

На правах рукописи

ЗИМИН Роман Юрьевич



**ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ
В ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСАХ
ПРЕДПРИЯТИЙ НЕФТЕДОБЫЧИ ГИБРИДНЫМИ
ФИЛЬТРОКОМПЕНСИРУЮЩИМИ
УСТРОЙСТВАМИ**

***Специальность 05.09.03 – Электротехнические комплексы
и системы***

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

Санкт-Петербург – 2021

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

Научный руководитель:

кандидат технических наук, доцент

Сычев Юрий Анатольевич

Официальные оппоненты:

Осипов Дмитрий Сергеевич

доктор технических наук, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Югорский государственный университет», институт нефти и газа, профессор

Поляков Николай Александрович

кандидат технических наук, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет ИТМО», факультет систем управления и робототехники, доцент

Ведущая организация – Общество с ограниченной ответственностью «НПК Промир».

Защита состоится 09 апреля 2021 г. в 12:00 на заседании диссертационного совета ГУ 212.224.14 Горного университета по адресу: 199106, г. Санкт-Петербург, 21-я В.О. линия, д. 2, ауд. 1171 а.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Горного университета и на сайте www.spmi.ru.

Автореферат разослан 08 февраля 2021 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
диссертационного совета



КОПТЕВА
Александра Владимировна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Современные электротехнические комплексы промышленных предприятий, в особенности нефтедобывающей отрасли, характеризуются интенсивным распространением нелинейной нагрузки (НН) в виде систем частотно-регулируемого электропривода (ЧРП) технологических установок. Это негативно влияет на уровень качества электроэнергии (КЭ) в части несинусоидальности напряжения и тока, что обуславливает наличие дополнительных потерь энергии в элементах систем электроснабжения. В частности наличие высших гармонических составляющих (ВГС) приводит к дополнительным потерям в электрических машинах, достигающие 20 % от уровня суммарных потерь. Также значительный уровень ВГС оказывает непосредственное влияние на срок службы изоляции электрооборудования и приводит к ложным срабатываниям систем релейной защиты.

Известны способы повышения КЭ, включая использование активных и пассивных фильтрокомпенсирующих устройств (ФКУ). Основным недостатком пассивных ФКУ является ограниченная эффективность в части снижения уровня несинусоидальности при вариации спектра ВГС. Активные ФКУ также имеют ряд недостатков, среди которых необходимо выделить возможность наличия резонансных явлений при совместной работе с конденсаторными установками компенсации реактивной мощности. Известны исследования, где показана ограниченная способность активных ФКУ осуществлять компенсацию ВГС в условиях систем распределенной генерации и комбинированного электроснабжения. Гибридные ФКУ (ГФУ), сочетающие достоинства активных и пассивных ФКУ, обладают более широким набором реализуемых функций по повышению КЭ в части ВГС тока и напряжения, отклонений напряжения, коррекции коэффициента мощности. Учитывая современную тенденцию внедрения распределенной генерации в системах электроснабжения предприятий нефтедобычи, существует необходимость наличия многофункциональных технических средств повышения КЭ в условиях вариации параметров питающей сети и подключенной нагрузки, к каковым относятся ГФУ. Актуальность задачи повышения КЭ в электрических сетях с НН посредством активных, пассивных и гибридных ФКУ обоснована в многочисленных научных трудах

отечественных и зарубежных ученых (Абрамович Б.Н., Розанов Ю.К., Тонкаль В.Е., Жежеленко И.В., Карташев И.И., Пронин М.В., Шклярский Я.Э., *H. Akagi, P. Tenti, P. Salmeron, S. P. Litran, M. Popescu* и др.).

Таким образом, задача повышения КЭ в электротехнических комплексах промышленных предприятий, включая предприятия нефтедобычи, являющихся наиболее крупными потребителями электроэнергии с НН, посредством обоснованного применения ГФУ является актуальной.

Степень проработанности темы исследования

В работах проф. Розанова Ю.К. рассмотрены основные топологии ГФУ без подробного анализа влияния параметров источника и нагрузки на степень эффективности повышения КЭ данными ГФУ. Усовершенствованы методы управления силовыми полупроводниковыми элементами. В проводимых исследованиях данный анализ и методы являются основными этапами выбора и обоснования структуры ГФУ.

В работах проф. Абрамовича Б.Н. рассматривается применение активных и пассивных ФКУ, эффективность компенсации ими ВГС в условиях предприятий минерально-сырьевого комплекса. В рамках проводимых исследований активные и пассивные ФКУ служат основой для разработки ГФУ.

В работах Мещерякова В.М. и Хабибуллина М.М. предлагается внедрение активных ФКУ с общим звеном постоянного тока у активной части и НН. Однако не рассматривается возможность применения такого решения для реализации бесперебойного электропитания и ГФУ. В рамках исследований предлагается внедрение ГФУ на основе активного ФКУ с общим звеном постоянного тока.

В работах Пронина М.В. разработана методология моделирования активных преобразователей путем разбиения схем силовых преобразователей на подсхемы, которая лежит в основе проводимых исследований, а также влияние ВГС на потери в электротехнических комплексах.

Работы *H. Akagi, P. Tenti, P. Salmeron, S. P. Litran, M. Popescu* рассматриваются различные топологии ГФУ и методы управления ими, однако, не рассматривается влияние вариации параметров системы электроснабжения и узла нагрузки на эффективность повышения КЭ ГФУ. В проводимых исследованиях рассматривается и ана-

лизируется воздействие параметров источника и нагрузки на степень компенсации ВГС, коррекции коэффициента мощности и отклонений напряжения ГФУ различной структуры.

Объект исследования – электротехнические комплексы предприятий нефтедобычи.

Предмет исследования – структуры и алгоритмы работы ГФУ.

Цель работы – повышение КЭ в электротехнических комплексах нефтедобывающих предприятий путем снижения уровня ВГС тока и напряжения с помощью ГФУ.

Идея работы. Повышение уровня КЭ, срока службы электрооборудования, минимизация дополнительных потерь в электротехнических комплексах нефтедобывающих предприятий достигается путем выбора и обоснования структуры и системы управления ГФУ на основе активных и пассивных ФКУ.

Основные задачи исследования:

1. Анализ основных источников ВГС и их влияние на эффективность функционирования электротехнических комплексов предприятий нефтедобычи.

2. Анализ основных типов, структур и систем управления активных и пассивных ФКУ для компенсации ВГС тока и напряжения с целью обоснования их применения в составе ГФУ.

3. Определение основных структур ГФУ и разработка их математического описания для условий электротехнических комплексов нефтедобычи.

4. Выявление зависимостей изменения показателей КЭ в части ВГС, отклонений напряжения и коэффициента мощности от параметров питающей сети и подключенной нагрузки для обоснованного выбора структуры и основных параметров ГФУ в заданных условиях. Определение зависимостей показателей КЭ в части уровня ВГС от зоны нечувствительности релейных регуляторов системы управления ГФУ для выбора требуемой степени компенсации ВГС с учетом минимизации тепловых потерь в силовой части ГФУ.

5. Разработка алгоритма выбора структуры, системы управления ГФУ, исходя из требуемой степени повышения КЭ, параметров питающей сети и подключенной нагрузки. Техническая реализация ГФУ и определение экономического эффекта от их внедрения в электротехнические комплексы предприятий нефтедобычи.

Научная новизна работы

Выявлены закономерности формирования структуры из совокупности активных и пассивных фильтров, исходя из требуемой степени коррекции показателей качества электроэнергии не ниже требований ГОСТ 32144-2013, включая уровень несинусоидальности и отклонения напряжения, что позволяет осуществить обоснованный выбор конфигурации гибридных фильтрокомпенсирующих устройств при вариации параметров источника электроснабжения и подключенной нагрузки.

Обоснована структура электротехнического комплекса на основе параллельного активного фильтра, звено постоянного тока которого совмещено с преобразователем частоты нелинейной нагрузки, отличающаяся наличием активно-емкостного пассивного фильтра, установленного на выходе активной части, и позволяющая обеспечить бесперебойное электроснабжение нелинейной нагрузки в случае отказа выпрямительного устройства или коротких замыканий на его входе для безаварийного завершения технологического процесса.

Теоретическая и практическая значимость работы

Результаты исследований могут быть использованы при разработке, организации и проведении мероприятий по повышению КЭ в части уровня ВГС, отклонений напряжения, величины коэффициента мощности в действующих электротехнических комплексах предприятий нефтедобычи.

Результаты работы могут быть использованы в учебном процессе при реализации специальных образовательных программ.

Методология и методы исследований

Исследования основывались на результатах анализа теоретических и экспериментальных данных в области качества электрической энергии и электромагнитной совместимости электрооборудования для условий электротехнических комплексов нефтедобычи. Экспериментальные исследования выполнялись с использованием имитационного моделирования электротехнических комплексов в среде *Simulink* программы *Matlab*, а также с использованием результатов заводских стендовых испытаний. Теоретические исследования осуществлялись с применением методов фазовых преобразований, теории преобразовательной техники, математического моделирова-

ния и анализа электромагнитных процессов в электротехнических комплексах и системах.

На защиту выносятся следующие положения:

1. Повышение качества электрической энергии в электротехнических комплексах нефтедобывающих предприятий, включающих распределенную генерацию, до уровня не ниже требований ГОСТ 32144-2013 в части уровня высших гармоник и отклонений напряжения, следует осуществлять совокупностью пассивных, параллельных и последовательных активных фильтров с системой управления независимо от видов и характеристик подключенной нелинейной нагрузки и источника электроснабжения.

2. Разработанный электротехнический комплекс на основе параллельного активного фильтра со звеном постоянного тока, являющимся общим для нелинейной нагрузки и фильтра, отличающийся наличием на выходе активной части резистивно-емкостного пассивного фильтра, блоков фазовых преобразований в составе системы управления, позволяет повысить качество электрической энергии по заданной совокупности показателей, а также обеспечить бесперебойное питание при аварийных режимах в выпрямительном устройстве нелинейной нагрузки на время восстановления электроснабжения, в том числе в условиях распределенной генерации.

Степень достоверности и апробация результатов работы

Степень достоверности научных положений, выводов и рекомендаций подтверждается корректным применением известных теорий и методов силовой преобразовательной техники, математического моделирования электротехнических комплексов, а также сходимостью теоретических и экспериментальных исследований с погрешностью не более 15%.

Основные положения обсуждались на заседаниях кафедры электроэнергетики и электромеханики Горного университета, докладывались и получили положительную оценку на 5 конференциях и семинарах: (г. Санкт-Петербург, 2017 г.; г. Краков, 2017 г.; г. Фрайберг, 2018 г.; г. Санкт-Петербург 2019 г. (две конференции)).

Личный вклад автора

Сформулированы цели, задачи исследований, защищаемые научные положения. Непосредственное участие во всех этапах исследований в рамках поставленных целей и задач. Созданы имитационные модели электротехнических комплексов предприятий неф-

тедобычи с НН и различными видами ГФУ, позволяющие выявить закономерности изменения степени изменения показателей КЭ. Разработан алгоритм выбора структуры ГФУ для условий электротехнических комплексов нефтедобычи. Выявлены закономерности, позволяющие адекватно оценить степень эффективности ГФУ в условиях электротехнических комплексов нефтедобычи. Разработаны рекомендации по выбору различных структур ГФУ.

Публикации

Результаты диссертационной работы в достаточной степени освещены в 13 печатных работах, в том числе в 4 статьях – в изданиях из перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (далее – Перечень ВАК), в 9 статьях – в изданиях, входящих в международные базы данных и системы цитирования *Scopus*, *Web of Science*; получены 1 патент на изобретение и 3 патента на полезные модели.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из оглавления, введения, пяти глав, с выводами по каждой из них, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы, включающего 131 наименование. Диссертация изложена на 146 страницах машинописного текста, содержит 88 рисунков и 19 таблиц, 2 приложения.

Благодарности

Автор выражает глубокую благодарность и искреннюю признательность научному консультанту, доктору технических наук, профессору, профессору кафедры электроэнергетики и электромеханики Абрамовичу Б.Н. за помощь в подготовке и проведении научных исследований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении представлено общее описание работы, обоснована актуальность, сформулированы цель и задачи исследований.

В первой главе представлен анализ причин возникновения ВГС и их влияние на эффективность функционирования электротехнических комплексов предприятий нефтедобычи, а также стандартов в области КЭ.

Выявлено, что ВГС тока и напряжения оказывают негативное влияние на электроустановки, подключенные к питающим сетям

нефтепромыслов. Негативные воздействия ВГС зависят от типа подключенной нагрузки, ее мощности, режима работы, и разделяются на два типа: мгновенные и длительные воздействия. Длительные воздействия связаны с повышением температуры обмоток и токоведущих частей электрооборудования.

Несинусоидальность напряжения и тока обуславливает дополнительные потери и нагрев оборудования, а также ускоренное старение изоляции и, кроме того, негативно сказывается на функционировании электрооборудования.

Основными мгновенными воздействиями ВГС тока и напряжения являются: повышенные вибрация и шум при работе трансформаторов и вращающихся электрических машин, а также помехи при работе систем защиты, управления, автоматики и связи.

Во второй главе проведен анализ основных типов, структур и систем управления активных и пассивных ФКУ для компенсации ВГС тока и напряжения.

Обоснованное применение пассивных ФКУ приводит значения суммарного коэффициента ВГС по напряжению k_U и коэффициенты отдельных ВГС напряжения k_{U5} и k_{U7} в соответствие с требованиями ГОСТ 32144-2013. За счет компенсации реактивной мощности снижается потребление полной мощности, следовательно, происходит разгрузка питающего трансформатора и линий от реактивных токов, поэтому увеличивается его срок службы и снижаются потери энергии. Существенным недостатком применения пассивных ФКУ является ограниченная по частотному диапазону фильтрация ВГС тока и напряжения.

Активный фильтр в зависимости от структуры и алгоритма управления обеспечивает выполнение следующих функций: подавление ВГС тока и напряжения; коррекцию коэффициента мощности; снижение отклонений напряжения; коррекцию несимметрии тока и напряжения. Основным недостатком классических активных фильтров (без дополнительных ФКУ) является их высокая стоимость.

По результатам исследований установлено, что для управления ПАФ в рамках ГФУ целесообразно использование фазовых преобразований Парка-Кларк, а для ПСАФ – Фортескью.

Формирование опорного сигнала тока для управления ПАФ осуществляется за счет перехода из трехфазной системы координат ABC в двухфазную α - β определяются следующим образом (1):

$$u_\alpha = u_a - \frac{u_b + u_c}{2}; \quad u_\beta = \frac{\sqrt{3}}{2}(u_b - u_c), \quad (1)$$

где u_a, u_b, u_c - измеренные фазные напряжения искаженной сети; u_α, u_β - преобразованные фазные напряжения искаженной сети в системе координат α - β . Фазовые преобразования позволяют определить угол ϕ между изображающим вектором искаженного напряжения сети и его проекцией на ось α . Характер изменения и величина угла ϕ содержит информацию об уровне искажения, присутствующих ВГС и фазовом сдвиге напряжения и тока компенсируемой сети.

Сигналы u_α, u_β используются системой фазовой автоподстройки частоты для синхронизации компенсационного тока ПАФ с питающей сетью. Синхронизация выполняется по значению угла ϕ , который определяется следующим образом (2):

$$\cos\phi = u_\alpha/u_{sm}; \quad \sin\phi = u_\beta/u_{sm}; \quad u_{sm} = \sqrt{u_\alpha^2 + u_\beta^2}. \quad (2)$$

После фазовой синхронизации скорректированные значения $\cos\phi'$ и $\sin\phi'$, соответствующие синусоидальной форме кривых напряжений сети, умножаются на сигнал задания по току i_3 от регулятора напряжения накопительного конденсатора ПАФ определяется следующим образом (3):

$$i_{3\alpha} = i_3 \cos\phi'; \quad i_{3\beta} = i_3 \sin\phi', \quad (3)$$

в результате чего получают сигналы задания по току $i_{3\alpha}$ и $i_{3\beta}$ в системе координат α - β , синфазного с напряжением сети.

Формирование опорного сигнала напряжения для управления ПСАФ осуществляется за счет выделения симметричных составляющих.

В третьей главе определены основные структуры ГФУ и разработка их математического описания для условий электротехнических комплексов нефтедобычи.

Главная особенность ГФУ - это сочетание следующих достоинств пассивных и активных фильтров:

1. Уменьшение установленной мощности силовой части активного фильтра, и, как следствие, снижение массогабаритной части и стоимости ГФУ.
2. Повышение степени компенсации уровня ВГС с учетом требований ГОСТ 32144-2013 по сравнению с одиночными пассивным ФКУ при изменении режимов работы НН.

3. Снижение вероятности появления резонансных явлений в компенсируемой сети ГФУ по сравнению с одиночными пассивными ФКУ при наличии КУ компенсации реактивной мощности по частоте основной составляющей.

4. Адаптивность структуры ГФУ, путем включения или отключения активной и пассивной части для обеспечения заданной степени компенсации ВГС в соответствии с требованиями ГОСТ 32144-2013 в зависимости от изменений характеристик НН и питающей сети.

5. ГФУ возможно использовать в системах электроснабжения с уже установленными пассивными ФКУ при дополнительной настройке параметров ГФУ.

Существует два способа компенсации ВГС с помощью ГФУ, исходя из типа активной части:

1. Компенсация ВГС управляемым источником тока с применением параллельного активного фильтра. При этом ВГС тока подавляются в точке подключения ПАФ. На характер потребления ВГС НН данное решение влияния не оказывает, как и на наличие ВГС напряжения со стороны предвключенной сети (параллельная компенсация).

2. Компенсация ВГС напряжения управляемым источником напряжения за счет применения ПСАФ, на характер потребления ВГС НН данное решение влияния не оказывает (последовательная компенсация).

В соответствии с различными теориями и расширением способов и методов активной фильтрации ВГС появляется возможность управления параметрами пассивной части ГФУ. Целесообразность применения ГФУ становится возможной по ряду причин:

1. Применение отдельных активных ФКУ с номинальными параметрами силовых элементов, рассчитанных на полную мощность НН, ведет к увеличению стоимости такого решения.

2. Пассивные ФКУ обладают ограниченной способностью компенсации высших гармоник тока и напряжения.

По результатам исследований определены две основные структуры ГФУ на основе ПАФ и ПСАФ для условий электротехнических комплексов нефтедобычи, представленные на рисунках 1а и 1б.

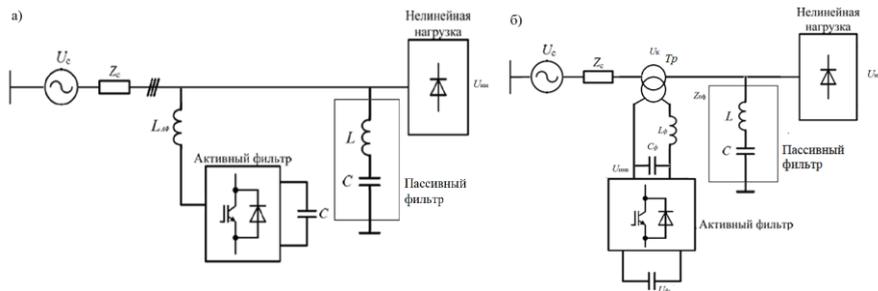


Рисунок 1 - Основные структуры ГФУ: а – на основе ПАФ и б – ПСАФ для условий электротехнических комплексов нефтедобычи

В четвертой главе приведены результаты имитационного моделирования ГФУ в условиях электротехнических комплексов нефтедобычи с учетом влияния различных факторов.

Имитационная модель ГФУ на основе ПАФ, разработанная в среде Simulink системы Matlab, представлена на рисунке 2.

ГФУ на основе ПАФ осуществляет компенсацию реактивной мощности, что позволяет максимально приблизить величину коэффициента мощности k_M на частоте основной составляющей к 1.

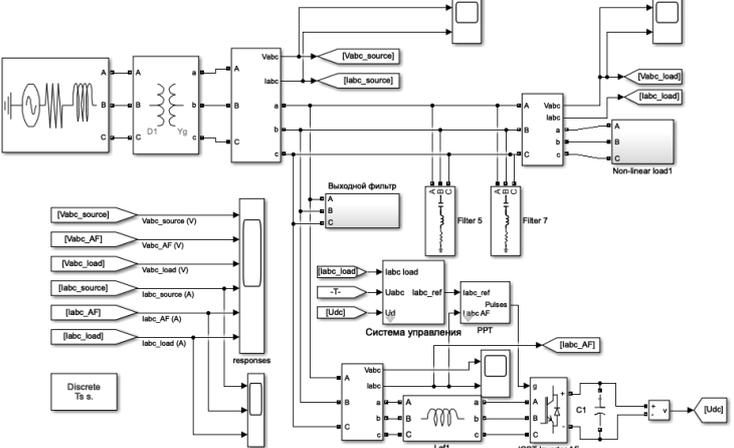


Рисунок 2 – Имитационная модель ГФУ на основе ПАФ

На рисунке 3 приведены полученные по результатам моделирования закономерности влияния загрузки трансформатора в виде

соотношения полной мощности НН к полной мощности трансформатора $k_3 = S_{\text{НН}}/S_{\text{ТР}}$ на суммарные коэффициенты гармонических составляющих по току и напряжению, а также величину k_M .

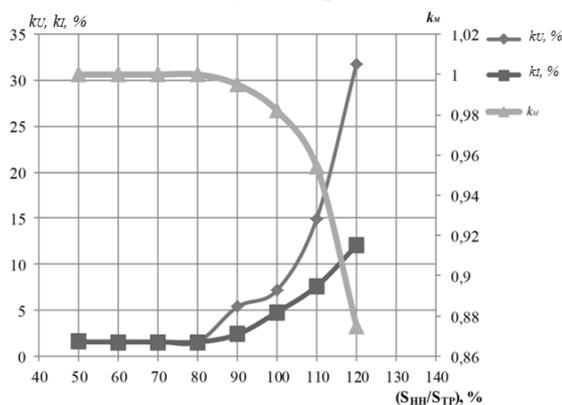


Рисунок 3 – Зависимости влияния загрузки трансформатора на k_U , k_I и k_M

По результатам моделирования были получены степени снижения коэффициентов, характеризующих наличие высших гармонических составляющих в сети до и после применения ФКУ, которые представлены в таблице 1. Степень снижения на примере k_U и k_I определяется следующим образом (4):

$$\Delta k_U = \frac{k_{U1} - k_{U2}}{k_{U1}} 100\%, \quad \Delta k_I = \frac{k_{I1} - k_{I2}}{k_{I1}} 100\%, \quad (4)$$

где k_{U1} , k_{I1} , - коэффициенты до применения устройства компенсации; k_{U2} , k_{I2} , - коэффициенты после применения устройства компенсации.

Степени снижения Δk_{I5} , Δk_{U5} , Δk_{I7} , Δk_{U7} , ΔU , ΔI определяются аналогичным образом.

Таблица 1 – Степени снижения уровней ВГС, отклонение напряжения, тока и коэффициента мощности до и после применения ГФУ на базе ПАФ для $k_3 = 0,7$

Δk_3 , %	Δk_U , %	Δk_{I5} , %	Δk_{U5} , %	Δk_{I7} , %	Δk_{U7} , %	ΔU , %	ΔI , %	Δk_M , %
97	86	93	83	92	83	5,1	0,4	2,6

Таким образом, при разработке имитационных моделей ГФУ следует учитывать наличие уровня ВГС тока и напряжения в СЭС предприятия нефтедобычи и применять ГФУ на базе ПАФ с системой управления, основанной на фазовых преобразованиях и на основе ПСАФ для эффективной компенсации ВГС напряжения.

Таким образом, выявлена возможность ГФУ на основе ПАФ реализовывать несколько функций: компенсация ВГС тока и напряжения, коррекция коэффициента мощности сети.

Имитационная модель ГФУ на основе ПСАФ, разработанная в среде *Simulink* системы *Matlab*, представлена на рисунке 4.

По результатам моделирования были получены степени снижения уровня гармонических искажений по напряжению, представленные в таблице 2.

Таблица 2 – Степени снижения высших гармонических составляющих по напряжению, отклонение напряжения до и после применения ГФУ на базе ПСАФ

$\Delta k_{U_5}, \%$	$\Delta k_{U_7}, \%$	$\Delta k_{U_{17}}, \%$	$\Delta U, \%$
85	76,5	73	5,1

По результатам моделирования установлено, что ГФУ с последовательной активной частью способно создавать добавку напряжения для нормализации уровня сетевого напряжения в случае его отклонения из-за подключения нагрузки в условиях протяженных линий электропередачи.

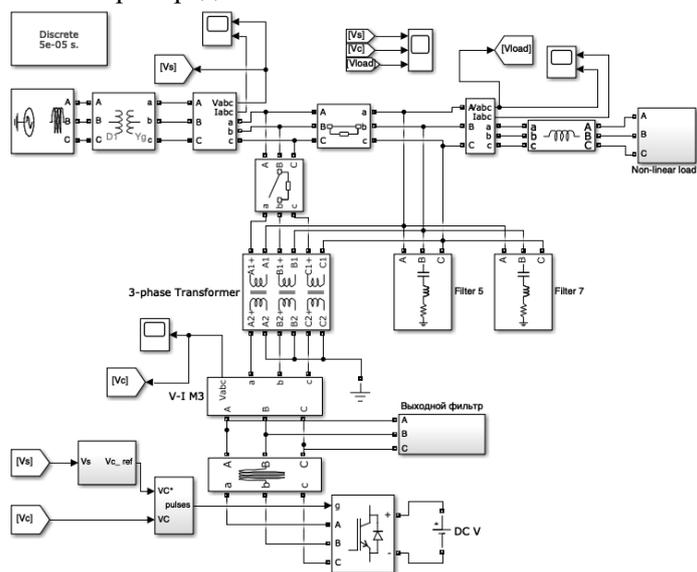


Рисунок 4 – Модель ГФУ на основе ПСАФ

Помимо этого, ГФУ на основе ПСАФ одновременно с компенсацией провалов напряжения способно подавлять ВГС напряжения, что также подтверждает многофункциональность подобного устройства. При этом уровень гармоник напряжения снижается на 85%.

При комбинированном использовании ГФУ на основе ПАФ и ПСАФ образуются сложные электротехнические комплексы автоматизированного повышения КЭ.

Разработана структура ГФУ с общим звеном постоянного тока (ОЗПТ). При этом для повышения достоверности результатов НИ представлена в виде системы частотно-регулируемого асинхронного электропривода с векторной системой управления, что является наиболее распространенным случаем в промышленных условиях.

При моделировании ГФУ с ОЗПТ в автономной системе электроснабжения был проведен опыт короткого замыкания на зажимах выпрямителя преобразователя частоты, что позволило подтвердить возможность бесперебойного электроснабжения нагрузки на время безаварийного завершения технологического процесса за счет ГФУ с ОЗПТ. На рисунке 5 представлена математическая модель ГФУ с ОЗПТ.

По результатам моделирования установлено, что ГФУ за счет настройки системы управления осуществляет питание асинхронного двигателя, минуя диодный выпрямитель. Питание привода осуществляется через автономный инвертор ГФУ, при этом в звене постоянного тока поддерживается заданный уровень напряжения, обеспечивающий работу асинхронного двигателя.

Разработанная система управления ГФУ обеспечивает функционирование асинхронного двигателя, выступая в данном случае как источник бесперебойного питания с компенсацией высших гармоник по току и напряжению в системе электроснабжения предприятия нефтедобычи.

В таблице 3 приведены результаты применения ГФУ в виде степеней снижения соответствующих коэффициентов.

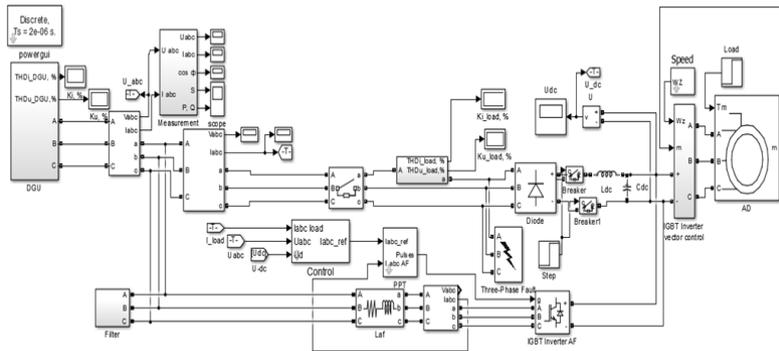


Рисунок 5 – Модель ГФУ с ОЗПТ при коротком замыкании на зажимах НН

Таблица 3 – Степени снижения ВГС напряжения и тока по результатам применения ГФУ с ОЗПТ

$\Delta k_I, \%$	$\Delta k_{I5}, \%$	$\Delta k_{IT}, \%$	$\Delta k_U, \%$	$\Delta k_{U5}, \%$	$\Delta k_{UT}, \%$
98,1	99,4	99,8	91,1	99,4	99,8

Результаты моделирования показывали, что показатели КЭ по результатам применения ГФУ в части ВГС, отклонений напряжения и несимметрии соответствуют ГОСТ 32144-2013. В частности значения k_I и k_U не превышают 2 % и 5 % соответственно.

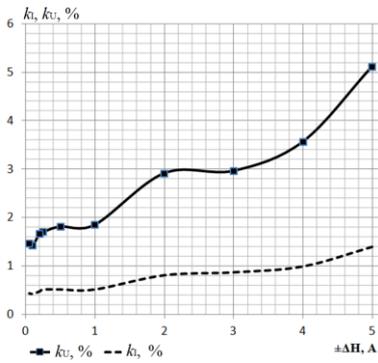


Рисунок 6 – График зависимости коэффициентов k_U и k_I от ΔI

Зависимости суммарного коэффициента гармонических составляющих по току и напряжению от величины зоны нечувствительности релейных регуляторов тока ΔI системы управления ПАФ в составе ГФУ представлены на рисунке 6.

Выявленные зависимости позволяют определить значение зоны нечувствительности релейных регуляторов по критериям требуемого уровня снижения ВГС тока и напряжения, минимизации потерь энергии и увеличения КПД

в силовых ключах активной части ГФУ, а также уровню быстродействия системы управления ГФУ. Таким образом, разработанное ГФУ с ОЗПТ обеспечивает снижение ВГС, как по току, так и по напряжению; обеспечивает компенсацию реактивной мощности, потребляемой из сети, реализует бесперебойное электроснабжение ответственной НН.

В пятой главе разработан алгоритм управления ГФУ, приведена техническая реализация ГФУ и определен экономический расчет от внедрения ГФУ в электротехнические комплексы предприятий нефтедобычи. Разработанный алгоритм управления ГФУ приведен на рисунке 7.

Расчет потенциального экономического эффекта от внедрения ГФУ, содержащего параллельный активный и пассивные фильтры, производился для условий предприятий нефтедобычи и показал, что индекс доходности, определяемый отношением прибыли к затратам, составляет 1,3; а срок окупаемости ГФУ составляет 4 года.



*ПКЭ – показатели качества электроэнергии

Рисунок 7 – Алгоритм выбора структуры ГФУ

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация представляет собой законченную научно-квалификационную работу, в которой предлагается новое решение актуальной научно-технической задачи повышения качества электрической энергии в электротехнических комплексах предприятий нефтедобычи путем обоснованного применения гибридных фильтрокомпенсирующих устройств для компенсации высших гармоник.

По результатам выполнения диссертационной работы сделаны следующие выводы:

1. Определены основные топологии гибридных фильтрокомпенсирующих устройств, применение которых целесообразно в условиях электротехнических комплексов нефтедобывающих предприятий, исходя из уровня качества электроэнергии по заданным показателям, включая уровень высших гармоник напряжения и тока, отклонения напряжения, коэффициент мощности.

2. Разработаны математические и имитационные модели гибридных фильтрокомпенсирующих устройств в условиях электротехнических комплексов нефтедобычи с нелинейной нагрузки, учитывающие влияние параметров питающей сети и подключенной нагрузки на работу данных устройств.

3. Средствами имитационного моделирования выявлены зависимости степени изменения показателей качества электрической энергии в части уровня высших гармоник напряжения и тока, отклонения напряжения и коэффициента мощности от структуры гибридных фильтрокомпенсирующих устройств на базе параллельных и последовательных активных фильтров с учетом параметров питающей сети и подключенной нагрузки. В частности, установлено, что гибридное фильтрокомпенсирующее устройство на базе параллельного активного фильтра позволяет снизить уровень высших гармоник тока и напряжения более чем на 90 и 70 % соответственно, а на основе последовательного активного фильтра – снизить уровень высших гармоник напряжения более чем на 80 %.

4. Разработана и запатентована структура гибридного электротехнического комплекса на основе параллельного активного фильтра, звено постоянного тока которого совмещено с преобразователем частоты нелинейной нагрузки, отличающаяся наличием активно-емкостного пассивного фильтра, установленного на выходе активной части, и позволяющая обеспечить бесперебойное электропитание нелинейной нагрузки в случае отказа выпрямительного устройства или коротких замыканий на его входе для безаварийного завершения технологического процесса (патенты № 2619919, № 176107, № 185875).

5. Установлено, что гибридное фильтрокомпенсирующее устройство на базе параллельного активного фильтра с выходным пассивным фильтром и общим с нелинейной нагрузкой звеном по-

стоянного тока позволяет обеспечить максимальную степень снижения высших гармоник тока и напряжения (в 5 и более раз) при соотношении мощности нелинейной нагрузки к мощности питающего трансформатора до 80%.

6. Разработан алгоритм управления гибридными фильтрокомпенсирующими устройствами в условиях электротехнических комплексов нефтедобычи, предусматривающий выбор структуры и системы управления устройством в условиях вариации параметров питающей сети и подключенной нагрузки.

7. Выполнено внедрение результатов исследований в части структур и алгоритмов управления гибридными фильтрокомпенсирующими устройствами в условиях электрических сетей АО «ОЭЗ ШТТ «Алабуга» и технической реализации данных устройств в ООО «Энергонефть ЮГРА», о чем имеются соответствующие акты внедрения.

8. Проведена экономическая оценка эффективности внедрения гибридного фильтрокомпенсирующего устройства в электротехнических комплексах предприятий нефтедобычи в условиях автономных и централизованных систем электроснабжения.

9. Определены направления дальнейших исследований по повышению качества электрической энергии в условиях предприятий нефтедобычи за счет модернизации алгоритмов автоматического управления гибридными фильтрокомпенсирующими устройствами.

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях из Перечня ВАК:

1. Зимин Р.Ю. Оценка эффективности гибридных систем коррекции формы кривых тока и напряжения в электрических сетях с распределенной генерацией / Абрамович Б.Н., Сычев Ю.А., Зимин Р.Ю. // Промышленная энергетика. – 2015. – № 8. – С.49-53.

2. Зимин Р.Ю. Оценка эффективности гибридного электротехнического комплекса для коррекции уровня несинусоидальности в автономных системах электроснабжения нефтепромыслов/ Абрамович Б.Н., Сычев Ю.А., Зимин Р.Ю. // Промышленная энергетика. – 2018. – № 1. – С.45-54.

3. Зимин Р.Ю. Гибридная система коррекции уровня высших гармоник и обеспечение бесперебойного электроснабжения ответст-

венных потребителей нефтедобычи/ Абрамович Б.Н., Сычев Ю.А., Зимин Р.Ю. // Промышленная энергетика. – 2018. – № 11. – С.50-57.
Публикации в изданиях, входящих в международные базы данных и системы цитирования Scopus и Web of Science:

4. Zimin R. Y. Hybrid harmonic compensation device adapted for variable speed drive system / Abramovich B. N., Sychev Y. A., Zimin R.Y. // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2017. – № 87 (3). – pp. 32002 – 32002.

5. Zimin R.Yu. 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. – 2018. – Volume 194. – Issue 5. – 052001.

6. Zimin R.Y. 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. – 2018. – Volume 1. - 8602638.

Патенты:

7. 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.

8. 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.

9. 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.