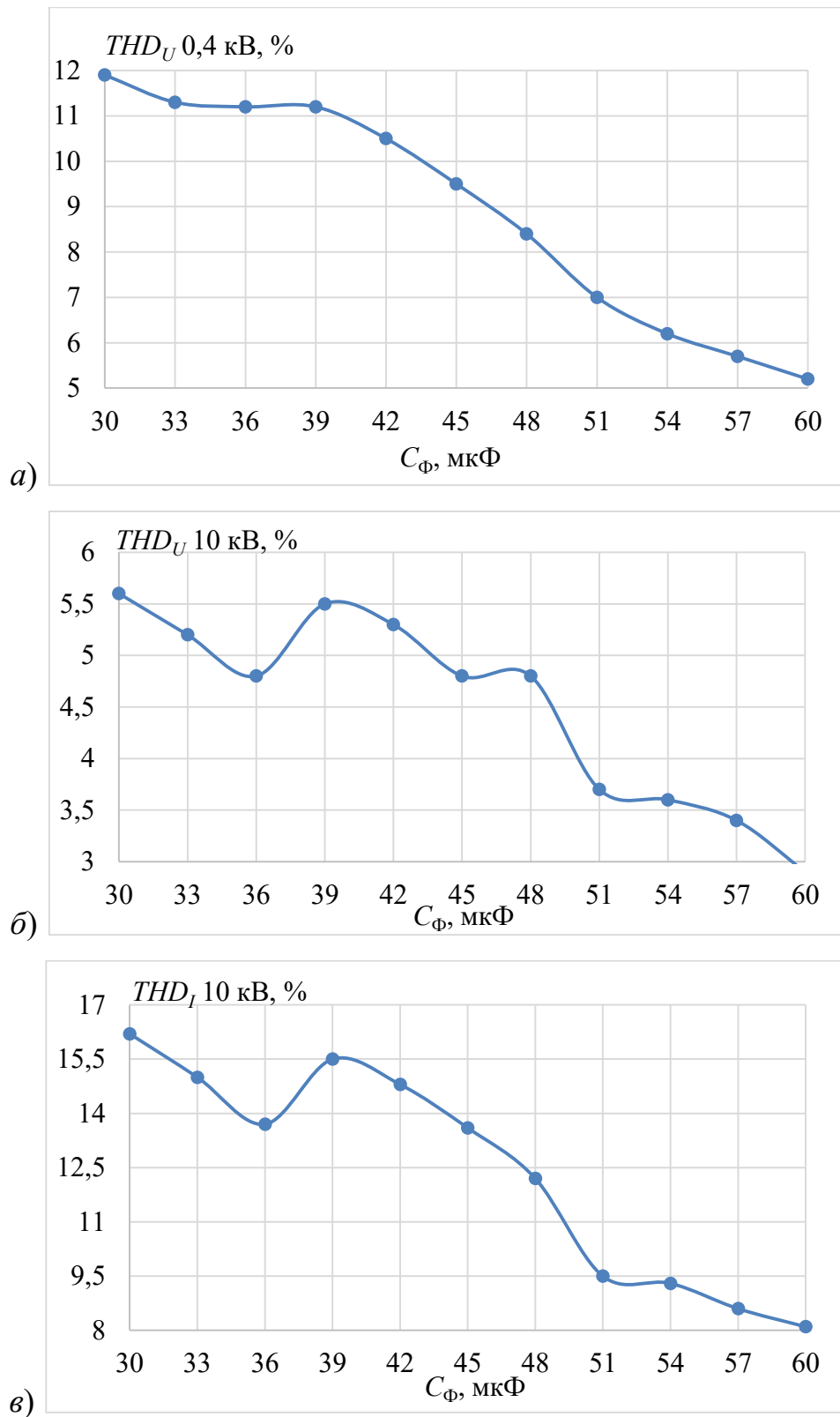


Рисунок 4.19 - Зависимости коэффициентов: а) - THD_U 0,4 кВ, б) - THD_U 10 кВ, в) - THD_I 10 кВ от емкости фильтра C_{Φ} при $R_{\Phi} = 1,5$ Ом

В результате моделирования было установлено, что при доле активного сопротивления в цепи RC -фильтра, определяемого коэффициентом K_Φ , который равен отношению емкостного сопротивления на частоте первой гармоники X_Φ к активному R_Φ : $K_\Phi = X_\Phi/R_\Phi$, $K_\Phi = 10$ удается снизить коэффициент перегрузки $K_{пер\ \Phi} = 1,3$ и коэффициенты искажения напряжений ΔTHD_U на стороне 0,4 и 10 кВ примерно на 30% (на стороне 0,4 кВ: с $THD_U = 8,7\%$ до $THD_U = 6,2\%$; на стороне 10 кВ: с $THD_U = 7,9\%$ до $THD_U = 5,9\%$). При этом потери активной мощности ΔP на R_Φ фильтра увеличиваются на 42 кВт.

Отдельно стоит отметить, что R_Φ незначительно влияет на величину токовой перегрузки K_{OVL} конденсаторов 10 кВ. Поэтому, в случае коррекции значения коэффициента токовой перегрузки конденсаторов 10 кВ K_{OVL} необходимо сначала скорректировать величину C_Φ выходного фильтра, а уже после этого выбрать наиболее оптимальный параметр R_Φ .

Следовательно, для повышения эффективности компенсации высших гармоник и недопущения образования резонансных контуров на канонических гармониках рекомендуется включать RC -фильтр в сеть только при их возникновении для смещения пика АЧХ сети от резонансной частоты.

Известно, что, в зависимости от алгоритма управления, активное или гибридное фильтрокомпенсирующее устройство способно не только повышать качество тока и напряжения, но и корректировать коэффициент мощности [135, 136, 146]. В исследовании была оценена способность активного фильтра и гибридного устройства на основе активного и выходного активно-емкостного фильтров увеличивать коэффициенты мощности сети K_m и по первой гармонике K_{m1} . Результаты моделирования показали, что в зависимости от параметров гибридной структуры фильтра, при его включении в сеть, коэффициент мощности сети повышается в среднем на 2-3%, по сравнению с включением только активного фильтра.

На рисунке 4.20 приведены зависимости доли увеличения коэффициентов мощности K_m и по первой гармонике K_{m1} от параметров активно-емкостного фильтра (от коэффициента K_Φ , который равен отношению емкостного

сопротивления на частоте первой гармоники X_Φ к активному R_Φ : $K_\Phi = X_\Phi/R_\Phi$) по сравнению с режим работы сети при отсутствии фильтрокомпенсирующего устройства.

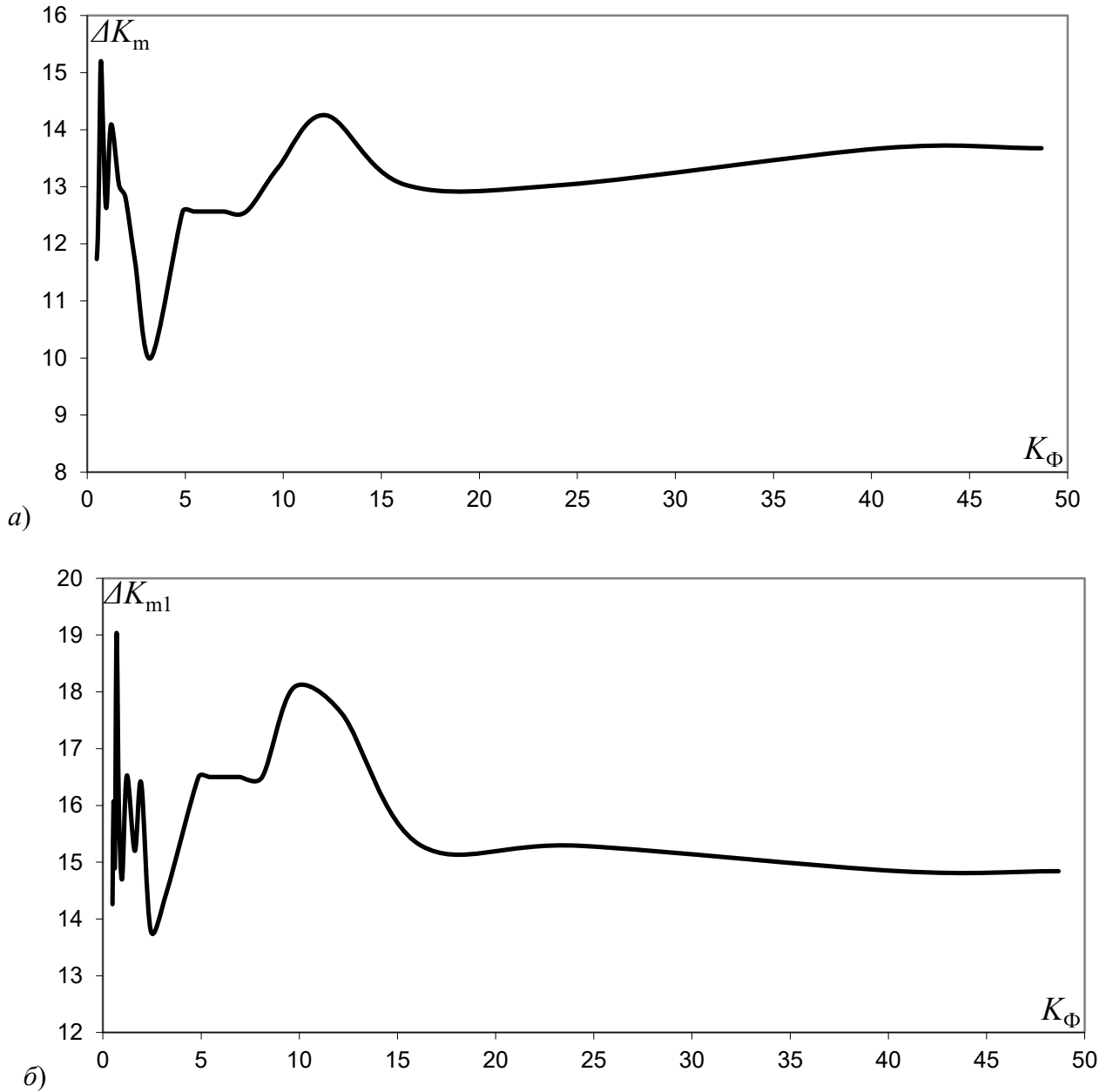


Рисунок 4.20 – Зависимости доли увеличения коэффициентов мощности K_m (а) и по первой гармонике K_{m1} (б) от параметров активно-емкостного фильтра

По рисункам 4.20 а,б видно, что при включении активного фильтра с пассивной активно-емкостной частью минимальная доля увеличения коэффициентов мощности $\Delta K_m = 13,7\%$, $\Delta K_{m1} = 14,8\%$. Увеличение доли активного сопротивления до $K_\Phi > 15$ практически не изменяет коэффициент

мощности: так, при $K_{\Phi} = 15$: $\Delta K_m = 13,2\%$, $\Delta K_{m1} = 15,5\%$. Наибольший прирост коэффициента мощности наблюдается при $K_{\Phi} \approx 8..12$ и $K_{\Phi} \approx 1..2$. Однако, как было сказано выше, увеличение активного сопротивления фильтра приводит и к увеличению активных потерь мощности на нем.

Следовательно, гибридный фильтр на основе активного и пассивного выходного RC -фильтров позволяет увеличить коэффициент мощности сети. Однако, с учетом многофакторности задач, которые решает пассивный выходной активно-емкостной фильтр, критерий выбора его параметров, основанный на обеспечения наивысших значений коэффициентов мощности K_m и K_{m1} , является второстепенным.

Как видно по рисунку 4.19, с увеличением емкости RC -фильтра снижаются гармонические искажения напряжений сети 0,4 и 10 кВ. Однако, такие снижения сопровождаются и негативными эффектами: повышается уровень потребления тока в распределительной сети 0,4 кВ, увеличиваются падение напряжения на RC -фильтре, потери мощности на активном сопротивлении фильтра, и возможен режим перекомпенсации сети по реактивной мощности.

По результатам имитационного моделирования были выявлены следующие закономерности, представленные на рисунке 4.21 а, б. Данные закономерности получены за счет вариации параметров пассивного активно-емкостного фильтра с целью отразить его влияние на степень эффективности компенсации высших гармоник напряжения в сети 0,4 кВ.

Выявленные закономерности, приведенные на рисунке 4.21, показывают, что повышение эффективности компенсации высших гармоник напряжения и тока при использовании параллельного активного фильтра с выходным пассивным сопровождается увеличением потребляемого узлом нагрузки тока и падения напряжения на пассивном фильтре. При включении пассивного активно-емкостного фильтра на выходе активной части THD_U становится ниже 8 %, коэффициент THD_I 10 кВ снижается до 8,2% при увеличении потребляемого тока на 25 % и падения напряжения на фильтре на 5,5%. При

незначительном увеличении потребляемого тока (на 5 - 10 %) при включении пассивного фильтра на выходе активной части коэффициент THD_I 10 кВ снижается более чем в 1,3 раза с 16,2% до 12,2%, однако, аналогичный коэффициент по напряжению THD_U становится выше 8 %. Эти побочные эффекты необходимо учитывать при настройке параметров пассивного фильтра на выходе активной части в составе фильтрокомпенсирующего устройства.

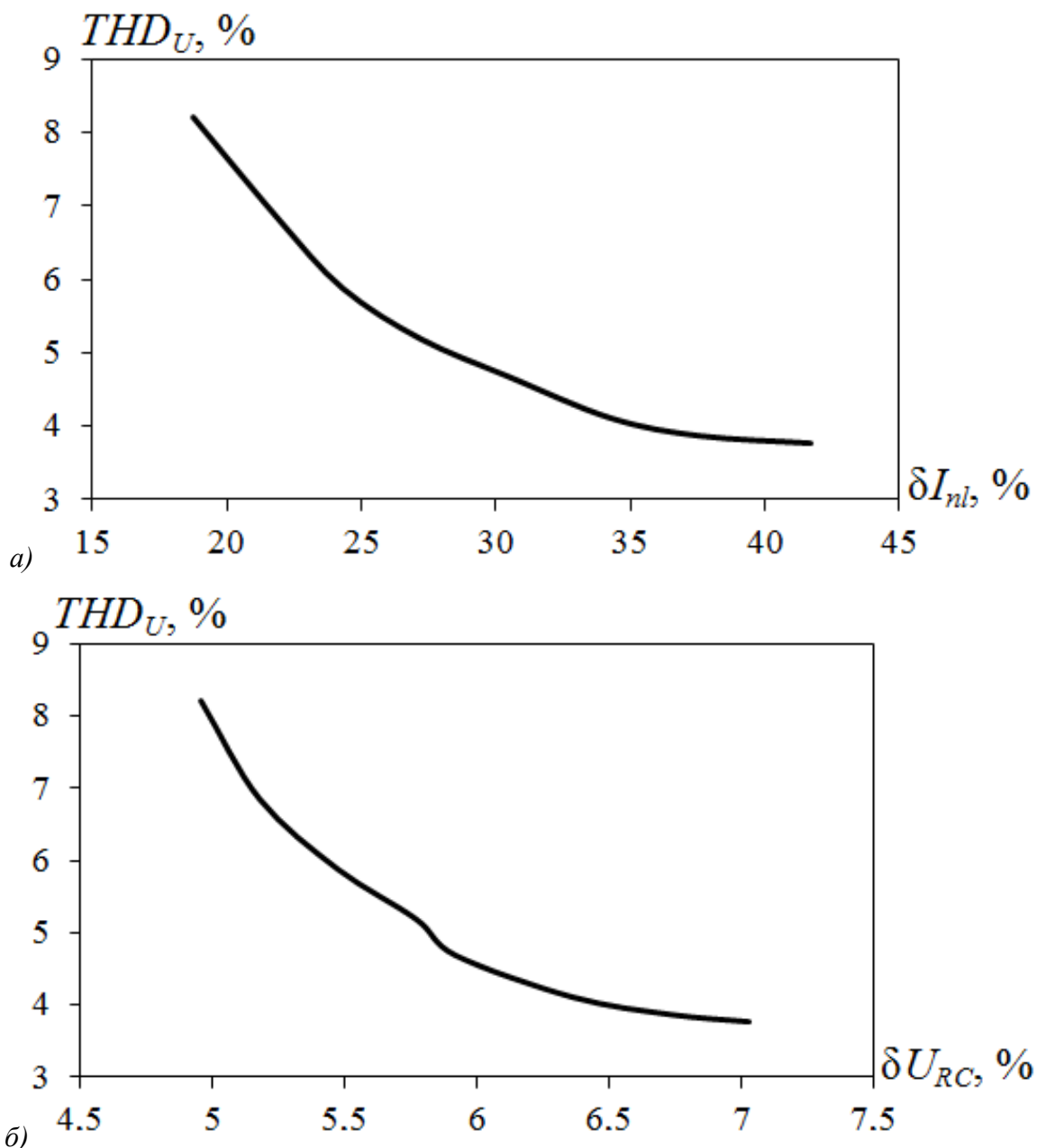


Рисунок 4.21 - Зависимости изменения суммарного коэффициента гармонических искажений по напряжению THD_U на зажимах узла нагрузки 0,4 кВ от степени:

- а) Увеличения потребляемого тока узла нагрузки δI_{nl} ;
- б) Увеличения падения напряжения на RC - фильтре δU_{RC} .

Таким образом, выявленные закономерности позволяют выбрать наиболее рациональную настройку параметров активно-емкостного пассивного фильтра, установленного на выходе активной части, в случае совместной работы конденсаторных установок с параллельным активным фильтром исходя из требуемого уровня высших гармоник тока и напряжения после компенсации с учетом допустимого увеличения тока, потребляемого узлом нагрузки и падения напряжения на выходном пассивном фильтре.

Стоит отметить, что при рассмотрении вопроса компенсации гармоник с помощью гибридного фильтра, состоящего из активного (ПАФ) и пассивного RC -фильтра уровень негативных эффектов от его работы снижается по мере увеличения резонирующей гармоники, на величину которой настроены параметры его пассивной части. Так при резонансе на 11 и выше гармониках параметры активно- емкостного фильтра: ($C_{\Phi} = 10$ мкФ, $R_{\Phi} = 1,5$ Ом).

Полное сопротивление сети при резонансе на 11 гармонике и при отсутствии RC -фильтра представлено на рисунке 4.22, при включении активно-емкостного фильтра: ($C_{\Phi} = 10$ мкФ, $R_{\Phi} = 1,5$ Ом) на рисунке 4.23.

В таблице 4.7. сведены результаты имитационного моделирования сети при резонансном режиме работы на 11 гармонике и при включении параллельного активного фильтра и при отсутствии или добавлении пассивного RC -фильтра.

Таблица 4.7 - Результаты имитационного моделирования системы электроснабжения с активным фильтром и выходным RC -фильтром

| Рассматриваемые режимы | | THD_U (0,4 кВ) % | THD_I (0,4 кВ) % | THD_U (10 кВ) % | THD_I (10 кВ) % |
|------------------------|--|-----------------------|-----------------------|----------------------|----------------------|
| 1 | Несинусоидальный режим, ПАФ и КУ включены, RC -фильтр отключен | 8,2 | 5,3 | 6,9 | 13 |
| 2 | Несинусоидальный режим, ПАФ и КУ включены, а также добавлен выходной RC -фильтр: $C_{\Phi} = 10$ мкФ, $R_{\Phi} = 1,5$ Ом | 3,9 | 2,2 | 1,1 | 2,3 |

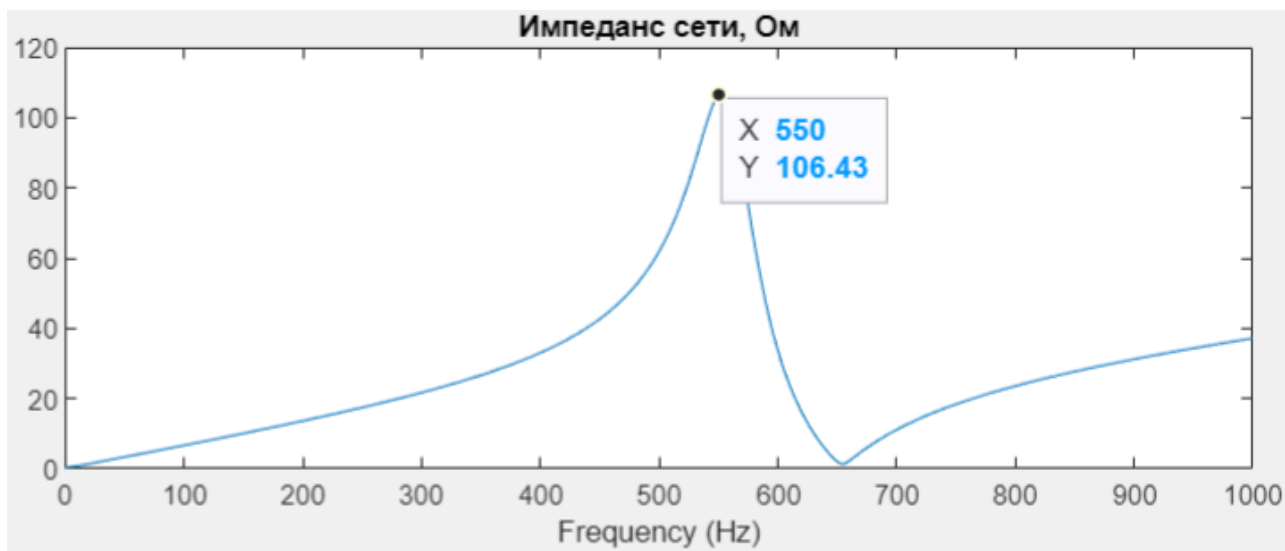


Рисунок 4.22 - Импеданс сети при резонансе на 11 гармонике ($C_K = 27$ мкФ) без RC -фильтра

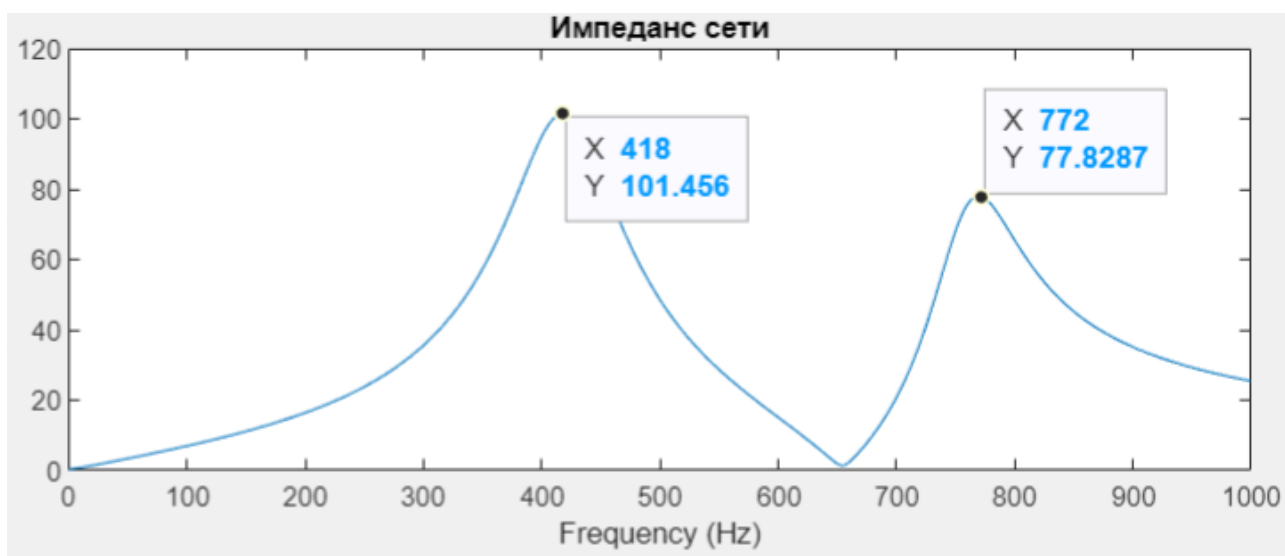
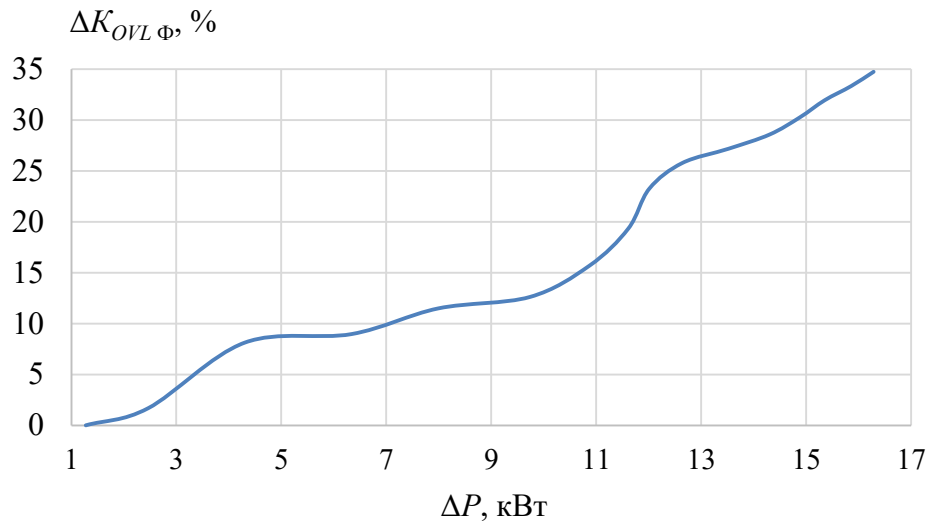


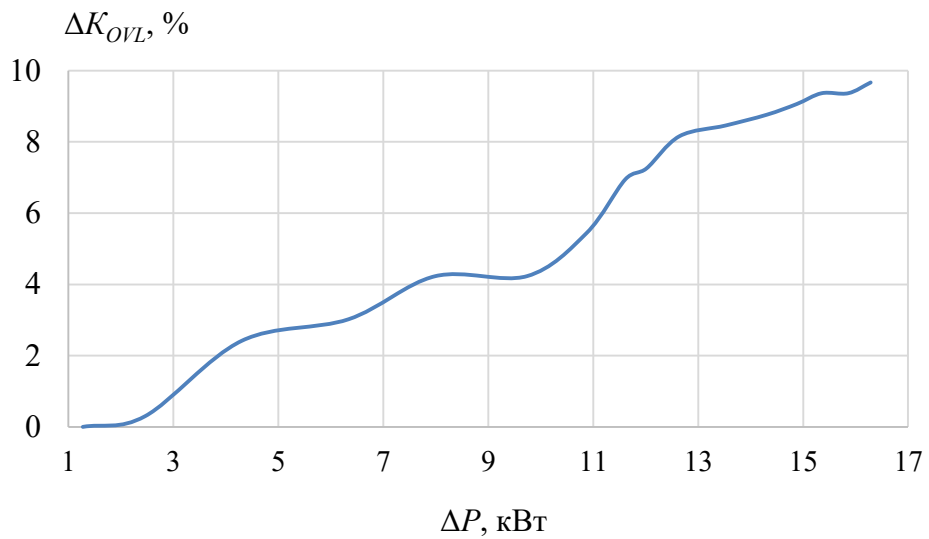
Рисунок 4.23 - Импеданс сети при резонансе на 11 гармонике и включении выходного RC -фильтра с параметром $C_\Phi = 10$ мкФ

Как видно из результатов имитационного моделирования, представленных в таблице 4.7, на резонансном режиме работы на 11 гармонике активный фильтр неэффективно компенсирует гармонические искажения. В случае включения RC -фильтра на уровне 0,4 кВ снижаются: THD_U с 8,2% до 3,9%, THD_I с 5,3% до 2,2%, на уровне 10 кВ снижаются: THD_U с 6,9% до 1,1%, THD_I с 13% до 2,3%. При этом увеличение потребления тока в распределительной сети 0,4 кВ $\delta I_{nl} = 10\%$, а увеличение падения напряжения на активно-емкостном фильтре $\delta U_{RC} = 3,4\%$. Наблюдаются уменьшения величин потребляемого тока и

уровня падения напряжения в узле нагрузки при увеличении номера гармоники, от частоты которой отстраиваются параметры выходного RC -фильтра.



а)



б)

Рисунок 4.24 – Зависимости доли уменьшения коэффициентов токовой перегрузки конденсаторов RC -фильтра (а) и конденсаторов 10 кВ (б) от мощности активных потерь на фильтре

На рисунках 4.24 - 4.26 приведены зависимости доли изменения (в процентах) коэффициентов токовой перегрузки конденсаторов RC -фильтра и конденсаторов 10 кВ ($\Delta K_{OVL \text{ Ф}}, \Delta K_{OVL}$), искажения тока и напряжения на стороне 0,4 кВ ($\Delta THD_U 0,4 \text{ кВ}, \Delta THD_I 0,4 \text{ кВ}$) и на стороне 10 кВ ($\Delta THD_U 10 \text{ кВ}, \Delta THD_I 10 \text{ кВ}$) от величины потерь активной мощности $\Delta P, \text{ кВт}$, связанной с

регулированием R_Φ фильтра. Доля активного сопротивления в цепи RC -фильтра определялась коэффициентом K_Φ , который равен $K_\Phi = X_\Phi/R_\Phi$. При моделировании режимов работы сети K_Φ регулировался и принимался равным 10..50.

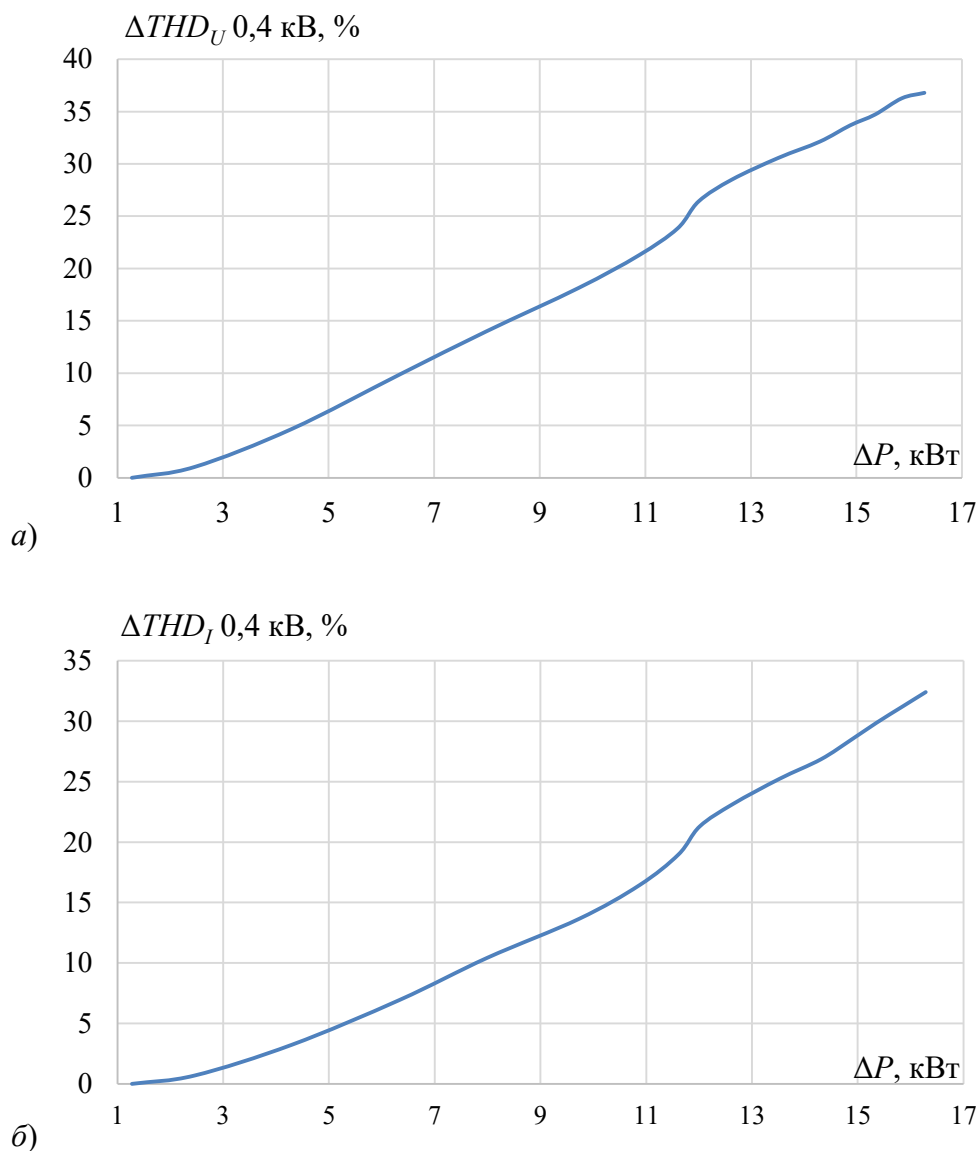


Рисунок 4.25 – Зависимости доли уменьшения коэффициентов искажения напряжения (а) и тока (б) в сети 0,4 кВ от мощности активных потерь на фильтре

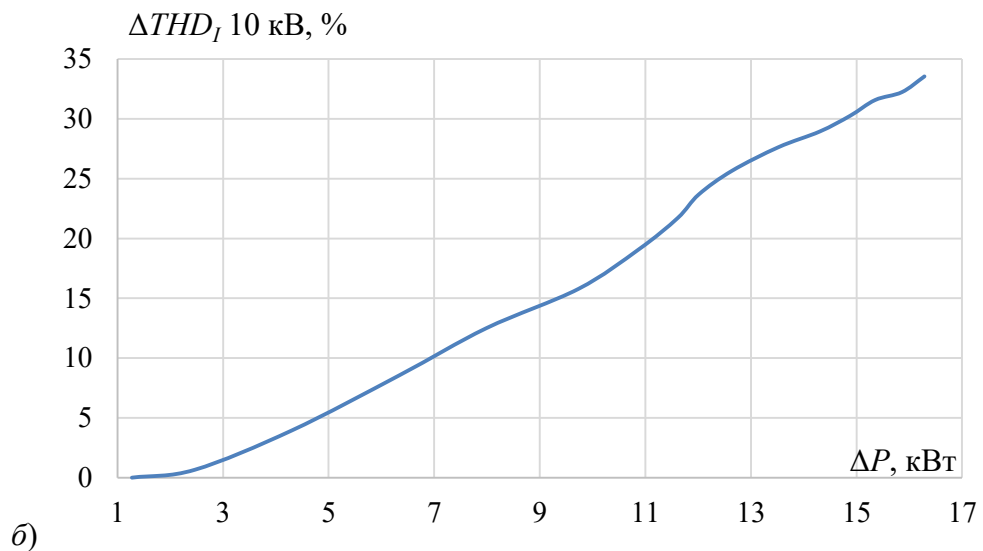
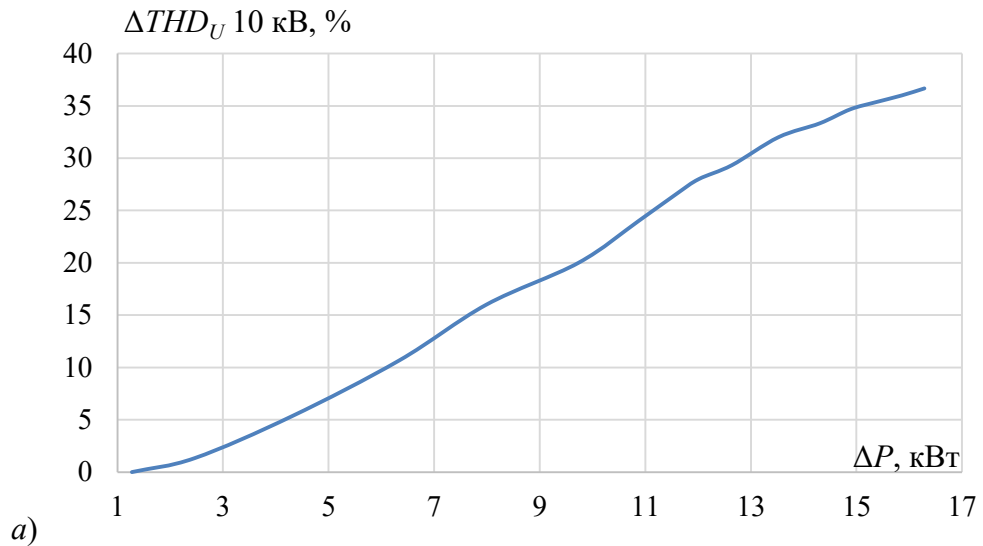


Рисунок 4.26 – Зависимости доли уменьшения коэффициентов искажения напряжения (а) и тока (б) в сети 10 кВ от мощности активных потерь на фильтре

Из полученных на рисунках 4.24 – 4.26 зависимостей можно сделать вывод, что увеличение активного сопротивления позволяет значительно снизить величины рассматриваемых коэффициентов. Правильный выбор величины R_Φ должен быть основан на недопущении токовой перегрузки K_{OVL} конденсаторов фильтра и снижении коэффициентов искажения напряжений в сетях 0,4 и 10 кВ до допустимых значений при минимизации потерь активной мощности на нем.

В случае, если анализ режимов работы сети показывает, что в системе возможны резонансы как на 5 и 7 гармониках, так и на более высоких из-за

регулирования мощности конденсаторов 10 кВ, то для повышения эффективности компенсации гармонических искажений можно выбрать один из нескольких технических решений.

Первый способ исходит из анализа результатов данного диссертационного исследования. В нем показано, что активный фильтр способен компенсировать гармонические искажения при доли нелинейной нагрузки 0,4 и более от мощности питающего трансформатора при корректной установке его параметров $L_{АФ}$, C_1 , C_2 . При этом, такой фильтр может неэффективно работать при наличии резонансного режима на ступени напряжения выше от него - 10 кВ. Значит, необходимо предотвратить возможность возникновения резонанса между емкостью конденсаторов 10 кВ и индуктивностью сети 10 кВ. Техническим решением для этого является установка в цепи конденсаторной батареи последовательно с ней антирезонансного дросселя, работа которого подробно рассмотрена в главе 3. Такие дроссели производятся на российских предприятиях, в том числе на Новосибирском заводе конденсаторов [52]. Однако, антирезонансный дроссель увеличивает приложенное напряжение на конденсатор на 7% (при настройке дросселя от возникновения резонанса в сети на 5 гармонике и выше) и на 14% (при настройке дросселя от возникновения резонанса в сети на 3 гармонике и выше) - требуются конденсаторы повышенного напряжения. В сетях уже работающих предприятий могут быть установлены конденсаторы, которые неспособны работать под таким повышенным напряжением. Также антирезонансные дроссели не способны эффективно работать при наличии высших гармоник напряжения на стороне 10 кВ со стороны питающей сети [135, 136, 146]. Значит, в этих случаях, установка антирезонансных дросселей 10 кВ является неэффективным решением по повышению уровня компенсации гармоник тока и напряжения активным фильтром.

Второй способ заключается в установке в узле нелинейной нагрузке гибридного фильтрокомпенсирующего устройства на основе параллельного активного фильтра и пассивных узкополосных фильтров, настроенных на

подавления наиболее мощных по величине высших гармоник. Такой тип гибридного фильтра является наиболее распространенным в сетях промышленных предприятий [11, 53, 75, 154-159]. Конфигурация такого фильтра, его математическое описание и результаты имитационного моделирования его работы широко освещены в научных трудах российских и зарубежных ученых [123, 137-139, 165-170]. Одной из оптимальных конфигураций является гибридный фильтр на основе ПАФ и узкополосных ПФ, настроенных на наибольшие по величине амплитуды тока, например, на 5 и 7 гармоники. Работа такой структуры фильтра и ее высокая эффективность компенсации высших гармоник рассмотрена в работах [154-159]. Однако в монографии [92] показано, что активная часть гибридного фильтра не влияет на значение резонансной частоты сети, а только способна снизить на ней величину сопротивления сети. Из этого можно сделать вывод, что в состав такого гибридного фильтра, кроме узкополосных фильтров 5 и 7 гармоники, должны также входить и ПФ, настроенные на подавления более высоких гармоник, на частотах которых могут возникать резонансные режимы работы.

Следовательно, необходимо рассмотреть возможность применения гибридного фильтрокомпенсирующего устройства на основе структуры, в которой пассивная часть состоит из блока узкополосных фильтров 5 и 7 гармоник, и выходного RC -фильтра, параметры которого настроены для повышения эффективной работы фильтра на более высоких частотах канонических гармоник. Принцип выбора параметров выходного активно-емкостного фильтра, а также ограничения его использования будут аналогичны структуре фильтрокомпенсирующего устройства, состоящего только из параллельного активного фильтра.

Таким образом, рассмотрены режимы работы сети горного предприятия при резонансе на разных частотах канонических гармоник при работе в ней рассматриваемых структур гибридных фильтрокомпенсирующих устройств, на выходе которых установлен пассивный активно-емкостной фильтр. По результатам исследования установлено, что ПАФ с RC -фильтром на выходе в

сети 0,4 кВ с нелинейной нагрузкой необходимо использовать тогда и только тогда, когда имеет место резонансный режим на стороне 10 кВ при наличии высоковольтных конденсаторных установок компенсации реактивной мощности определенной емкости, которая определяется на основе анализа характера импеданса сети относительно источника высших гармоник, учитывая негативные эффекты, которые возникают в распределительной сети 0,4 кВ при его работе.

4.4. Разработка алгоритма выбора параметров активно-емкостного фильтра на выходе параллельного активного фильтра

По результатам теоретических и экспериментальных исследований установлено, что классический параллельный активный фильтр вне зависимости от используемого алгоритма управления не способен эффективно подавлять высшие гармоники при совместной работе с конденсаторными установками. Однако выходной пассивный фильтр помогает активному фильтру сохранить определенный уровень эффективности исходя из ограничений, налагаемых конфигурацией системы электроснабжения. Также необходимо отметить, что использование пассивного фильтра на выходе активной части дает ряд побочных эффектов, уровень которых нужно оценивать применительно к конкретным условиям применения. Использование предлагаемого алгоритма позволяет дать соответствующую оценку подобным эффектам.

На основе результатов моделирования разработан алгоритм выбора параметров RC -фильтра на выходе параллельного активного фильтра, приведенный на рисунке 4.27, при резонансных режимах в промышленных системах электроснабжения с нелинейной нагрузкой и конденсаторными установками.

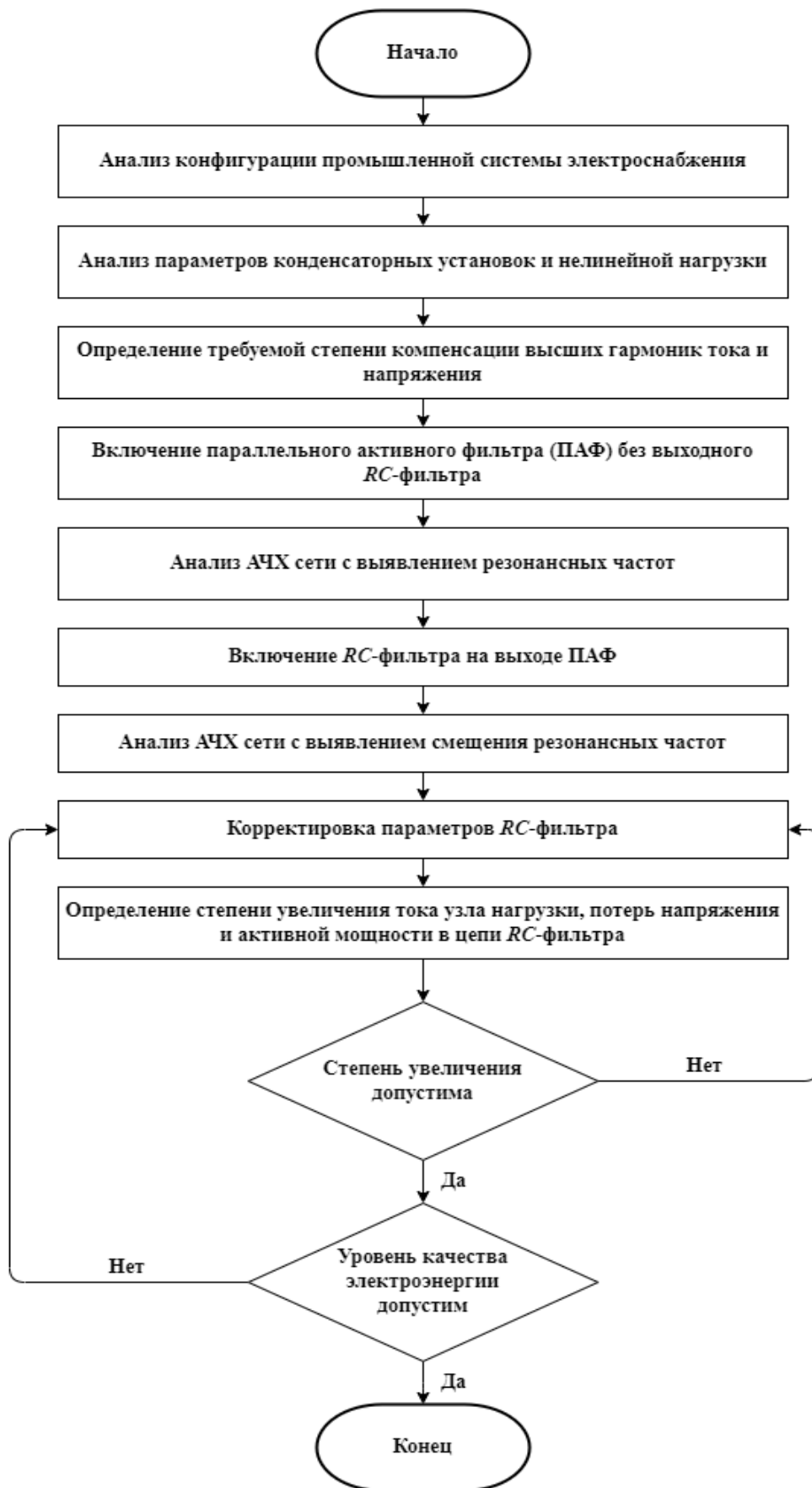


Рисунок 4.27 - Алгоритм выбора параметров RC -фильтра на выходе параллельного активного фильтра при резонансных режимах в промышленных системах электроснабжения с нелинейной нагрузкой и конденсаторными установками

Обобщенный алгоритм по выбору параметров RC -фильтра, устанавливаемого на выходе ПАФ, реализуется исходя из следующих ключевых факторов:

- смещения резонансной частоты, обусловленной образованием резонансного контура «емкость конденсаторов-индуктивность системы электроснабжения» на частоте высшей гармоники, в сторону более низких частот;
- смещения дополнительного резонанса, обусловленного установкой RC -фильтра на выходе ПАФ, в сторону частот, превышающих частоты канонических высших гармоник, а именно 5, 7, 11, 13;
- минимизации степени увеличения тока, потребляемого узлом нагрузки при установке ПАФ с выходным RC -фильтром;
- минимизации потерь напряжения на RC -фильтре;
- диапазона регулирования емкости конденсаторов компенсации реактивной мощности на стороне 10 кВ с целью недопущения смещения дополнительного резонанса, обусловленного установкой RC -фильтра на выходе ПАФ, в сторону частот канонических гармоник 5, 7, 11, 13;
- возможного роста ширины частотного диапазона резонанса, обусловленного емкостью конденсаторов 10 кВ и индуктивностью трансформатора 110/10 кВ и дополнительного резонанса, обусловленного установкой RC -фильтра на выходе ПАФ, за счет увеличения активного сопротивления RC -фильтра. При этом амплитуда резонансного пика (величины полного сопротивления сети на частоте резонанса) снижается;
- выбора величины активного сопротивления R_{Φ} выходного активно-емкостного фильтра, который должен быть основан на недопущении токовой перегрузки $K_{\text{пер}\Phi}$ конденсаторов фильтра и требуемой степени снижении коэффициентов искажения напряжений и токов в сетях 0,4 и 10 кВ до допустимых значений при минимизации потерь активной мощности на нем.

4.5. Техничко-экономическая оценка применения активно-емкостного фильтра на выходе параллельного активного фильтра

В исследовании поставлена задача технико-экономической оценки применения активно-емкостного фильтра на выходе параллельного активного фильтра для повышения уровня качества электрической энергии и обеспечения требуемого уровня компенсации реактивной мощности в условиях несинусоидальных режимов промышленных систем электроснабжения при наличии резонансных явлений.

На примере работы систем электроснабжения горно-обогатительных комбинатов известны случаи, когда конденсаторные установки компенсации реактивной мощности находятся в выключенном состоянии из-за их перегрузки токами высших гармоник. Тогда реактивная мощность, необходимая ее потребителям в промышленных системах электроснабжения, должна быть получена из питающей сети, что приведет к увеличению тока сети, и как следствие, увеличатся потери активной мощности и напряжения на импедансе сопротивления питающей системы. Следует отметить, что снижение коэффициента мощности ниже нормируемого показателя в часы потребления больших суточных нагрузок в электрических сетях, приведенного в таблице 2.1, которое может возникнуть при отключении конденсаторных установок, приведет к штрафам, накладываемые со стороны энергоснабжающих организаций.

Для определения экономии электрической энергии в условиях промышленных систем электроснабжения в режиме работы при отключенной конденсаторной установке, предлагается определить стоимость переплат за реактивную мощность и сопоставить ее с капитальными затратами на установку пассивного активно-емкостного фильтра.

Стоит отметить, что экономический расчет будет приближенным, поскольку конечная стоимость реактивной мощности зависит от условия договора на поставку электрической энергии между конкретным

промышленным предприятием и энергоснабжающей организацией, а итоговые капитальные затраты на активно-емкостной фильтр могут зависеть от множества факторов, которые невозможно учесть в данном диссертационном исследовании.

В работе было установлено, что для рассматриваемой системы электроснабжения резонанс на 7 гармонике имел место при реактивной мощности конденсаторной установки равной 1300 квар. Принимаем, что в резонансном режиме конденсаторы будут отключены и 1300 квар мощности будут взяты из питающей системы. Если учесть, что стоимость кВт·ч активной энергии для промышленных предприятий равен 2,5 руб. и более [82], то энергоснабжающая компания может установить стоимость квар·ч реактивной энергии равной 15% от стоимости активной или 0,4 руб. за квар·ч.

Стоимость переплат за час (СПч) потребления реактивной мощности определяется по выражению (4.5):

$$\text{СПч} = 1300 \cdot 0,4 = 520 \text{ руб} \cdot \text{ч} \quad (4.5)$$

Капитальные затраты (КЗ) на активно-емкостной фильтр для рассматриваемой системы электроснабжения приняты равными 840000 руб., исходя из анализа стоимости конденсаторов и нагрузочных резисторов, предлагаемых российскими предприятиями.

Время окупаемости (ВО) пассивного фильтра в часах от времени простоя конденсаторных установок компенсации реактивной мощности (4.6):

$$\text{ВО} = \text{КЗ} / \text{СПч} = 840000 / 520 = 1615,4 \text{ ч} \quad (4.6)$$

Капитальные затраты на установку конденсаторов компенсации реактивной мощности в рассматриваемой системе электроснабжения оценивались 2000000 руб. Отключение конденсаторов приводит и к неэффективному расходованию средств компании, которая вложила финансовые средства в устройство, не выполняющее свои технические функции.

4.6. Выводы по 4 главе

1. Выявлено, что при резонансных явлениях между питающим трансформатором и конденсаторной установкой повышение эффективности компенсации высших гармоник достигается путем установки активно-емкостного фильтра на выходе активного фильтра, что сопровождается увеличением тока, потребляемого узлом нагрузки и падения напряжения на активно-емкостном фильтре.

2. Определены максимальные уровни эффективности компенсации высших гармоник тока и напряжения при применении активно-емкостного фильтра на выходе активного фильтрокомпенсирующего устройства при резонансном режиме на частоте 7 гармонике между питающим трансформатором и конденсаторной установкой, которые составляют 30,1 % и 44,7 % соответственно при увеличении потребляемого тока на 25 % и падения напряжения на 5,5%.

3. Показано, что уровень негативных эффектов от работы активного фильтра с выходным активно-емкостным фильтром снижается по мере увеличения резонирующей гармоники, на величину которой настроены параметры его пассивной части: так, при резонансе на 11 гармонике между питающим трансформатором и конденсаторной установкой при эффективности компенсации высших гармоник напряжения и тока равной 30,1 % и 44,7 % соответственно увеличивается потребляемый ток на 10 % и падения напряжения на 3,4%.

4. Получены закономерности изменения уровня высших гармоник тока и напряжения от вариации параметров пассивного фильтра на выходе активной части гибридного устройства, отражающие более существенное влияние емкостной части сопротивления фильтра на эффективность компенсации высших гармоник тока и напряжения при резонансных режимах, а также степень увеличения потребляемого узлом нагрузки тока.

5. Выявлены закономерности изменения общего коэффициента мощности и аналогичного ему по основной составляющей от вариации уровня высших гармоник тока и напряжения, показывающие более существенное влияние

параметров активно-емкостного фильтра на выходе активной части гибридного устройства на степень повышения общего коэффициента мощности нелинейной нагрузки.

6. Разработан алгоритм выбора параметров активно-емкостного фильтра на выходе параллельного активного фильтра при резонансных режимах в промышленных системах электроснабжения с нелинейной нагрузкой и конденсаторными установками.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам выполненного исследования сделаны следующие выводы:

1. Выполнено моделирование режимов работы типовых схем промышленных систем электроснабжения на примере обогатительных фабрик различной конфигурации, напряжения и мощности, включающих изменяющиеся в течение суток линейную и нелинейную нагрузки и регулируемую конденсаторную установку для компенсации реактивной мощности.

2. Для всех исследованных схем определены относительные значения мощностей регулируемой конденсаторной установки, при которых возникают резонансные режимы на частотах характерных высших гармоник, обусловленных работой нелинейной нагрузки, что приводит к недопустимой токовой перегрузке конденсаторной установки (коэффициент перегрузки более 1,3), ненадлежащему уровню качества напряжения узла нагрузки, а также вариации амплитуд высших гармоник тока нелинейной нагрузки.

3. Показано, что при математическом и имитационном моделировании систем электроснабжения имеющуюся нелинейную нагрузку необходимо представлять в виде источников тока ограниченной мощности, а не бесконечной мощности, как указывается во многих отечественных и зарубежных научных работах. При этом мощность таких источников необходимо выбирать исходя из мощностей нелинейной нагрузки и питающего силового трансформатора.

4. Полученные по результатам физического, математического и компьютерного имитационного моделирования зависимости и ограничения могут рассматриваться в качестве теоретической основы моделирования и анализа несинусоидальных режимов в промышленных системах электроснабжения с резонансными явлениями.

5. Выявленные закономерности, связанные с относительными значениями мощностей конденсаторной установки, при которых возникают резонансные явления, сопровождающиеся вариацией амплитуд канонических высших гармоник тока и снижением уровня качества напряжения, ограничения, касающиеся

моделирования источников гармоник тока нелинейной нагрузки конечной мощности, допущения при выборе параметров схем замещения являются теоретической основой моделирования и анализа сложных несинусоидальных режимов в типовых схемах промышленных систем электроснабжения для обоснованного выбора технического средства или решения для повышения качества электроэнергии.

6. При наличии резонансных режимов, создаваемых конденсаторной установки и питающим трансформатором, показана недостаточная эффективность использования параллельного активного фильтра для компенсации высших гармоник, и необходимость включения на его выходе RC -фильтра, что сопровождается увеличением тока, потребляемого узлом нагрузки на 20-30%, при этом максимальные уровни снижения суммарных коэффициентов гармонических составляющих тока и напряжения достигали соответственно 30,11 % и 44,74 %.

7. Получены закономерности изменения уровня высших гармоник тока и напряжения от вариации параметров RC -фильтра на выходе активного фильтра, отражающие более существенное влияние емкостной части сопротивления фильтра на эффективность компенсации высших гармоник тока и напряжения при резонансных режимах, а также степень увеличения потребляемого узлом нагрузки тока.

8. Обосновано, что параметры RC -фильтра, устанавливаемого на выходе активного фильтра, для повышения качества электроэнергии в резонансных режимах необходимо выбирать исходя из характера смещения резонансных частот, а также степени изменения частотного диапазона резонанса амплитудно-частотной характеристики системы электроснабжения с нелинейной нагрузкой и конденсаторной установкой.

9. Разработан алгоритм выбора параметров RC -фильтра на выходе параллельного активного фильтра при резонансных режимах в промышленных системах электроснабжения с нелинейной нагрузкой и конденсаторными установками, который в качестве технических предложений и рекомендаций принят к внедрению в ООО «ЭИС» и ООО «ГЦЭ-энерго» для реализации методик

расчета и моделирования несинусоидальных режимов работы систем электроснабжения, о чем имеются соответствующие акты.

10. Перспективным направлением развития темы диссертационного исследования является разработка рекомендаций применения различных конфигураций фильтрокомпенсирующих устройств в промышленных системах электроснабжения с нелинейной нагрузкой и конденсаторными установками компенсации реактивной мощности в резонансных режимах при планировании, организации и реализации мероприятий по повышению качества электрической энергии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абрамович, Б.Н. Гибридная система коррекции уровня высших гармоник и обеспечения бесперебойного электроснабжения ответственных потребителей нефтедобычи/ Б.Н. Абрамович, Ю.А. Сычев, Р.Ю. Зимин // Промышленная энергетика. - 2018. - № 11. - С. 50-57.
2. Абрамович, Б.Н. Повышение качества электрической энергии и обеспечение электромагнитной совместимости электрооборудования в сетях нефтедобывающих предприятий с помощью параллельного активного фильтра/ Б.Н. Абрамович, Ю.А. Сычев, Д.А. Устинов // Технологии электромагнитной совместимости. - 2013. - № 1 (44). - С. 39-43.
3. Абрамович, Б.Н. Повышение качества электрической энергии с помощью параллельного активного фильтра в системах электроснабжения промышленных предприятий/ Б.Н. Абрамович, Ю.А. Сычев // Электричество. - 2012. - № 3. - С. 7-11.
4. Абрамович, Б.Н. Повышение эффективности автономных электротехнических комплексов нефтегазовых предприятий / Б.Н. Абрамович, И.А. Богданов // Записки Горного института. - 2021. - Т. 249. - С. 408-416. DOI: 10.31897/PMI.2021.3.10
5. Абрамович, Б.Н. Оценка эффективности гибридного электротехнического комплекса для коррекции уровня несинусоидальности в автономных системах электроснабжения нефтепромыслов / Б.Н. Абрамович, Ю.А. Сычев, Р.Ю. Зимин // Промышленная энергетика. - 2018. - № 1. - С. 45-54.
6. Абрамович, Б.Н. Оценка эффективности гибридных систем коррекции формы кривых тока и напряжения в электрических сетях с распределенной генерацией / Б.Н. Абрамович, Ю.А. Сычев, Р.Ю. Зимин // Промышленная энергетика. - 2015. - № 8. - С. 49-53.
7. Абрамович, Б.Н. Технологии повышения качества электрической энергии как основной фактор обеспечения энергетической безопасности предприятий минерально-сырьевого комплекса / Б.Н. Абрамович, Ю.А. Сычев, В.В. Полищук //

Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). - 2019. - № 7. - С. 184-193.

8. Алгоритм расчета потерь мощности, обусловленных высшими гармониками и интергармониками на основе вейвлет-преобразования/ Д.С. Осипов, А.Г. Люতারевич, В.А. Ткаченко, Я.Ю. Логунова // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. - 2023. - Т. 23. - № 1. - С. 38-47.

9. Анализ дополнительных потерь от высших гармоник в сетях 380 В с помощью алгоритмов пакетного вейвлет-преобразования / Д.С. Осипов, Н.Н. Долгих, С.А. Горовой, В.Е. Поплавская // Омский научный вестник. - 2018. - № 6 (162). - С. 76-81.

10. Анализ качества электроэнергии в городских распределительных сетях 0,4 кВ/ С.А. Темербаев, Н.П. Боярская, В.П. Довгун, В.О. Колмакова // Journal of Siberian Federal University. Engineering and Technologies. – 2013. - № 6. - С. 107-120.

11. **Анализ несинусоидальных режимов в системах электроснабжения горных предприятий с нелинейной нагрузкой и конденсаторными установками** / Ю.А. Сычев, В.Н. Костин, В.А. Сериков, Аладьин М.Е.// Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2023. – № 1. – С. 159–179. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_1_0_159.

12. Анализ существующих инженерных математических моделей учета поверхностного эффекта в токопроводящих жилах силовых кабелей / А.А. Алферов, А.В. Засименко, Т.В. Алферова, Ю.А. Рудченко // Вестник ГГТУ имени П.О. Сухого: научно-практический журнал. – 2015. - № 2. С. 62-69.

13. Белей, В.Ф. Стандарты в области качества электроэнергии: проблемы и тенденции/ В.Ф. Белей, М.С. Харитонов. // Информационные ресурсы России. - 2016. -№1. - С. 10-14.

14. Бессонов, Л.А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи. – 9-е изд., перераб. и доп. – М.: «Высшая школа», 1996. – 638 с.

15. Бош, В.И. Повышение эффективности функционирования систем электроснабжения с гармоническими составляющими и резонансными явлениями

сталеплавильных и прокатных производств: Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук: 05.09.03 / Бош Виолетта Иосифовна; [Место защиты: Липецкий государственный технический университет]. – Липецк, 2005. – 176 с.

16. Бош, В.И. Резонансные явления от гармонических составляющих в системах электроснабжения/ В.И. Бош // Промышленная энергетика. - 2006. - № 7. - С. 41-42.

17. Булычева, Е.А. Анализ методов определения фактического вклада потребителей в несинусоидальность напряжения/ Е.А. Булычева, С.А. Янченко // В сборнике: Современные электротехнические и информационные комплексы и системы. Материалы I Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и преподавателей, посвященной 60-летию со дня образования Армавирского механико-технологического института. - 2019. - С. 23-27.

18. Булычева, Е.А. Анализ современных методов определения фактического вклада потребителей в общий уровень несинусоидальности напряжения электрической сети. Часть 1 / Е.А. Булычева, С.А. Янченко // Методы отклонений измеряемых величин // Промышленная энергетика. - 2019. - № 6. - С. 42-52.

19. Булычева, Е.А. Анализ современных методов определения фактического вклада потребителей в общий уровень несинусоидальности напряжения электрической сети. Часть 2 / Е.А. Булычева, С.А. Янченко // Методы статистического анализа данных // Промышленная энергетика. - 2019. - № 7. - С. 34-44.

20. Булычева, Е.А. Генератор троичной импульсной последовательности для определения источников несинусоидальности в электрических сетях/ Е.А. Булычева, С.А. Янченко // В сборнике: Фёдоровские чтения — 2020: Международная научно-практическая конференция с элементами научной школы. - 2020. - С. 319-324.

21. Булычева, Е.А. Идентификация высших гармоник в реальном времени в электрических сетях с переменным режимом работы/ Е.А. Булычева,

- Г.С. Кулешова, С.А. Янченко // Промышленная энергетика. - 2020. - № 10. - С. 28-38.
22. Булычева, Е.А. Метод определения фактического вклада нелинейных потребителей в режиме реального времени в электрических сетях с переменным режимом работы./ Е.А. Булычева, С.А. Янченко// В сборнике: Фёдоровские чтения - 2019. Под общей редакцией Б.И. Кудрина, Ю.В. Матюниной. - 2019. - С. 248-256.
23. Булычева, Е.А. Определение фактического вклада многоквартирного дома в несинусоидальность напряжения сети/ Е.А. Булычева, А.И. Куликов, С.А. Янченко // В сборнике: Проблемы и перспективы развития электроэнергетики и электротехники. Материалы Всероссийской научно-практической конференции. -2019. - С. 143-149.
24. «Булычева, Е.А. Определение фактического вклада нелинейных потребителей в несинусоидальность напряжения сети с помощью нейронной сети/ Е.А. Булычева, С.А. Янченко // В сборнике: Наука. Технология. Производство - 2019: Моделирование и автоматизация технологических процессов и производств, энергообеспечение промышленных предприятий. Материалы Всероссийской научно-методической конференции, посвященной 100-летию образования Республики Башкортостан. - 2019. - С. 236-240».
25. Булычева, Е.А. Роль амплитудно-частотной характеристики сопротивления сети в определении вклада нелинейных электроприемников в несинусоидальность напряжения/ Е.А. Булычева, С.А. Янченко // В сборнике: Энерго- и ресурсосбережение – XXI век. Материалы XVII международной научно-практической конференции. - 2019. - С. 45-50.
26. Булычева, Е.А. Экспериментальное определение влияния источников искажений на несинусоидальность напряжения сети/ Е.А. Булычева, С.А. Янченко // В сборнике: Управление качеством электрической энергии. Сборник трудов Международной научно-практической конференции. - 2020. - С. 13-19.
27. Влияние высших гармоник тока на режимы работы кабелей распределительной сети 380 В/ В.Н. Тульский, И.И. Карташев, М.Г. Симуткин, Р.Р. Насыров // Промышленная энергетика. - 2013. - №5. - С.42-47.

28. Внедрение параллельных активных фильтров для повышения качества электрической энергии в сетях приобского месторождения/ Б.Н. Абрамович, Ю.А. Сычев, В.А. Бурчевский [и др.] // Нефтяное хозяйство. - 2011. - № 6. - С. 130-132.
29. Воронин, В.А. Выбор оптимальной конфигурации конденсаторных установок для компенсации реактивной мощности в системах электроснабжения выемочных участков/ В.А. Воронин, Ф.С. Непша // Горный информационно-аналитический бюллетень. - 2022. - № 12. - С. 94-108. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_12_0_94.
30. ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения: межгосударственный стандарт: утвержден и введен в действие в качестве национального стандарта Российской Федерации Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 22 июля 2013 г. N 400-ст: дата введения: 1 июля 2014 г.
31. Довгун, В.П. Синтез пассивных фильтрокомпенсирующих устройств/ В.П. Довгун, Н.П. Боярская, В.В. Новиков// Проблемы энергетики. – 2011. - № 9-10. - С. 31-39.
32. Дрей, Н.М. Компенсация реактивной мощности на промышленных предприятиях с малой установленной мощностью электроприемников/ Н.М. Дрей, А.Г. Зиганшин, Г.М. Михеев // Проблемы и перспективы развития энергетики, электротехники и энергоэффективности материалы IV Международной научно-технической конференции. Чебоксары. 2020. – 2020. – С. 61-67.
33. Дыбко, М.А. Математическая модель системы "Сеть - нелинейная нагрузка" с активным силовым фильтром в режиме компенсации высших гармоник/ М.А. Дыбко, О.В. Нос, И.В. Александров // Электротехника. - 2023. - № 2. - С. 55-64.
34. Дыбко, М.А. Анализ динамических параметров активных силовых фильтров на базе параллельных инверторов напряжения/ М.А. Дыбко, В.Г. Токарев, О.В. Нос // Электротехника. - 2020. - № 12. - С. 32-38.

35. Дюдяков, А.А. Разработка экспериментального прототипа параллельного активного фильтра / А.А. Дюдяков, С.А. Янченко // В сборнике: Фёдоровские чтения — 2021. LI международная научно-практическая конференция с элементами научной школы. - 2021. - С. 231-239.
36. Дюдяков, А.А. Анализ эффективности работы гибридного фильтра в условиях ухудшенного качества электроэнергии питающей сети / А.А. Дюдяков, С.А. Янченко // В сборнике: Фёдоровские чтения — 2022. LII Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием, с элементами научной школы для молодежи. - 2022. - С. 167-175.
37. Егоров, Д.Э. Совершенствование методов расчета многофункциональных фильтрокомпенсирующих устройств для сетей 10–0,4 кВ: диссертация кандидата технических наук: 05.14.02 / Егоров Денис Эдуардович; [Место защиты: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Сибирский федеральный университет"].- Красноярск, 2015.- 133 с.
38. Жежеленко, И.В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий. - 4-е изд., перераб. и доп. - М: Энергоатомиздат. 2000. - 331 с, ил.
39. Жуков, Н.А. Имитационное моделирование систем управления активными фильтрами/ Н.А. Жуков // Электротехнические системы и комплексы. - 2017. - № 4(37). - С. 27-31. Doi: 10.18503/2311-8318-2017-4(37)-27-31.
40. Зацепина, В.И. Анализ воздействия негативных сетевых возмущений резкопеременного характера на эффективность функционирования систем электроснабжения/ В.И. Зацепина, Е.П. Зацепин, П.И. Скоморохов // Вестник Тамбовского государственного технического университета. - 2019. - Т. 25. - № 4. - С. 560-566.
41. Зацепина, В.И. Анализ качества электроэнергии при наличии частотных искажений/ В.И. Зацепина, О.Я. Шачнев, Ю.П. Шачнева // Вести высших учебных заведений Черноземья. - 2022. - Т.18. - № 1 (67). - С. 66-72.

42. Зацепина, В.И. Влияние несинусоидальности напряжения на контактную систему электрических аппаратов металлургических производств/ В.И. Зацепина // Вести высших учебных заведений Черноземья. - 2009. - № 1 (15). - С. 3-6.
43. Зацепина, В.И. Влияние частотного преобразователя на питающую сеть / В.И. Зацепина, С.В. Довженко, А.А. Шпиганович // Промышленная энергетика. - 2009. - № 4. - С. 52-54.
44. Зацепина, В.И. Исследование процессов во входном LC фильтре при различных режимах работы и алгоритм выбора его параметров/ В.И. Зацепина // Вести высших учебных заведений Черноземья. 2008. № 3 (13). С. 18-20.
45. Зацепина, В.И. Моделирование провалов напряжения в системах электроснабжения металлургических производств/ В.И. Зацепина, Е.П. Зацепин, О.Я. Шачнев // Вестник Тамбовского государственного технического университета. - 2017. - Т. 23. - № 2. - С. 247-251.
46. Зацепина, В.И. Особенности алгоритмов идентификации искажений напряжения в системах распределения, передачи и потребления электрической энергии/ В.И. Зацепина, Е.П. Зацепин // Вести высших учебных заведений Черноземья. - 2011. - № 4 (26). - С. 3-6.
47. Зацепина, В.И. Оценочный анализ эффективности модернизированного устройства СТАТКОМ в металлургических предприятиях / В.И. Зацепина, Е.П. Зацепин, О.Я. Шачнев // Вести высших учебных заведений Черноземья. - 2017. - № 4 (50). - С. 31-38.
48. Зацепина, В.И. Повышение эффективности функционирования систем электроснабжения посредством комбинированного воздействия на искажения напряжения/ В.И. Зацепина, Е.П. Зацепин, П.И. Скоморохов // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. - 2019. - Т. 21. - № 5. - С. 79-86.
49. Зацепина, В.И. Регулирование напряжения статическими компенсаторами реактивной мощности в системах с резкопеременными нагрузками / В.И. Зацепина, Е.П. Зацепин, О.Я. Шачнев // В сборнике: ЭНЕРГО- И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ - XXI ВЕК. материалы XII международной научно-практической интернет-конференции. - 2016. - С. 73-76.

50. Зацепина, В.И. Статистический анализ искажений напряжения в системах передачи, распределения и потребления электрической энергии/ В.И. Зацепина, Е.П. Зацепин // Вести высших учебных заведений Черноземья. - 2011. - № 3 (25). - С. 24-28.
51. Зацепина, В.И. Устранение нарушения функционирования компенсирующего устройства СТАТКОМ на металлургических предприятиях/ В.И. Зацепина, Е.П. Зацепин, О.Я. Шачнев // Вести высших учебных заведений Черноземья. - 2018. - № 1 (51). - С. 29-35.
52. Каталог высоковольтных дросселей 6,3/10,5 кВ: сайт компании Новосибирский завод конденсаторов. – Новосибирск. - URL: <https://ponzk.ru/catalog/vysokovoltnye-drosseli/> (дата обращения 04.02.2023).
53. **К вопросу о способе определения коэффициента мощности при несинусоидальных режимах** / Ю.А. Сычев, М.С. Ковальчук, А.В. Кривенко, В.А. Сериков // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2021. № 5. С. 473-482.
54. Коррекция коэффициента мощности в сетях нефтепромыслов с помощью активного фильтра/ Б.Н. Абрамович, Ю.А. Сычев, А.В. Медведев [и др.] // Нефтяное хозяйство. - 2008. - № 5. - С. 88-90.
55. **Костин, В.Н. Влияние высших гармоник на качество напряжения и на работу конденсаторных батарей в системах электроснабжения с нелинейной нагрузкой** / В.Н. Костин, А.В. Кривенко, В.А. Сериков // Известия тульского государственного университета. Технические науки. - 2020. - №5. - С. 431-441.
56. Костин, В.Н. Качество напряжения питающей сети в системах электроснабжения с нелинейной нагрузкой / В.Н. Костин, В.А. Сериков, А.В. Кривенко // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. - 2019. - № 6. - С. 74-77.
57. Костин, В.Н. Качество напряжения питающей сети в системах электроснабжения с нелинейной нагрузкой / В.Н. Костин, В.А. Сериков В.А. // материалы Всероссийской научно-практической конференции Проблемы и

перспективы развития электроэнергетики и электротехники, Казань. – 2019. - С. 62-67.

58. Костин, В.Н. К вопросу о компенсации реактивной мощности в системах электроснабжения с нелинейной нагрузкой/ В.Н. Костин, В.А. Сериков, И.А. Шерстенникова // Неделя науки СПбПУ: материалы научной конференции с международным участием, 19-24 ноября 2018 г. Институт энергетики и транспортных систем ч.2. – 2018. - С. 95-98.

59. Костин, В.Н. **Компьютерное моделирование режимов работы систем электроснабжения с нелинейной нагрузкой** / В.Н. Костин, В.А. Сериков // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. – 2019. –Т. 25. - №1. - С. 19-29. С.19-29. DOI: 10.18721/JEST.25102

60. Костин, В.Н. **Моделирование несинусоидальных режимов работы систем электроснабжения** / В.Н. Костин, А.В. Кривенко, В.А. Сериков // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. - 2019. - № 7. - С. 394-405.

61. Мартынов, А. А. Силовая электроника. Ч. I: Выпрямители и регуляторы переменного напряжения: учеб. пособие / А. А. Мартынов. – СПб.: ГУАП, 2011. – 184 с.: ил.

62. Мартынов, А.А. Силовая электроника. Ч. II: Инверторы и преобразователи частоты: учеб. пособие / А. А. Мартынов. – СПб.: ГУАП, 2012. – 144 с.: ил.

63. 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.

64. 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.

65. 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.

66. Моделирование влияния величины нелинейной нагрузки на качество электроэнергии промышленных электротехнических систем / Н.Н. Портнягин, М.С. Ершов, П.Ю. Барбасов, М.Ю. Чернев // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. - 2017. - Т. 60. - № 1. - С. 61-66.

67. Налбандян, Г.Г. Ключевые факторы эффективного применения технологий распределенной генерации в промышленности/ Г.Г. Налбандян, С.С. Жолнерчик // Стратегические решения и риск менеджмент. - 2018. - №1 (106). С. 80-87.

68. Ненахов, А.И. Совмещение функций компенсации реактивной мощности, симметрирования и активной фильтрации токов при построении алгоритма управления устройством СТАТКОМ/ А.И. Ненахов, С.И. Гамазин // Электричество. - 2016. - № 8. - С. 46-52.

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

70. Осипов, Д.С. Идентификация резонансных режимов при наличии нелинейных нагрузок в системах электроснабжения промышленных предприятий/ Д.С. Осипов, В.Н. Горюнов, Д.В. Коваленко // В сборнике: Ученые Омска - региону. Материалы IV Региональной научно-технической конференции. Под общей редакцией Л.О. Штриплинга. - 2019. - С. 42-47.

71. Осипов, Д.С. Расчет резонанса токов на высших гармониках в системах электроснабжения на основе пакетного вейвлет-преобразования/ Д.С. Осипов, Д.В. Коваленко, Н.Н. Долгих // Динамика систем, механизмов и машин. - 2017. - Т. 5. № 3. - С. 68-78.

72. Особенности управления каскадными преобразователями частоты/ А.Г. Воронцов, В.В. Глушаков, М.В. Пронин, Ю.А. Сычев // Записки Горного института. - 2020. - Т. 241. - С. 37-45.
73. 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.
74. Паньков, И.А. Повышение качества электроэнергии в автономных электроэнергетических системах / И.А. Паньков, В.Я. Фролов // Записки Горного института. - 2017. - Т.227. - С.563-568. DOI: 10.25515/PMI.2017.5.563.
75. Перспективы использования многофункциональных активных преобразователей в современных промышленных системах электроснабжения / Ю.А. Сычев, М.Е. Аладьин, Р.Ю. Зимин, А.А. Алдашов // Промышленная энергетика. - 2022. - № 4. - С. 2-12.
76. Повышение качества электрической энергии в сетях приобского месторождения ООО "РН-ЮГАНСКНЕФТЕГАЗ" с помощью параллельных активных фильтров/ Б.Н. Абрамович, Ю.А. Сычев, В.А. Бурчевский [и др.] // Промышленная энергетика. - 2011. - № 6. - С. 49-52.
77. Повышение энергоэффективности производства за счет применения силовых фильтров высших гармоник/ О.В. Нос, А.С. Востриков, А.А. Штанг, Е.Ю. Малявко // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. - 2019. - Т. 330. - № 12. - С. 28-36.
78. Применение аппарата нечеткой логики для улучшения динамических характеристик гибридных фильтров высших гармоник/ Ю.К. Розанов, М.В. Рябчицкий, М.И. Смирнов, Р.П. Гринберг // Электричество. - 2007. - № 1. - С. 23-31.
79. Принципы управления и мониторинга многофункциональными активными преобразователями и фильтрокомпенсирующими устройствами в системах комбинированного электроснабжения/ Ю.А. Сычев, М.Е. Аладьин, В.А. Сериков, А.С. Забунов // Вести высших учебных заведений Черноземья. - 2022. - Т. 18. - № 4 (70). - С. 11-23.

80. Проблема обеспечения электромагнитной совместимости конденсаторных установок и активных фильтров в сетях нефтепромыслов/ Б.Н. Абрамович, Ю.А. Сычев, А.В. Медведев [и др.] // Нефтяное хозяйство. - 2010. - № 4. - С. 112-114.
81. Промышленные испытания активного фильтра в промышленных сетях ОАО "ОРЕНБУРГНЕФТЬ ТНК-ВР"/ Б.Н. Абрамович, Ю.А. Сычев, А.В. Медведев [и др.] // Промышленная энергетика. - 2008. - № 10. - С. 42-46.
82. Разработка высоковольтного устройства автоматизированного мониторинга качества электрической энергии в подземных сетях угольных шахт/ А.В. Ляхомский, Л.А. Плащанский, С.Н. Решетняк, М.Ю. Решетняк // Горный информационно-аналитический бюллетень. - 2019. - № 7. - С. 207—213. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-07-0-207-213.
83. Распределенная энергетика в России: потенциал развития. / А. Хохлов, Ю. Мельников, Ф. Веселов [и др.]; под ред. А. Хохлов. – Москва: Энергетический центр Московской школы управления СКОЛКОВО, 2018. – 89 с.
84. Расчёт параметров и анализ работы пассивного фильтра гармоник/ М.Н. Атаманов, Н.М. Дрей, А.Г. Зиганшин, Г.М. Михеев // Вестник Чувашского университета. – 2020. – № 1. – С. 17–25.
85. Расчет резонансных режимов систем электроснабжения и разработка мероприятий по фильтрации высших гармоник/ В.А. Ощепков, Д.С. Осипов, Д.В. Коваленко, Б.Ю. Киселев // Промышленная энергетика. - 2018. - № 9. - С. 10-16.
86. Расчёт тока конденсаторных батарей с учетом источников высших гармоник / Г.М. Михеев, М.Н. Атаманов, О.В. Афанасьева, Н.М. Дрей // Вестник Чувашского университета. – 2017. – № 1. – С. 145–155.
87. Розанов, Ю.К. Гибридные фильтры для снижения несинусоидальности тока и напряжения в системах электроснабжения/ Ю.К. Розанов, Р.П. Гринберг // Электротехника. - 2006. - № 10. - С. 55-60.

88. Розанов, Ю.К. Многофункциональный регулятор качества электроэнергии на основе силового электронного преобразователя / Ю.К. Розанов, М.Г. Лепанов, М.Г. Киселев // Электротехника. -2014. - № 8. - С. 51-59.
89. Розанов, Ю.К. Повышение эффективности систем электроснабжения с нетрадиционными источниками электроснабжения/ Ю.К. Розанов, А.В. Соломатин, К.В. Крюков // Электротехника. - 2006. - № 10. - С. 63-67.
90. Розанов, Ю.К. Управление потоками электроэнергии и повышение эффективности электроэнергетических систем / Ю.К. Розанов, А.П. Бурман, Ю.Г. Шакарян // М.: Издательский дом «МЭИ». - 2012. - 336 с.
91. Сериков, В.А. Влияние нелинейной нагрузки на оборудование и режимы работы систем электроснабжения/ В.А. Сериков, Д.А. Тучнолобова, Е.Р. Бучинская // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. - 2022. - № 6. - С. 271-281.
92. Синтез фильтрокомпенсирующих устройств для систем электроснабжения: коллективная монография / Н. П. Боярская, В. П. Довгун, Д. Э. Егоров [и др.]; под ред. В.П. Довгуна. – Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2014. – 192 с.
93. Скоморохов, П.И. Обеспечение автономной работы устройств динамической компенсации искажений напряжения посредством ионисторно-аккумуляторной схемы/ П.И. Скоморохов, В.И. Зацепина // Вестник Чувашского университета. - 2019. - № 1. - С. 146-153.
94. Стандарт европейского союза Standart EN 50160:2010 Voltage characteristics of electricity supplied by public distribution networks (Характеристики напряжения электричества, поставляемого общественными распределительными сетями): утвержден и введен в действие Technical Committee CLC/TC 8X - System aspects of electrical energy supply: дата введения 30 июля 2010. – URL: <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/clc/18a86a7c-e08e-405e-88cb-8a24e5fedde5/en-50160-2010> (дата обращения 04.06.2022)
95. Стандарт США Standart IEEE Std 519-2014 IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems (Рекомендуемая практика IEEE и требования к гармоническому контролю в

- электроэнергетических системах): утвержден и введен в действие Sponsor Committee PE/T and D - Transmission and Distribution: дата введения: 27 марта 2014. - URL: <https://standards.ieee.org/ieee/519/3710/> (дата обращения 04.06.2022)
96. Сычев, Ю.А. Многофункциональные фильтрокомпенсирующие устройства в комбинированных системах электроснабжения предприятий минерально-сырьевого комплекса / Ю.А. Сычев, М.Е. Аладьин, Р.Ю. Зимин // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). - 2022. - № 7. - С. 164-179.
97. Сычев, Ю.А. Повышение качества электроэнергии в системах электроснабжения минерально-сырьевого комплекса гибридными фильтрокомпенсирующими устройствами / Ю.А. Сычев, Р.Ю. Зимин // Записки Горного института. - 2021. - Т. 247. - С. 132-140. DOI: 10.31897/PMI.2021.1.14
98. Техническая коллекция Schneider Electric. Измерение и устранение гармоник. Выпуск № 30. Schneider Electric. 2010: сайт. - URL: https://driveka.ru/files/lists/Products/1834_Files_1557305283_SE---Izmerenie-i-ustranenie-garmonik.pdf (дата обращения 18.04.2022)
99. Управление качеством электроэнергии: учебное пособие / И.И. Карташев, В.Н. Тульский, Р.Г. Шамонов [и др.]; под ред. Ю.В. Шарова. 3-е изд., перераб. и доп. М. : Издательский дом МЭИ, 2017, — 347 с. : ил.
100. Фокеев, А.Е. Моделирование трехфазного силового трансформатора / А.Е. Фокеев, В.К. Барсуков // Вестник ИжГТУ. - 2012. - № 2(54). - С. 127-131.
101. Чаплыгин, Е. Е. Теория мощности в силовой электронике: учебное пособие / Е.Е. Чаплыгин, Н.Г. Калугин – Москва: Издательство Московского энергетического института, 2006. – 56 с.
102. Шачнев, О.Я. Эффективность внедрения системы СТАТКОМ в промышленное производство с переменными нагрузками / О.Я. Шачнев, В.И. Зацепина // В сборнике: Энергосбережение и эффективность в технических системах. Материалы V Международной научно-технической конференции студентов, молодых учёных и специалистов. - 2018. - С. 284-286.

103. Шевырева, Н.Ю. Актуальные аспекты обеспечения качества электроэнергии на открытых горных работах/ Н.Ю. Шевырева, Ю.В. Шевырѐв, А.В. Пичуев // В сборнике: Пром-Инжиниринг. труды VI Всероссийской научно-технической конференции. Челябинск, 2020. – 2020. - С. 246-251.
104. Шевырева, Н.Ю. Влияние активного выпрямителя напряжения с релейным контуром тока на искажение формы напряжения сети/ Ю.В. Шевырев // Горный журнал. – 2022. - №12. - С. 49-54. DOI:10.17580/gzh.2022.12.09.
105. Шевырев, Ю.В. Обоснование схемы активного фильтра гармоник на основе гибридного каскадного инвертора/ Ю.В. Шевырев, До Тхань Лич // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. - 2021. - Т. 21. - № 2. - С. 105-114.
106. Шевырев, Ю.В. Повышение качества электроэнергии на примере глиноземного завода в Лам Донге, Вьетнам/ Ю.В. Шевырев, До Тхань Лич // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. - 2021. - № 12. - С. 43-51.
107. Шевырев, Ю.В. Улучшение качества электроэнергии при работе полупроводникового преобразователя частоты/ Ю.В. Шевырев // Горный информационно-аналитический бюллетень. - 2020. - № 2. - С. 171-178. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-2-0-171-178.
108. Шевырев, Ю.В. Улучшение формы напряжения в системах электроснабжения предприятий минерально-сырьевого комплекса с активным выпрямителем/ Ю.В. Шевырев, Н.Ю. Шевырева // Горный журнал. - 2019. - № 1. - С. 66-69. DOI: 10.17580/gzh.2019.01.14.
109. Шишкин С. Защитные антирезонансные дроссели низковольтных конденсаторных батарей/ С. Шишкин // Силовая электроника. – 2007. - №4. URL: http://www.power-e.ru/2007_4_18.php (дата обращения: 25.05.2022)
110. Шпиганович, А.Н. Модернизация фильтрокомпенсирующих установок / А.Н. Шпиганович, С.А Ермолов // Промышленная энергетика - 2007. - №5. - С. 47-48.

111. Шпиганович, А.Н. Оценка параметров фильтров высших гармоник/ А.Н. Шпиганович, М.В. Боев, В.И. Бош // Известия Тульского государственного университета. Серия: Проблемы управления электротехническими объектами. - 2002. - № 2. - С. 133-136.
112. Шрейнер, Р.Т. Активный фильтр как новый элемент энергосберегающих систем электропривода / Р.Т. Шрейнер, А.А. Ефимов // Электричество. - 2000. - №3, - С. 46-54.
113. Электромагнитная совместимость потребителей [Текст]: моногр. / И.В. Жежеленко, А.К. Шидловский, Г.Г. Пивняк [и др.]; под ред. И.В. Жежеленко. — М.: Машиностроение, 2012. — 351 с.
114. Эффективность распределенной энергетики в условиях минерально-сырьевого комплекса / Б.Н. Абрамович, Ю.А. Сычев, Д.А. Устинов [и др.] // Промышленная энергетика. - 2019. - № 5. - С. 8-16.
115. 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 // В сборнике: Proceedings of the 2019 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, ElConRus 2019. - 2019. - P. 401-406.
116. Abramovich, B.N. Modified proportional integral controller for single ended primary inductance converter/ B.N. Abramovich, D.A. Ustinov, W.J. Abdallah // International Journal of Power Electronics and Drive Systems (IJPEDS). – 2022. - vol. 13, - no. 2, P. 1007—1025. DOI: 11591/ijpeds.v13.i2.
117. Abramovich, B. N. Problems of ensuring energy security for enterprises from the mineral resources sector / B.N. Abramovich, Y.A. Sychev // Journal of Mining Institute. – 2016. – Vol. 217. P. 132-139.
118. Abramovich, B.N. Shunt active correction system analysis in conditions of industrial enterprises networks / B.N. Abramovich, Y.A. Sychev // International Journal of Applied Engineering Research. - 2016. №11 (4), P. 2640 – 2645.
119. Abramovich, B.N. The assessment of the shunt active filter efficiency under varied power supply source and load parameters/ B. Abramovich, Y. Sychev,

- V. Prokhorova// International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE). – 2020. - Vol. 10, No. 6, pp. 5621-5630. DOI: 10.11591/ijece.v10i6.pp 5621-5630
120. Akagi, H. Instantaneous Power Theory and Applications to Power Conditioning. 2007. Print ISBN: 9781118362105. Copyright © 2017 by The Institute of Electrical and Electronic Engineers, Inc. USA. 389 p
121. Analysis of power quality in presence of frequency distortions/ V. Zatsepina, E. Zatsepin, O. Shachnev [et al.] // E3S Web of Conferences. - 2020. - P. 178.
122. A Practical and Effective Way of Applying IEEE Std 519-2014 Harmonic Limits White Paper // Mirus international: сайт компании MIRUS International Inc. - URL: <https://www.mirusinternational.com/downloads/White%20Paper%20-%20IEEE%20Std%20519-2014%20Harmonic%20Limits.pdf> (дата обращения 18.04.2022)
123. Assessment of the Harmonics Influence on the Power Consumption of an Electric Submersible Pump Installation/ A. Lyakhomskii, A. Petrochenkov, A. Romodin, [et al.] // Energies. – 2022. – Vol. 15(7). –P. 2409; doi: 10.3390/en15072409.
124. Assessment and data analysis of beneficial implementation of cogeneration modules at mining enterprises to minimize negative influence on the environment / Y.A. Sychev, P.A. Kuznetsov, B.N. Abrmovich, D.Z. Mukminova // Journal of Physics: Conference Series. International Conference "Information Technologies in Business and Industry". Mathematical Simulation and Computer Data Analysis. - 2019. - P. 032048
125. Bulycheva, E. Experimental assessment of harmonic contributions using a ternary pulse sequence/ E. Bulycheva, S. Yanchenko // Serbian Journal of Electrical Engineering. - 2021. - vol. 18. - № 3. - P. 271-289.
126. Bulycheva, E.A. Real-time harmonic identification under varying grid conditions/ E.A. Bulycheva, S.A. Yanchenko // Serbian Journal of Electrical Engineering. - 2021. - vol. 18. - № 1. - P. 29-48.
127. Calculation of resonant modes for power supply systems and development of measures on higher harmonics filtering / D.S. Osipov, D.V. Kovalenko, E.N. Eremin, [et al.] // В сборнике: Journal of Physics: Conference Series. - 2019. - P. 052025.

128. Crepaldi, J. Analysis of the topologies of power filters applied in distributed generation units-Review / J. Crepaldi// IEEE Latin America Transactions. - 2018. - vol. 16 (7), P. 1892-1897. DOI: 10.1109/TLA.2018.8447354
129. Comprehensive review of improving power quality using active power filters/ Dayi Li, Tingkang Wang, Wenhao Pan, [et al.] // Electric Power Systems Research. – 2021. - Vol. 199. – P. 107389. DOI: 10.1016/j.epsr.2021.107389.
130. Distributed power quality conditioning system for three-phase four-wire low voltage networks/ V. Dovgun, S. Temerbaev, M. Chernyshov, [et al.] // Energies. – 2020. - Vol. 13. – P. 4915. DOI: 10.3390/en13184915.
131. 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.Y. Zimin. // В сборнике: IPDME 2018 - Materials Science and Processing of Materials. "IOP Conference Series: Earth and Environmental Science" - 2018. – No5. - P. 052001..
132. Estimation of spark protection device's reliability influence on the fire safety of apartment's network with harmonic currents and voltage up to 1 kv / Y. Sychev, P. Kuznetsov, S. Solyonyj,[et al.] // MATEC Web of Conferences. 13. Сер. "13th International Scientific-Technical Conference on Electromechanics and Robotics "Zavalishin's Readings" - 2018". - 2018. - P. 2008.
133. Harmonic Disturbances in Networks and Their Treatment // Cahier Technique Schneider Electric, № 152. 25 p.
134. Kavithaa, G. A prognostic energy optimization technique with unified power quality conditioner for energy stabilization in grid system/ G. Kavithaa, P. Balakrishnan, S.A. Yuvaraj// Computers and Electrical Engineering. – 2021. - Vol. 94. – P. 107360. DOI: 10.1016/j.compeleceng.2021.107360.
135. Kostin, V.N. **Higher harmonics and limiting thereof in power supply systems of different voltages** / V.N. Kostin, V.A. Serikov, I.A. Sherstennikova // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. - 2019. - Vol. 378. - No. 1. - paper 012051. DOI: 10.1088/1755-1315/378/1/012051

136. Kostin, V.N. **Modeling of operation modes of electrical supply systems with non-linear load** / V.N. Kostin, A.V. Krivenko, V.A. Serikov // Scientific and Practical Studies of Raw Material Issues. - 2020. - P. 263-271. Doi: 10.1201/9781003017226.
137. Kustov, A. Analysis of the higher harmonic component and modeling of a transformer with a magnetization curve in networks with an isolated neutral in a single-phase short circuit/ A. Kustov, E. Zatsepin, V. Byaly // Vesti Universities of the Chernozem Region. - 2021. - № 2 (64). - P. 60-69.
138. Kustov, A. Analysis of the highest harmonic component in networks with isolated neutral in single-phase short circuit/ A. Kustov, E. Zatsepin, V. Zatsepina // В сборнике: Proceedings - 2021 3rd International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency, SUMMA 2021. - 2021. - P. 1113-1116.
139. Lapanov, M. Multifunctional regulator based on SMES and power electronic converter for increase of power quality and power supply reliability / M. Lapanov, Y. Rozanov // International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives. Proceedings of 2013 4th International Conference on Power Engineering Energy and Electrical Drives, POWERENG 2013 - 2013. - P. 1387-1391.
140. Maintenance problems of pwm-inverters in power networks with distributed generation / Y. Sychev, P. Kuznetsov, S. Solyonyj, O. Solenaya // MATEC Web of Conferences. 13. Сер. "13th International Scientific-Technical Conference on Electromechanics and Robotics "Zavalishin's Readings" - 2018". - 2018. - P. 2010.
141. Multi-objective optimisation of step voltage regulator operation and optimal placement for distribution systems design using linkage combination update-non-dominated sorting genetic algorithm/ Shigenobu Ryuto, Noorzad Ahmad Samim, Yona Atsushi, Senjyu Tomonobu // II. IET Generation, Transmission and Distribution. -2018. – Vol. 12, Issue 1. - P. 20 – 30. DOI: 10.1049/iet-gtd.2016.1361
142. Osipov, D.S. Calculation of currents resonance at higher harmonics in power supply systems based on wavelet packet transform/ D.S. Osipov, D.V. Kovalenko, N.N. Dolgikh // В сборнике: 11th International IEEE Scientific and Technical Conference "Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines", Dynamics 2017. Proceedings. - 2017. - P. 1-6.

143. Plashchansky, L.A. Improvement of electric energy quality in underground electric networks of highly productive coal mines / L.A. Plashchansky, S.N. Reshetnyak, M.Y. Reshetnyak // Mining Science and Technology (Russia). - 2022 - №7 (1). - P. 66–77. doi: 10.17073/2500-0632-2022-1-66-77.
144. Providing high-quality electricity using modern groups of electric consumers / V.I. Zatsepina, E.P. Zatsepin, O. Shachnev, A. Shachnev // В сборнике: Proceedings - 2020 2nd International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency, SUMMA 2020. - 2020. - P. 932-935.
145. Rashevskaya, M. Assessment of non-stationary harmonic distortion related to adjustable speed induction motor and soft starters/ M. Rashevskaya, S. Yanchenko, S. Tsyruk // В сборнике: 2018 20th International Symposium on Electrical Apparatus and Technologies, SIELA 2018 - Proceedings. 20. - 2018. - Paper 8447097.
146. **Research of power supply system modes with nonlinear and linear loads connected to different winding of the transformer** / V.N. Kostin, A.S. Krivenko, V.A. Serikov, T.S. Ivanova // Proceedings of the 3rd 2021 International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering, REEPE 2021. – 2021. – P 9387988. Doi: 10.1109/REEPE51337.2021.9387988
147. Salmerón, P. Improvement of the Electric Power Quality Using Series Active and Shunt Passive Filters/ P. Salmerón and S. P. Litrán // IEEE Transactions on power delivery. – 2010. - vol. 25, NO. 2. – P. 1058-1067.
148. Sandhya, P. Modeling of hybrid active power filter using artificial intelligence controller: hardware and software prospective/ P. Sandhya, R. Nagaraj // International Journal of Power Electronics and Drive Systems (IJPEDS). – 2021. - Vol.12. - No.4. - P. 2545-2556. DOI: 10.11591/ijpeds.v12.i4.pp2545-2556
149. Schneider Electric: «Cahiers Techniques» publications nos. 152, 159, 160, 183. URL: <http://www.schneider-electric.com>.
150. Shevyreva, N.Y. Effects of active rectifiers on power quality in supply systems in mineral mining industry/ N.Y. Shevyreva// Eurasian Mining. - 2021. - № 1. - P. 70-74.
151. Shevyreva, N. Ensuring the power quality in the operation of variable frequency drives of drilling rigs/ N. Shevyreva, O. Kozhakov // В сборнике: 2020 11th

- International Conference on Electrical Power Drive Systems, ICEPDS 2020 - Proceedings. 11. - 2020. - P. 9249360.
152. Shklyarskiy, Y. E. High Harmonic Minimization in Electric Circuits of Industrial Enterprises / Y. E. Shklyarskiy, A. N. Skamyin // World Applied Sciences Journal. – 2014. – Vol. 30(12). - P. 1767-1771.
153. Shubh, Lakshmi An On-Line Operational Optimization Approach for Open Unified Power Quality Conditioner for Energy Loss Minimization of Distribution Networks/ Shubh Lakshmi and Sanjib Ganguly // 2019 IEEE Transactions on Power Systems. – 2019. - Vol. 34. - Issue: 6. – P. 4784 – 4795. DOI:10.1109/TPWRS.2019.2919786
154. Sychev, Y.A. **Developing a hybrid filter structure and a control algorithm for hybrid power supply** / Y.A. Sychev, M.E. Aladin V.A. Serikov // International Journal of Power Electronics and Drive Systems (IJPEDS). – 2020. - Vol. 13. - No. 3. - P. 1625-1634. DOI: 10.11591/ijpeds.v13.i3.pp1625-1634
155. Sychev, Y.A. Modernization of gas-turbine engines with high-frequency induction motors/ Y.A. Sychev, B.N. Abramovich, P.A. Kuznetsov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. - 2018. - P. 052001.
156. Sychev, Y.A. Power Components Analysis under Non-Sinusoidal Conditions / Y.A. Sychev, V.B. Prokhorova, M.E. Aladin // 2020 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies, FarEastCon 2020. – 2020. – P. 9271137
157. Sychev, Y. The assesement of the shunt active filter efficiency under varied power supply source and load parameters/ Y. Sychev, B. Abramovich, V. Prokhorova// International Journal of Electrical and Computer Engineering. - 2020. - Vol. 10. - № 6. P. 5621-5630.
158. Sychev, Y.A. The method of power factor calculation under non-sinusoidal conditions/ Y.A. Sychev, M.E. Aladin, B.N. Abramovich // В сборнике: Proceedings of the 2020 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, EIConRus 2020. - 2020. - P. 904-908.

159. Sychev, Y.A. The modeling and analysis of the parameters of the non-sinusoidal modes/ Y.A. Sychev, V.B. Prokhorova, M.E. Aladin // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2021. – №1753(1). – P. 012045
160. Tofoli, F. L. On the study of losses in cables and transformers in nonsinusoidal conditions / F. L. Tofoli, S. M. R. Sanhueza, A. de Oliveira // *IEEE Transactions on Power Delivery*. – 2006. – vol. 21, issue 2. – P. 971-978. DOI: 10.1109/tpwrd.2006.870986
161. Tuomainen, M. Special questions of industrial networks harmonics. *Nokian Capacitors*, EN-TH03-11/2004. 16 p.
162. Tuomainen, M. Harmonics and reactive power compensation in practice. *Nokian Capacitors*, EN-TH04-11/2004. 21 p.
163. Tuomainen, M. Shunt active filters. *Nokian Capacitors*, EN-TH05-11/2004. 9 p.
164. Tuomainen, M. Compensation of harmonic currents and reactive power with shunt active filter. *Nokian Capacitors*, EN-TH06-11/2004. 9 p.
165. Ustinov, D.A. Influence by technological process onto mineral resources sector enterprise power supplies reliability parameters/ D.A. Ustinov, S.V. Baburin // *International Journal of Applied Engineering Research*. – 2016. - vol. 11, no. 7. - P. 5267—5270.
166. 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. - 2000. - Vol. 1. – P. 332 - 337.
167. 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*. - 2003. - Vol. 18. - No. 1. – P. 248 – 255.
168. Yanchenko, S. Modeling harmonic amplification effects of modern household devices/ S. Yanchenko, A. Kulikov, S. Tsyruk // *Electric Power Systems Research*. - 2018. -Vol. 163. - P. 28-37.
169. Yanchenko, S. A Simulation tool for accurate and fast assessment of harmonic propagation in modern residential grids/ S. Yanchenko, F.B. Costa, K. Strunz // *IEEE Transactions on Power Delivery*. - 2021. - Vol. 36, No 4. - P. 2118-2128.

170. Zatsepina, V.I. Ensuring effective functioning of compensating device STATCOM in metallurgical enterprises / V.I. Zatsepina, E.P. Zatsepin, O.Y. Shachnev // В сборнике: 2018 International Russian Automation Conference, RusAutoCon 2018. - 2018. - P. 8501660.

171. ZIGOR. «Динамический компенсатор искажений напряжения с увеличенной глубиной и временем защиты от провалов напряжения». – сайт компании ООО «НПК Промир». – текст [электронный]. URL: <http://www.npkpromir.com/index.php/production/2-dkin/5-dkin> (дата обращения 18.04.2022)

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



RU

2021619131

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ
(12) ГОСУДАРСТВЕННАЯ РЕГИСТРАЦИЯ ПРОГРАММЫ ДЛЯ ЭВМ

| | |
|---|--|
| Номер регистрации (свидетельства): <u>2021619131</u> | Авторы: Сериков Владимир Александрович (RU), Гуревич Илья Андреевич (RU) |
| Дата регистрации: 04.06.2021 | Правообладатель: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет» (RU) |
| Номер и дата поступления заявки: 2021618196 31.05.2021 | |
| Дата публикации: <u>04.06.2021</u> | |
| Контактные реквизиты: нет | |

Название программы для ЭВМ:

Программа оценки коэффициентов несинусоидальности напряжения и токовой перегрузки конденсаторов для режимов работы систем электроснабжения 10/0,4 кВ с нелинейной нагрузкой

Реферат:

Программа предназначена для определения зависимостей суммарного коэффициента гармонических искажений напряжения и коэффициента токовой перегрузки конденсаторов от мощности конденсаторной батареи в режимах работы систем электроснабжения 10/0,4 кВ с нелинейной нагрузкой. Она позволяет моделировать режимы работы сети 10/0,4 кВ в широких пределах изменения линейной и нелинейной нагрузки. Конденсаторная батарея рассчитывается по мощности линейной нагрузки и ее косинуса угла ($\cos\phi$). Программа по заданным значениям линейной нагрузки, $\cos\phi$ и диапазону изменения частоты сети строит график амплитудно-частотной характеристики системы, который позволяет определить резонансную частоту между сетью и конденсаторной батареей. Программа предназначена для дисциплин "Актуальные аспекты электроснабжения" и "Теоретических основ электротехники".

Язык программирования: C++

Объем программы для ЭВМ: 828 КБ

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Акты о внедрении результатов диссертации

Утверждаю:

Генеральный директор ООО «ГЦЭ–энерго»
Павлюченков Иван Юрьевич



« 21 » апреля 2023 г.



А К Т

о внедрении результатов кандидатской диссертации
«Повышение качества электроэнергии активными фильтрокомпенсирующими устройствами в промышленных электротехнических комплексах с нелинейной нагрузкой и конденсаторными установками при резонансных режимах»
Серикова Владимира Александровича по специальности
2.4.2 – Электротехнические комплексы и системы

Рабочая комиссия в составе:

Председатель: Тарасовский Василий Григорьевич, к.т.н.**Члены комиссии:**

Пряхоров Александр Иванович, к.ф.н.

Водяков Алексей Геннадиевич

Турчин Максим Сергеевич

составили настоящий акт о том, что результаты диссертации на тему «Повышение качества электроэнергии активными фильтрокомпенсирующими устройствами в промышленных электротехнических комплексах с нелинейной нагрузкой и конденсаторными установками при резонансных режимах», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук, использованы в «ООО ГЦЭ–энерго» при анализе режимов систем электроснабжения, включающих вентильные преобразователи и конденсаторные установки, в виде:

- технических предложений и рекомендаций по использованию фильтрокомпенсирующих устройств для снижения потерь и повышения качества электроэнергии в системах с нелинейной нагрузкой;
- методик расчета и моделирования несинусоидальных режимов работы систем электроснабжения на стадии их эксплуатации, реконструкции и энергоаудита;

– программных комплексов, которые по заданной структуре и параметрам системы электроснабжения позволяют определить резонансные частоты системы.

Использование указанных результатов позволяет:

- повысить эффективность проведения энергоаудита промышленных систем электроснабжения в части снижения потерь и обеспечения нормируемого качества электроэнергии;
- обосновывать выбор структуры и параметров устройств для снижения негативного влияния высших гармоник на оборудование систем электроснабжения.

Председатель комиссии
технический директор



к.т.н., Тарасовский В.Г.

Члены комиссии:
руководитель отдела
надёжности систем энергоснабжения



к.ф.н., Прохоров А.И.

руководитель отдела
энергоаудита
нефтегазотранспортных предприятий



Водяков А.Г.

руководитель отдела
энергоаудита
промышленных предприятий



Турчин М.С.

Утверждаю
 Генеральный директор ООО «ЭИС»
 Лозовский Сергей Евгеньевич



АКТ

о внедрении результатов
 кандидатской диссертации

«Повышение качества электроэнергии активными фильтрокомпенсирующими устройствами в промышленных электротехнических комплексах с нелинейной нагрузкой и конденсаторными установками при резонансных режимах»

Серикова Владимира Александровича по специальности
 2.4.2 – Электротехнические комплексы и системы

Рабочая комиссия в составе:
 Председатель: Гагарин Петр Семенович;

Члены комиссии:
 Казанцев Дмитрий Юрьевич;
 Арцыбышев Павел Евгеньевич;
 Коновалов Константин Николаевич

составили настоящий акт о том, что результаты диссертации на тему «Повышение качества электроэнергии активными фильтрокомпенсирующими устройствами в промышленных электротехнических комплексах с нелинейной нагрузкой и конденсаторными установками при резонансных режимах», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук, использованы в обществе с ограниченной ответственностью «Электрические измерительные системы» при разработке методических указаний и рекомендаций для процесса обследований промышленных предприятий с автоматизированной системой коммерческого учета электроэнергии, включая мониторинг качества электроэнергии, с целью повышение эффективности электроснабжения в виде:

- технических предложений и рекомендаций по реконструкции и модернизации электрических схем для повышения надежности и качества электроснабжения отдельных потребителей;

- методик расчета и моделирования несинусоидальных режимов работы различных схем промышленных систем электроснабжения;
- программных комплексах для расчета наиболее вероятных частот возникновения резонанса во вновь проектируемых и реконструируемых системах электроснабжения предприятий.

Использование указанных результатов позволяет:

- повысить эффективность проектирования, реконструкции и модернизации электротехнических комплексов в части уровня качества электроэнергии;
- повысить эффективность применения технических средств и решений по повышению качества электроэнергии в промышленных системах электроснабжения.

Председатель комиссии
Технический директор


_____ Гагарин П.С.

Члены комиссии:
Начальник ОМиН


_____ Казанцев Д.Ю.

Начальник ОКС


_____ Арцыбышев П.Е.

Начальник ОПИР


_____ Коновалов К.Н.

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Учебно-методические пособия

Министерство высшего образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
Санкт-Петербургский горный университет

Кафедра электроэнергетики и электромеханики

АКТУАЛЬНЫЕ АСПЕКТЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

*Методические указания к курсовой работе
для студентов магистратуры по направлению подготовки 13.04.02*

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ
2021

УДК 621.382

Актуальные аспекты электроснабжения. Методические указания к курсовой работе / Санкт-Петербургский горный университет. Сост. *В.Н. Костин., В.А. Сериков,* СПб, 2021 – 34 с.

Курсовая работа закрепляет знания студентов в области проектирования систем электроснабжения объектов коммунально-бытовой сферы.

Методические указания предназначены для студентов, обучающихся в магистратуре по направлению подготовки 13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника», специализация – Системы электроснабжения.

Научный редактор заведующий кафедрой проф. *В.А. Шпенст*

Рецензент д.т.н., проф. кафедры информатики *СПбГЭУ В.Ф. Минаков*

© Санкт-Петербургский
горный университет, 2021

Рисунок В1. Учебно-методическое пособие: Актуальные аспекты электроснабжения.
Методические указания к курсовой работе / Санкт-Петербургский горный университет. Сост.
Костин В.Н., Сериков В.А., СПб, 2021 – 35 с.

Министерство высшего образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
Санкт-Петербургский горный университет

Кафедра электроэнергетики и электромеханики

АКТУАЛЬНЫЕ АСПЕКТЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

*Методические указания к лабораторным работам
для студентов магистратуры по направлению подготовки 13.04.02*

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ
2020

УДК 621.382

Актуальные аспекты электроснабжения. Методические указания к лабораторным работам / Санкт-Петербургский горный университет. Сост. *В.Н. Костин., В.А. Сериков*, СПб, 2020 – 37 с.

Лабораторные работы охватывают основные разделы дисциплины и представляют собой компьютерное моделирование различных режимов работы систем электроснабжения.

Методические указания предназначены для студентов, обучающихся в магистратуре по направлению подготовки 13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника», специализация – Системы электроснабжения.

Научный редактор заведующий кафедрой проф. *В.А. Шенст*

Рецензент д.т.н., проф. кафедры информатики *СПбГЭУ В.Ф. Минаков*

© Санкт-Петербургский
горный университет, 2020

Рисунок В2. Учебно-методическое пособие: Актуальные аспекты электроснабжения. Методические указания к лабораторным работам для студентов магистратуры направления 13.04.02 / Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский горный университет. Сост. Костин В.Н., Сериков В.А., СПб, 2020. - 37 с.