

*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*

**Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук**

Санкт-Петербург – 2023

Диссертация выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет».

**Научный руководитель:**

доктор технических наук, доцент

*Сычев Юрий Анатольевич*

доктор технических наук, профессор

**Абрамович Борис Николаевич**

**Официальные оппоненты:**

*Зацепина Виолетта Иосифовна*

доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Липецкий государственный технический университет», кафедра электрооборудования, профессор кафедры;

*Шевырева Наталия Юрьевна*

кандидат технических наук, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина», кафедра теоретической электротехники и электрификации нефтяной и газовой промышленности, доцент кафедры.

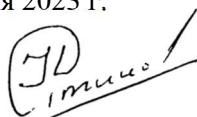
**Ведущая организация** – федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ», г. Москва.

Защита диссертации состоится **28 сентября 2023 г. в 13:00** на заседании диссертационного совета ГУ.6 Горного университета по адресу: 199106, г. Санкт-Петербург, 21-я В.О. линия, д. 2, аудитория **№ 1171а**.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Горного университета и на сайте [www.spmi.ru](http://www.spmi.ru).

Автореферат разослан 28 июля 2023 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ  
диссертационного совета



УСТИНОВ  
Денис Анатольевич

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

### **Актуальность темы исследования**

Нелинейная нагрузка (НН) 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.

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.

Для повышения качества электроэнергии успешно применяется ряд технических средств, включая пассивные, активные, гибридные фильтры, антирезонансные дроссели, а также схемные решения по изменению конфигурации СЭС и силовой части НН. Однако, теория и практика применения указанных средств и решений не в полной мере учитывает наличие резонансных явлений, обусловленных КУ компенсации реактивной мощности и питающими трансформаторами за счет присутствия НН. Типовые СЭС промышленных предприятий, в частности обогатительных фабрик, содержат КУ, подключенные к шинам 6(10) кВ комплексных распределительных устройств, и НН частотно-регулируемых электроприводов, сосредоточенную на стороне 0,4 кВ, где также могут быть установлены различные фильтрокомпенсирующие устройства, включая активные фильтры (АФ). При возникновении резонансных явлений в указанных условиях КУ подвергаются недопустимой перегрузке, а АФ 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 СЭС, а также при выборе структуры и основных параметров КУ компенсации реактивной мощности и АФ.

Актуальность задачи повышения качества электроэнергии в промышленных СЭС 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, Н.Ю. Шевыревой, С.Г. Германа-Галкина, М.С. Ершова, А.Н. Шпигановича, О.В. Носа, В.Н. Костина, Я.Э. Шклярского, Е.Н. Сосниной.

**Степень разработанности темы исследования**

Причины возникновения ВГ, 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 СЭС 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 подавления ВГ тока и напряжения в промышленных СЭС 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 СЭС путем компенсации ВГ 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 СЭС с НН, КУ компенсации реактивной мощности и АФ.

**Предмет исследования** - параметры, характеристики и

закономерности формирования несинусоидальных режимов в электротехнических комплексах промышленных СЭС с НН, КУ и АФ.

**Цель работы** - повышение качества электроэнергии в промышленных СЭС с НН и КУ компенсации реактивной мощности в резонансных режимах.

**Идея работы.** Компенсацию ВГ тока и напряжения в промышленных СЭС с НН и КУ при резонансных режимах необходимо осуществлять параллельным АФ, на выходе которого устанавливается пассивный фильтр, параметры которого выбираются для смещения резонансной частоты в область между основной составляющей и минимальным порядком канонической гармоники.

Поставленная в диссертационной работе цель достигается посредством решения нижеуказанных **задач**:

1. Анализ основных источников ВГ в условиях промышленных СЭС, их влияния на уровень качества электрической энергии и потери в электрооборудовании и элементах сети, а также отечественной и международной нормативной базы в области электромагнитной совместимости.

2. Моделирование и анализ несинусоидальных режимов в промышленных СЭС различной структуры с НН, линейной нагрузкой (ЛН), КУ в условиях возникновения и протекания резонансных явлений с целью оценки их влияния на показатели качества электрической энергии в части несинусоидальности напряжения, амплитуд ВГ тока, а также степень токовой перегрузки КУ.

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 СЭС с НН, ЛН и КУ 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 АФ, с целью повышения эффективности компенсации ВГ для условий несинусоидальных режимов промышленных СЭС с НН и КУ с учетом

резонансных явлений в соответствии с выявленными зависимостями и закономерностями.

**Научная новизна работы:**

Выявленные в работе зависимости и закономерности, связанные с вариацией амплитуд ВГ тока НН, уровня искажения напряжения при изменении мощности КУ и коэффициента их перегрузки ВГ 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 СЭС.

Получены закономерности, отражающие влияние параметров активно-емкостного пассивного фильтра, установленного на выходе АФ, на степень эффективности компенсации ВГ тока и напряжения в условиях резонанса в СЭС с НН, линейной нагрузками и КУ компенсации реактивной мощности.

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

**Теоретическая и практическая значимость работы:**

Выявленные закономерности, ограничения и допущения являются теоретической основой анализа и моделирования сложных несинусоидальных режимов в промышленных СЭС с НН, ЛН и КУ.

Разработана программа для ЭВМ, которая по заданным значениям линейной нагрузки,  $\cos\phi$  и диапазону изменения частоты сети позволяет построить график амплитудно-частотной характеристики системы, определяющий резонансную частоту между сетью и КУ.

Разработан алгоритм выбора параметров активно-емкостного фильтра (RC-фильтра) на выходе параллельного АФ при резонансных режимах в промышленных СЭС с НН и КУ, который в качестве технических предложений и рекомендаций может быть принят к внедрению для реализации методик расчета и моделирования несинусоидальных режимов работы СЭС.

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.

**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.

**На защиту выносятся следующие положения:**

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 обсуждались 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 исследований в рамках поставленных целей и задач. Соискателем ученой степени: созданы имитационные модели электротехнических комплексов промышленных СЭС, позволяющие выявить зависимости и закономерности, связанные с вариацией амплитуд ВГ тока НН, уровня искажения напряжения при изменении мощности КУ и коэффициента их перегрузки ВГ тока при резонансе; создана физическая модель промышленной СЭС с НН и КУ; выполнено математическое и имитационное моделирование режимов работы параллельного АФ в промышленной СЭС с НН, ЛН и КУ при резонансных режимах; разработан алгоритм выбора структуры и основных параметров параллельного АФ для условий несинусоидальных режимов промышленных СЭС с НН и КУ.

**Публикации.** Результаты диссертационной работы в достаточной степени освещены в 11 печатных работах, 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.

**Структура работы.** 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.

### **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** представлено общее описание работы, обоснована актуальность, сформулированы цель и задачи исследований, раскрыты теоретическая и практическая значимости исследования и изложены основные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** описываются проблемы возникновения ВГ тока и напряжения и их влияние на показатели качества электроэнергии и электромагнитную совместимость электрооборудования в промышленных СЭС. Представлен сравнительный анализ отечественного и зарубежных стандартов в области качества электроэнергии. Установлено, что ВГ тока и напряжения, возникающие в результате работы НН, негативно влияют на уровень качества электрической энергии и электромагнитной совместимости электрооборудования. ВГ искажают форму кривых напряжения и тока питающей сети, тем самым ухудшают эффективность работы электрооборудования. Также ВГ увеличивают потери напряжения и мощности в элементах СЭС, токовую перегрузку КУ компенсации реактивной мощности, уровень вибрации в электромеханических комплексах и др.

**Во второй главе** проведен анализ влияния ВГ на работу КУ. Показано, что КУ является одним из наиболее распространенных способов компенсации реактивной мощности в СЭС промышленных предприятий. Установлено, что КУ, работающие при несинусоидальном напряжении, перегружаются токами ВГ. Наибольшая токовая перегрузка КУ возникает, когда индуктивность питающей сети и емкость КУ образуют резонансный контур на частоте одной из ВГ, что недопустимо и приводит к сокращению срока службы КУ, а также к нарушению заданного режима компенсации реактивной мощности. Поэтому задача компенсации реактивной мощности в СЭС с НН должна решаться с учетом допустимой перегрузки КУ токами ВГ при суточном регулировании их реактивной мощности, схемы распределения

компенсирующих устройств на разных уровнях напряжения СЭС и выполнения требований к качеству напряжения.

**В третьей главе** приведена классификация технических средств и решений по компенсации ВГ тока и напряжения, включая традиционные способы подавления ВГ, в том числе схемные решения рационального построения СЭС с НН, включение антирезонансных дросселей и сглаживающих реакторов в цепи КУ, а также применение активных, пассивных и гибридных фильтрокомпенсирующих устройств.

Проведен сравнительный анализ различных модификаций активных, пассивных и гибридных фильтров, выявлены их ключевые достоинства и недостатки.

**В четвертой главе** разработана имитационная модель типовой промышленной СЭС с ЛН и НН, КУ и фильтрокомпенсирующими устройствами. Рассмотрены режимы работы пассивных, активных фильтрокомпенсирующих устройств при наличии резонансных явлений. Произведен расчет параметров фильтрокомпенсирующих устройств, при которых обеспечиваются наилучшие компенсационные характеристики. Показано, что пассивные фильтры имеют ограниченную область применения, поскольку резонансный режим может возникнуть на частоте гармоника, на компенсацию которой не было настроено фильтрокомпенсирующее устройство. Результаты моделирования работы АФ показали, что при резонансных явлениях в промышленных СЭС АФ не способно обеспечить эффективную компенсации ВГ тока и напряжения. Для улучшения компенсационных характеристик АФ в резонансных режимах сети в исследовании рассматривается включение на его выходе пассивного активно-емкостного фильтра (*RC*-фильтра). Получены закономерности, отражающие влияние параметров *RC*-фильтра на степень эффективности компенсации ВГ тока и напряжения АФ в условиях резонанса в СЭС с НН, ЛН и КУ компенсации реактивной мощности. Произведен расчет экономического эффекта от внедрения пассивного *RC*-фильтра.

По результатам моделирования разработан алгоритм выбора параметров *RC*-фильтра на выходе параллельного АФ для обеспечения эффективной компенсации ВГ в промышленных СЭС с НН и КУ при резонансных режимах.

**В заключении** представлены обобщенные выводы по результатам исследований в соответствии с целью и решенными задачами.

Основные результаты отражены в следующих защищаемых

положениях:

**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.**

Для анализа несинусоидальных режимов, возникающих в сетях с КУ и НН, разработана компьютерная имитационная модель промышленной СЭС, показанная на рисунке 1, включающая силовой трансформатор 10/0,4 кВ, питающий НН, ЛН и КУ. Имитационное моделирование приводилось для трансформатора номинальной мощностью  $S_T = 1000$  кВА, при этом для дальнейшего обобщения и анализа результатов все регулируемые мощности элементов СЭС представлялись в относительных единицах, за базисную величину принята номинальная мощность  $S_T$  трансформатора. Поэтому полученные результаты моделирования качественно не будут отличаться для любого серийного трансформатора 10/0,4 кВ.

В работе определены относительные мощности КУ, при которых возникают резонансные явления, по выражению (1):

$$Q_k^* = \frac{100}{u_k[\%] \cdot n^2} \quad (1)$$

где  $u_k[\%]$  - напряжение короткого замыкания силового трансформатора,  $n$  – номер ВГ, на частоте которой возникает резонансный режим.

Показано, что в резонансных и близких к ним режимах работы СЭС с НН, коэффициент токовой перегрузки конденсаторов  $K_{OVL}$  может превышать допустимое значение, равное 1,3, а амплитуды ВГ тока, протекающие через КУ, могут превышать амплитуду тока основной гармоники. Результаты моделирования показали минимальную возможность предотвращения перегрузки КУ токами ВГ, поскольку в промышленных СЭС применяют ступенчатые регулируемые КУ. При суточном изменении мощности КУ, резонансный режим может возникнуть на любой из ступеней регулирования реактивной мощности.

Произведена оценка суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения  $THD_U$  при наличии и отсутствии КУ со

ступенчатым регулированием реактивной мощности. Установлено, что работа КУ в СЭС с НН, особенно в режимах близких к резонансному, существенно ухудшается качество напряжения. Результаты моделирования режимов СЭС в трехфазной модели показали, что в резонансных и близких к ним режимам относительные амплитуды ВГ тока, генерируемых НН, существенно меньше величин  $I_n^* = 1/n$ , принимаемых в существующих методиках при расчетах ВГ тока в однофазной модели, что видно по зависимостям на рисунке 2.

Снижение амплитуд ВГ тока в резонансных режимах связано с протеканием этих гармоник по резонансному контуру «индуктивность сети - емкость КУ», что и вызывает увеличение искажения напряжения сети и токовую перегрузку КУ (увеличиваются значения  $K_{OVL}$  и  $THD_U$ ).

Результаты имитационного моделирования были подтверждены на физической модели лабораторной установки, состоящей из трансформатора 0,4/0,23 кВ мощностью  $S_{т ном} = 19$  кВА, питающего НН, ЛН и регулируемую КУ. Источник питания установки имел уровень искажений  $THD_U = 0,9$  %, что показывает незначительное влияние искажений напряжения со стороны питающей сети на полученные результаты. Основные результаты физического моделирования представлены на рисунках 3а, 3б и 3в.

Физическое моделирование показало, что КУ перегружены токами ВГ, что видно на рисунке 3а, качество напряжения ухудшается при совместной работе КУ и НН, что видно на рисунке 3б.

Максимальные значения  $K_{OVL}$  и  $THD_U$  имели место при возникновении резонансного режима сети. Также установлено снижение амплитуд ВГ тока в резонансных режимах, что видно на рисунке 3в, характер которого аналогичен рисунку 2, что подтверждает адекватность имитационной модели физической, и возможность ее применения для дальнейшего анализа сложных несинусоидальных режимов.

В процессе исследований рассматривались режимы работы типовых промышленных СЭС на примере обогатительных фабрик и хвостовых хозяйств, приведенные на рисунках 4а, 4б и 4в. Для типовых СЭС получены зависимости коэффициентов  $K_{OVL}$  и  $THD_U$  от мощности КУ  $Q_k^*$ , которые приведены на рисунках 5, 6 и 7.

Из рисунка 5 следует, что в области  $Q_k^* < 0,2$  и  $Q_k^* > 0,35$ , где величины коэффициентов  $K_{OVL}$  и  $THD_U$  существенно выше нормируемых значений при мощности НН  $P_d^* > 0,1$ . Зависимости на рисунке 6 показывают превышение допустимой перегрузки КУ в резонансных режимах ( $K_{OVL} > 1,3$ ), а также несоответствие качества напряжения

нормируемым показателям при  $P_d^* > 0,2$ . На рисунке 7 приведены результаты моделирования при расщеплении обмотки питающего трансформатора, которые показывают недопустимый уровень  $K_{OVL}$  и  $THD_U$  при резонансных режимах при  $P_d^* = 0,5$  и  $P_d^* = 0,2$  соответственно.

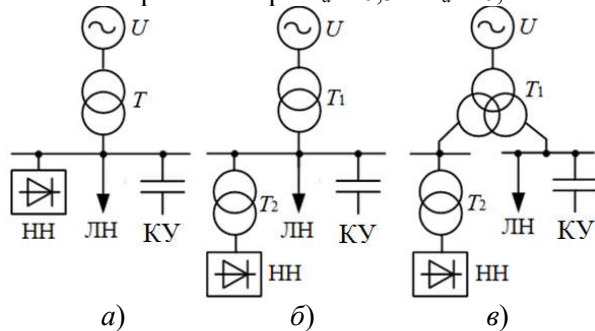


Рисунок 4 – Типовые СЭС: а) – для маломощной низковольтной нагрузки; б) – для мощной нагрузки с общей секцией шин на стороне высокого напряжения; в) – для мощной нагрузки с секционированием на стороне высокого напряжения и трехобмоточным трансформатором.

Результаты моделирования доказывают, что в условиях несинусоидальных режимов при регулировании мощности НН и КУ для рассмотренных СЭС необходимо применять меры по защите КУ от токовой перегрузки и предусматривать технические средства и решения по улучшению качества напряжения с учетом выявленных закономерностей вариации параметров несинусоидальных режимов.

Эффективность применения антирезонансных дросселей иллюстрируется осциллограммами тока и напряжения на конденсаторной установке, приведенные на рисунках 8а и 8б. Осциллограммы были получены при параметрах сети:  $S_T = 1000$  кВА,  $P_d^* = 0,4$ ,  $S^* = 0,4$ ,  $Q_k^* = 0,15$ , которые соответствуют резонансному режиму на 11 гармонике. При включении антирезонансного дросселя удастся снизить коэффициенты:  $K_{OVL}$  с 2,1 до 1,08,  $THD_U$  с 15,6% до 3%.

Таким образом антирезонансный дроссель препятствует увеличению амплитуд ВГ тока и напряжения при включении КУ, однако он не способен обеспечить нормируемые показатели качества электроэнергии в случае, когда искажения тока и напряжения связаны с высокой долей НН от номинальной мощности трансформатора, а не с наличием резонансного режима сети.

По результат моделирования даны рекомендации для выбора способа подавления ВГ в зависимости от величины относительной мощности НН для низковольтной СЭС: при  $P_d^* < 0,15$  - обычные КУ; при  $0,15 < P_d^* < 0,25$  - КУ с повышенным номинальным напряжением; при  $0,25 < P_d^* < 0,6$  - КУ с повышенным номинальным напряжением и антирезонансными дросселями или пассивные фильтры; при  $P_d^* > 0,6$  - АФ.

Разработан алгоритм анализа и моделирования несинусоидальных режимов для обоснованного выбора технического средства или решения по повышению качества электроэнергии, приведенный на рисунке 9.

**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.**

На рисунке 10 приведена типовая промышленная СЭС, принятая для оценки эффективности применения рассмотренных выше технических средств или решений. В данной схеме присутствует несколько ступеней напряжения, которые могут быть разными в зависимости от условий электроснабжения и состава потребителей. В качестве примера рассматривается один из наиболее распространенных случаев, когда  $U_1=110$  кВ,  $U_2=10$  кВ,  $U_3=0,4$  кВ,  $T_1$  -двухобмоточный трансформатор  $S_{T1ном}=16000$  кВА, питающий переменную ЛН максимальной мощностью  $S_{ЛН}=10000$  кВА,  $\cos\varphi=0,7$ , регулируемую КУ максимальной реактивной мощностью  $Q_{КУ}=2000$  квар,  $T_2$  -трансформатор  $S_{T2ном}=2500$  кВА, питающий узел НН максимальной мощностью  $S_{НН}=2000$  кВА,  $\cos\varphi=0,8$ . При этом результаты моделирования качественно будут совпадать с аналогичными при других классах напряжения при неизменной структуре СЭС.

Имитационная модель типовой СЭС приведена на рисунке 11, где моделирование осуществлялось в относительных единицах, и за базис приняты мощности  $S_{T1ном}$  и  $S_{T2ном}$ , поэтому полученные результаты качественно не будут отличаться для аналогичных трансформаторов из типового ряда мощностей и напряжений на разных ступенях СЭС.

В процессе моделирования рассматривался режим работы СЭС с наибольшими искажениями тока ( $THD_I$ ) и напряжения ( $THD_U$ ), при максимальной нагрузке  $T_2$  мощностью  $S_{нн}$  в условиях резонансного режима между индуктивностью  $T_1$  и емкостью КУ. В таком режиме  $THD_U=16,3\%$ ,  $THD_I=21,4\%$  (на стороне 0,4 кВ), и  $THD_U=11,8\%$ ,  $THD_I=27,7\%$  (на стороне 10 кВ), что обуславливает необходимость применения фильтрокомпенсирующих устройств. При моделировании рассматривалось применение пассивных фильтров, настроенных на подавление 5, 7, 11 и 13 ВГ на стороне 0,4 кВ, установка АФ при наличии и отсутствии на его выходе дополнительных пассивных фильтров при резонансных режимах.

При включении пассивных фильтров в резонансном режиме на 7 ВГ  $THD_U=2,3\%$ ,  $THD_I=1\%$  (на стороне 0,4 кВ)  $THD_U=2,1\%$ ,  $THD_I=3,5\%$  (на стороне 10 кВ). Однако, в случае возникновения резонансных режимов на частотах ВГ  $n \geq 17$ , на устранение которых не настроены пассивные фильтры, коррекция искажений будет недостаточно эффективной, что показывают результаты моделирования:  $THD_U=4,6\%$ ,  $THD_I=19,1\%$  (на стороне 0,4 кВ) и  $THD_U=21,4\%$ ,  $THD_I=19\%$  (на стороне 10 кВ).

Имитационная модель АФ приведена на рисунке 12, в которой в качестве алгоритма управления АФ принят метод преобразований Парка-Кларк. Параметры АФ выбраны для обеспечения максимальной эффективности компенсации ВГ при заданных условиях. В таблице 1 приведены величины  $THD_I$  и  $THD_U$ , которые показывают низкую эффективность АФ при компенсации ВГ в резонансном режиме, что показывают результаты моделирования:  $THD_U=8,7\%$ ,  $THD_I=4,7\%$  (на стороне 0,4 кВ) и  $THD_U=7,9\%$ ,  $THD_I=12,7\%$  (на стороне 10 кВ).

Для повышения эффективности работы АФ в резонансных режимах предложено включение на выходе АФ пассивного активно-емкостного фильтра ( $RC$ -фильтра). Для выбора параметров  $RC$ -фильтра, при которых будет обеспечена максимальная эффективность фильтрации ВГ при резонансном режиме, составлена однофазная схема замещения СЭС, приведенная на рисунке 13, позволяющая оценить влияние параметров  $RC$ -фильтра на величину полного сопротивления сети (АЧХ). Для анализа и расчета все параметры элементов СЭС приведены к стороне 10 кВ и схема настроена на резонансный режим на частоте 7 ВГ.

На рисунках 14а, 14б и 14в приведены АЧХ в зависимости от параметров  $RC$ -фильтра, по которым установлено, что емкость  $C_f$   $RC$ -

фильтра смещает резонансную частоту в сторону ее уменьшения, при этом также появляется дополнительный резонанс на более высокой частоте относительно исходного резонанса, но меньший по амплитуде. При этом частота дополнительного резонанса зависит от параметров КУ компенсации реактивной мощности. Для рассматриваемого режима СЭС удается сместить частоту исходного резонанса в сторону уменьшения во избежание резонансных явлений на канонических ВГ при  $C_{\Phi} \geq 48$  мкФ, что позволяет снизить  $THD_U$  на сторонах 0,4 и 10 кВ до допустимых значений.

Установлено, что токовая перегрузка  $RC$ -фильтра может превышать допустимое значение, а также могут возникать резонансные явления на более высоких частотах ВГ, чем частота исходного резонанса. Снижение этих негативных эффектов осуществляется регулированием активного сопротивления  $R_{\Phi}$   $RC$ -фильтра, однако, увеличение  $R_{\Phi}$  ведет к росту потерь активной мощности на нем  $\Delta P$ . Проведена оценка влияния  $R_{\Phi}$  на снижение  $THD_I$  и  $THD_U$ , а также токовой перегрузки  $RC$ -фильтра от величины  $\Delta P$ . Результаты моделирования показали, что токовая перегрузка и величины  $THD_I$  и  $THD_U$  снижаются до 35% от исходных значений при увеличении  $\Delta P$  до 42 кВт.

По результатам имитационного моделирования были выявлены следующие закономерности, представленные на рисунках 15а и 15б.

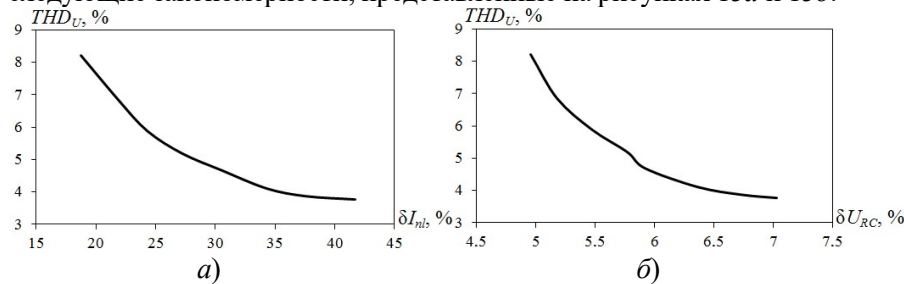


Рисунок 15 - Зависимости изменения  $THD_U$  на зажимах узла нагрузки 0,4 кВ от степени: а) Увеличения потребляемого тока узла нагрузки:  $\delta I$ . б) Увеличения падения напряжения на  $RC$ -фильтре:  $\delta U_{RC}$ .

Данные закономерности получены за счет вариации параметров  $RC$ -фильтра с целью отражения его влияния на степень эффективности компенсации ВГ напряжения. Выявленные закономерности показывают, что повышение эффективности компенсации ВГ при использовании АФ с  $RC$ -фильтром сопровождается увеличением потребляемого узлом нагрузки тока и падения напряжения на  $RC$ -фильтре. Поэтому при настройке



параметров *RC*-фильтра следует исходить из требуемого уровня качества электроэнергии при учете допустимой степени увеличения тока узла нагрузки и падения напряжения на фильтре. Стоит отметить, что при рассмотрении вопроса компенсации ВГ с помощью АФ с *RC*-фильтром уровень негативных эффектов от его работы снижается по мере увеличения частоты резонанса, на которую настроены параметры *RC*-фильтра.

На основе результатов исследований разработан обобщенный алгоритм выбора параметров *RC*-фильтра на выходе АФ при резонансных режимах в промышленных СЭС, который приведен на рисунке 16.

Расчет потенциального экономического эффекта от внедрения пассивного *RC*-фильтра производился при отключенных КУ для недопущения их токовой перегрузки. Срок окупаемости пассивного фильтра составляет 1500-2000 ч (2-3 месяца) в зависимости от суммарного времени простоя КУ, исходя из суточного регулирования графика электрических нагрузок.

### **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

По результатам выполнения диссертационной работы сделаны следующие выводы:

1. Выполнено моделирование режимов работы типовых схем промышленных СЭС на примере обогатительных фабрик различной конфигурации, напряжения и мощности, включающих изменяющиеся в течение суток ЛН, НН и регулирующую КУ для компенсации реактивной мощности.

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

3. Установлено, что при моделировании систем с НН по упрощенной однофазной модели необходимо учитывать ограниченную мощность ВГ, обусловленную их внутренним сопротивлением, величина которого зависит от мощности НН и сопротивления питающего трансформатора. Это существенно повышает точность моделирования в резонансных режимах и делает ее сопоставимой с результатами, полученными на трехфазной модели. Выявленная закономерность должна учитываться при моделировании и анализе несинусоидальных режимов

промышленных СЭС.

4. Выявлены диапазоны соотношения мощностей НН и питающего трансформатора, исходя из которых целесообразно применение того или иного технического средства или решения для подавления ВГ в СЭС различной конфигурации, включая применение КУ, рассчитанных на повышенное напряжение, оснащение КУ антирезонансными дросселями, применение АФ.

5. Выявленные закономерности, связанные с относительными значениями мощностей КУ, при которых возникают резонансные явления, сопровождающиеся вариацией амплитуд канонических ВГ тока и снижением уровня качества напряжения, ограничения, касающиеся моделирования источников ВГ тока НН конечной мощности, допущения при выборе параметров схем замещения являются теоретической основой моделирования и анализа сложных несинусоидальных режимов в типовых схемах промышленных СЭС для обоснованного выбора технического средства или решения для повышения качества электроэнергии.

6. При наличии резонансных режимов, создаваемых КУ и питающим трансформатором, показана недостаточная эффективность использования параллельного АФ для компенсации ВГ, 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 ВГ тока и напряжения от вариации параметров *RC*-фильтра на выходе АФ, отражающие более существенное влияние емкостной части сопротивления фильтра на эффективность компенсации ВГ тока и напряжения при резонансных режимах, а также степень увеличения потребляемого узлом нагрузки тока.

8. Обосновано, что параметры *RC*-фильтра, устанавливаемого на выходе АФ, 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 СЭС с НН и КУ.

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 по применению различных конфигураций фильтрокомпенсирующих устройств в промышленных СЭС с НН и КУ компенсации реактивной мощности в резонансных режимах при планировании, организации и реализации мероприятий по повышению качества электрической энергии.

#### **СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

*Публикации в изданиях из Перечня ВАК:*

1. 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. DOI: 10.18721/JEST.25102.

2. 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.

3. Сычев, Ю.А. 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.

4. 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.

*Публикации в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus:*

5. Sychev, Yu.A. Nonsinusoidal modes in power-supply systems with nonlinear loads and capacitors in mining / Sychev Yu.A., Kostin V.N.,

Serikov V.A., Aladin M.E. // Mining Informational and Analytical Bulletin. – 2022. – № 1. – P. 159–179.

6. 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) - 2022. – Vol. 13, Issue 3. – P. 1625-1634.

*Публикации в прочих изданиях:*

7. Kostin, V.N. Research of power supply system modes with nonlinear and linear loads connected to different winding of the transformer / V.N. Kostin, **V.A. Serikov**, Ivanova T.S. // Proceedings of the 3rd 2021 International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering, REEPE. - 2021. – P. 9387988. DOI: 10.1109/REEPE51337.2021.9387988.

8. Kostin, V.N. Higher harmonics and limiting thereof in power supply systems of different voltages/ V.N. Kostin, **V.A. Serikov**, Sherstennikova I.A. // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2019. Vol. 378, Issue 1. – P. 012051. Doi: 10.1088/1755-1315/378/1/012051.

9. 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. PP. 263-271. Doi: 10.1201/978100301722.

10. 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.

11. Актуальные аспекты электроснабжения. Методические указания к курсовой работе / Санкт-Петербургский горный университет. Сост. *Костин В.Н., Сериков В.А.*, СПб, 2021 – 35 с.

*Свидетельство:*

12. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2021619131, Российская Федерация. Программа оценки коэффициентов несинусоидальности напряжения и токовой перегрузки конденсаторов для режимов работы систем электроснабжения 10/0,4 кВ с нелинейной нагрузкой: заявл. 31.05.2021; опубл. 04.06.2021 / **Сериков В.А.**, Гуревич И.А.; заявитель СПбГУ.

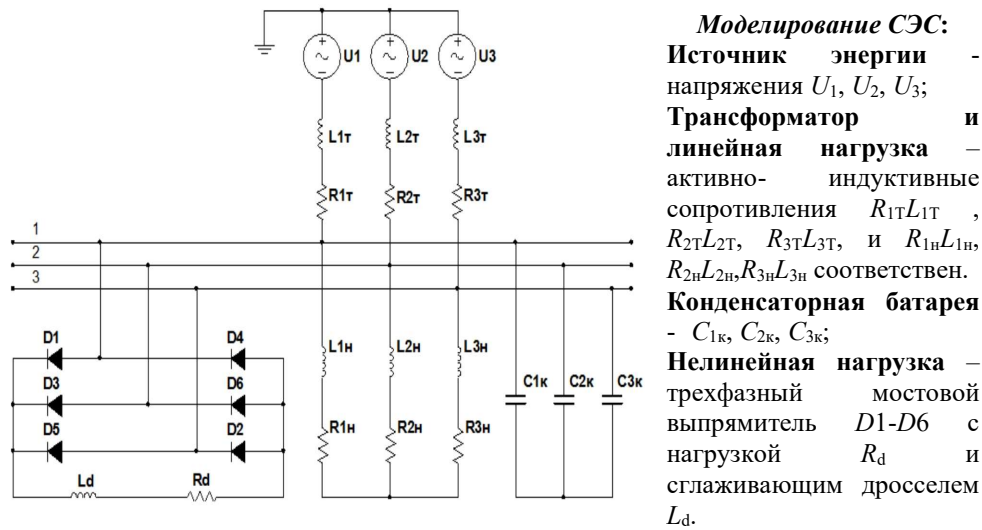


Рисунок 1 - Трехфазная компьютерная модель системы электроснабжения трансформатора 10/0,4 кВ

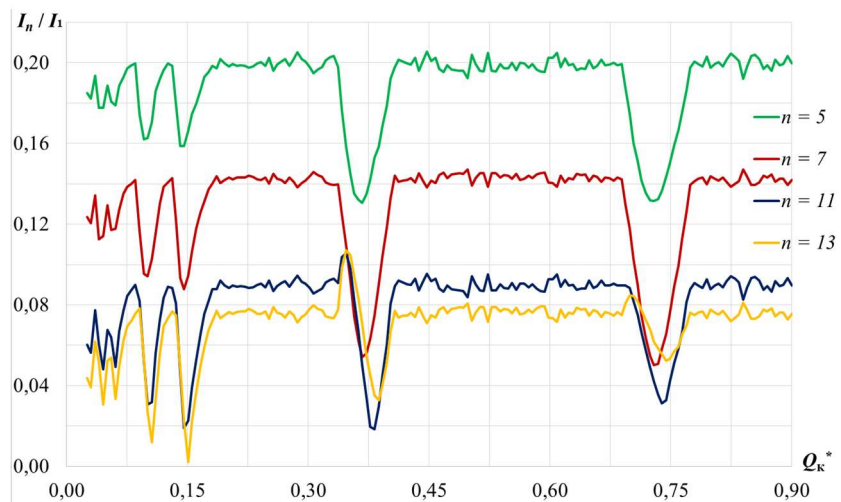


Рисунок 2 - Зависимости относительных амплитуд ВГ  $I_n^*$  от мощности  $Q_k^*$

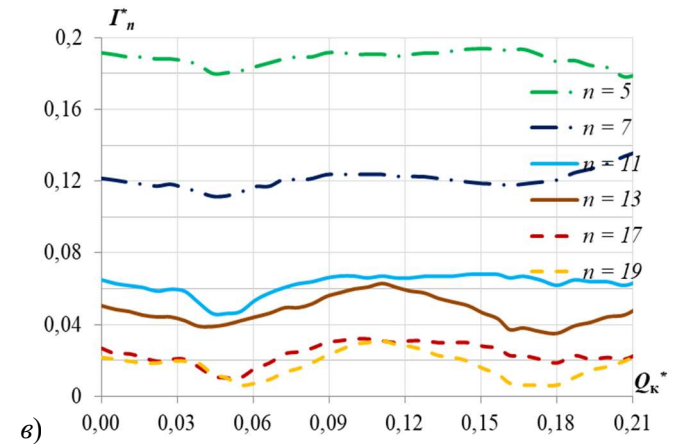
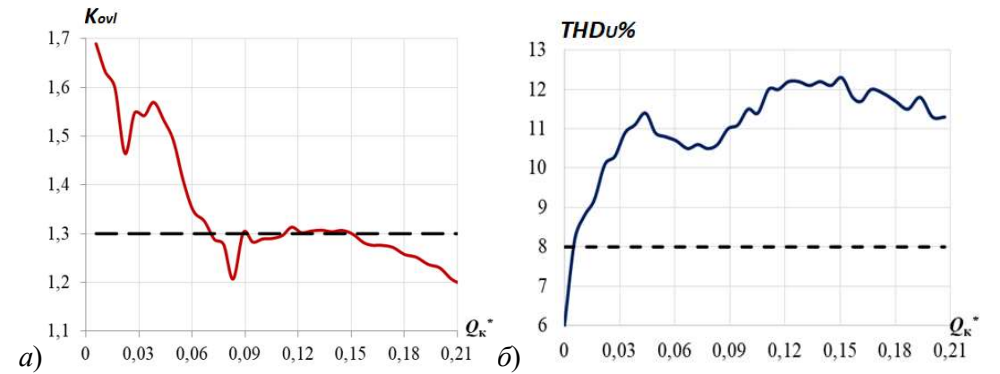


Рисунок 3 – Зависимости коэффициентов  $K_{OVL}$  (а),  $THDu$  (б) и  $I_n^*$  (в) от мощности КУ  $Q_k^*$

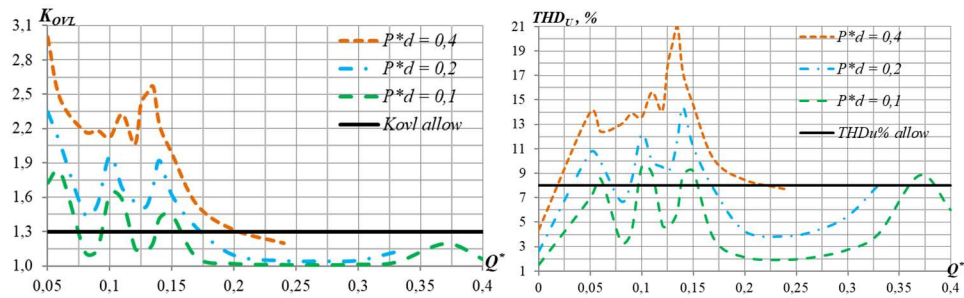


Рисунок 5 - Зависимости  $K_{OVL}$  и  $THD_U$  от мощности  $Q_k^*$  для промышленной СЭС рисунка 4а.

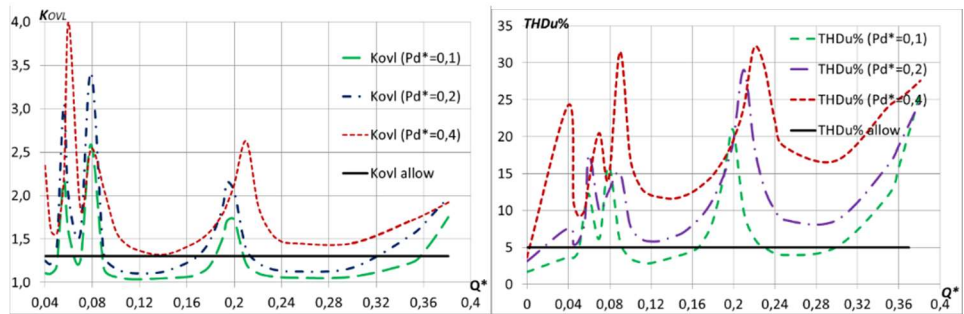


Рисунок 6 - Зависимости  $K_{OVL}$  и  $THD_U$  от мощности  $Q_k^*$  для промышленной СЭС рисунка 4б.

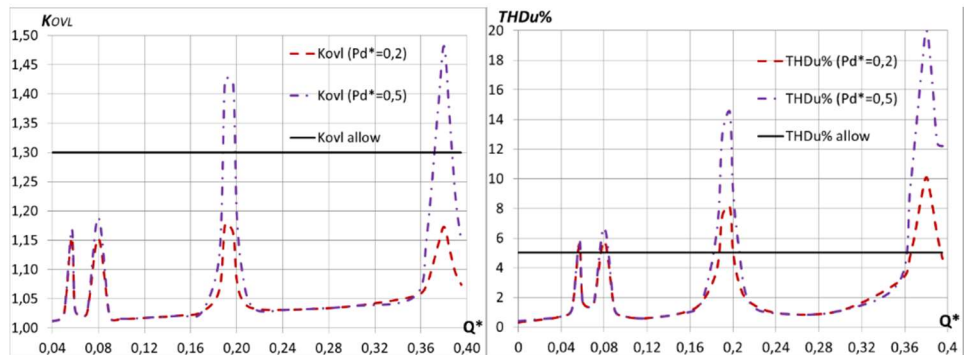


Рисунок 7 - Зависимости  $K_{OVL}$  и  $THD_U$  от мощности  $Q_k^*$  для промышленной СЭС рисунка 4в.

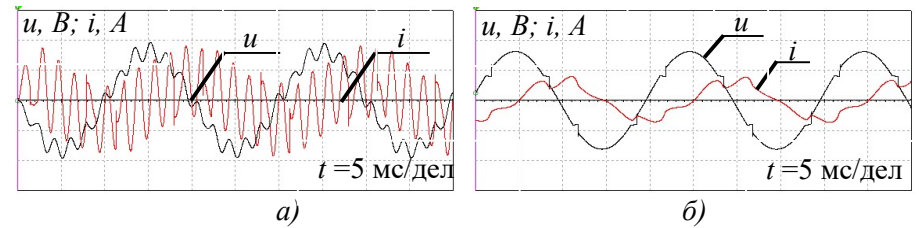


Рисунок 8 - Осциллограммы тока (красный сигнал) на КУ и напряжения сети (синий сигнал) для СЭС рисунка 4а  
 а – резонансный режим на 11 гармонике при отсутствии антирезонансных дросселей:  $K_{OVL} = 2,1$ ,  $THD_U = 15,6\%$ .  
 б – то же, но с антирезонансными дросселями:  $K_{OVL} = 1,08$ ,  $THD_U = 3\%$ .

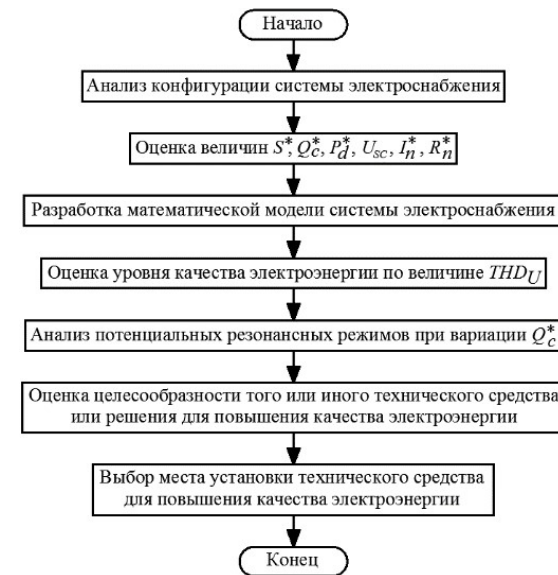


Рисунок 9 - Алгоритм анализа и моделирования несинусоидальных режимов для обоснованного выбора технического средства или решения по повышению качества электроэнергии

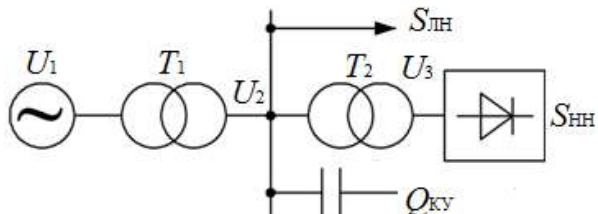


Рисунок 10 - Типовая СЭС промышленного предприятия

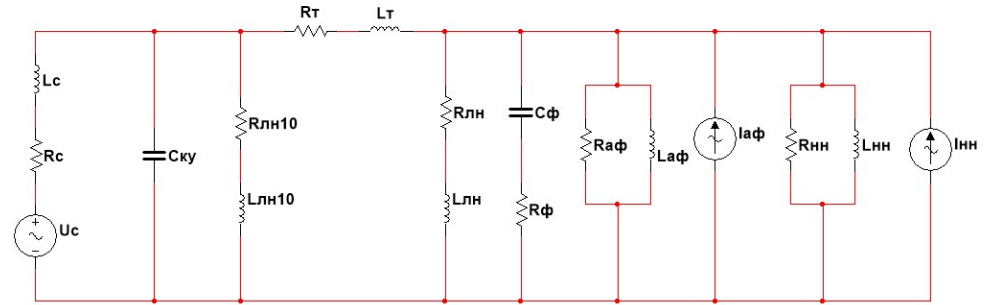


Рисунок 13 - Однофазная схема замещения рассматриваемой СЭС

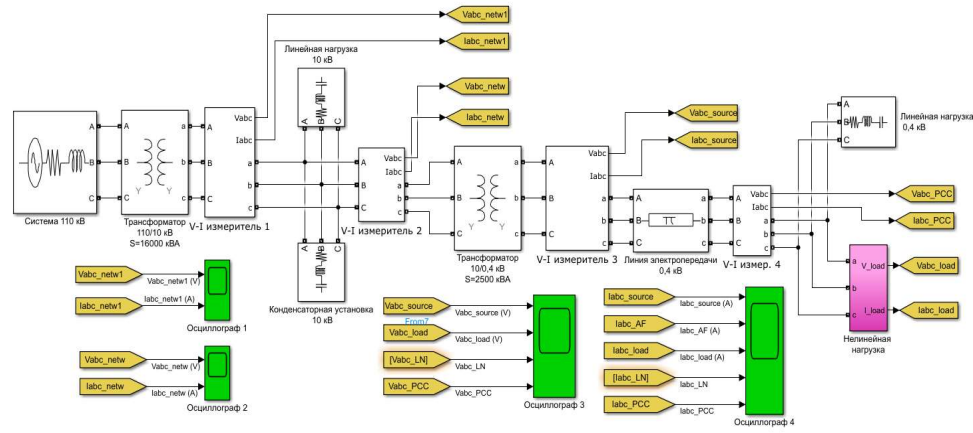


Рисунок 11 - Имитационная модель рассматриваемой СЭС

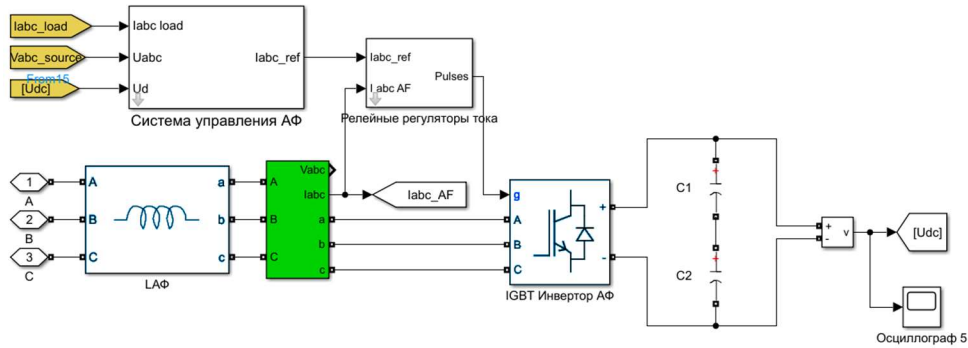


Рисунок 12 - Имитационная модель АФ

Таблица 1 - Коэффициенты искажений тока и напряжения при работе АФ

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

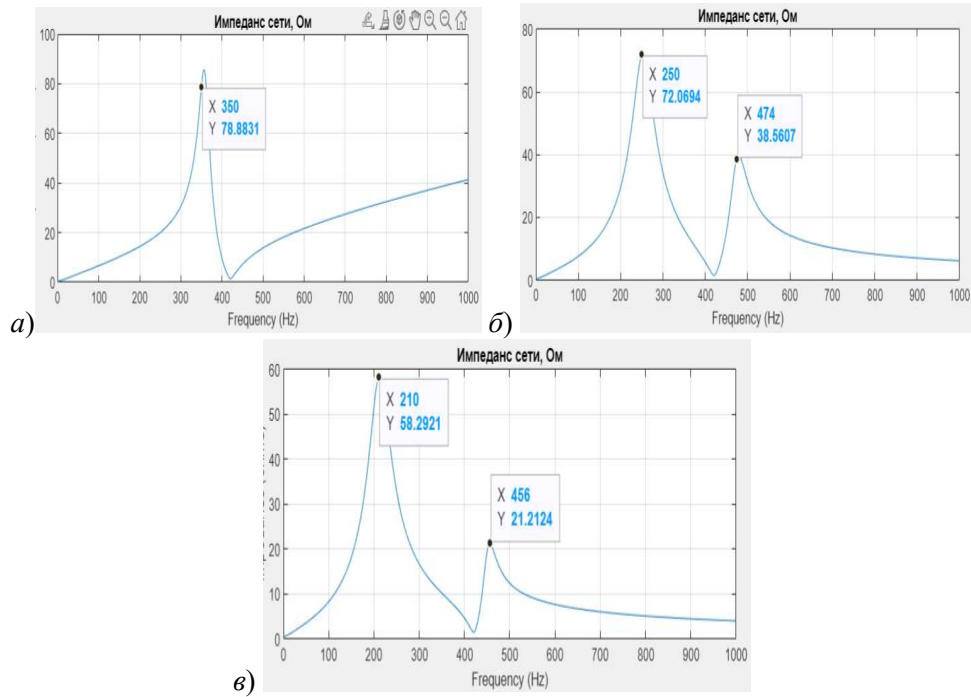


Рисунок 14 - Импеданс сети при резонансе на 7 гармонике ( $C_K = 63$  мкФ):

- а)  $RC$ -фильтр отключен;  
 б) включение  $RC$ -фильтра с параметром  $C_\Phi = 30$  мкФ и  $R_\Phi = 1,5$  Ом;  
 в) включение  $RC$ -фильтра с параметром  $C_\Phi = 48$  мкФ и  $R_\Phi = 1,5$  Ом.

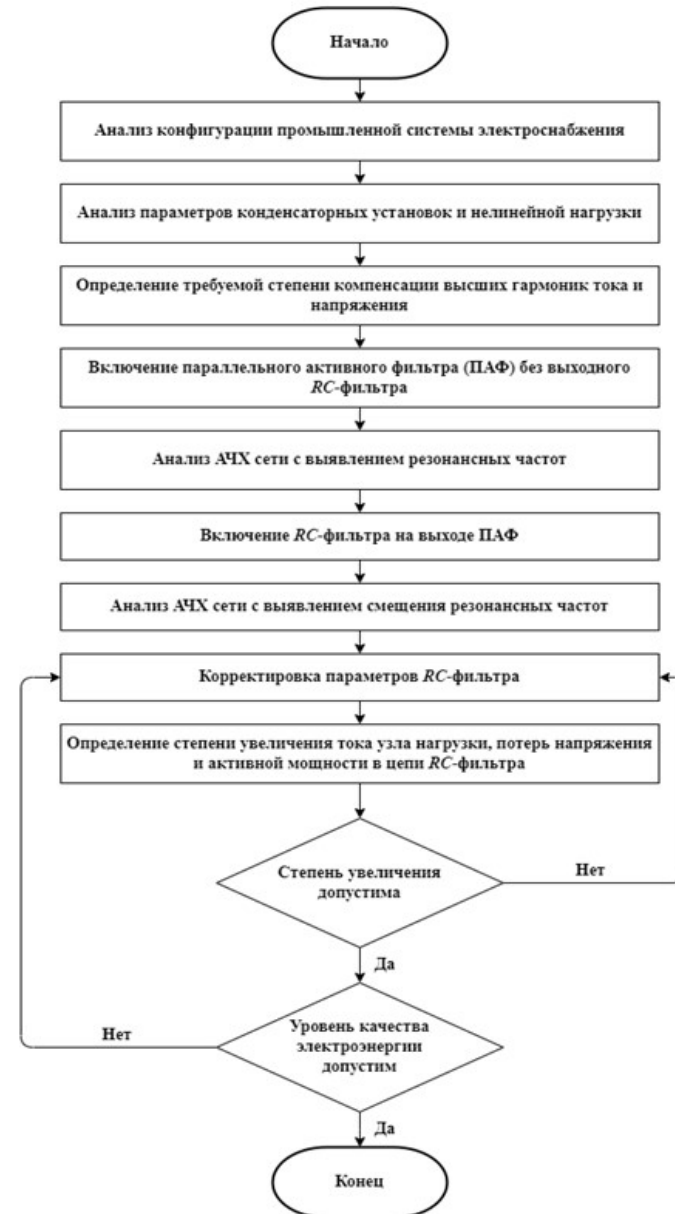


Рисунок 16 - Алгоритм выбора параметров  $RC$ -фильтра на выходе АФ при резонансных режимах в промышленных СЭС с НН и КУ