

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Санкт-Петербургский горный университет»

СЫЧЕВ Юрий Анатольевич

**ФИЛЬТРОКОМПЕНСИРУЮЩИЕ УСТРОЙСТВА С АКТИВНЫМИ
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯМИ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА
ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСАХ
НЕФТЕГАЗОВЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ**

Специальность 05.09.03 – «Электротехнические комплексы и системы»

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Научный консультант доктор технических наук, профессор Абрамович Б.Н.

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ - 2021

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Необходимость формирования комплексного научного подхода к проблеме повышения качества электрической энергии (КЭ) и обеспечения электромагнитной совместимости (ЭМС) электрооборудования в электрических сетях различной структуры при наличии несинусоидальных режимов, как со стороны источников электроэнергии (централизованных или автономных), так и со стороны подключенной нелинейной нагрузки (НН) обусловлена множеством факторов, особенно в условиях нефтегазовых предприятий (НГП). Наличие ряда современных активных преобразовательных устройств повышения КЭ различного функционального назначения, не охваченного едиными теоретическими положениями и методологией синтеза, выбора, расчета, анализа и применения, такие как устройства статической компенсации реактивной мощности (СТАТКОМ), динамические компенсаторы искажения напряжения (ДКИН), универсальные компенсаторы, активные выпрямители, активные и гибридные фильтры) делает их применение недостаточно эффективным при повышении КЭ. Существует большое число методов и алгоритмов управления активными преобразователями (АП), направленных на решение узких специализированных задач при определенной совокупности условий без единой теоретической и методологической базы, что не позволяет реализовать более масштабное применение подобных преобразователей как отдельно, так и в составе фильтрокомпенсирующих устройств (ФКУ). Наличие дополнительных потерь энергии в электрооборудовании (трансформаторах, электрических машинах) из-за наличия высших гармоник (ВГС) тока и напряжения (до 25 % от суммарных потерь) требует системного научно-обоснованного применения современных многофункциональных технических средств и решений по повышению КЭ, включая ФКУ с АП. Развитие технологий комбинированного электроснабжения на основе параллельной работы централизованных и автономных источников распределенной генерации (РГ), для которого не определены нормы КЭ и ЭМС, определяет необходимость научно-обоснованного применения технических средств автоматизированной коррекции КЭ, включая ФКУ с АП, в условиях вариации величин показателей КЭ (ПКЭ), исходя из режима электроснабжения и характера подключенной нагрузки. Низкая эффективность использования АП для повышения КЭ без дополнительных ФКУ, согласно результатам экспериментальных исследований, определяет необходимость развития теории синтеза и применения электротехнических комплексов ФКУ с АП.

Указанные факторы и противоречия обуславливают актуальность решения научно-технической проблемы повышения КЭ посредством автоматизированной коррекции ПКЭ электротехническими комплексами ФКУ с АП в системах электроснабжения (СЭС) НГП.

Степень разработанности проблемы. Работа основана на исследованиях ведущих отечественных и зарубежных ученых.

Вопросам эффективного применения АП в электротехнических комплексах и системах посвящены работы Шакаряна Ю.Г., Розанова Ю.К., Козярука А.Е., Дмитриева Б.Ф., Пронина М.В., Шрейнера Р.Т., Ефимова А.А., Германа-Галкина С.Г. Однако, в их трудах системно не рассматриваются вопросы применения АП в качестве ФКУ для повышения КЭ.

Проблемам повышения КЭ электротехнических комплексах и системах за счет активных и пассивных ФКУ посвящены труды Абрамовича Б.Н., Гамазина С.И., Железко Ю.С., Смоловика С.В., Довгуна В.П., Боярской Н.П., Ершова М.С., Чивенкова А.И., Шпигановича А.Н., Шклярского Я.Э., *D. Arrilaga, D. Bredly, M. Bollen, P. Salmeron, S. P. Litran*. Однако, в их трудах системно не рассматриваются вопросы совместного применения АП и пассивных ФКУ в рамках единых электротехнических комплексов для повышения КЭ, а также выполнения других функций.

Развитию теорий гармонического анализа и энергетических процессов в несинусоидальных режимах посвящены работы Жежеленко И.В., Тонкаля В.Е., Шидловского А.К., Агунова М.В.,

Агунова А.В., C. Budeanu, S. Fryze, , L. Czarnecki, H. Akagi, P. Tenti, P. Mattavelli. Однако, в их трудах не рассматриваются вопросы выбора того или иного метода выявления и коррекции ПКЭ для системы управления АП в составе ФКУ в условиях вариации параметров СЭС и подключенной нагрузки.

Таким образом, на настоящий момент существует большое количество исследований по применению АП и ФКУ для решения узких задач при конкретных условиях, а также ряд теорий и методов анализа несинусоидальных режимов, обладающих достоинствами и недостатками. Однако, в настоящий момент не в полной мере разработан системный подход к структурному и параметрическому синтезу, а также применению АП и ФКУ в рамках единых многофункциональных электротехнических комплексов повышения КЭ.

Связь темы диссертации с государственными научными программами.

Работа выполнялась в соответствии с тематическими планами государственных контрактов Минобрнауки РФ:

- № 7.8044.2013 «Научно-методическое сопровождение деятельности и информационное обеспечение учебно-образовательного центра «энергосбережение и энергоэффективность» от 01.01.2013 г.

- № 13.707.2014/К «Повышение конкурентоспособности предприятий минерально-сырьевого комплекса путем снижения энергетической составляющей в себестоимости продукции посредством распределенной генерации с комбинированным использованием альтернативных и возобновляемых источников энергии и суперконденсаторными накопительными модулями» от 11.07.2014 г.

- № 13.3746.2017/ПЧ «Разработка научно обоснованных методов и средств синтеза структуры и реализации централизованных, автономных и комбинированных систем электроснабжения повышенной надежности с использованием альтернативных и возобновляемых источников для бесперебойного энергообеспечения предприятий с непрерывным технологическим циклом на основе логико-вероятностных оценок» от 11.01.2017 г.

Цель работы. Решение проблемы повышения КЭ в централизованных, автономных и комбинированных системах электроснабжения НПП путем структурного и параметрического синтеза электротехнических комплексов ФКУ с АП.

Идея работы. Развитие теории и разработка принципов структурного и параметрического синтеза многофункциональных электротехнических комплексов ФКУ с АП позволит повысить КЭ и обеспечить надлежащий уровень ЭМС электрооборудования, а также снизить потери энергии в СЭС НПП.

Для достижения указанной цели в диссертации поставлены и решены следующие **задачи**:

1. Комплексный анализ негативного влияния параметров КЭ и ЭМС, несоответствующего требованиям нормативной базы, на параметры и режимы работы электрооборудования, с выявлением необходимого уровня коррекции ПКЭ посредством ФКУ с АП.

2. Определение теоретических основ метода исследования АП для обоснования способов их использования в составе ФКУ автоматизированного повышения КЭ в условиях вариации внешних и внутренних параметров (п.1, 2*).

3. Создание математических моделей ФКУ с АП различной топологии, учитывающих степень влияния и характер изменения внешних и внутренних факторов, а также адаптивный режим повышения КЭ (п.1).

4. Разработка способов и методов интеграции ФКУ с АП в состав систем распределенной генерации и комбинированных СЭС для реализации заданного набора функций, а также в состав ав-

* Паспорт специальности 05.09.03 – «Электротехнические комплексы и системы»

томатизированных систем управления электроснабжением при формировании информационно-управляющих воздействий (п.3).

5. Развитие теоретических положений по структурному и параметрическому синтезу ФКУ с АП в централизованных, автономных и комбинированных СЭС, включая оптимизацию параметров ФКУ в соответствии с целевой функцией (п.1, 3).

6. Промышленные испытания и техническая реализация ФКУ с АП в соответствии с разработанными теоретическими положениями и методами (п.4).

Область исследования, обозначенная в сформулированных задачах, соответствует п.1 «Развитие общей теории электротехнических комплексов и систем, изучение системных свойств и связей, физическое, математическое, имитационное и компьютерное моделирование компонентов электротехнических комплексов и систем», п.2 «Обоснование совокупности технических, технологических, экономических, экологических и социальных критериев оценки принимаемых решений в области проектирования, создания и эксплуатации электротехнических комплексов и систем», п.3 «Разработка, структурный и параметрический синтез электротехнических комплексов и систем, их оптимизация, а также разработка алгоритмов эффективного управления», п.4 «Исследование работоспособности и качества функционирования электротехнических комплексов и систем в различных режимах, при разнообразных внешних воздействиях» паспорта научной специальности 05.09.03 – «Электротехнические комплексы и системы».

Объект исследования: Электротехнические комплексы СЭС НГП.

Предмет исследования: Структуры, параметры, характеристики, системы управления и режимы работы электротехнических комплексов ФКУ с АП для повышения КЭ.

Методология и методы исследований. Для решения поставленных задач использованы методы расчета и моделирования электрических цепей, систем электроснабжения электротехнических комплексов, методы фазовых преобразований, математического и компьютерного имитационного моделирования электромагнитных процессов, анализа несинусоидальных режимов. Проведены экспериментальные исследования и промышленные испытания серийных и опытных образцов ФКУ с АП в СЭС НГП.

Научная новизна работы:

1. Выявлены закономерности изменения величин ПКЭ и степени их коррекции АП последовательного и параллельного типа, в соответствии с различными методами управления, при вариации параметров источника, нагрузки, самих АП, а также режима измерения и выявления ими опорных величин, что позволяет в заданных условиях произвести обоснованный выбор типа АП, способа управления им, степени коррекции ПКЭ и их количества.

2. Установлены степени влияния диапазонов варьирования внутренних параметров АП, внешних параметров питающей сети и нагрузки на уровень эффективности повышения КЭ, а также свойство АП одновременно влиять на несколько ПКЭ с разной степенью эффективности, которое сопровождается отклонениями режимов работы электрической сети от номинальных параметров, что необходимо учитывать при синтезе структуры ФКУ с АП в заданных условиях.

3. Получена закономерность, определяющая составляющие суммарного коэффициента мощности при несинусоидальных режимах, включая степень завышения полной мощности сетевого оборудования при несинусоидальных режимах, которая является одним из критериев выбора структуры и основных параметров ФКУ с АП.

4. Разработаны математические модели ФКУ с АП различной топологии и компонентного состава, включая модели универсальных компенсаторов, отличающиеся учетом вариации структуры и параметров пассивных фильтров на выходе активной части в зависимости от степени воздействия совокупности внешних и внутренних факторов, влияющих на уровень эффективности повышения КЭ с учетом возможности наличия резонансных явлений.

5. Разработаны алгоритмы автоматизированного повышения КЭ для АП, функционирующих как отдельные устройства, так и в составе ФКУ, отличающиеся учетом заданной совокупности факторов, определяющих характеристики источника и нагрузки, набора корректируемых ПКЭ, источника искажения синусоидального режима, метода управления АП.

6. Разработаны структуры систем комбинированного электроснабжения на основе параллельной работы централизованных источников и распределенной генерации, в составе которых ФКУ с АП обеспечивают бесперебойное электроснабжение ответственных потребителей, повышение КЭ при изменении режима электроснабжения, а также синхронизацию параллельной работы источников на общую нагрузку.

7. Сформулированы научно-методические основы выбора и обоснования структуры, компонентного состава, режима работы, методов управления и распределения ФКУ с АП в централизованных, автономных и комбинированных СЭС НПП, что является основным этапом развития теории структурного и параметрического синтеза ФКУ с АП.

Основные научные положения, выносимые на защиту:

1. Метод исследования ФКУ с АП, обладающими различными топологиями и системами управления, в условиях вариации параметров и характеристик систем электроснабжения, подключенной нагрузки, самих АП, позволяющий оценить уровень эффективности повышения качества электрической энергии при заданных факторах.

2. Математическое описание и модели ФКУ с АП, позволяющее выявить зависимости уровня эффективности повышения КЭ от вариации конфигурации пассивного фильтра на выходе АП, способа соединения компонентов активной и пассивной части, режима работы силовых ключей АП, способа подключения к компенсируемой сети и диапазонов вариации параметров активной части.

3. Методология интеграции ФКУ с АП в комбинированные СЭС с возможностью реализации информационно-управляющих воздействий в соответствии с алгоритмами повышения КЭ, синхронизации параллельной работы распределенных источников, обеспечения бесперебойного электропитания.

4. Структурный и параметрический синтез топологии и параметров электротехнических комплексов ФКУ с АП должен осуществляться в соответствии с разработанной целевой функцией оптимизации на основе многофакторной оценки зависимости эффективности повышения КЭ от набора критериев, включающей уровень минимизации параметров АП в составе ФКУ, в том числе емкость и напряжение накопительных элементов, потерь напряжения в пассивных фильтрах, установленных на выходе активной части, потерь активной мощности в АП и нагрузке.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждаются корректным использованием общепризнанных теорий, методов и подходов, адекватных математических моделях исследуемых систем, сходимости результатов математического моделирования и экспериментальных исследований не хуже 90 %. Полученные результаты по отдельным направлениям согласуются с аналогичными результатами исследований других отечественных и зарубежных авторов. Также достоверность результатов исследований подтверждается положительным опытом эксплуатации ФКУ с АП в электрических сетях ОАО «Оренбургнефть» и ООО «РН-Юганскнефтегаз», прошедших внедрение в соответствии с результатами работы.

Теоретическая значимость. Результаты работы являются развитием теории и методов структурного и параметрического синтеза ФКУ с АП в электротехнических комплексах централизованных, автономных и комбинированных СЭС НПП, создают методическую основу для проектирования ФКУ с АП, представляют задел для развития теории комбинированных СЭС.

Практическая значимость.

1. Даны практические рекомендации по выбору структуры, компонентного состава, метода управления, режима работы и места размещения ФКУ с АП в централизованных, автономных и комбинированных СЭС.

2. Разработаны компьютерные имитационные модели централизованных, автономных и комбинированных СЭС с АП и ФКУ, позволяющие оценивать эффективность повышения КЭ в различных режимах.

3. Выявлены закономерности, позволяющие оценивать степень влияния внешних и внутренних факторов на уровень эффективности повышения КЭ комплексами ФКУ с АП при их проектировании и эксплуатации.

4. Выявлен положительный экономический эффект от внедрения ФКУ с АП в условиях СЭС НГП на уровне от 150 до 300 тыс.руб. в год от одного ФКУ с АП со сроком окупаемости не более 2 лет.

Реализация результатов работы. Результаты работы используются в ПАО «Газпром», ООО «РН-Юганскнефтегаз» при разработке и комплексном внедрении мероприятий по повышению уровня энергосбережения и энергетической эффективности, в ООО «СПИК СЗМА» и АО «Чебоксарский электроаппаратный завод», ЗАО «Электон» при разработке преобразовательного оборудования и ФКУ, в ООО «НТЦ Механотроника» при разработке современных интеллектуальных устройств релейной защиты, в ПАО «МРСК Сибири» - «Омскэнерго» при составлении программ, организации и проведении научно-технических работ, направленных на энергосбережение и повышение КЭ в энергосистемах, о чем имеются соответствующие акты внедрения.

Апробация результатов работы. Основные положения и результаты работы докладывались и получили положительную оценку на международных конференциях: Международная конференция «IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus)», 2019-2020 гг., Санкт-Петербург; Международная научная конференция «Энергетика, экология и строительство» (EECE 2019), 2019 г., Санкт-Петербург; Международная мультидисциплинарная конференция по промышленному инжинирингу и современным технологиям «International multi-conference on industrial engineering and modern technologies, FAREASTCON», 2018-2020 гг., Владивосток; Международная научно-техническая конференция «Динамика систем, механизмов и машин» (Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines, Dynamics), 2016-2017 гг., Омск; 10-ая Международная конференция «Качество электроэнергии и надежность электроснабжения» (2016 Electric Power Quality and Supply Reliability, PQ 2016), 2016 г., Таллин; 15 Международный симпозиум по проблемам избыточности в информационных и управляющих системах (REDUNDANCY 2016), 2016 г, Санкт-Петербург; Международная научно-техническая конференция «Актуальные проблемы электронного приборостроения АПЭП-2016», 2016 г., Саратов; Международная научная конференция ассоциации открытых инноваций FRUCT (Conference of Open Innovation Association, FRUCT), 2017 г., Санкт-Петербург; Международная научно-техническая конференция «Пром-Инжиниринг», 2017 г., Челябинск; 2018 г., Москва; Международная научно-техническая конференция «Инновации и перспективы развития горного машиностроения и электромеханики», 2017-2020 гг., Санкт-Петербург; XIII международная конференция по электромеханике и робототехнике «Завалишинские чтения», 2018 г., Санкт-Петербург; Международная конференция «Информационные технологии в бизнесе и производстве», 2018-2020 гг., Новосибирск; II Всероссийская научная конференция «Современные образовательные технологии в подготовке специалистов для минерально-сырьевого комплекса», 2018 г., Санкт-Петербург; XIV Международная научно-практическая конференция «Новые идеи в науках о Земле», 2019 г., Москва; II и III международная научно-практическая конференция «Промышленная безопасность предприятий минерально-сырьевого комплекса в XXI веке», 2016 г., 2018 г., Санкт-Петербург.

Разработки по тематике диссертационных исследований отмечены наградами международных выставок и конгрессов: 65-я и 68-я Международные выставки «Идеи-Изобретения-Инновации» – «IENA-2013», «IENA-2016» (г. Нюрнберг, Германия, 2013, 2016), XV Московский международный Салон изобретений и инновационных технологий «Архимед-2012» (г. Москва, 2012), 23 Международная выставка изобретений, инноваций и промышленного дизайна «ITEX'12» (г. Куала-Лумпур, Малайзия, 2012), IX Международная выставка инноваций «IEIK-2016» (г. Куньшань, Китай, 2016), XII Международная ярмарка инноваций «SIIF-2016» (г. Сеул, Южная Корея, 2016).

Публикации и патенты. По теме диссертации опубликовано 49 печатных работ, в том числе 13 в научных изданиях, входящих в Перечень ВАК РФ, 28 в изданиях, индексируемых международными базами научного цитирования Scopus и Web of Science, получено 19 патентов РФ на изобретение.

Личный вклад автора. Проведены экспериментальные исследования эффективности повышения качества электроэнергии АП в сетях ОАО «Оренбургнефть» и ООО «РН-Юганскнефтегаз». Выявлены закономерности, отражающие влияние внешних и внутренних факторов на степень повышения качества электрической энергии АП. Разработаны модифицированные алгоритмы работы АП, функционирующих как отдельные устройства, так и в составе ФКУ. Созданы математическое описание и модели ФКУ с АП различной топологии. Выявлены допустимые диапазоны вариации параметров АП в составе ФКУ для снижения массогабаритных показателей АП с сохранением заданного уровня эффективности повышения КЭ. Разработаны структуры систем комбинированного электроснабжения, в состав которых интегрированы ФКУ с АП для выполнения ряда функций. Разработаны теоретические положения и системный подход к структурному и параметрическому синтезу ФКУ с АП. Выполнено промышленное внедрение ФКУ с АП в соответствии с разработанными методами и алгоритмами.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 6 глав, заключения, содержит 199 рисунков, 39 таблиц, список литературы из 535 наименований и трех приложений. Общий объем диссертации 365 страниц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дана общая характеристика работы, обоснована ее актуальность, сформулированы цель исследования, научная новизна, научные положения и результаты, выносимые на защиту.

В главе 1 приведена характеристика научно-технической проблемы повышения КЭ в СЭС НПП. Рассмотрены основные типы НН, генерируемый ими спектр ВГС, их негативное влияние на электрооборудование. Выявлены основные типы АП и задачи, которые должны выполнять ФКУ с АП. Проведен анализ технических средств и решений для повышения КЭ, рассмотрена их структура, режимы коррекции ПКЭ, достоинства и недостатки.

ФКУ с АП должны в свете современных требований по условиям непрерывности и устойчивости технологических процессов НПП, а также надлежащего уровня энергосбережения и энергетической эффективности решать следующие основные задачи:

- компенсация ВГС тока и напряжения в полном или частичном режиме в условиях ЦЭС, РГ и комбинированных СЭС в зависимости от типа и режима работы НН и источника;
- управление режимом напряжения, путем минимизации гармонических искажений, величины и длительности провалов и отклонений напряжения;
- коррекция коэффициента мощности сети с учетом основной составляющей и ВГС;
- устранение несимметрии источника и нагрузки из-за ее неравномерного распределения и наличия ВГС тока и напряжения;

- обеспечение синхронизации режимов параллельной работы ЦЭС и автономных источников различных типов в рамках систем РГ и комбинированного электроснабжения.

ФКУ повышения КЭ с АП корректно называть такой ЭТК, который:

- является управляемым источником тока или напряжения заданной величины и гармонического состава;

- содержит, по меньшей мере, один АП на основе современных активных элементов (IGBT, GTO, GCT, IGCT);

- имеет систему управления, функционирующую на основе теории фазовых преобразований, гармонического анализа, фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ) и обладает свойством самонастройки;

- содержит одно или несколько пассивных ФКУ, соединенных с АП определенным образом; может являться составной частью ЭТК источника РГ, НН или отдельно подключаемым устройством коррекции ПКЭ.

Данное определение является основой развития теории структурного и параметрического Синтеза ФКУ с АП в централизованных, автономных и комбинированных СЭС НПП.

Определены основные задачи исследований.

В главе 2 приведены факторы, определяющие необходимую степень коррекции ПКЭ помимо требований нормативной документации.

На рисунке 1 приведены зависимости наработки на отказ ($t_{отк}$) погружных электродвигателей (ПЭД) установок НПП от коэффициента k_U (а), и степени уменьшения паспортного срока службы электроустановок (γ) от k_U (б), выявленные в процессе экспериментальных исследований в электрических сетях предприятий минерально-сырьевого комплекса (МСК) и статистических данных. Представленные закономерности отражают степень влияния несинусоидальности формы кривой сетевого напряжения на один из показателей надежности работы электрооборудования и уровень снижения срока службы изоляции электроустановок. Зависимость рисунка 2.6а аппроксимирована по результатам обработки значительного объема экспериментальных данных и может рассматриваться, как обобщенная закономерность влияния ВГС напряжения на наработку на отказ.

При исследованиях $t_{отк}$ изменялась в пределах от 20 до 400 дней при значениях k_U от 2,5 до 8,4 %, что незначительно превышает ному ГОСТ 32144-2013 в 8% для сетей 0,4 кВ. Закономерности рисунка 2.6б получены расчетным путем также с использованием экспериментальных данных об уровне несинусоидальности напряжения в сетях МСК и справочных данных о параметрах изоляции электрооборудования.

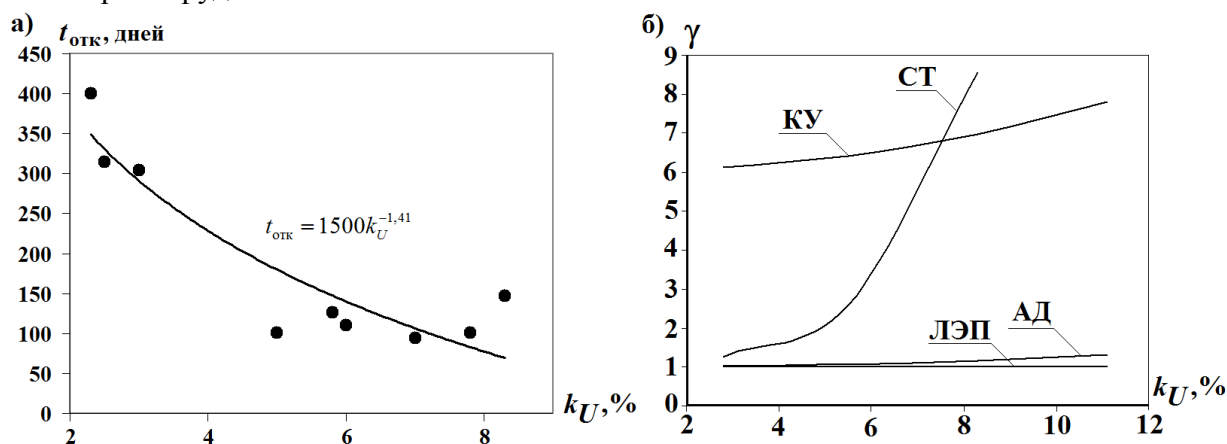


Рисунок 1 – а) Зависимость наработки на отказ ($t_{отк}$) ПЭД установок НПП от коэффициента k_U , б) Зависимости кратности снижения срока службы основного электрооборудования (γ) от k_U

Таким образом, представленные обобщенные закономерности могут служить основой для выявления необходимой степени коррекции k_U тем или иным техническим средством или решени-

ем, включая ФКУ с АП, по критерию обеспечения требуемой продолжительности срока службы изоляции и наработки на отказ электрооборудования.

По результатам экспериментальных исследований выявлено, что при превышении $k_U < 5\%$ существенно (на 20÷35%) сокращается срок службы СТ 10/0,4 кВ. Поэтому для сетей НДП целесообразно ограничить коэффициент k_U на уровне 5%. Для нефтепромысловых сетей критическим является уровень $k_U = 2,5\%$ на ступени 0,4 кВ. Большие искажения начинают существенно сокращать срок службы электрооборудования НПП, в первую очередь электропогружные установки (ЭПУ) и КУ.

Помимо этого необходимо рассматривать влияние несинусоидальных режимов на тепловые процессы в ЭМ. Согласно результатам исследований наличие высокочастотных ВГС в роторе АД, которые наводятся пространственными ВГС воздушного зазора, обуславливает до 25 % от суммарных потерь в стали АД, работающий при скольжении 0,033.

Несинусоидальные режимы также оказывают влияние на уровень вибрации электродвигателей электромеханических комплексов.

Провалы, отклонения и несимметрия питающего напряжения могут оказывать непосредственное влияние на устойчивость ЭТК. Известны результаты исследований, в которых анализируется влияние несимметрии питающего напряжения на устойчивость СД серии СТД.

Таким образом, основными факторами, определяющими требуемую степень коррекции ПКЭ ЭТК с АП и ФКУ, являются:

- кратность снижения срока службы;
- наработка на отказ основного электрооборудования;
- статическая и динамическая устойчивость ЭМК с АД и СД;
- потери энергии в ЭМК с АД и СД;
- вибрация в ЭМК с АД и СД.

Разработан метод исследования ФКУ с АП, обладающими различными топологиями и системами управления, в условиях вариации параметров и характеристик систем электроснабжения, подключенной нагрузки, самих АП, позволяющий оценить уровень эффективности повышения качества электрической энергии при заданных факторах.

Разработанный метод заключается в исследовании ФКУ с АП параллельного и последовательного типа, которые оснащены различными системами управления, при вариации внешних и внутренних факторов для оценки уровня эффективности повышения КЭ. Предлагаемый метод состоит из следующих этапов.

На первом этапе рассматриваются пять основных случаев формирования несинусоидальных режимов: синусоидальный источник, питающий ЛН; несинусоидальный источник, питающий линейную нагрузку (ЛН); несинусоидальный источник, питающий ЛН; синусоидальный источник, питающий узел с ЛН и ЛН; несинусоидальный источник, питающий узел с ЛН и ЛН.

Для всех представленных случаев получены соотношения, устанавливающие взаимосвязь суммарного коэффициента мощности и показателей качества электрической энергии. Последний из указанных случаев является наиболее общим и распространенным и должен рассматриваться в качестве основного условия, при котором необходимо исследовать и оценивать ФКУ с АП.

Для данного случая выявлена аналитическая взаимосвязь суммарного коэффициента мощности k_M :

$$k_M = k_{M1} k_{S1} k_{pBGC} \quad (1)$$

с его составляющими, включающими коэффициент мощности основной составляющей $k_{M1} = P_1/S_1$, коэффициент, характеризующий степень завышения полной мощности трансформаторного и сетевого оборудования $k_{S1} = S_1/S$, коэффициент, отражающий наличие неактивных составляющих полной мощности из-за присутствия гармонических искажений $k_{pBGC} = (1 + P_{BGC}/P_1)$.

На втором этапе выбраны основные характерные системы управления последовательными и параллельными АП. Выбор осуществлен по результатам комплексного анализа множества существующих систем управления АП. Данные системы хорошо известны и апробированы, однако, отсутствуют результаты сравнительного анализа эффективности их работы в части повышения КЭ в условиях вариации параметров питающей сети и подключенной нагрузки.

Для параллельных АП (параллельных активных фильтров (ПАФ)) это следующие системы управления: система управления (СУ) на основе $p-q$ теории мгновенной мощности с регулятором напряжения накопительного конденсатора (СУ №1); СУ на основе фазовых преобразований в системе координат $\alpha\beta$ токов и напряжений (СУ №2); СУ на основе непосредственного выявления составляющих тока и напряжения без каких-либо фазовых преобразований на основе теории Fryze (СУ №3); СУ на основе фазовых преобразований в системе координат dq (Система управления №4); СУ на основе $p-q$ теории мгновенной мощности без регулятора напряжения накопительного конденсатора (СУ №5).

Для последовательных АП (последовательных активных фильтров (ПСАФ)) это система управления на основе преобразований Фортескью.

На третьем этапе определены показатели, по которым оценивается эффективность работы АП. В соответствии с разработанным методом это следующие показатели: степень снижения суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения; степень снижения суммарного коэффициента гармонических составляющих тока; степень снижения коэффициента несимметрии напряжения по обратной последовательности; степень снижения коэффициента несимметрии напряжения по нулевой последовательности; степень снижения величины отклонения напряжения; степень снижения величины потребляемого нагрузкой тока.

Согласно разработанному методу выбор той или иной степени эффективности по указанным показателям осуществляется согласно следующим критериям: соблюдение требований ГОСТ 32144-2013; минимизация кратности снижения срока службы электрооборудования; минимизация потерь энергии в электроустановках из-за наличия искажений; обеспечение устойчивой работы электрооборудования.

На четвертом этапе выявлены внешние и внутренние факторы, оказывающие непосредственное влияние на показатели эффективности функционирования АП. В соответствии с разработанным методом в качестве внешних факторов рассматриваются параметры и характеристики питающей сети и подключенной нагрузки, а в качестве внутренних – параметры самих АП.

Согласно разработанному методу в качестве внешних факторов рассматриваются следующие показатели, характеризующие параметры и характеристики питающей сети и подключенной нагрузки: отношение текущего значения сопротивления питающей сети Z_c к базисному значению Z_0 , связанному с мощностью короткого замыкания: $k_c = Z_c/Z_0$; отношение активной мощности НН $P_{НН1}$ к суммарной активной мощности узла нагрузки $P_{НН1} + P_{ЛН1}$ на частоте основной составляющей: $\beta = P_{НН1}/(P_{НН1} + P_{ЛН1})$.

Диапазоны вариации указанных параметров приняты по результатам анализа теоретических и экспериментальных данных о реальных СЭС НПП.

Согласно разработанному методу в качестве внутренних факторов рассматриваются следующие показатели, характеризующие параметры и характеристики АП: емкость накопительного конденсатора; заданный уровень напряжения накопительного конденсатора; индуктивность выходных дросселей; установленная мощность вольтодобавочного или выходного трансформатора. Существующие методики выбора и расчета этих параметров разработаны с учетом специфики конкретных условий применения АП. Однако отсутствует оценка возможного влияния системы управления на эффективность работы преобразователей с заданными параметрами.

На пятом этапе осуществляется имитационное моделирование ПАФ и ПСАФ с выделенными системами управления при вариации внешних и внутренних факторов. По результатам моделирования в соответствии с разработанным методом выявлены следующие закономерности:

- ни одна из исследованных СУ не позволяет АП параллельного типа эффективно осуществлять коррекцию уровня высших гармоник и несимметрии напряжения при вариации внешних и внутренних факторов;

- максимальной эффективностью коррекции несимметрии, неактивных составляющих и гармоник тока (до 100%) при вариации внешних и внутренних факторов обладает СУ на основе dq преобразований (СУ №4);

- максимальной эффективностью коррекции отклонений напряжения АП параллельного типа при вариации величины внутреннего сопротивления питающей сети (от 5 до 10 %) обладает СУ на основе $p-q$ теории мгновенной мощности без регулятора напряжения накопительного конденсатора (СУ №5);

- в области малых значений внутреннего сопротивления питающей сети (централизованные энергосистемы) достаточный уровень эффективности коррекции высших гармоник тока (без ухудшения качества) демонстрируют СУ на основе dq преобразований (СУ №4), $\alpha\beta$ преобразований (СУ №2) и непосредственного определения составляющих тока и напряжения (СУ №3);

- в области малых значений внутреннего сопротивления питающей сети (централизованные энергосистемы) все указанные СУ способны эффективно (без ухудшения качества) компенсировать несимметрию и отклонения напряжения, несимметрию токов нагрузки, за исключением непосредственного определения составляющих тока и напряжения (СУ №3);

- в условиях вариации соотношения мощностей ЛН и НН в точке общего присоединения максимальную эффективность коррекции гармоник тока (до 90 %) демонстрирует СУ на основе dq преобразований (СУ №4) и непосредственного выявления составляющих тока и напряжения (СУ №3);

- в области больших значений внутреннего сопротивления питающей сети (распределенная генерация, сопротивление в 6-10 раз больше исходного значения) эффективность коррекции гармоник, несимметрии и неактивных составляющих тока на уровне требований нормативных документов сохраняет СУ на основе dq преобразований (СУ №4);

- изменение емкости накопительных конденсаторов АП параллельного типа не оказывает существенного влияния на показатели эффективности повышения КЭ для СУ на основе $\alpha\beta$ преобразований (СУ №2), $p-q$ теории без регулятора напряжения накопительных конденсаторов (СУ №5) и непосредственного определения составляющих тока и напряжения (СУ №3), при этом значения показателей эффективности коррекции ПКЭ для указанных СУ имеют разброс изменения в пределах 10-20 %, при этом для СУ на основе $p-q$ теории с регулятором напряжения накопительных конденсаторов (СУ №1) и СУ на основе dq преобразований (СУ №4) такой разброс для некоторых значений емкости достигает 100-150 %;

- увеличение индуктивности выходных дросселей параллельного АП позволяет повысить эффективность коррекции гармоник напряжения для всех СУ, при этом для СУ на основе $\alpha\beta$ преобразований (СУ №4) значительное увеличение индуктивности выходных дросселей (в 2 и более раза) ведет к резкому ухудшению КЭ в части несимметрии тока и напряжения, компенсации неактивных составляющих тока, а также отклонений напряжения;

- изменение задания по величине напряжения накопительных конденсаторов параллельного АП негативно влияет на показатели эффективности повышения КЭ только для СУ на основе dq преобразований (СУ №4);

- в условиях вариации внутреннего сопротивления питающей сети АП последовательного типа сохраняет достаточный уровень повышения КЭ (без ухудшения качества) в части несинусоидальности кривых тока и напряжения, отклонений напряжения, несимметрии тока и напряжения;

- с ростом внутреннего сопротивления питающей сети АП последовательного типа увеличивает потребляемый НН ток (на 40 % и более), создавая дополнительную нагрузку для питающих линий, что является недопустимым явлением для систем распределенной генерации;

- АП последовательного типа способен осуществлять коррекцию суммарного коэффициента гармоник тока за счет увеличения значения его основной составляющей (на 40 % и более);

- АП последовательного типа не способен осуществлять эффективную коррекцию несимметрии потребляемого тока во всем диапазоне вариации величины внутреннего сопротивления питающей сети;

- уменьшение заданной величины напряжения накопительного конденсатора и мощности выходного трансформатора ниже номинального значения (менее 80 % от исходной величины) снижает эффективность повышения КЭ АП последовательного типа (более чем в 2 раза) в части отклонений, несинусоидальности, несимметрии напряжения, несинусоидальности тока;

- увеличение заданной величины напряжения накопительного конденсатора и мощности выходного трансформатора выше номинального значения на 20-60% снижает эффективность повышения КЭ АП последовательного типа (более чем в 2 раза) в части несимметрии тока, а также ведет к повышению потребляемого НН тока (на 5 % и более);

- при вариации величины напряжения накопительного конденсатора и мощности выходного трансформатора в диапазоне 0,8 - 1,8 от исходного номинального значения показатели эффективности повышения КЭ АП последовательного типа в части отклонений, несинусоидальности, несимметрии напряжения, а также несинусоидальности тока остаются практически без изменений.

Таким образом, АП последовательного и параллельного типа в чистом виде без каких-либо ФКУ не способны в условиях вариации внешних и внутренних факторов сохранять эффективность работы по одновременной коррекции нескольких ПКЭ. При этом также выявлены ограничения, которыми обладают наиболее характерные СУ АП в части вариации внешних и внутренних параметров.

Применение разработанного метода позволяет произвести исследование и оценку эффективности работы АП в составе ФКУ в условиях вариации внешних и внутренних факторов. Результаты применения разработанного метода должны учитываться при развитии теории структурного и параметрического синтеза ФКУ с АП. По результатам применения данного метода разработан алгоритм автоматизированного повышения КЭ одиночным АП (см. рисунок 2).

В главе 3 разработаны структуры и математические модели ФКУ с АП для автоматизированного повышения КЭ. Приведена классификация структур ФКУ с АП, определены их достоинства и недостатки. Выявлены основные режимы функционирования наиболее распространенных структур ФКУ с АП. Определены допустимые уровни снижения массогабаритных показателей АП в составе ФКУ с сохранением заданной степени повышения КЭ. Разработан модифицированный алгоритм управления ФКУ с АП для автоматизированного повышения КЭ в условиях вариации внешних и внутренних факторов.

Математическое описание и модели ФКУ с АП выполнены для различных структур ФКУ, которые отличаются следующими ключевыми факторами: способом соединения активной и пассивной части между собой в составе ФКУ, способом подключения ФКУ к сети, типом и режимом работы АП в составе ФКУ, типом пассивного фильтра (ПФ) на выходе АП. В основе моделирования ФКУ с АП лежит общепризнанный и хорошо известный метод разделения электрических схем АП на подсхемы, или метод исследования сложных систем по частям, разработанный Г. Кроном.

Наиболее распространенные структуры ФКУ с АП приведены на рисунках 3-4. На рисунке 3а приведена структура ФКУ, состоящего из параллельного соединения двух ПФ и ПСАФ, функционирующего в режиме управляемого источника напряжения, который подключен параллельно компенсируемой НН.

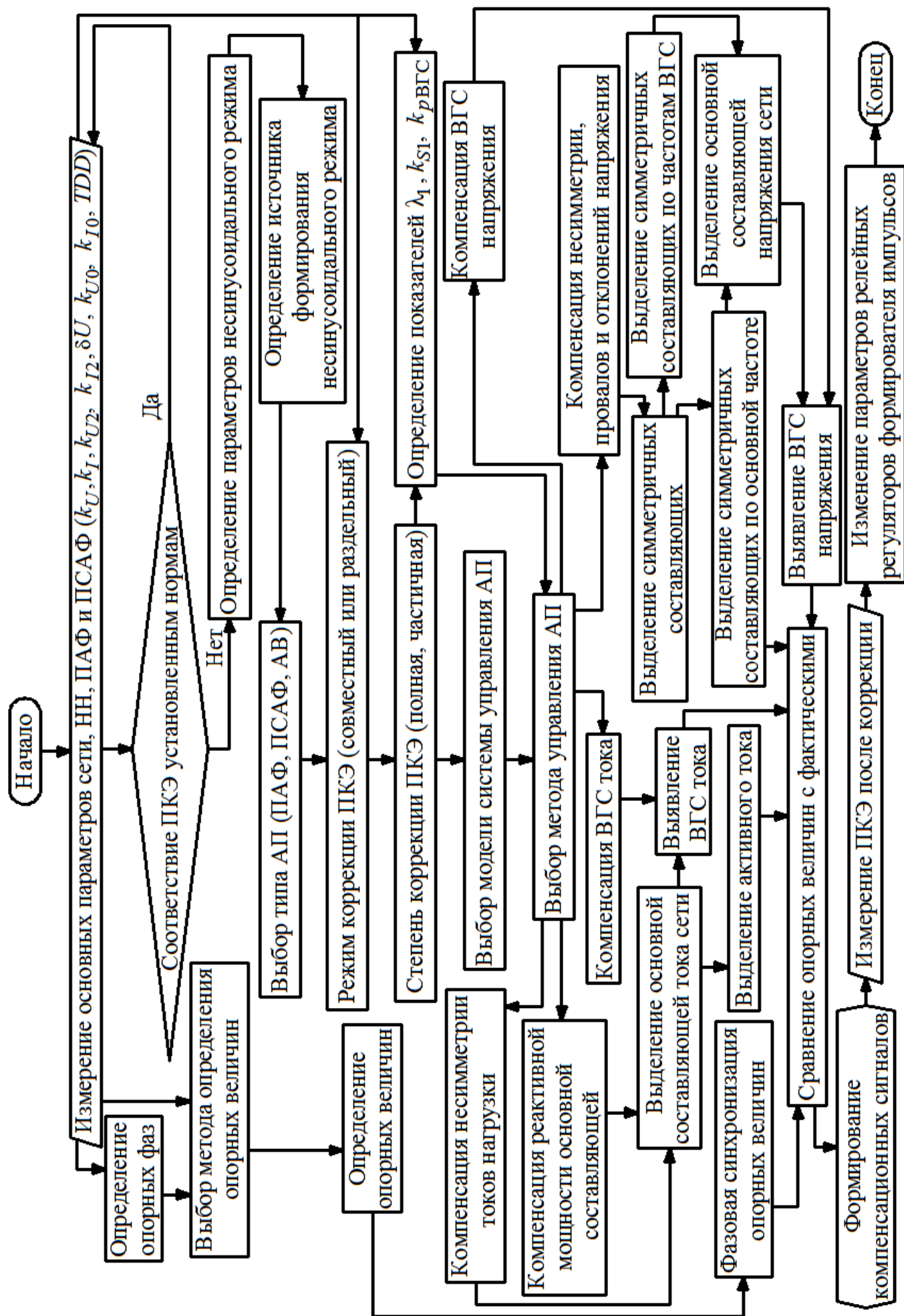


Рисунок 2 - Алгоритм автоматизированного повышения КЭ одиночным АП

Данное ФКУ описывается следующими выражениями:

$$\begin{aligned} u_k + u_{\text{ПФ}} &= u_c; \quad u_{\text{ПФ}} = u_{\text{НН}}; \quad u_k = k_T u_{C\Phi} = 2k_{\text{ПРi}} u_{dc} - \Delta u_{L\Phi}; \quad u_{\text{ПФ}} = L_{\text{ПФ}} \frac{di_k}{dt} + u_{\text{СПФ}}; \\ \Delta u_{L\Phi} &= L_{\Phi} \frac{di_{\Phi}}{dt}; \quad i_c = i_{\text{НН}} + i_k; \quad i_k = i_{k5} + i_{k7}; \quad i_{k5} = C_5 \frac{du_{C5}}{dt}; \quad i_{k7} = C_7 \frac{du_{C7}}{dt}. \end{aligned} \quad (2)$$

где: u_k – напряжение компенсации ПСАФ, $u_{\text{ПФ}}$ – напряжение ПФ, $u_{\text{НН}}$ – напряжение НН, k_T – коэффициент трансформации согласующего трансформатора; $u_{C\Phi}$ – напряжение конденсатора выходного ПФ; $k_{\text{ПРi}}$ – функция состояния силовых ключей АП; u_{dc} – напряжение накопительных конденсаторов ПСАФ; $\Delta u_{L\Phi}$ – потеря напряжения на выходных дросселях ПСАФ; $L_{\text{ПФ}}$ – индуктивность ПФ (L_5, L_7), i_k – выходной компенсационный ток ФКУ; $u_{\text{СПФ}}$ – напряжение конденсатора ПФ; L_{Φ} – индуктивность выходных дросселей ПСАФ; i_{Φ} – ток выходных дросселей; i_c – ток сети; $i_{\text{НН}}$ – ток НН; i_{k5}, i_{k7} – токи ПФ 5 и 7 ВГС соответственно; C_5, C_7 – емкости ПФ 5 и 7 ВГС соответственно; u_{C5}, u_{C7} – напряжение емкости ПФ 5 и 7 ВГС соответственно.

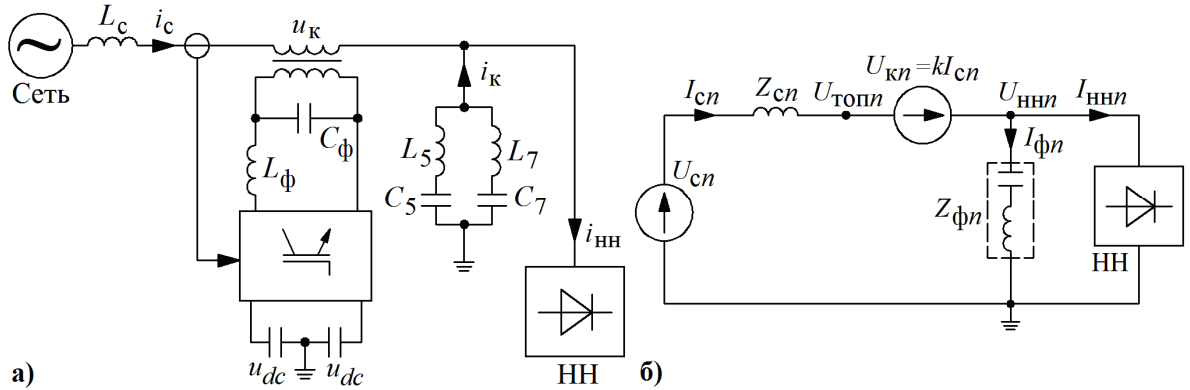


Рисунок 3 – а) Структура ФКУ на основе параллельного соединения ПСАФ и ПФ, подключенного параллельно компенсируемой НН, б) Схема замещения на частоте n -ой ВГС

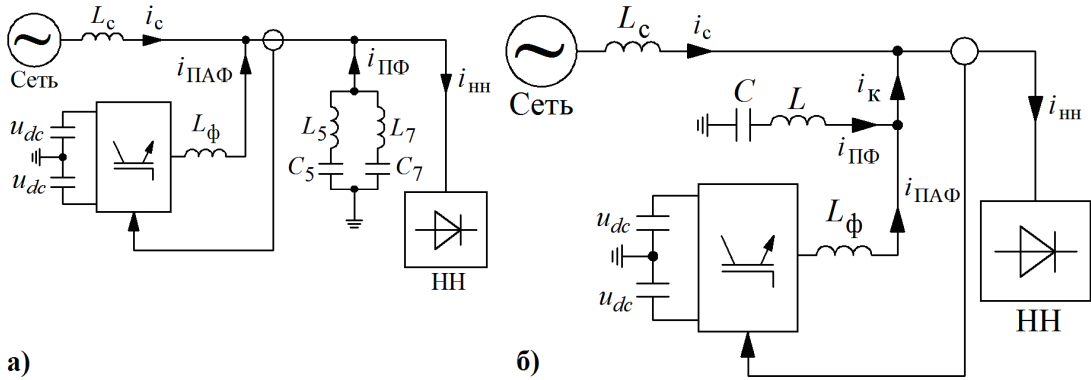


Рисунок 4 – а) Структура ФКУ на основе параллельного соединения ПАФ и ПФ, подключенного параллельно компенсируемой НН, б) Структура ФКУ на основе ПАФ с выходным ПФ, подключенного параллельно компенсируемой НН

На рисунке 3б показана эквивалентная схема замещения данной гибридной структуры на частоте n -ой ВГС, при этом гармоническое напряжение ТОП может быть определено следующим образом:

$$U_{\text{топн}} = \frac{k}{(Z_{cn} + k)} U_{cn} + \frac{Z_{cn}}{(Z_{cn} + k)} U_{\text{ннн}}. \quad (3)$$

При условии $k \gg Z_c$ данная гибридная структура изолирует ТОП от ВГС напряжения со стороны НН.

На рисунке 4а приведена структура ФКУ, аналогичная рисунку 3а, за исключением применения ПАФ вместо ПСАФ. Данное ФКУ описывается следующими соотношениями:

$$i_c = i_{\text{ПАФ}} + i_{\text{ПФ}} + i_{\text{НН}}; \quad u_{\text{НН}} = u_c = u_{\text{ПФ}}; \quad u_{\text{ПАФ}} + \Delta u_{L\Phi} = u_{\text{НН}}; \\ \Delta u_{L\Phi} = L_{\Phi} \frac{di_{\text{ПАФ}}}{dt}; \quad u_{\text{ПАФ}} = 2k_{\text{ПРi}} u_{dc}; \quad i_{\text{ПФ}} = C_5 \frac{du_{C5}}{dt} + C_7 \frac{du_{C7}}{dt}. \quad (4)$$

На рисунке 4б приведена структура ФКУ, на основе ПАФ с выходным ПФ. Данное ФКУ описывается следующими соотношениями:

$$i_c = i_{\text{ПАФ}} + i_{\text{ПФ}} + i_{\text{НН}}; \quad u_{\text{НН}} = u_c = u_{\text{ПФ}}; \quad u_{\text{ПАФ}} + \Delta u_{L\Phi} = u_{\text{НН}}; \\ \Delta u_{L\Phi} = L_{\Phi} \frac{di_{\text{ПАФ}}}{dt}; \quad u_{\text{ПАФ}} = 2k_{\text{ПРi}} u_{dc}; \quad i_{\text{ПФ}} = C \frac{du_c}{dt}. \quad (5)$$

Таким образом, все ФКУ с АП основаны на ПАФ и ПСАФ, функционирующих соответственно в качестве управляемых источников тока и напряжения заданной величины и гармонического состава. При комбинировании структур на рисунках 4а и б, образуется ФКУ, приведенное на рисунке 5.

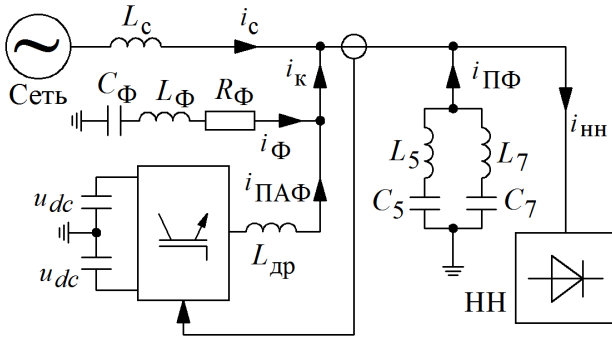


Рисунок 5 – Структура ФКУ

Результаты теоретических и экспериментальных исследований показали, что на выходе ПАФ, работающих в режиме управляемого источника компенсационного тока, необходимо устанавливать RC фильтры для подавления высокочастотных составляющих в спектре выходного тока ПАФ. Таким образом, представляется целесообразным провести комплексный анализ эффективности ФКУ, состоящего из ПАФ, на выходе которого подключен RC фильтр, и ПФ, настроенных на подавление канонических ВГС. Компенсационные параметры определяются следующим образом:

$$\frac{di_{kn}}{dt} = \frac{di_n}{dt} - \frac{di_{\Phi n}}{dt}, \quad i_{kn} = i_n - i_{\Phi n}, \quad \frac{di_n}{dt} = \frac{u_n - R_{\text{др}} i_n - u_{kn}}{L_{\text{др}}}, \\ u_{kn} = R_{\Phi n} i_{\Phi n} + u_{\Phi cn}, \quad i_{\Phi n} = C_{\Phi n} \frac{du_{\Phi cn}}{dt}, \quad i_{\text{НН}} - i_c = i_k + i_{\text{ПФ}}, \quad (6)$$

где: u_k и i_k – компенсационное напряжение и ток на выходе АИН с фильтрацией выходного напряжения, который выполняет функцию ПАФ в составе ФКУ.

В зависимости от структуры, параметров и режима работы компенсируемой сети конфигурация ПФ на выходе ПАФ может быть различной для повышения эффективности коррекции ПКЭ. При наличии выходного RLC фильтра уравнения (6) примут следующий вид:

$$\frac{di_{kn}}{dt} = \frac{di_n}{dt} - \frac{di_{\Phi n}}{dt}, \quad i_{kn} = i_n - i_{\Phi n}, \quad \frac{di_n}{dt} = \frac{u_n - R_{\text{др}} i_n - u_{kn}}{L_{\text{др}}}, \\ u_{kn} = R_{\Phi n} i_{\Phi n} + u_{\Phi cn} + L_{\Phi n} \frac{di_{\Phi n}}{dt}, \quad i_{\Phi n} = C_{\Phi n} \frac{du_{\Phi cn}}{dt}, \quad i_{\text{НН}} - i_c = i_k + i_{\text{ПФ}}. \quad (7)$$

При наличии RL фильтра выражения (6) примут следующий вид:

$$\frac{di_{kn}}{dt} = \frac{di_n}{dt} - \frac{di_{\Phi n}}{dt}, \quad i_{kn} = i_n - i_{\Phi n}, \quad \frac{di_n}{dt} = \frac{u_n - R_{\text{др}} i_n - u_{kn}}{L_{\text{др}}}, \\ u_{kn} = R_{\Phi n} i_{\Phi n} + L_{\Phi n} \frac{di_{\Phi n}}{dt}, \quad i_{\text{НН}} - i_c = i_k + i_{\text{ПФ}}. \quad (8)$$

При наличии LC фильтра выражения (6) примут следующий вид:

$$\begin{aligned} \frac{di_{\kappa n}}{dt} &= \frac{di_n}{dt} - \frac{di_{\phi n}}{dt}, \quad i_{\kappa n} = i_n - i_{\phi n}, \quad \frac{di_n}{dt} = \frac{u_n - R_{\text{др}} i_n - u_{\kappa n}}{L_{\text{др}}}, \\ u_{\kappa n} &= u_{\phi cn} + L_{\phi n} \frac{di_{\phi n}}{dt}, \quad i_{\phi n} = C_{\phi n} \frac{du_{\phi cn}}{dt}, \quad i_{\text{нн}} - i_{\text{с}} = i_{\kappa} + i_{\text{пф}}. \end{aligned} \quad (9)$$

Для более сложных структур ПФ на выходе ПАФ могут быть составлены аналогичные уравнения, также, как и для ПФ на выходе ПСАФ.

Таким образом, выражения (6)-(9) с учетом более сложных конфигураций ПФ на выходе ПАФ являются совокупностью математических моделей ФКУ с АП, функционирующего в режиме управляемого источника тока для компенсации ВГС тока НН и коррекции коэффициента мощности. Такое ФКУ реализовано на основе параллельного соединения ПФ, настроенных на подавление канонических ВГС НН, и АП, на выходе которого установлен ПФ определенной конфигурации. Аналогичный принцип синтеза структуры и уравнений справедлив и для ФКУ на основе ПСАФ с выходным ПФ.

Приведенное математическое описание является основой для компьютерного имитационного моделирования ФКУ с АП последовательного и параллельного типа (ПСАФ и ПАФ). По результатам моделирования выявлены следующие зависимости уровня эффективности коррекции ПКЭ от вариации конфигурации ПФ на выходе АП, способа соединения компонентов активной и пассивной части, режима работы силовых ключей АП, способа подключения к компенсируемой сети и диапазонов вариации параметров активной части:

- наличие ПФ на выходе ПАФ позволяет повысить эффективность последнего при повышении КЭ более чем в 2 раза в части снижения ВГС напряжения в условиях централизованного и автономного электроснабжения;
- выявлен диапазон, в котором должна находиться величина полного сопротивления ПФ на выходе ПАФ, для сохранения заданного уровня эффективности повышения КЭ;
- определены конфигурации ПФ на выходе ПАФ, обеспечивающие максимальный уровень эффективности повышения КЭ по отдельным ПКЭ;
- выявлены диапазоны вариации параметров ПАФ и ПСАФ в составе ФКУ, позволяющие сохранить заданный уровень эффективности повышения КЭ;
- структуры ФКУ на основе ПФ, настроенных на подавление канонических ВГС, ПАФ и ПСАФ с выходными ПФ, должны быть переменными исходя из совокупности корректируемых ПКЭ, заданных уровней остаточных значений ПКЭ и режима электроснабжения (централизованный, автономный, комбинированный).

На основании результатов моделирования разработан модифицированный алгоритм управления ФКУ с АП (см. рисунок 6), предусматривающий выбор оптимальной конфигурации ФКУ и способа его управления исходя из требуемой степени коррекции ПКЭ и заданного уровня снижения параметров активной части.

В главе 4 приведены методы и средства интеграции ФКУ с АП в системы комбинированного электроснабжения и автоматизированные системы управления электроснабжением. Разработаны структуры систем распределенной генерации и комбинированного электроснабжения при наличии ФКУ с АП. Создан алгоритм работы ФКУ с АП для централизованных, распределенных и комбинированных СЭС с реализацией заданного набора функций. Разработаны структуры и алгоритмы работы автоматизированных систем контроля и мониторинга энергоснабжения, энергообеспечения и КЭ в условиях комбинированных СЭС, где ФКУ с АП являются основным звеном при формировании информационно-управляющих воздействий.

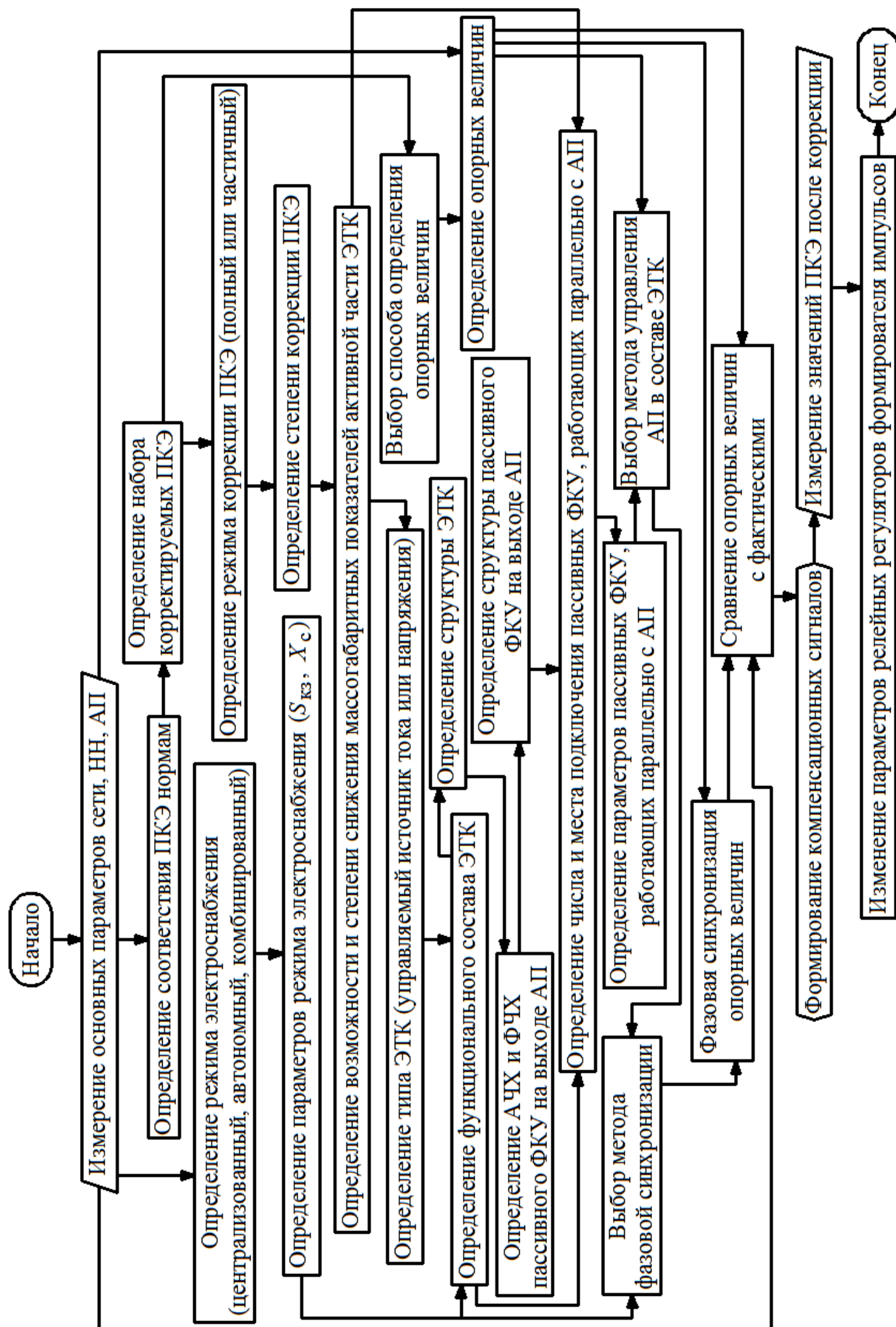


Рисунок 6 - Модифицированный алгоритм управления ФКУ с АП для автоматизированного повышения КЭ

В комбинированных системах электроснабжения (СЭС), функционирующих на основе параллельной работы централизованной энергосистемы (ЦЭС) и распределенной генерации (РГ), в аварийных режимах при переходе режима электроснабжения с одного источника на другой, сопровождающегося изменением внутреннего сопротивления сети и отключением части ответственной преобразовательной НН, необходима оперативная корректировка следующих ключевых данных и параметров:

- карты уставок срабатывания релейной защиты;
- значения токов КЗ в узловых точках;
- параметры КЭ в узловых точках;
- режимы работы подключенных активных и пассивных ФКУ при изменении количества и мощности работающих источников.

Последний из указанных факторов оказывает непосредственное влияние на выбор и обоснование структуры, основных параметров и режимов работы ФКУ с АП в комбинированных СЭС. В ряде научных исследований обоснована возможность использования АП в качестве устройства сопряжения РГ и ЦЭС. При этом не учитывается возможность параллельной работы нескольких разнотипных автономных источников в более общем случае, а рассматривается только взаимодействие одного локального источника с ЦЭС. В условиях комбинированных СЭС представляется эффективным и целесообразным рассматривать ФКУ с АП в первую очередь в качестве основного элемента обеспечения ЭМС электрооборудования при изменении режимов электроснабжения.

В рамках разработанной методологии при интеграции ФКУ с АП в комбинированные СЭС учитываются следующие основные факторы: изменение величины внутреннего сопротивления питающей сети (мощности КЗ); изменение мощности подключенной преобразовательной НН, связанной с отключением части ответственной нагрузки при переходе электроснабжения с ЦЭС на РГ; необходимость обеспечения бесперебойного режима электроснабжения наиболее ответственной нагрузки на период действия систем ввода резерва при переходе режима электроснабжения.

На рисунке 7 приведена структура ЭТК комбинированной СЭС, где АП и ФКУ выполняют функции синхронизации параллельной работы нескольких источников РГ, коррекции ПКЭ и источника бесперебойного питания (ИБП) для безаварийного отключения наиболее ответственных технологических потребителей при отказе всех источников электроснабжения.

Система РГ состоит из нескольких источников ($G_1 \dots G_k$), каждый из них содержит АП (AD-DC и DC-AC) с системой управления, где содержится блок фазовой синхронизации (ФС1...ФС k) на основе принципа фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ). При комбинированном режиме электроснабжения фазовая синхронизация осуществляется относительно опорных величин со стороны ЦЭС. В режиме электроснабжения от РГ при синхронизации параметры какого-либо источника ($G_1 \dots G_k$) принимаются за опорные.

Блоки ФС1...ФС k осуществляют обмен измерительной информацией и фазовую синхронизацию относительно опорных величин. ЦЭС и РГ соединяются на общей шине, от которой получают питание ответственные потребители, при этом последние могут секционироваться (QF12) в зависимости от степени их ответственности в непрерывности и устойчивости технологического процесса и исходя из количества источников РГ, режима работы ЦЭС и количества накопленной электроэнергии. Коррекция ПКЭ осуществляется АП в виде ПАФ с выходным ПФ (ВПФ) и отдельно подключаемыми пассивными ФКУ (ПФ1...ПФ n), при этом ПАФ и ФКУ подключены к отдельным шинам. Также в рамках данного ЭТК имеется возможность перевода ПАФ в режим ПСАФ за счет подключения ВДТ (QF15-16). ВПФ подключается в случае питания потребителей от РГ, когда внутреннее сопротивление питающей сети возрастает.

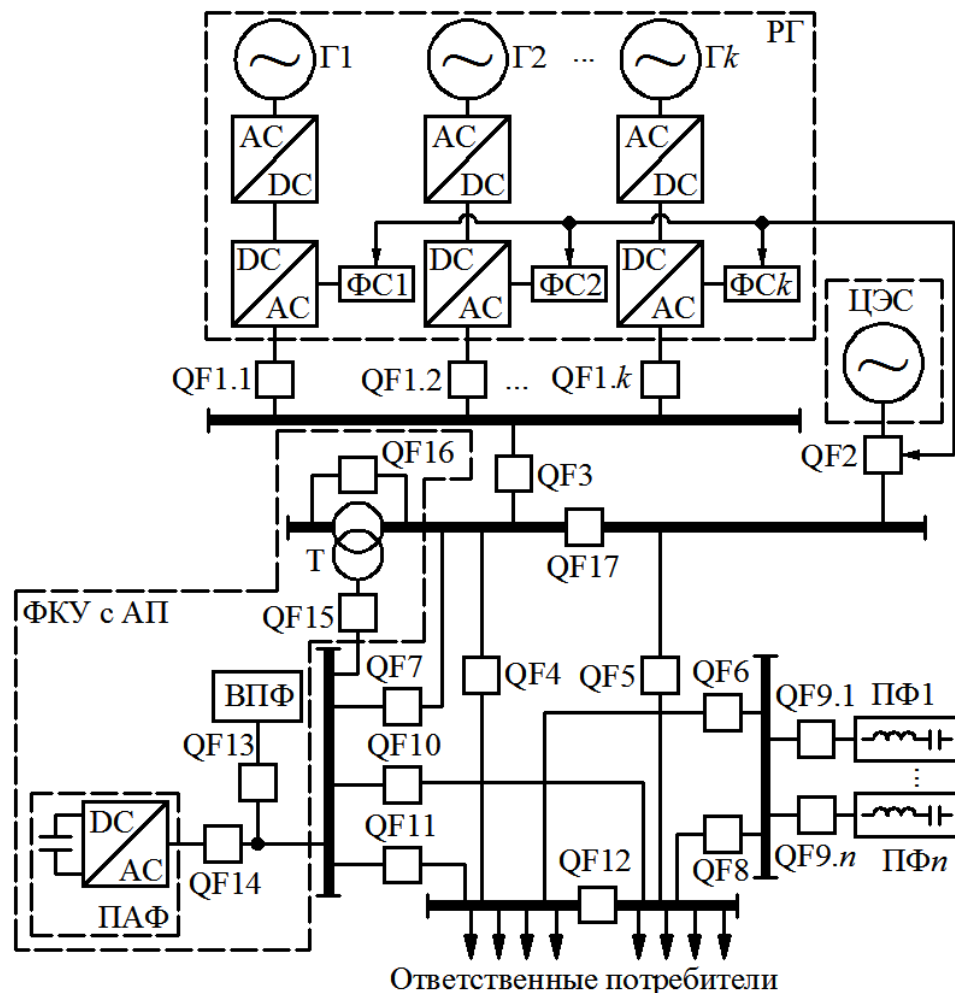


Рисунок 7 – Структура комбинированной СЭС с ФКУ и АП

В аварийных режимах при отказе всех источников энергии накопительного конденсатора ПАФ тратится на безаварийное отключение наиболее ответственных технологических потребителей при их наличии, при этом ПАФ переводится в режим ИБП.

Таким образом, в рамках структуры, приведенной на рисунке 7, ФКУ с АП выполняют следующие функции:

- коррекция ПКЭ при различных режимах электроснабжения;
- синхронизация параллельной работы ЦЭС и РГ;
- накопление электроэнергии;
- реализация функции ИБП для безаварийного отключения наиболее ответственных потребителей.

Также необходимо рассматривать возможность непосредственного использования ЭТК РГ в качестве средства повышения КЭ. При таком подходе необходимо учитывать следующие основные факторы: тип и располагаемая мощность источника РГ, характер подключенной нагрузки, ПКЭ со стороны источника и нагрузки. На рисунке 8а приведена подобная структура на примере двух источников, на рисунке 8б – алгоритм синхронизации источников с использованием метода ФАПЧ.

Первый из двух генераторов Г1 является опорным источником, относительно которого осуществляется синхронизация параллельной работы (блок фазовой синхронизации БФС) Г2.

На выходе инверторов Г1 и Г2 устанавливаются ПФ1 и ПФ2, для коррекции ВГС тока и напряжения на выходе источников. В случае наличия ЦЭС фазовая синхронизация осуществляется относительно нее, также, если энергии одного из источников достаточно для электроснабжения ответственных технологических потребителей, ЭТК второго источника, включая инвертор и нако-

питательный конденсатор, может быть использован в режиме ПАФ для дополнительной коррекции ПКЭ, если эффективности ПФЗ, установленного со стороны нагрузки, не достаточно. Также, при незначительном удалении ответственных технологических потребителей от источников, что является ключевой особенностью систем РГ, звено постоянного тока ПАФ и ПЧ от какого-либо потребителя может быть общим.

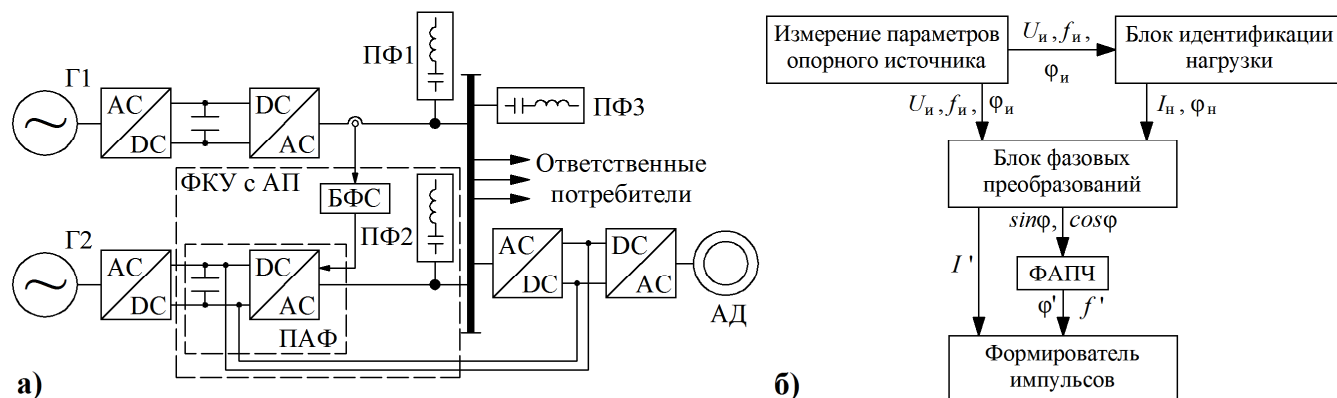


Рисунок 8 – а) ЭТК РГ на примере двух источников с АП и ФКУ, б) Алгоритм синхронизации источников ЭТК РГ

Алгоритм, приведенный на рисунке 8б, может быть использован и в комбинированных СЭС при большем количестве источников.

Результаты исследований показывают эффективность и целесообразность совмещения звена постоянного тока ПЧ и ПАФ с целью снижения массогабаритных показателей последнего и возможности его перевода в режим ИБП. Также данный комплекс по сравнению с существующими аналогами осуществляет фазовую синхронизацию разнотипных источников за счет системы ФАПЧ, которая интегрирована в большинство систем управления АП.

Таким образом, ЭТК, на рисунке 8 реализует следующие функции: гарантированное и бесперебойное электроснабжение ответственных технологических потребителей; фазовую синхронизацию параллельной работы нескольких источников РГ; активную и пассивную коррекцию ПКЭ за счет возможности использования ЭТК одного из источников в качестве ПАФ.

По результатам моделирования установлено, что подобный ЭТК способен осуществлять питание асинхронного двигателя (АД) через общее звено постоянного тока. Питание АД осуществляется через ПАФ, при этом в звене постоянного тока поддерживается заданный уровень напряжения, что обеспечивает устойчивую работу АД. Осциллограммы, полученные по результатам моделирования, показывают возможность предложенного ЭТК с АП и ФКУ функционировать в режиме ИБП при возникновении аварийных режимов в сети. Длительность провала напряжения в звене постоянного тока ПЧ составляет не более 0,25 с, при этом на выходе ПЧ аналогичный провал имеет длительность менее 0,1 с, что является допустимым режимом для погружных АД нефтедобычи согласно результатам исследований с точки зрения возможного нарушения устойчивости их работы.

Для более эффективной реализации функции ИБП необходима дополнительная настройка и совершенствование системы управления ФКУ с АП в части повышения эффективности регулирования напряжения накопительного конденсатора для минимизации величины и длительности провала напряжения на нем при КЗ со стороны питающей сети. Однако для безаварийного завершения ответственных технологических процессов и отключения наиболее ответственных потребителей за минимально возможное время показатели выявленных динамических характеристик ЭТК находятся на приемлемом уровне.

Таким образом, предложенные методы интеграции ФКУ с АП в комбинированные СЭС позволяют в рамках одного устройства с адаптивной структурой реализовать следующие важные

функции по надежному, бесперебойному и качественному электроснабжению ответственных промышленных потребителей: повышение КЭ, синхронизация параллельной работы источников, накопление электроэнергии, бесперебойное питание на время безаварийного завершения технологического процесса.

При интеграции ФКУ с АП в автоматизированные системы управления СЭС необходимо учитывать влияние параметров КЭ и технических средств его повышения на характер явных и скрытых закономерностей, имеющих в СЭС, процесс формирования аналитических решений автоматизированными системами управления (АСУ) СЭС и параметры управления энергообеспечением и энергопотреблением. Также необходимо рассматривать интеграцию ФКУ с АП в АСУ как отдельно, так и в рамках централизованных и распределенных автоматизированных подсистем контроля и повышения КЭ.

Выявлено, что наиболее существенными закономерностями являются: характер режимов энергообеспечения и энергопотребления в зависимости от уровня ВГС в распределительной сети; зависимость режима энергопотребления от величины и характера изменения напряжения в электрической сети; влияние величины и длительности провалов напряжения на эффективную работу потребителей и устойчивость режимов энергообеспечения и энергопотребления; пусковые характеристики электродвигателей у потребителей при различных режимах энергообеспечения; влияние повреждений в энергосистеме на устойчивость режимов энергопотребления и энергообеспечения.

На рисунке 9 приведена структура энергетической системы с РГ и предложенной интеллектуальной системой комплексного мониторинга, которая контролирует три основных процесса: генерация, распределение и потребление.

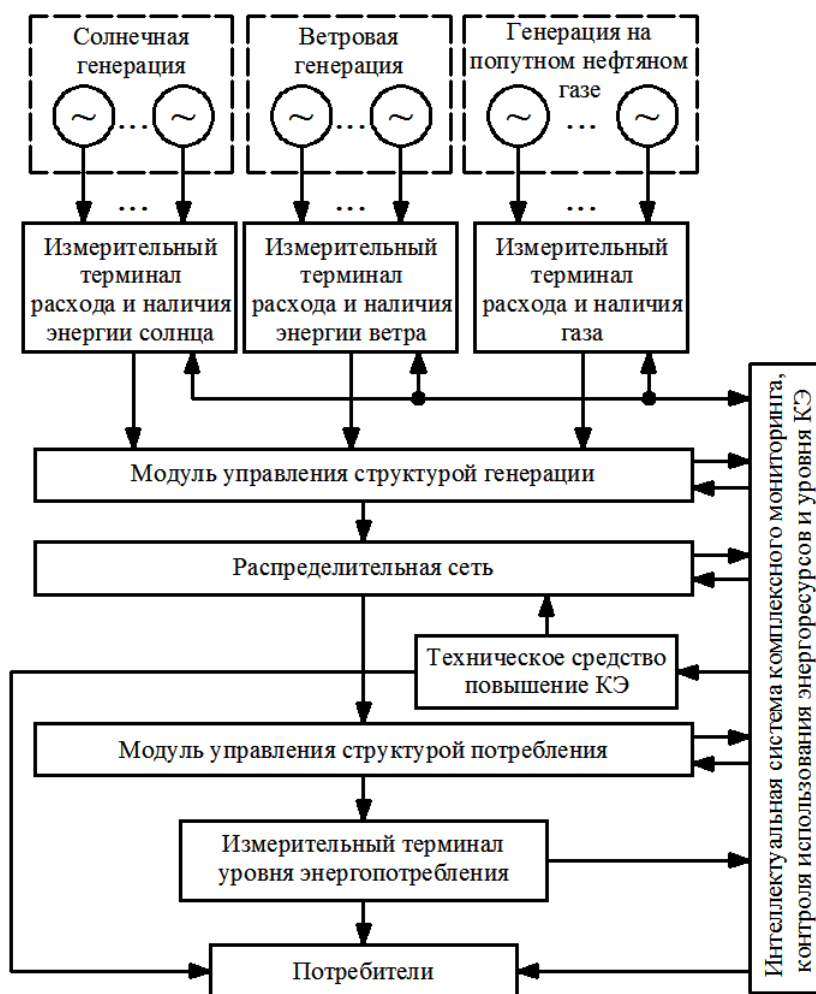


Рисунок 9 – Структура энергетической системы с РГ и предложенной интеллектуальной системой комплексного мониторинга, контроля использования энергоресурсов и уровня КЭ

На всех указанных стадиях необходим сбор и анализ информации о значимых факторах, явных и скрытых закономерностях, их влияния на энергетические процессы, что позволяет в режиме реального времени формировать информационно-управляющие воздействия для отдельных элементов системы РГ исходя из текущих режимов энергопотребления и энергообеспечения. Данная система также выполняет три основных операции: сбор информации о режимах энергопотребления и энергообеспечения, анализ развития ситуации на основании полученной информации с формированием прогнозной модели энергосистемы, и формирование информационно-управляющего воздействия, которое производится на основе современных алгоритмов с использованием теории фазовых преобразований, нечеткой логики, методов прогнозирования.

На рисунке 10 приведена общая структура распределенной системы контроля и повышения КЭ (ПАФ – параллельный активный фильтр, СМ – синхронная машина с тиристорным возбуждением, ВЭУ – ветроэнергетическая установка, ФЭС – фотоэлектрическая станция, МТУ – микро-турбинная установка, работающая на ПНГ, СКРМ – статический компенсатор реактивной мощности, ДКИН – динамический компенсатор искажений напряжения, ЧРП – частотно-регулируемый электропривод, ГСК – гибридная система коррекции ПКЭ на базе ПФ, ПАФ (ПСАФ)).

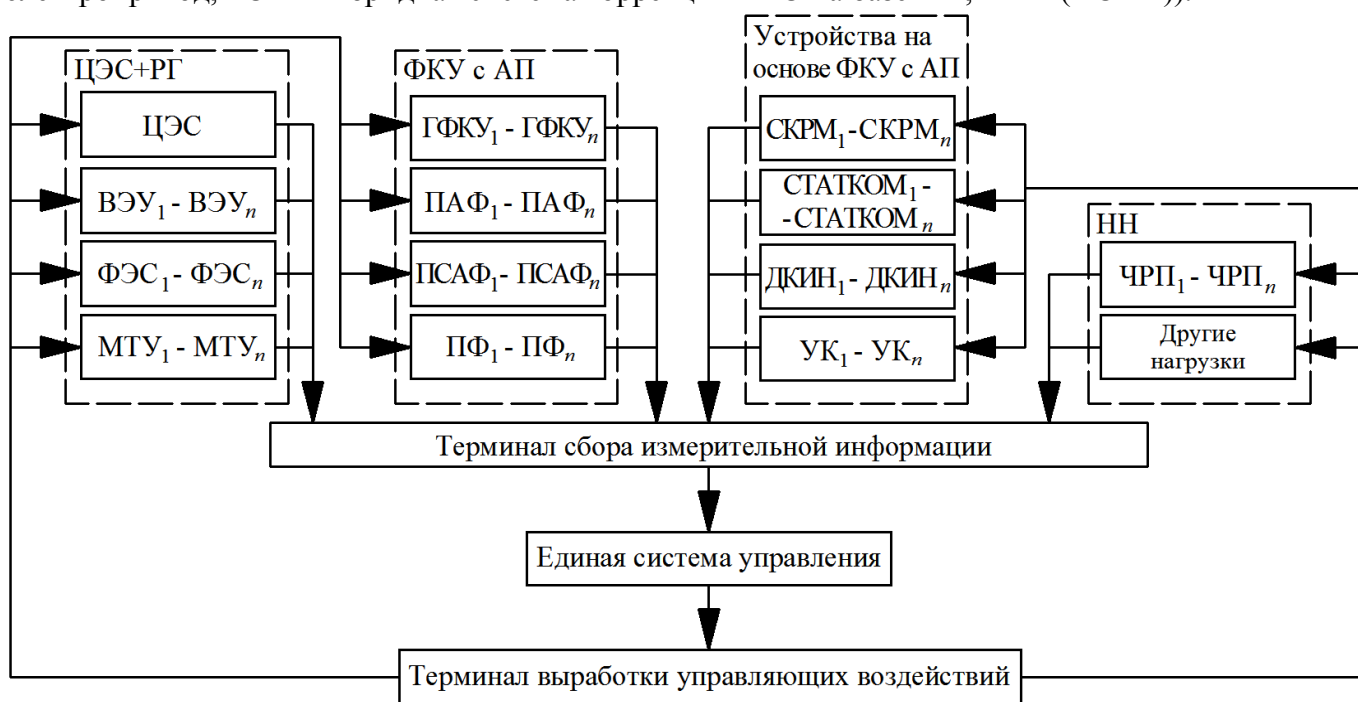


Рисунок 10 - Общая структура распределенной системы контроля и повышения КЭ

Элементы, входящие в структуру, приведенную на рисунке 10, разделяются на следующие классы:

- источники РГ (ВЭУ, ФЭС и МТУ);
- ЭТК коррекции ПКЭ (ПАФ, СТАТКОМ, СКРМ, ДКИН, ГСК);
- регулируемые электроприводы (СМ, ЧРП);
- иные нагрузки.

Первые четыре класса содержат АП с различными алгоритмами управления и ФКУ. Каждый из указанных классов выполняет свою функцию в процессе контроля и повышения КЭ. Устройства из первого класса, являясь источниками РГ, одновременно оказывают непосредственное влияние на уровень КЭ при параллельной работе с ЦЭС. Устройства из второго класса осуществляют коррекцию ПКЭ. Устройства из третьего класса оказывают влияние на уровень КЭ за счет своей структуры и алгоритмов управления. Устройства четвертого класса объединяют в себе все нагрузки, которые нельзя отнести к первым трем классам, но которые также могут влиять на уровень КЭ. При этом в процессе контроля и мониторинга КЭ необходим сбор, обработка и анализ информа-

ции о первых трех классах устройств с АП и ФКУ для определения степени их вклада в изменение уровня КЭ и их потенциала его повышения, как указано на рисунке 10.

Таким образом, интеграция ФКУ с АП в централизованные, автономные и комбинированные СЭС реализуется в соответствии с алгоритмом, приведенном на рисунке 11. Исходя из параметров и режимов энергообеспечения (централизованный, автономный, комбинированный), а также количества, типа и мощности подключенной ответственной НН определяется совокупность корректируемых ПКЭ и требуемая степень их коррекции.

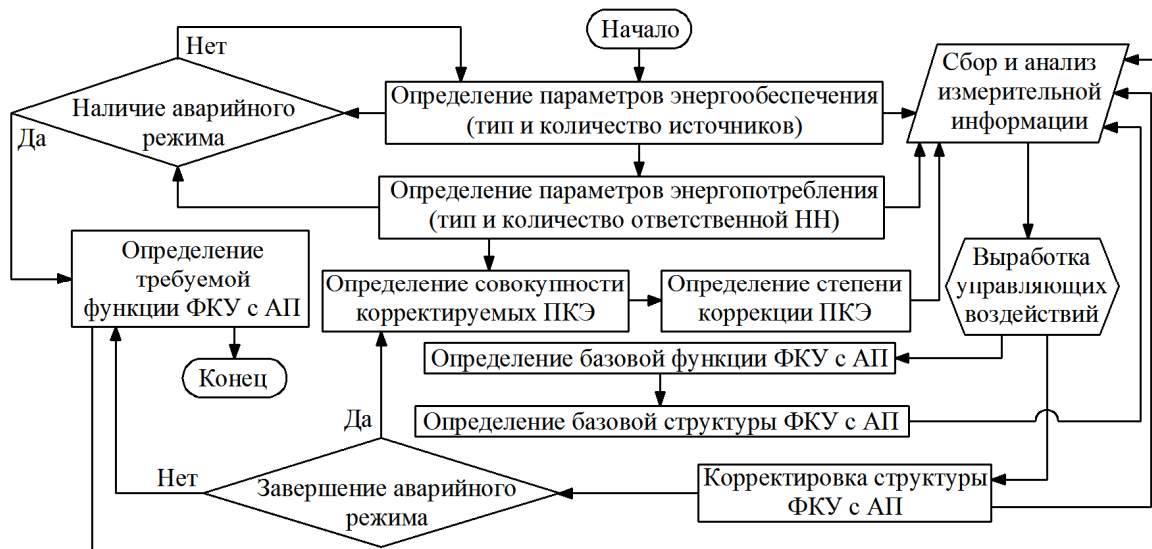


Рисунок 11 – Алгоритм интеграции ФКУ с АП в системы комбинированного электроснабжения с возможностью реализации информационно-управляющих воздействий

Далее осуществляется выбор базовой функции ФКУ с АП (повышение КЭ) и его структура (способ соединения активной и пассивной части между собой, конфигурация ПФ на выходе АП). Исходя из вида аварийного режима (КЗ, отказ централизованного или автономного источника) определяется дополнительная требуемая функция ФКУ с АП (синхронизация параллельной работы источников, ИБП, накопление энергии). Информация о структуре и режиме работы ФКУ с АП, а также о ПКЭ и степени их коррекции заносится в подсистему сбора и анализа информации системы управления СЭС. Управление структурой и режимом работы ФКУ с АП осуществляется за счет выработки информационно-управляющих воздействий системой управления СЭС. Таким образом, в соответствии с предложенными схемами и алгоритмом осуществляется интеграция ФКУ с АП, функционирующих как в составе электротехнических комплексов каких-либо источников, или нагрузки, так и отдельных устройств, в автоматизированные системы управления СЭС.

В главе 5 приведено развитие теоретических положений по структурному и параметрическому синтезу ФКУ с АП в СЭС НГП. Разработана целевая функция оптимизации параметров ФКУ с АП по заданному набору критериев.

Целевую функцию оптимизации параметров и характеристик ФКУ с АП и целесообразно представить в следующей форме:

$$\Phi = w_1\Phi_1 + w_2\Phi_2 + \dots + w_n\Phi_n, \quad (10)$$

где $w_1 \dots w_n$ – весовые коэффициенты, учитывающие значимость отдельных критериев $\Phi_1 \dots \Phi_n$, которые формируют целевую функцию.

В целях оптимизации структурного и параметрического синтеза ФКУ с АП необходимо рассматривать следующие основные критерии.

В качестве критерия Φ_1 выступает приближение коэффициента k_{S1} к единице в соответствии с соотношением (1):

$$\Phi_1 = k_{S1} = S_1 / S = \frac{1}{\sqrt{1+k_U^2} \sqrt{1+k_I^2}} \rightarrow 1, \quad (11)$$

что отражает минимизацию уровня завышения полной установленной мощности трансформаторного и сетевого оборудования СЭС при несинусоидальных режимах.

Критерий Φ_2 отражает приближение коэффициента λ_1 к 1 и минимизацию фазового угла между током и напряжением основной составляющей:

$$\Phi_2 = k_{m1} = P_1 / S_1 \rightarrow 1. \quad (12)$$

Данный критерий определяет, будет ли компенсационный ток ПАФ содержать помимо ВГС основную составляющую. В частности если в качестве НН выступает многопульсный ПЧ, то потребляемый ток определяется следующим образом:

$$i_{nn} = i_{1nn} \sin \varphi_1 + \sum_{k=1}^{\infty} (i_{pk+1} \sin \varphi_{pk+1} + i_{pk-1} \sin \varphi_{pk-1}), \quad (13)$$

где p – пульсность ПЧ, i_{1nn} – основная составляющая тока ПЧ. При этом компенсационный ток ПАФ будет следующим при отсутствии необходимости коррекции λ_1 :

$$i_{ПАФ} = \sum_{k=1}^{k_{max}} (i_{pk+1} \sin(\varphi_{pk+1} + \pi) + i_{pk-1} \sin(\varphi_{pk-1} + \pi)), \quad (14)$$

где k_{max} для большинства серийных ПАФ составляет 4 или 5. В случае необходимости коррекции k_{m1} выражение (14) примет вид:

$$i_{ПАФ} = k_{\lambda_1} i_{1nn} \sin \varphi_1' + \sum_{k=1}^{k_{max}} (i_{pk+1} \sin(\varphi_{pk+1} + \pi) + i_{pk-1} \sin(\varphi_{pk-1} + \pi)), \quad (15)$$

где k_{λ_1} – коэффициент, определяемый исходя из степени снижения реактивной части тока на частоте основной составляющей; φ_1' – фазовый сдвиг компенсационного тока реактивной части основной составляющей.

На рисунке 12 приведен алгоритм выбора режима работы АП на примере ПАФ при компенсации реактивной мощности с учетом соотношения (1).

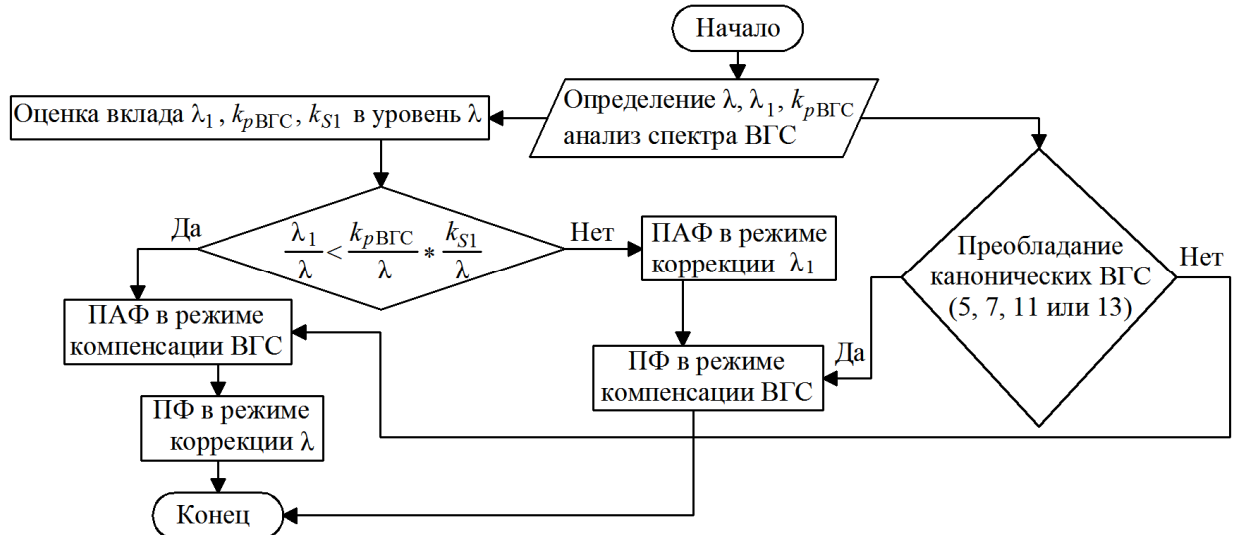


Рисунок 12 - Алгоритм выбора режима работы АП на примере ПАФ при компенсации реактивной мощности

Критерий Φ_3 определяет минимизацию коэффициента k_{pBGC} согласно выражению (1):

$$\Phi_3 = k_{pBGC} = P_{BGC} / P_1 \rightarrow 0, \quad (16)$$

что отражает минимизацию неактивных составляющих мощности при несинусоидальных режимах.

В качестве критерия Φ_4 выступает следующее соотношение:

$$\Phi_4 = k_U^2 + k_I^2 \rightarrow 0, \quad (17)$$

отражающее минимизацию уровня ВГС тока и напряжения. С учетом критерия Φ_1 выражение (17) примет вид:

$$\Phi_4 = k_U^2 k_I^2 \rightarrow 0. \quad (18)$$

Критерий Φ_5 отражает минимизацию потерь напряжения на ПФ, установленных на выходе АП (ПАФ или ПСАФ):

$$\Phi_5 = \Delta U_{\text{выхПФ}} \rightarrow 0. \quad (19)$$

Для выбора параметров выходных ПФ необходимо составить схемы замещения для двух основных случаев: АП функционирует в режиме управляемого источника напряжения или тока. В качестве примера на рисунке 13 приведены схемы замещения для двух указанных случаев при наличии выходных ПФ наиболее простой конфигурации.

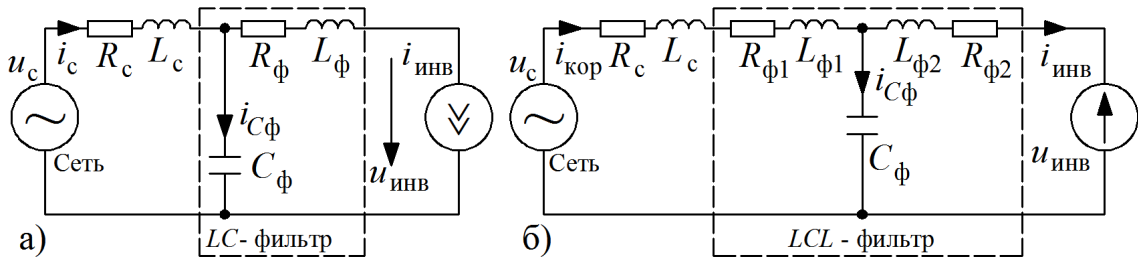


Рисунок 13 – Схема замещения сети с инвертором тока (а) и инвертором напряжения (б)

Для схем рисунков 13аб минимизация потерь компенсационного напряжения на выходе ПФ определяется соответственно из условий:

$$u_{C\phi}(t) - u_{\text{инв}}(t) = i_{\text{инв}}(t)R_{\phi} + L_{\phi} \frac{di_{\text{инв}}(t)}{dt} \rightarrow \min; \frac{di_{\text{инв}}(t)}{dt} R_{\phi} + L_{\phi} \frac{d^2 i_{\text{инв}}(t)}{dt^2} = 0. \quad (20)$$

$$u_{C\phi}(t) - u_{\text{инв}}(t) = i_{\text{инв}}(t)R_{\phi2} + L_{\phi2} \frac{di_{\text{инв}}(t)}{dt} \rightarrow \min; \frac{di_{\text{инв}}(t)}{dt} R_{\phi2} + L_{\phi2} \frac{d^2 i_{\text{инв}}(t)}{dt^2} = 0. \quad (21)$$

Критерий Φ_6 отражает минимизацию среднего значения активной мощности, потребляемой АП при коррекции ПКЭ на периоде основной частоты T_c :

$$\Phi_6 = P_k(t) \rightarrow 0, \quad (22)$$

в состав которой входят как известно дополнительные потери активной мощности, обусловленные током, протекающим по силовым элементам инвертора, которые состоят из следующих компонентов: потери в открытом состоянии $\Delta P_{\text{откр}}$, потери при переключении $\Delta P_{\text{пер}}$, потери на обратных диодах в открытом состоянии $\Delta P_{\text{д откр}}$ и потери на выключение диодов $\Delta P_{\text{выкл}}$:

$$P_{\Sigma} = \Delta P_{\text{откр}} + \Delta P_{\text{пер}} + \Delta P_{\text{д откр}} + \Delta P_{\text{выкл}}. \quad (23)$$

Таким образом, выполнение критерия (22) непосредственно связано с минимизацией каждой составляющей выражения (23).

В качестве критерия Φ_7 выступает минимизация емкости накопительного конденсатора ПАФ или ПСАФ в рамках ФКУ с АП в соответствии с выражением:

$$\Phi_7 = C_n = \frac{L_{\text{др}} i_{\text{ПАФ}}^2}{k_{\text{ин}} U_{\text{cd}}^2} \rightarrow \min. \quad (24)$$

Для практических расчетов при известном гармоническом спектре НН, емкость накопительного конденсатора на примере ПАФ можно приближенно вычислить следующим образом:

$$C_{\text{н}} = \frac{Q_{\text{ПАФ}}}{k_{\text{ин}}^2 U_{\text{cd}}^2 \omega}, \quad (25)$$

где: $k_{\text{ин}}$ – функция состояния силовых ключей АП; U_{cd} – заданный уровень напряжения накопительного конденсатора. При этом $Q_{\text{ПАФ}}$ определяется как:

$$Q_{\text{ПАФ}} = \sqrt{\sum_{n=2}^{40} Q_n} = \sqrt{\sum_{n=2}^{40} I_n U_n \sin \varphi_n}, \quad (26)$$

где: Q_n – реактивные составляющие компенсируемых ВГС с учетом фазового сдвига. При этом спектр регистрируемых большинством приборов ВГС ограничивается 40 порядком.

Критерий Φ_8 определяет минимизацию компенсационного тока ПАФ или напряжения ПСАФ соответственно в составе ФКУ с АП (см. рисунки 14аб):

$$\Phi_8 = i_{\text{к}}(t) = i_{\text{с}}(t) - i_{\text{нн}}(t) = \frac{S_{\text{к}}(t)}{U_{\text{с}}(t)} \rightarrow \min, \quad (27)$$

$$\Phi_8 = u_{\text{к}}(t) = u_{\text{с}}(t) - u_{\text{нн}}(t) \rightarrow \min. \quad (28)$$

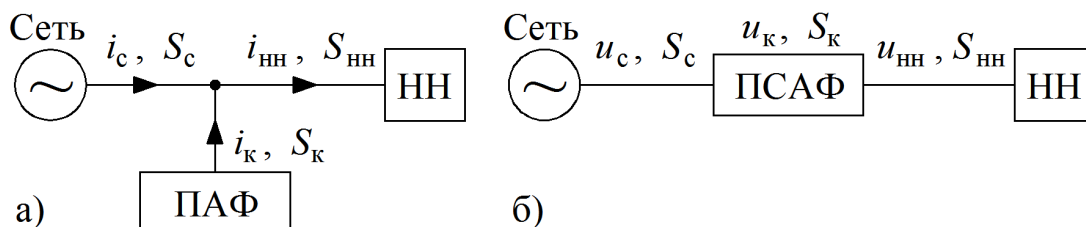


Рисунок 14 - Подключение АП параллельного (а) и последовательного (б) типа ($i_{\text{с}}$, $u_{\text{с}}$, $S_{\text{с}}$ – ток, напряжение, полная мощность сети соответственно, $i_{\text{к}}$, $u_{\text{к}}$, $S_{\text{к}}$ – ток, напряжение, полная мощность ПАФ, ПСАФ, $i_{\text{нн}}$, $u_{\text{нн}}$, $S_{\text{нн}}$ – ток, напряжение, полная мощность НН)

В качестве критерия Φ_9 выступает реактивная мощность основной составляющей, которая компенсируется ФКУ с АП:

$$\Phi_9 = \frac{(Q_0 - Q_{\text{КУ}})^2}{S_{\text{н}}^2} \rightarrow \min, \quad (29)$$

где $Q_{\text{КУ}}$ – мощность, генерируемая ФКУ на частоте основной составляющей; $S_{\text{н}}$ – полная мощность нагрузки; Q_0 – реактивная мощность, которую необходимо компенсировать в точке подключения ФКУ.

На рисунке 15 приведено структурирование методов и средств применения ФКУ с АП в различные элементы СЭС.

Выбор места размещения ФКУ с АП исходя из структуры, реализуемых функций и величин ПКЭ в компенсируемой СЭС, осуществляется в соответствии с алгоритмом, приведенным на рисунке 16.

В главе 6 приведены запатентованные технические и технологические решения по реализации ФКУ с АП в соответствии с разработанными методами и методиками, а также результаты их промышленных испытаний и внедрения.

На основании и с учетом разработанных теоретических положений выполнено промышленное внедрение 10 ФКУ с АП в СЭС нефтепромыслов ООО «РН-Юганскнефтегаз» и ОАО «Оренбургнефть». В качестве примера на рисунке 17 приведена схема установки ПАФ серии «Электон-

ФСА» с серийными номерами 35, 29, 37 и 38 в сети 0,4 кВ куста 213бис Приобского месторождения ООО «РН-Юганскнефтегаз».

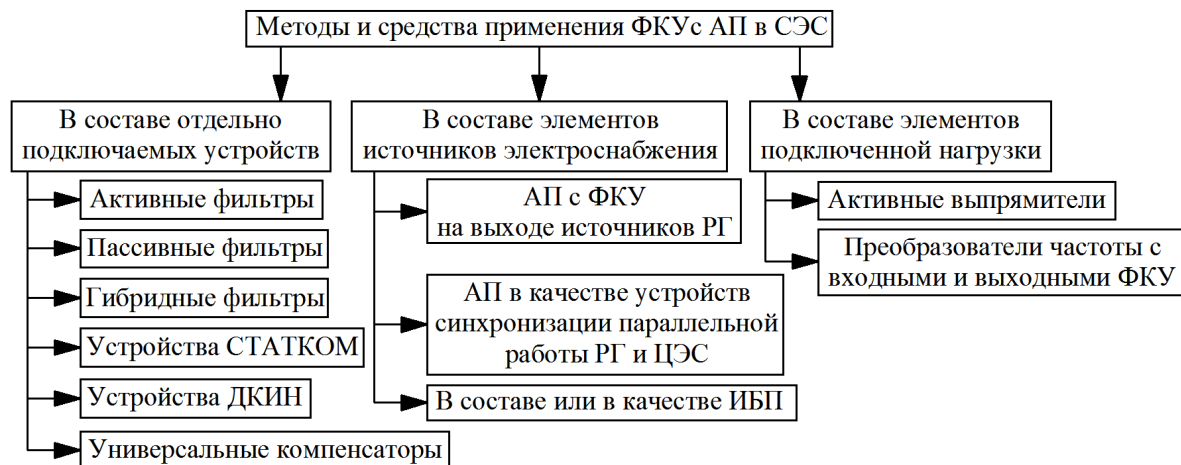


Рисунок 15 - Структурирование методов и средств применения ФКУ с АП в различные элементы СЭС



Рисунок 16 – Алгоритм выбора места размещения ФКУ с АП

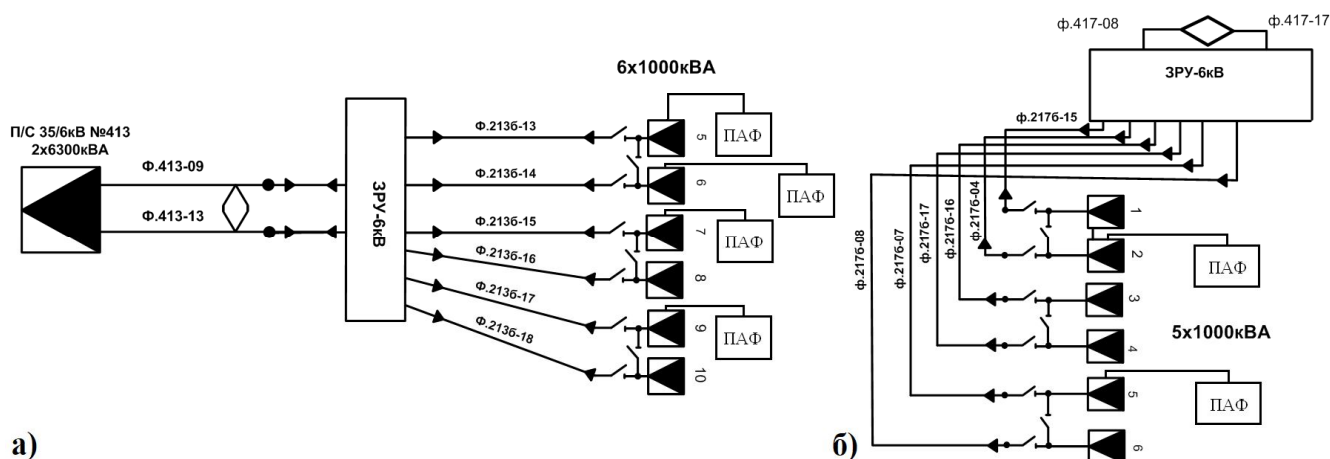


Рисунок 17 – Фрагменты эксплуатационных схем электроснабжения кустов 213бис (а) и 217бис (б) Приобского месторождения ООО «РН-Юганскнефтегаз» с указанием мест установки ПАФ

Результаты оценки эффективности промышленного внедрения ФКУ с АП на примере ПАФ приведены в таблице 1, где: Δk_U - уменьшение коэффициента k_U , $\Delta I_{нг}$ - уменьшение тока нагрузки, Q – компенсируемая реактивная мощность, Δk_I - уменьшение коэффициента k_I . Результаты, приведенные в таблице 1, подтверждают эффективность промышленного внедрения ФКУ с АП в действующих СЭС.

Таблица 1 - Оценка эффективности работы ПАФ

Параметры	Серийный номер ПАФ									
	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38
Δk_U , %	1,5	5,9	6,4	3,9	2,7	2,8	3,9	7,0	1,6	5,3
$\Delta I_{нг}$, %	9,1	6,9	5,7	2,5	11,5	5,3	4,3	2,1	2,9	3,1
Q , квар	37	-	-	-	-	-	28	-	22	36
Δk_I , %	31,4	26,5	29,9	24,3	29,7	18,1	25,7	26	31,2	17,9

В качестве примера для исследования особенностей совместной работы нескольких ПАФ в сети 0,4 кВ куста 213бис произведены измерения коэффициента k_U при изменении комбинации включенных ПАФ и порядок их подключения и отключения. На рисунках 18 и 19 представлено изменение величины k_U соответственно при поочередном отключении и включении ПАФ №№ 35, 29, 37 и 38.

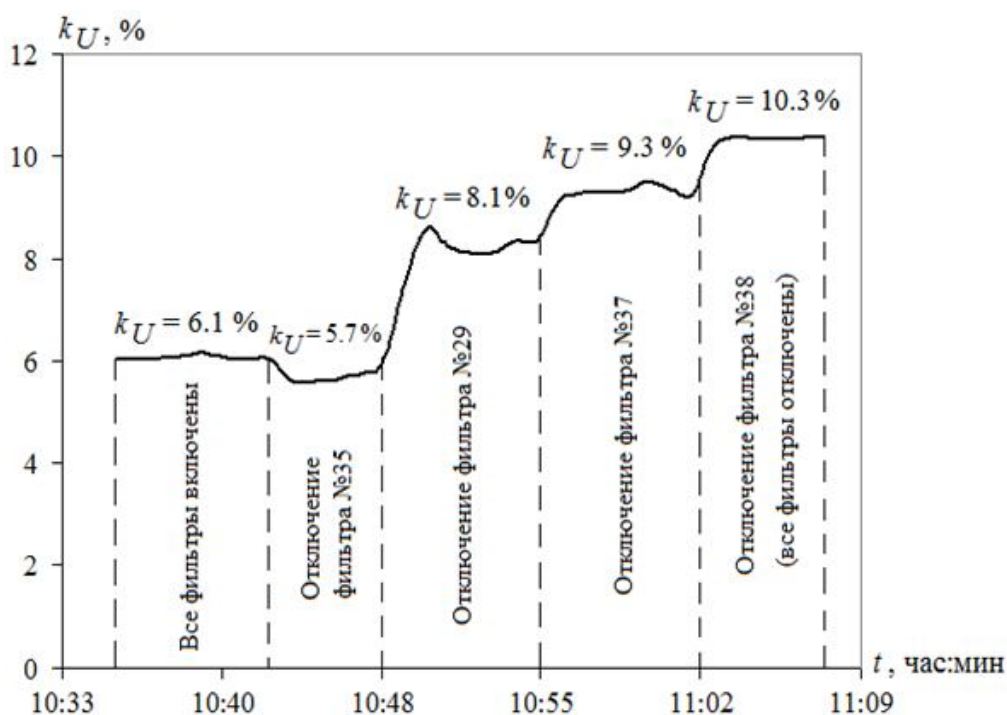


Рисунок 18 - Изменение величины k_U при поочередном отключении ПАФ №№ 35, 29, 37 и 38

В сети 0,4 кВ куста 213 бис установлено одновременно 4 ПАФ (№№ 35, 29, 37 и 38), эффективность их работы отличается в зависимости от количества одновременно работающих ПАФ. Из результатов измерений параметров работы ПАФ № 37 видно, что при отключенных ПАФ №№ 35, 29 и 38 величина коэффициента k_U увеличивается с 1,6% до 3,6%. Однако, при этом фактическая величина коэффициента k_U увеличивается до 7,1% против 6,1% при работе всех четырех ПАФ (см. рисунки 18 и 19). Этот эффект объясняется разгрузкой секции шин 6 кВ от тока НН и снижением коэффициента k_U сети с 6,1% до 5,4%.



Рисунок 19 - Изменение величины k_U при поочередном включении ПАФ №№ 35, 29, 37 и 38

Станции управления погружными электронасосами, которые являются основным видом НН в сети Приобского месторождения, отличаются друг от друга значениями индуктивности L и емкости C нагрузки. При этом, чем больше L и меньше C , тем ниже величина k_I потребляемого станцией тока. В тех станциях, где при работе на идеальную сеть и при номинальной нагрузке $k_I \sim 30\div40\%$, ПАФ серии «Электрон ФСА» компенсирует ВГС, снижая коэффициент k_I ниже 10%. При низком значении L , k_I тока станции превышает 40%, что приводит к полной нагрузке ПАФ при коэффициенте k_I сетевого тока на уровне 13÷14%, что не позволяет добиться существенного снижения коэффициента k_U .

По результатам промышленного внедрения и эксплуатации ПАФ в условиях Приобского месторождения ООО «РН-Юганскнефтегаз» выявлены следующие особенности и закономерности, которые согласуются с разработанными теоретическими положениями:

- при установке в сети 0,4 кВ одного куста нескольких ПАФ необходимо учитывать порядок их подключения и отключения для обеспечения соответствия величины k_U норме ГОСТ 32144-2013;
- совместная работа нескольких ПАФ, подключенных на стороне напряжения 0,4 кВ, питающихся от одной секции шин, позволяет существенно снизить уровень искажений напряжения во всей сети 6 и 0,4 кВ;
- при работе всех ПАФ зафиксировано снижение величины тока, потребляемого НН, что является следствием компенсации реактивной мощности ПАФ;
- особенностью работы ПАФ серии «Электрон ФСА» является низкая эффективность при компенсации ВГС тока и напряжения станций управления, у которых дроссели имеют малую величину L или отсутствуют ($L = 0$);
- отмечены резонансные явления при работе ПАФ с подключенной конденсаторной установкой (КУ) компенсации реактивной мощности;
- при дальнейшей эксплуатации установленных ПАФ необходимо периодически проводить измерения уровня ВГС тока и напряжения для выявления возможности возникновения резонансных явлений, изменения мощности подключенной НН и конфигурации компенсируемой сети.

На рисунке 19 и в таблице 2 приведены результаты промышленных испытаний и внедрения ПАФ в системе электроснабжения скважины №1716 в составе Курманаевского месторождения ОАО «Оренбургнефть». В процессе испытаний выявлена необходимость установки ПФ на выходе ПАФ для повышения эффективности повышения КЭ. Также установлено, что номинальный ток

ПАФ должен быть в 1,5-2 раза меньше номинального тока станции управления, что исключает переход последнего в активно-емкостный режим.

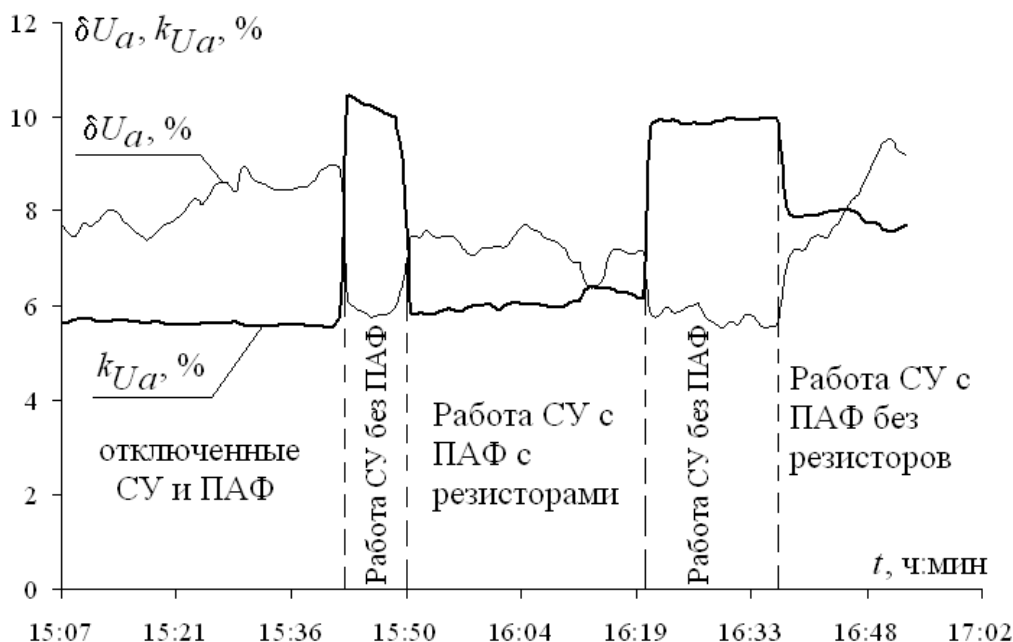


Рисунок 19 – Изменение величины отклонения напряжения δU_a и коэффициента k_{Ua} для фазы А сети 0,4 кВ скважины №1716 Курманаевского месторождения ОАО «Оренбургнефть»

Необходимо предусматривать автоматическое отключение ПАФ при отключении нагрузки и его включение при включении нагрузки, так как при отключении СУ, ПАФ превращается в источник ВГС тока и увеличивает k_U сети. Выявлена возможность ПАФ снижать отклонение напряжения сети (см. рисунок 19).

Таблица 2 - Оценка эффективности ПАФ в условиях ОАО «Оренбургнефть»

Параметр	Отключенные СУ и ПАФ	Работа СУ без ПАФ	Работа ПАФ без резисторов в составе RC фильтра		Работа ПАФ с резисторами в составе RC фильтра	
U_c , В	238	232	238	+3%	237	+3%
k_U , %	5,5	10,1	7,7	-52%	5,8	-93,5%
I_c , А	-	270	227	-26%	235	-13%
k_I , %	-	22,5	15	-33%	7,5	-58%

Годовой экономический эффект от промышленного внедрения одного ПАФ в соответствии с разработанными теоретическими положениями в условиях НГП в зависимости от номинального тока составляет от 150 тыс.руб. до 1 млн.руб. Усредненный экономический эффект от внедрения одного ФКУ с АП составляет до 300 тыс. руб. в год со сроком окупаемости до 2 лет.

Таким образом, результаты промышленного внедрения подтверждают справедливость разработанных теоретических положений по синтезу и применению ФКУ с АП в СЭС промышленных предприятий.

Заключение отражает обобщенные выводы по результатам исследований в соответствии с целью и решаемыми задачами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе на основе системного подхода решена актуальная научная проблема повышения КЭ в централизованных, автономных и комбинированных системах электроснабжения НПП путем развития теории структурного и параметрического синтеза ФКУ с АП, имеющая важное хозяйственное значение.

Основные результаты работы заключаются в следующем:

1. Выявлены закономерности изменения показателей эффективности работы активных преобразователей от степени вариации внешних факторов, характеризующих параметры питающей сети и узла нагрузки, и внутренних факторов, характеризующих параметры преобразователей. Это позволяет в заданных условиях определить рациональную степень коррекции показателей качества электроэнергии по установленным критериям, включая увеличение срока службы электрооборудования и минимизации потерь энергии, а также метод реализации системы управления преобразователем для ее достижения. При этом установлено негативное влияние вариации внешних и внутренних факторов на отдельные системы управления в части ухудшения качества электроэнергии, что делает недопустимым их применение для активных преобразователей при определенных условиях, что также отражают выявленные закономерности.

2. Разработан алгоритм автоматизированного повышения качества электроэнергии активными преобразователями, позволяющий реализовать рациональную степень коррекции совокупности показателей качества по установленным критериям, исходя из заданных факторов, включая параметры питающей сети, узла нагрузки и преобразователей.

3. Разработан комплекс математических моделей и методология моделирования многофункциональных фильтрокомпенсирующих устройств с активными преобразователями для условий централизованных, автономных и комбинированных систем электроснабжения, с учетом конфигурации устройства, способа соединения активной и пассивной части в его составе, переменной структуры пассивного фильтра на выходе преобразователя.

4. Установлены закономерности, отражающие степень влияния конфигурации фильтрокомпенсирующих устройств с активными преобразователями на уровень повышения качества электроэнергии. Это позволяет определить рациональное соотношение параметров активной и пассивной части по критерию максимального снижения характеристик активной части как наиболее дорогостоящей с сохранением требуемого уровня эффективности в заданных условиях. Выявлено, что включение пассивных фильтров на выходе преобразователей обеспечивает многофункциональность последних по совокупности корректируемых показателей, включая несинусоидальность и несимметрию тока и напряжения. В частности уровень высших гармоник тока и напряжения снижается на 70-80 % и 11-13 % соответственно, отклонение напряжения - на 2-5 %, уровень потребляемого тока - на 5-6 %, степень несимметрии тока и напряжения – на 60-90 % при применении фильтрокомпенсирующего устройства на основе параллельного активного преобразователя. Показано, что в условиях распределенной генерации применение пассивных фильтров с активными преобразователями в рамках единых многофункциональных электротехнических комплексов увеличивает эффективность повышения качества электроэнергии более чем в 2 раза.

5. Выявлены допустимые диапазоны вариации параметров активных преобразователей в рамках фильтрокомпенсирующих устройств, обеспечивающие сохранение заданного уровня повышения качества электроэнергии. Установлено, что снижение номинальных параметров параллельного активного преобразователя в 2-4 раза, а последовательного активного преобразователя на 25-50 % от исходных значений позволяет сохранить требуемый уровень повышения качества электроэнергии. Указанные диапазоны также позволяют оценить степень значимости отдельных

параметров при оценке допустимости их снижения при минимизации массогабаритных показателей преобразователей в составе фильтрокомпенсирующих устройств.

6. Разработан алгоритм управления фильтрокомпенсирующими устройствами с активными преобразователями для автоматизированного повышения качества электроэнергии, предусматривающий выбор рациональной конфигурации устройства и способа управления преобразователем, исходя из требуемой степени коррекции показателей качества и допустимого уровня снижения параметров активной части.

7. Разработана структура и алгоритм функционирования системы комбинированного энергообеспечения, где фильтрокомпенсирующие устройства с активными преобразователями обладают переменной конфигурацией и набором реализуемых функций по повышению качества электроэнергии, бесперебойному электроснабжению и синхронизации параллельной работы источников, с возможностью формирования и реализации информационно-управляющих воздействий в рамках автоматизированных систем управления электроснабжением.

8. Разработана научно-обоснованная методология выбора структуры, параметров, режима работы, системы управления и распределения фильтрокомпенсирующими устройствами с активными преобразователями в условиях различных систем электроснабжения нефтегазовых предприятий, что является основным этапом развития теории структурного и параметрического синтеза данных устройств. Определена целевая функция оптимизации параметров фильтрокомпенсирующих устройств с активными преобразователями для повышения качества электроэнергии по заданному набору критериев, включая минимизацию компенсационных токов и напряжений, потерь в пассивных фильтрах на выходе преобразователей, потерь энергии в активных преобразователях, минимизацию реактивной мощности и гармонических составляющих.

9. На основании полученных теоретических и практических результатов разработаны технические и технологические решения по реализации фильтрокомпенсирующих устройств с активными преобразователями для повышения качества электроэнергии при вариации внешних и внутренних факторов, выполнено промышленное внедрение данных устройств с экономическим эффектом до 300 тыс. руб. на один преобразователь в условиях нефтепромыслов со сроком окупаемости не более 2 лет. Эффект достигнут за счет снижения потребления реактивной мощности, потерь энергии в электрооборудовании, уменьшению количества отказов оборудования. Внедрение результатов в части алгоритмов управления активными преобразователями при их изготовлении выполнено в ЗАО «Электон», ООО «СПИК СЗМА» и АО «ЧЭАЗ». В условиях ООО «РН-Юганскнефтегаз» выбраны и установлены фильтрокомпенсирующие устройства с активными преобразователями в соответствии с разработанными методами и алгоритмами. В ООО «НТЦ Мехатроника» выполнено внедрение методологии интеграции фильтрокомпенсирующих устройств с активными преобразователями в автоматизированные системы управления электроснабжением. На объектах ПАО «Газпром» и ООО «МРСК Сибири» внедряются разработанные методы интеграции фильтрокомпенсирующих устройств с активными преобразователями в системы комбинированного электроснабжения. Все указанные положения отражены в актах внедрения.

Научные результаты работы отражены в следующих основных публикациях:

Статьи в изданиях, входящих в Перечень ВАК РФ:

1. Сычев, Ю.А. Система контроля и повышения качества электрической энергии в сетях предприятий минерально-сырьевого комплекса / Б.Н. Абрамович, В.В. Полищук, Ю.А. Сычев // Горное оборудование и электромеханика. – 2009. - №9. - С. 42-47.
2. Сычев, Ю.А. 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, А.А. Вырва, Р.А. Ульбаев, В.В. Полищук // Промышленная энергетика. - 2011. - № 6. - С. 49-52.
3. Сычев, Ю.А. Активная компенсация провалов и искажений напряжения в системах электроснабжения нефтедобывающих предприятий / Б.Н. Абрамович, Ю.А. Сычев, Д.А. Устинов, А.Я. Шклярский // Промышленная энергетика. - 2012. - № 4. - С. 23-25.
4. Сычев, Ю.А. Повышение качества электрической энергии с помощью параллельного активного фильтра в системах электроснабжения промышленных предприятий / Б.Н. Абрамович, Ю.А. Сычев // Электричество. - 2012. - № 3. - С. 7а-11.
5. Сычев, Ю.А. Система гарантированного электроснабжения предприятий минерально-сырьевого комплекса с использованием альтернативных и возобновляемых источников энергии / Б.Н. Абрамович, Ю.А. Сычев, Д.А. Устинов, А.В. Фёдоров // Промышленная энергетика. - 2013. - № 1. - С. 14-16.
6. Сычев, Ю.А. Интеллектуальная система комплексного мониторинга использования энергоресурсов и контроля уровня качества электрической энергии в условиях распределенной генерации на основе альтернативных и возобновляемых источников энергии / Б.Н. Абрамович, Ю.А. Сычев // Промышленная энергетика. - 2014. - № 12. - С. 40-44.
7. Сычев, Ю.А. Современные проблемы и перспективы развития интеллектуализации и автоматизации энергосистем предприятий минерально-сырьевого комплекса / Б.Н. Абрамович, Ю.А. Сычев, Д.А. Устинов, А.В. Фёдоров, В.Б. Прохорова // Горное оборудование и электромеханика. - 2014. - № 9. - С. 6-11.
8. Сычев, Ю.А. 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.
9. Сычев, Ю.А. Методы и средства повышения уровня энергосбережения и энергоэффективности на горных предприятиях / Б.Н. Абрамович, Ю.А. Сычев, Ю.Л. Жуковский // Горное оборудование и электромеханика. - 2015. - № 5. - С. 25-30.
10. Сычев, Ю.А. Методы и средства обеспечения энергетической безопасности промышленных предприятий с непрерывным технологическим циклом / Б.Н. Абрамович, Ю.А. Сычев // Промышленная энергетика. - 2016. - № 9. - С. 18-22.
11. Сычев, Ю.А. Комбинированная энергетическая установка для энергоснабжения горных предприятий / Б.Н. Абрамович, Ю.А. Сычев, В.А. Моренов // Горное оборудование и электромеханика. - 2016. - № 4 (122). - С. 36-41.
12. Сычев, Ю.А. Повышение эффективности электротехнических преобразовательных комплексов для добычи и переработки полезных ископаемых / Б.Н. Абрамович, А.А. Веприков, Ю.А. Сычев // Горное оборудование и электромеханика. - 2017. - № 1 (128). - С. 7-12.
13. Сычев, Ю.А. Эффективность распределенной энергетики в условиях минерально-сырьевого комплекса / Б.Н. Абрамович, Ю.А. Сычев, Д.А. Устинов, И.С. Бабанова, В.Б. Прохорова // Промышленная энергетика. - 2019. - № 5. - С. 8-16.

Патенты РФ на изобретения:

14. Патент № 2354025 Российская Федерация, МПК H02J 3/18 (2006.01). Способ компенсации высших гармоник и коррекции коэффициента мощности сети : 2008117891/09 : заявл. 04.05.2008 : опубл. 27.04.2009 / Абрамович Б.Н., Полищук В.В., Сычев Ю.А. ; заявитель СПГТИ(ТУ). – 9 с. : ил. – Текст : непосредственный.
15. Патент № 2413350 Российская Федерация, МПК H02J 3/18 (2006.01). Способ компенсации высших гармоник и коррекции коэффициента мощности сети : 2009146366/07 : заявл. 14.12.2009 :

- опубл. 27.02.2011 / Абрамович Б.Н., Полищук В.В., Сычев Ю.А. ; заявитель СПГГИ(ТУ). – 8 с. : ил. – Текст : непосредственный.
16. Патент № 2446536 Российская Федерация, МПК H02J 3/00 (2006.01). Устройство компенсации высших гармоник и коррекции коэффициента мощности сети : 2010148940/07 : заявл. 30.11.2010 : опубл. 27.03.2012 / Абрамович Б.Н., Сычев Ю.А. ; заявитель СПГГИ(ТУ). – 11 с. : ил. – Текст : непосредственный.
17. Патент № 2512886 Российская Федерация, МПК H02J 3/00 (2006.01), H02J 3/02 (2006.01), H02J 3/16 (2006.01). Устройство компенсации высших гармоник и коррекции коэффициента мощности сети : 2013119660/07 : заявл. 26.04.2013 : опубл. 10.04.2014 / Абрамович Б.Н., Сычев Ю.А. ; заявитель НМСУ «Горный». – 9 с. : ил. – Текст : непосредственный.
18. Патент № 2446537 Российская Федерация, МПК H02J 3/12 (2006.01). Устройство регулирования напряжения и передаваемой мощности электрической сети : 2010154352/07 : заявл. 29.12.2010 : опубл. 27.03.2012 / Абрамович Б.Н., Сычев Ю.А., Устинов Д.А., Шклярский А.Я. ; заявитель СПГГИ(ТУ). – 11 с. : ил. – Текст : непосредственный.
19. Патент № 2453021 Российская Федерация, МПК H02J 3/00 (2006.01). Устройство регулирования отклонений напряжения и реактивной мощности электрической сети : 2011118261/07 : заявл. 05.05.2011 : опубл. 10.06.2012 / Абрамович Б.Н., Сычев Ю.А., Устинов Д.А., Шклярский А.Я. ; заявитель СПГГИ(ТУ). – 8 с. : ил. – Текст : непосредственный.
20. Патент № 2467447 Российская Федерация, МПК H02J 3/12 (2006.01). Устройство динамического управления режимом напряжения в электрической сети с применением fuzzy-логики : 2011141241/07 : заявл. 11.10.2011 : опубл. 20.11.2012 / Абрамович Б.Н., Сычев Ю.А., Устинов Д.А., Шевчук А.П. ; заявитель СПГГУ. – 9 с. : ил. – Текст : непосредственный.
21. Патент № 2480602 Российская Федерация, МПК F02C 9/00 (2006.01). Система генерирования электроэнергии : 2011141243/06 : заявл. 11.10.2011 : опубл. 27.04.2013 / Абрамович Б.Н., Сычев Ю.А., Устинов Д.А., Турышева А.В. ; заявитель СПГГУ. – 9 с. : ил. – Текст : непосредственный.
22. Патент № 2481688 Российская Федерация, МПК H02J 9/04 (2006.01). Устройство гарантированного электроснабжения : 2012104934/07 : заявл. 13.02.2012 : опубл. 10.05.2013 / Абрамович Б.Н., Сычев Ю.А., Устинов Д.А. ; заявитель СПГГУ. – 8 с. : ил. – Текст : непосредственный.
23. Патент № 2505917 Российская Федерация, МПК H02P 9/02 (2006.01). Система автономного электроснабжения : 2012146725/07 : заявл. 01.11.2012 : опубл. 27.01.2014 / Абрамович Б.Н., Сычев Ю.А., Жуковский Ю.Л. ; заявитель НМСУ «Горный». – 8 с. : ил. – Текст : непосредственный.
24. Патент № 2536704 Российская Федерация, МПК H02J 7/10 (2006.01). Устройство заряда накопительного конденсатора : 2013120634/07 : заявл. 06.05.2013 : опубл. 27.12.2014 / Абрамович Б.Н., Сычев Ю.А. ; заявитель НМСУ «Горный». – 5 с. : ил. – Текст : непосредственный.
25. Патент № 2567112 Российская Федерация, МПК F02C 9/00 (2006.01). Система генерирования электрической энергии : 2014100099/07 : заявл. 09.01.2014 : опубл. 20.07.2015 / Абрамович Б.Н., Сычев Ю.А., Устинов Д.А., Моренов В.А., Турышева А.В., Леушева Е.Л. ; заявитель НМСУ «Горный». – 6 с. : ил. – Текст : непосредственный.
26. Патент № 2573599 Российская Федерация, МПК H02J 3/01 (2006.01), H02J 3/26 (2006.01). Устройство компенсации высших гармоник и коррекции несимметрии сети : 2014144588/07 : заявл. 05.11.2014 : опубл. 20.01.2016 / Абрамович Б.Н., Сычев Ю.А. ; заявитель НМСУ «Горный». – 8 с. : ил. – Текст : непосредственный.
27. Патент № 2576664 Российская Федерация, МПК H02J 9/00 (2006.01). Устройство бесперебойного электроснабжения : 2015109769/07 : заявл. 19.03.2015 : опубл. 10.03.2016 / Абрамович Б.Н., Сычев Ю.А., Федоров А.В., Бельский А.А. ; заявитель НМСУ «Горный». – 9 с. : ил. – Текст : непосредственный.

28. Патент № 176107 Российская Федерация, МПК H02J 3/00 (2006.01), H02J 1/02 (2006.01). Устройство гибридной компенсации высших гармоник : 2017124473 : заявл. 10.07.2017 : опубл. 09.01.2018 / Абрамович Б.Н., Сычев Ю.А., Зимин Р.Ю. ; заявитель СПГУ. – 7 с. : ил. – Текст : непосредственный.
29. Патент № 180919 Российская Федерация, МПК G05D 17/00 (2006.01), H02J 3/01 (2006.01), H02N 3/00 (2006.01). Контроллер защиты от веерных отключений с возможностью компенсации гармоник : 2017142191 : заявл. 04.12.2017 : опубл. 29.06.2018 / Абрамович Б.Н., Сычев Ю.А., Кузнецов П.А. ; заявитель СПГУ. – 7 с. : ил. – Текст : непосредственный.
30. Патент № 185875 Российская Федерация, МПК H02J 3/01 (2018.01). Устройство гибридной компенсации высших гармоник : 2018136024 : заявл. 11.10.2018 : опубл. 21.12.2018 / Абрамович Б.Н., Сычев Ю.А., Зимин Р.Ю. ; заявитель СПГУ. – 8 с. : ил. – Текст : непосредственный.
31. Патент № 192770 Российская Федерация, МПК G05D 17/00 (2019.05). Контроллер защиты от веерных отключений с возможностью компенсации гармоник и коррекции уставок релейной защиты : 2019110656 : заявл. 09.04.2019 : опубл. 30.09.2019 / Абрамович Б.Н., Сычев Ю.А., Кузнецов П.А. ; заявитель СПГУ. – 8 с. : ил. – Текст : непосредственный.
32. Патент № 2619919 Российская Федерация, МПК H02M 1/12 (2006.01). Устройство компенсации высших гармоник, адаптированное к электроприводу переменного тока : 2016123897 : заявл. 15.06.2016 : опубл. 19.05.2017 / Абрамович Б.Н., Сычев Ю.А., Зимин Р.Ю. ; заявитель СПГУ. – 11 с. : ил. – Текст : непосредственный.

Статьи в изданиях, входящих в международную базу научного цитирования Scopus:

33. Sychev, Yu.A. Power factor correction by means of active filter in networks of oil and gas enterprises / B.N. Abramovich, Yu.A. Sychev, A.V. Medvedev, V.V. Storostin, E.N. Abolemov, V.V. Polishchuk // Neftyanoe khozyaystvo - Oil Industry. – 2008. - Issue 5. – pp. 88-90. (Scopus)
34. Sychev, Yu.A. The electrotechnical complexes electromagnetic compatibility in oil and gas enterprises networks / B.N. Abramovich, Yu.A. Sychev, A.V. Medvedev, V.V. Storostin, V.V. Polishchuk // Neftyanoe khozyaystvo - Oil Industry. - 2010. - Issue 4. - pp. 112-114. (Scopus)
35. Sychev, Yu.A. The shunt active filters implementation for power quality increasing in electrical networks of Priobskoye deposit / B.N. Abramovich, Yu.A. Sychev, V.A. Burchevskiy, A.A. Vyrva, R.A. Ulbaev, V.V. Polishuk // Neftyanoe khozyaystvo - Oil Industry. - 2011. - Issue 6. - pp. 130-132. (Scopus)
36. Sychev, Yu.A. On the elimination of voltage and current harmonics created by uninterruptible power supply / B.N. Abramovich, Yu.A. Sychev, A.S. Mingazov, V.V. Polishuk // Neftyanoe khozyaystvo - Oil Industry. – 2013. - Issue 10. - pp. 126-127. (Scopus)
37. Sychev, Y.U.A. The methods of voltage dips and distortion compensation in electrical networks of oil production enterprises / B.N. Abramovich, Y.U.A. Sychev, D.A. Ustinov, A.Y.A. Shkljarskiy // Neftyanoe khozyaystvo - Oil Industry. – 2014. - Issue 8. - pp. 110-112. (Scopus)
38. Sychev, Yu.A. The application of modern information technologies for power monitoring and control in conditions of distributed generation / B.N. Abramovich, Yu.A. Sychev, V.B. Prokhorova, // Proceeding of the 16th conference of FRUCT association, 27-31 Oct., Oulu (Finland), 2014, ISSN: 2305-7254, DOI: 10.1109/FRUCT.2014.7000938. IEEE Conference Publications. – 2014. – Volume 1. - pp. 3 - 8. (Scopus, Web of Science)
39. Sychev, Yu.A. Intelligent power system on the base of active-adaptive control and interaction between elements / B.N. Abramovich, Yu.A. Sychev, A.A. Belsky // International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON), DOI: 10.1109/SIBCON.2015.7147230 IEEE Conference Publications. – 2015. – Volume 1. – pp. 1 – 6. (Scopus, Web of Science)

40. Sychev, Yu.A. The modeling of harmonic compensation modes of active correction systems / B.N. Abramovich, Yu.A. Sychev // Proceedings of 2015 International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems (MEACS), DOI: 10.1109/MEACS.2015.7414924. IEEE Conference Publications. – 2015. – Volume 1. - pp. 1-4. (Scopus, Web of Science)
41. Sychev, Yu.A. Shunt active correction system analysis in conditions of industrial enterprises networks / B.N. Abramovich, Yu.A. Sychev // International Journal of Applied Engineering Research. – 2016. - Volume 4. - pp. 2640-2645. (Scopus)
42. Sychev, Yu.A. Increasing the effectiveness of electro-technical transformation complexes for supplying of aluminium electrolyzers / B.N. Abramovich, Yu.A. Sychev, A.A. Veprikov, K.A. Khomyakov // Tsvetnye Metally. – 2016. - Volume 10. - pp. 49-53. (Scopus)
43. Sychev, Y.A. Energy safety of technological processes of oil extraction / B.N. Abramovich, Y.A. Sychev // Neftyanoe Khozyaystvo - Oil Industry. – 2016. - Volume 9. - pp. 120-123. (Scopus)
44. Sychev, Yu.A. Active compensation of voltage dips, deviations and distortions in electrical networks with highly variable loads and long lines / Yu.A. Sychev, A.A. Belsky // 2016 Electric Power Quality and Supply Reliability (PQ), DOI: 10.1109/PQ.2016.7724087. IEEE Conference Publications. – 2016. - Volume 1. - pp. 41 – 44. (Scopus, Web of Science)
45. Sychev, Yu.A. The evaluation of hybrid active filter efficiency / B.N. Abramovich, Yu.A. Sychev // 2016 International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering (APEDE). DOI: 10.1109/APEDE.2016.7879064. IEEE Conference Publications. – 2016. – Volume 1. - pp. 1-7. (Scopus, Web of Science)
46. Sychev, Yu.A. The control system on the base of signal processing for power quality improvement in electrotechnical complexes of alternative and renewable power sources / V.B. Prokhorova, Yu.A. Sychev // 2016 XV International Symposium Problems of Redundancy in Information and Control Systems (REDUNDANCY), DOI: 10.1109/RED.2016.7779343. IEEE Conference Publications. – 2016. – Volume 1. - pp. 119 – 124. (Scopus, Web of Science)
47. Sychev, Yu.A. The control algorithm for active and hybrid correction systems of voltage and current waveforms / B.N. Abramovich, Yu.A. Sychev // 2016 Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics), DOI: 10.1109/Dynamics.2016.7818962. IEEE Conference Publications. – 2016. – Volume 1. - pp. 1 – 5. (Scopus, Web of Science)
48. Sychev, Yu.A. The complex system of power quality control and improvement for minimization of deleterious effect on environment in conditions of oil production enterprises / Yu.A. Sychev, E.V. Iakovleva // Journal of Ecological Engineering. – 2017. - Volume 18(3). - pp. 43–47. (Scopus, Web of Science)
49. Sychev, Y.A. Efficiency estimation of hybrid electrotechnical complex for non-sinusoidal signals level correction in autonomous power supply systems for oil fields / B.N. Abramovich, Y.A. Sychev, P.A. Kuznetsov, R.Yu. Zimin // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, DOI: 10.1088/1755-1315/194/5/052001. – 2018. - Volume 194. - Issue 5. - 052001. (Scopus, Web of Science)
50. Sychev, Yu.A. Protective controller against cascade outages with selective harmonic compensation function / B.N. Abramovich, Yu.A. Sychev, P.A. Kuznetsov // Journal of Physics: Conference Series, DOI: 10.1088/1742-6596/1015/2/022001. – 2018. - Volume 1015. - 022001. (Scopus, Web of Science)
51. Sychev, Y.A. The hybrid correction system, based on active and passive filters for harmonic compensation in networks of oil enterprises / B.N. Abramovich, Y.A. Sychev, R.Y. Zimin // 2018 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies, FarEastCon 2018, DOI: 10.1109/FarEastCon.2018.8602638. – 2018. – Volume 1. - 8602638. (Scopus, Web of Science)
52. Sychev, Y.A. Efficiency estimation of hybrid electrical complex for voltage and current waveform correction in power systems of oil enterprises / B.N. Abramovich, Y.A. Sychev, R.Y. Zimin // Proceedings of the 2019 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineer-

- ing, ElConRus 2019, DOI: 10.1109/ElConRus.2019.8657081. – 2019. – Volume 1. - pp. 401-406. (Scopus, Web of Science)
53. Sychev, Yu.A. Mathematical modeling of harmonic correction by parallel active filter in conditions of distributed generation / B.N. Abramovich, Yu.A. Sychev, R.Yu. Zimin, P.A. Kuznetsov // Journal of Physics: Conference Series, DOI: 10.1088/1742-6596/1333/3/032081. – 2019. - Volume 1333. - 032081. (Scopus, Web of Science)
54. Sychev, Yu.A. Modelling and analysis of functional modes of active compensators in distributed generation systems / B.N. Abramovich, Yu.A. Sychev, R.Yu. Zimin // Journal of Physics: Conference Series, DOI: 10.1088/1742-6596/1333/6/062028. – 2019. - Volume 1333. - 062028. (Scopus, Web of Science)
55. Sychev, Yu.A. The Application of Series Active Filter for Improvement of Power Quality in Networks of Oil Enterprises / B.N. Abramovich, Yu.A. Sychev, R.Yu. Zimin, M.E. Aladin // 2019 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon), DOI: 10.1109/FarEastCon.2019.8933900. – 2019. – Volume 1. - 8933900 (Scopus, Web of Science)
56. Sychev, Yu. The assessment of the series active filter efficiency in power supply systems of oil production enterprises / Yu. Sychev, R. Zimin, M. Aladin // E3S Web of Conferences, DOI: 10.1051/e3sconf/201914004003. – 2019. - Volume 140. - 04003. (Scopus, Web of Science)
57. Sychev, Y.A. The Method of Power Factor Calculation under Non-Sinusoidal Conditions / Y.A. Sychev, M.E. Aladin, B.N. Abramovich // Proceedings of the 2020 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, ElConRus 2020, DOI: 10.1109/ElConRus49466.2020.9039427. – 2020. – Volume 1. - pp. 904-908. (Scopus, Web of Science)
58. Sychev, Y.A. Cascade frequency converters control features / A.G. Vorontsov, V.V. Glushakov, M.V. Pronin, Y.A. Sychev // Journal of Mining Institute. - 2020. - Volume 241(1). - pp. 37-45. (Scopus, Web of Science)
59. Sychev, Y.A. Use of active power transducers in industrial DC power systems supplying electrolysis cells / B.N. Abramovich, Y.A. Sychev, A.A. Veprikov, D.A. Lyakh // Tsvetnye Metally. – 2020. - Issue 2. - pp. 95-100 (Scopus)
60. Sychev, Yu. The assessment of the shunt active filter efficiency under varied power supply source and load parameters / Yu. Sychev, B. Abramovich, V. Prokhorova, // International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE). – 2020. - Volume 10. - No.6. - pp. 5621-5630. (Scopus)