

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

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

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
кандидат технических наук, доцент
Сычев Ю.А.

Санкт-Петербург – 2020

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	6
ГЛАВА 1 НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ В ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСАХ НЕФТЕДОБЫВАЮЩИХ ПРЕДПРИЯТИЙ	13
1.1 Общие требования к качеству электрической энергии	13
1.2 Особенности и основные положения стандартов качества электроэнергии	14
1.3 Сравнительный анализ стандартов качества электрической энергии по показателям и нормам.....	16
1.4 Причины несоответствия показателей качества электроэнергии установленным нормам	17
1.5 Влияние высших гармоник на режим работы электрооборудования.....	25
1.6 Вводы к главе 1	27
ГЛАВА 2 АНАЛИЗ ОСНОВНЫХ ТИПОВ, СТРУКТУР И СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ АКТИВНЫХ И ПАССИВНЫХ ФИЛЬТРОКОМПЕНСИРУЮЩИХ УСТРОЙСТВ	29
2.1 Пассивная фильтрация высших гармонических составляющих.....	29
2.2 Активная фильтрация высших гармоник	33
2.3 Способы управления активными фильтрами.....	38
2.4 Выводы к главе 2	46
ГЛАВА 3 ОСНОВНЫЕ СТРУКТУРЫ И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ГИБРИДНЫХ ФИЛЬТРОКОМПЕНСИРУЮЩИХ УСТРОЙСТВ ДЛЯ КОМПЕНСАЦИИ ВЫСШИХ ГАРМОНИК	48
3.1 Общие положения	48
3.2 Основные структуры и классификация гибридных фильтрокомпенсирующих устройств.....	49
3.2.1 Гибридная структура на основе последовательного активного и параллельного пассивного фильтров	49
3.2.2 Гибридная структура на основе последовательного активного и параллельного пассивного фильтров	51

3.2.3 Гибридная структура на основе параллельного активного и параллельного пассивного фильтров для компенсации высших гармоник тока	53
3.3 Математические модели гибридных фильтрокомпенсирующих устройств.....	54
3.3.1 Математическая модель гибридной структуры на базе последовательного активного фильтрокомпенсирующего устройства с пассивными фильтрами	54
3.3.2 Математическая модель гибридного фильтрокомпенсирующего устройства на основе последовательного активного и параллельно подключенного пассивного фильтрокомпенсирующих устройств	56
3.3.3 Математическая модель гибридной структуры на основе параллельного активного и пассивного фильтров, соединенных параллельно.....	58
3.4 Принципы регулирования гибридных фильтрокомпенсирующих устройств..	61
3.5 Взаимосвязь между функциональными возможностями гибридного фильтра, его структурой и особенностями реализации системы автоматического управления	63
3.6 Выводы к главе 3	65
ГЛАВА 4 ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИБРИДНЫХ ФИЛЬТРОКОМПЕНСИРУЮЩИХ УСТРОЙСТВ В УСЛОВИЯХ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ НЕФТЕДОБЫЧИ	66
4.1 Общие положения	66
4.2 Пассивная фильтрация высших гармонических составляющих в системах электроснабжения предприятий нефтедобычи	66
4.3 Имитационное моделирование активных фильтрокомпенсирующих устройств.....	72
4.4 Имитационное моделирование структур гибридных фильтрокомпенсирующих устройств.....	80
4.4.1 Моделирование гибридной структуры на основе параллельного активного фильтра.....	80
4.4.2 Моделирование гибридной структуры на основе последовательного активного фильтра.....	84

4.4.3 Моделирование гибридного фильтрокомпенсирующего устройства на основе параллельного активного фильтра с частотно-регулируемым электроприводом..	87
4.5 Оценка влияния различных факторов на эффективность работы гибридного фильтрокомпенсирующего устройства.....	91
4.6. Имитационное моделирование электротехнического комплекса в условиях автономных систем электроснабжения.....	95
4.6.1. Математическая модель автономной электроэнергетической системы	95
4.6.2 Система управления электротехническим комплексом.....	101
4.7 Выводы к главе 4.....	110
ГЛАВА 5 АЛГОРИТМ УПРАВЛЕНИЯ ГИБРИДНЫМИ ФИЛЬТРОКОМПЕНСИРУЮЩИМИ УСТРОЙСТВАМИ, ИХ ТЕХНИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ И ЭКОНОМИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ ОТ ВНЕДРЕНИЯ В СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ НЕФТЕДОБЫЧИ	112
5.1 Алгоритм управления гибридными фильтрокомпенсирующими устройствами	112
5.2 Техническая реализация гибридных фильтрокомпенсирующих устройств... 113	113
5.2.1 Устройство подавления высших гармоник и коррекции коэффициента мощности сети	113
5.2.2 Устройство гибридной компенсации высших гармоник	115
5.2.3 Устройство гибридной компенсации высших гармоник, адаптированное к электроприводу переменного тока	116
5.3 Расчет экономического эффекта от внедрения гибридного фильтрокомпенсирующего устройства.....	117
5.4 Выводы к главе 5.....	124
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	125
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ.....	128
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	129
ПРИЛОЖЕНИЕ А Акт об использовании материалов диссертации в АО «Особая экономическая зона промышленно-производственного типа «Алабуга».....	145

ПРИЛОЖЕНИЕ Б Акт внедрения результатов исследования диссертации в электротехнических комплексах производственных объектов ООО «Энергонефть Югра».....	146
---	-----

ВВЕДЕНИЕ

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 устройствами 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 предприятий 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 [65-77,113-114, 119-122].

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 [1-27,88-95].

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 электроснабжения и ГФУ. В рамках исследований предлагается внедрение ГФУ на основе активного ФКУ с общим звеном постоянного тока [47-55,116,117].

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 [59-64,118].

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 анализируется воздействие параметров источника и нагрузки на степень компенсации ВГС, коррекции коэффициента мощности и отклонений напряжения ГФУ различной структуры [96-99,101,103-106,115,124,126-128].

Объект исследования – электротехнические комплексы предприятий нефтедобычи.

Предмет исследования – структуры и алгоритмы гибридного фильтрокомпенсирующего устройства.

Цель работы – повышение качества электрической энергии в электротехнических комплексах нефтедобывающих предприятий путем снижения уровня высших гармоник тока и напряжения с помощью гибридных фильтрокомпенсирующих устройств.

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.

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 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 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 диссертационных исследований могут применяться в учебном процессе при осуществлении образовательной деятельности при реализации специальных дисциплин учебного плана.

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

моделирования и анализа электромагнитных процессов в электротехнических комплексах и системах.

Соответствие паспорту специальности

Работа соответствует паспорту специальности 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы (технические науки) – п.3 Разработка, структурный и параметрический синтез электротехнических комплексов и систем, их оптимизация, а также разработка алгоритмов эффективного управления и п.4 Исследование работоспособности и качества функционирования электротехнических комплексов и систем в различных режимах, при разнообразных внешних воздействиях.

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 параметров и характеристик подключенной 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 защищаемых научных положений, выводов и рекомендаций подтверждается применением теорий и методов силовой

полупроводниковой и преобразовательной техники, математического и компьютерного моделирования электротехнических комплексов программном пакете *Matlab*, а также сходимостью теоретических исследований и стендовых испытаний с погрешностью не более 15%.

Основные положения диссертационного исследования обсуждались на заседаниях кафедры электроэнергетики и электромеханики Горного университета, освещались и получили положительные отзывы на международных конференциях и симпозиумах: Международной научно-практической конференция «Инновации и перспективы развития горного машиностроения и электромеханики: IPDME-2017», Санкт-Петербург, Россия, 2017; Международной конференции «58 Konferencja Studenckich Kół Naukowych Pionu Górniczego AGH» на базе Краковской горно-металлургической академии, г. Краков, Польша, 7 декабря 2017 г.; 69 Международной конференции «68TH Bergund Huttenmannischer Tag 2017» на базе Фрайбергской горной академии, г. Фрайберг, Германия, 6-8 июня 2018 г.; «2019 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering», на базе Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), г. Санкт-Петербург, Россия, 28 января 2019 г.; «2019 International Scientific Conference on Energy, Environmental and Construction Engineering» на базе Санкт-Петербургского политехнического университета им. Петра Великого, г. Санкт-Петербург, Россия, 20 ноября 2019 г.

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 нефтедобычи с нелинейной нагрузкой и различными видами гибридных фильтрокомпенсирующих устройств.

Разработан алгоритм выбора структуры гибридного фильтрокомпенсирующего устройства для условий электротехнических комплексов нефтедобычи.

Выявлены закономерности, позволяющие адекватно оценить степень эффективности гибридных фильтрокомпенсирующих устройств в условиях электротехнических комплексов нефтедобычи.

Разработаны рекомендации по выбору различных структур гибридных фильтрокомпенсирующих устройств.

Публикации

Результаты диссертационных исследований в достаточной степени отражены в 13 печатных работах, в том числе в 4 статьях – в издании 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 диссертации

Диссертация состоит из оглавления, введения, пяти глав, с выводами по каждой их 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.

ГЛАВА 1 НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ В ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСАХ НЕФТЕДОБЫВАЮЩИХ ПРЕДПРИЯТИЙ

1.1 Общие требования к качеству электрической энергии

В Российской Федерации существует ГОСТ 32144-2013, который устанавливает показатели, характеристики и действующие нормы качества электроэнергии (КЭ) [41].

Стандарт применяется при выявлении и нормировании показателей КЭ, связанных с такими характеристиками, как частота, уровень, форма кривой и симметрии напряжения в трехфазных СЭС. Действующие показатели качества электрической энергии подвергаются изменениям в связи с различной нагрузкой, влияния кондуктивных электромагнитных помех, создаваемых отдельными видами оборудования, и возникновения неисправностей, вызываемых, главным образом, внешними событиями.

Нормы качества электрической энергии установлены как для централизованных СЭС, так и для изолированных систем энергоснабжения общего назначения, к которым относятся системы распределенной генерации от альтернативных и возобновляемых источников энергии.

В данном стандарте нормы качества электрической не рассматривают в качестве уровней электромагнитной совместимости (ЭМС) для кондуктивных электромагнитных помех и предельных значений кондуктивных электромагнитных помех, создаваемых оборудованием электроустановок потребителей электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения [41].

Стандарт качества ГОСТ 32144-2013 предусматривает перед потребителем обеспечить мероприятия по повышению КЭ, при которых отклонения напряжения питания на выводах электроприемников не превышают установленных допустимых значений.

Для определения отклонения частоты, колебания напряжения, несимметрии напряжения в трехфазных системах электроснабжения необходимо производить

измерения в соответствии с ГОСТ Р 51317.4.30, прибором класса А, при этом маркированные данные не учитывают [43].

Гармонические составляющие в основном генерируются за счет нелинейной нагрузки, которые потребляют несинусоидальный ток. К ним относятся в первую очередь промышленные нагрузки с силовым электронным оборудованием, а также установки, которые используют электрическую дугу.

1.2 Особенности и основные положения стандартов качества электроэнергии

Отечественный стандарт КЭ ГОСТ 32144-2013 имеет общие черты по показателям и нормам качества с Европейским стандартом EN 50160:2010, а также имеет и незначительные отличительные особенности с разделением показателей качества электрической энергии с делением класса напряжения на низкое и высокое.

Стандарт качества EN 50160:2010 устанавливает показатели и нормы качества электроэнергии исходя из количества различных событий или явлений в СЭС.

Рассмотрим его основные положения.

Постоянные события, которые возникают в СЭС с течением времени, и сопровождаются незначительным отклонением электротехнических параметров от номинальной величины, возникают из-за наличия той или иной нагрузки.

Американский стандарт в области КЭ *IEEE Std. 1159-2009* устанавливает показатели и нормы применительно к сетевому напряжению в системах электроснабжения с промышленной частотой 60 Гц [111].

Рассмотрим его основные положения.

Импульсные переходные процессы, как правило, характеризуются временем нарастания и падением напряжения до номинальной величины. Например, когда импульсное напряжение записано в виде 1,2/50 - первое число означает время нарастания напряжения в микросекундах, 50 – время спада напряжения до номинальной величины.

Импульсные напряжения характеризуются по величине (среднеквадратическое значение) и времени действия. Величина импульсных напряжений зависит от состояния и наличия неисправностей в электрической сети. Одиночные импульсы могут достигать значения в 1,8 от номинального значения напряжения в сети.

Наиболее частой причиной возникновения импульсных скачков напряжения служат разряды молний. Импульсные переходные процессы от молний затухают быстрее, чем переходные процессы в момент коммутации сети. Импульсные переходные процессы могут вызвать резонансные явления в электрических сетях.

Провалы напряжения возникают в том случае, если ток на нагрузке снижается менее чем до 0,1 от номинальной величины, в течение периода времени не более 1 минуты. Провалы напряжения могут быть результатом системных сбоев, отказов и выхода из строя электрооборудования .

Перенапряжение – это увеличение напряжения, среднеквадратичное значение которого больше чем 1,1 от номинальной величины. Продолжительность перенапряжения часто более 1 минуты и может быть результатом включения реактивной нагрузки, например, включение конденсаторной батареи.

Пониженное напряжение – это величина напряжения в сети, когда среднеквадратическое значение менее 0,9 номинального напряжения, продолжительность пониженного напряжения может быть более 1 минуты. Обычные значения пониженного напряжения составляют от 0,8 до 0,9 номинального напряжения. Пониженное напряжение является результатом включения или отключения нагрузки, состоящей из конденсаторных батарей. Перегрузка сети также может вызвать пониженного напряжения в СЭС. Пониженное напряжение используется для описания длительных периодов низкого напряжения в электроэнергетической сети.

Основная частота влияет на работу вращающихся механизмов, от которых зависит время эксплуатации электроэнергетического оборудования. Поэтому отклонения частоты строго регламентированы в стандарте *IEEE Std. 1159-2009*.

Отклонение частоты в СЭС от номинального значения 60 Гц зависит чаще всего от подключенной нагрузки. Уровень отклонения частоты и продолжительность зависит от особенностей нагрузки. Так, например, из-за переключения нагрузки изменения частоты происходят почти непрерывно. Изменение частоты является результатом сдвига фаз между напряжением и током, протекающим через подключенную нагрузку [111].

Значительные отклонения частоты, выходящие за пределы допустимых значений нормального режима работы энергосистемы, как правило, вызваны результатом отключения блока большой нагрузки или если происходит отключение генератора электрической энергии переменного тока [42].

Стандарт *IEEE Std. 1159-2009* устанавливает необходимость контроля КЭ. Существует несколько предпосылок производить контроль, главная из которых – это влияние электромагнитных помех на режим работы, срок службы электрооборудования. При этом из-за выхода из строя электрооборудования необходим срочный ремонт или его замена, вследствие чего возникают простои на производстве, что влечет за собой убытки.

1.3 Сравнительный анализ стандартов качества электрической энергии по показателям и нормам

По результатам сравнения российского, американского и европейского стандартов КЭ выявлено, что отечественный ГОСТ 32144-2013 по нормам КЭ в СЭС общего назначения практически идентичен европейскому стандарту EN50160:2010 по всем установленным показателям и нормам. Европейский стандарт во многом послужил основой для создания российского ГОСТа. Соблюдение требований и норм ГОСТ 32144-2013, касающихся всех видов изменения напряжения, для обеспечения эффективной и бесперебойной работы технологических процессов предприятий минерально-сырьевого комплекса требует разработки и внедрения энергоэффективного электрооборудования. Данное требование особо актуально для нефтедобывающих предприятий, которые играют ведущую роль в минерально-сырьевом комплексе РФ.

Американский стандарт качества электрической энергии имеет более жесткие критерии по гармоническим составляющим и достаточно узкий нормируемый диапазон отклонения в частоте питающего напряжения.

Таким образом, с учетом наличия на предприятиях минерально-сырьевого комплекса РФ чувствительных к наличию высших гармоник, провалов и перенапряжений, а также непрерывности технологического цикла потребителей, необходимо принимать эффективные меры и применять специальные технические средства, которые должны соответствовать ведущим мировым стандартам.

1.4 Причины несоответствия показателей качества электроэнергии установленным нормам

В настоящее время на нефтедобывающих предприятиях значительное распространение получили нагрузки, имеющие нелинейную вольт-амперную характеристику (нелинейные нагрузки). К числу таких нелинейных нагрузок относят электротехнические комплексы систем частотно-регулируемые электроприводы. В результате в системе электроснабжения промышленных предприятий возникают нелинейные искажения (несинусоидальные режимы), сопровождающиеся наличием ВГС [30].

При несинусоидальных режимах кривые тока и напряжения представляют собой функциональную зависимость от времени, которую можно выразить в обобщенном виде через ряд Фурье (1.1) [78]:

$$i(t) = \sum_{i=1}^{\infty} S_i f_i(t), u(t) = \sum_{i=1}^{\infty} C_i f_i(t), \quad (1.1)$$

где коэффициенты рядов S_i, C_i определяются через скалярные произведения сигналов $i(t), u(t)$ и базисных векторов $f_i(t)$.

Выражение (1.1) соответствует разложению по ортонормированному базису, поэтому в линейной цепи гармонические колебания можно записать следующим образом (1.2) – (1.3):

$$i(t) = \sum_i \sqrt{2} I_i \sin(i\omega t - \beta_i) \quad (1.2)$$

$$u(t) = \sum_k \sqrt{2} U_k \sin(k\omega t - \alpha_k) \quad (1.3)$$

Таким образом, можно получить функцию мгновенной мощности, являющейся скоростью преобразования энергии (1.4):

$$p(t) = u(t)i(t) = \sum_k \sqrt{2}U_k \sin(k\omega t - \alpha_k) \sum_l \sqrt{2}I_l \sin(l\omega t - \beta_l) \quad (1.4)$$

Теперь можно представить мгновенную мощность суммой трех слагаемых (1.5):

$$p(t) = p_p(t) + p_q(t) + p_d(t), \quad (1.5)$$

где $p_p(t)$ - активная составляющая мгновенной мощности (1.6):

$$p_p(t) = \sum U_k I_l \cos(\beta_k - \alpha_l) [1 - \cos 2(l\omega t - \alpha_l)]; \quad (1.6)$$

$p_q(t)$ – реактивная составляющая мгновенной мощности (1.7.):

$$p_q(t) = \sum U_k I_l \sin(\beta_k - \alpha_l) \sin 2(l\omega t - \alpha_l); \quad (1.7)$$

$p_d(t)$ - искажающая составляющая мгновенной мощности (1.8):

$$p_d(t) = \sum \sum U_k I_l \{ \cos[(l - k)\omega t + \alpha_k - \beta_l] - \cos[(l + k)\omega t - \alpha_k - \beta_l] \}. \quad (1.8)$$

Таким образом, разлагая ток и напряжение в ряд Фурье, а затем перемножая их, будет получена мгновенная мощность. В линейных и нелинейных цепях электрического тока с периодическими несинусоидальными функциями мгновенная мощность имеет одну интегральную характеристику с физическим смыслом – активную мощность. Если говорить о мощности переменного тока, то имеют виду количественную меру – средняя или активная мощность, которая является постоянной величиной и определяет электромагнитную энергию, преобразуемая в теплоту или другой вид энергии (1.9) [111]:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^T p_p(t) dt = \sum U_k I_l \cos(\beta_l - \alpha_k) \quad (1.9)$$

Для стационарных условий мгновенные значения несинусоидального тока и напряжения можно представить (1.10):

$$u = u_1 + u_H \text{ и } i = i_1 + i_H, \quad (1.10)$$

где $u_1 = \sqrt{2}U_1 \sin(\omega t - \alpha_1)$, $i_1 = \sqrt{2}I_1 \sin(\omega t - \beta_1)$,

$u_H = U_0 + \sqrt{2} \sum_{h \neq 1} u_h \sin(h\omega t - \alpha_h)$, $i_H = I_0 + \sqrt{2} \sum_{h \neq 1} i_h \sin(h\omega t - \beta_h)$,

Тогда среднеквадратичные значения будут представлены (1.11) – (1.12):

$$U^2 = \frac{1}{kT} \int_{\tau}^{\tau+kT} u^2 dt = U_1^2 + U_H^2 \quad (1.11)$$

$$I^2 = \frac{1}{kT} \int_{\tau}^{\tau+kT} i^2 dt = I_1^2 + I_H^2, \quad (1.12)$$

где $U_H^2 = U_0^2 + \sum_{h \neq 1} U_h^2 = U^2 - U_1^2$, $I_H^2 = I_0^2 + \sum_{h \neq 1} I_h^2 = I^2 - I_1^2$

Суммарный коэффициент ВГС по напряжению и току может быть получен (1.13) – (1.14):

$$THD_U = \frac{U_H}{U_1} = \sqrt{\left(\frac{U}{U_1}\right)^2 - 1} \quad (1.13)$$

$$THD_I = \frac{I_H}{I_1} = \sqrt{\left(\frac{I}{I_1}\right)^2 - 1} \quad (1.14)$$

Активная мощность вычисляется (1.15) – (1.16):

$$P = \frac{1}{kT} \int_{\tau}^{\tau+kT} p dt = \frac{1}{kT} \int_{\tau}^{\tau+kT} p_p dt \quad (1.15)$$

$$P = P_1 + P_H \quad (1.16)$$

Активная мощность на основной гармонической составляющей определяется по выражению (1.17):

$$P_1 = \frac{1}{kT} \int_{\tau}^{\tau+kT} u_1 i_1 dt = U_1 I_1 \cos \theta_1 \quad (1.17)$$

Гармоническая активная мощность (1.18):

$$P_H = U_0 I_0 + \sum_{h \neq 1} U_h I_h \cos \theta_h = P - P_1 \quad (1.18)$$

Реактивная мощность на основной гармонической составляющей определяется по выражению (1.19):

$$Q_1 = \frac{\omega}{kT} \int_{\tau}^{\tau+kT} i_1 [\int u_1 dt] dt = U_1 I_1 \sin \theta_1 \quad (1.19)$$

Полная мощность (1.20):

$$S = UI \quad (1.20)$$

Важным практическим свойством полной мощности является вычисление потери мощности ΔP , которые являются почти линейной функцией S^2 (1.21):

$$\Delta P = \frac{r_e}{U^2} S^2 + \frac{U^2}{R}, \quad (1.21)$$

где R – эквивалентное активное сопротивление, представляющее собой потери в сердечнике трансформатора и потери в линии, r_e – эквивалентное сопротивление Тевенена, которое может быть вычислено из формулы (1.22):

$$r_e I^2 = r_{dc} \sum_h K_{sh} I_h^2 \quad (1.22)$$

где $I = \frac{S}{U}$, $K_{sh} > 1$ – коэффициент учитывающий поверхностный скин-эффект и эффект близости, а также потери в оболочке кабеля. Величина зависит от гармонического спектра, сечения кабеля и материала проводников и изоляции.

Также при несинусоидальных режимах необходимо рассматривать составляющие полной мощности, которые наиболее подробно отражены в стандарте США *IEEE* 1459-2010.

Полная мощность на основной гармонике (синусоидальный режим) (1.23) – (1.24):

$$S_1 = U_1 I_1 \quad (1.23)$$

$$S_1^2 = P_1^2 + Q_1^2 \quad (1.24)$$

Полная мощность несинусоидального режима (1.25) – (1.26):

$$\begin{aligned} S^2 &= (UI)^2 = (U_1^2 + U_H^2)(I_1^2 + I_H^2) = (U_1 I_1)^2 + (U_1 I_H)^2 + (U_H I_1)^2 + (U_H I_H)^2 = \\ &= S_1^2 + S_N^2 \end{aligned} \quad (1.25)$$

$$S_N = \sqrt{S^2 - S_1^2} \quad (1.26)$$

Полная мощность искажения (неактивная мощность несинусоидального режима) может быть представлена как совокупность трех составляющих (1.27):

$$S_N^2 = D_I^2 + D_U^2 + S_H^2 \quad (1.27)$$

Мощность искажения по току (1.28):

$$D_I = U_1 I_H = S_1 (THD_I) \quad (1.28)$$

Мощность искажения по напряжению (1.29):

$$D_U = U_H I_1 = S_1 (THD_U) \quad (1.29)$$

Полная мощность высших гармоник (1.30) – (1.31):

$$S_H = U_H I_H = S_1 (THD_I) (THD_U) \quad (1.30)$$

$$S_H = \sqrt{P_H^2 + D_H^2} \quad (1.31)$$

Мощность искажения высших гармоник (1.32):

$$D_H = \sqrt{S_H^2 - P_H^2} \quad (1.32)$$

Неактивная мощность (1.33):

$$N = \sqrt{S^2 - P^2} \quad (1.33)$$

Неактивную мощность не следует отождествлять с реактивной мощностью, они могут быть равны только в том случае, если ток и напряжение синусоидальной формы (идеализированный режим). Также в некоторых научных трудах составляющие мощности отличные от классических определений (1.26) и (1.27) называются «мощностью искажения» [109,110,123]. При этом по результатам анализа отечественных и зарубежных научных трудов [46,67,79 ,103-108] термины «неактивная мощность» и «мощность искажения» в равной степени употребляются при описании составляющих, отличных от классических определений (1.17) и (1.19). Также необходимо отметить, что составляющие (1.27)-(1.33) могут служить критериями оценки эффективности работы того или иного фильтрокомпенсирующего устройства при несинусоидальных режимах.

Коэффициент мощности на основной гармонике (1.34):

$$k_{M1} = \cos\theta_1 = \frac{P_1}{S_1} \quad (1.34)$$

Коэффициент мощности несинусоидального режима (1.35):

$$k_M = \frac{P}{S} = \frac{P_1 + P_H}{\sqrt{S_1^2 + S_N^2}} = \frac{\left(\frac{P_1}{S_1}\right) \left[1 + \left(\frac{P_H}{P_1}\right)\right]}{\sqrt{1 + \left(\frac{S_N}{S_1}\right)^2}} = \frac{\left[1 + \left(\frac{P_H}{P_1}\right)\right] k_{M1}}{\sqrt{1 + THD_I^2 + THD_U^2 + (THD_I THD_U)^2}} \quad (1.35)$$

Когда $THD_U < 5\%$ и $THD_I > 40\%$, коэффициент мощности можно вычислить (1.36):

$$k_M = \frac{k_{M1}}{\sqrt{1 + THD_I^2}} \quad (1.36)$$

В современных частотно-регулируемых электроприводах наибольшее применения получили статические преобразователи для регулирования уровня выходного напряжения, которое может быть реализовано на основе автономных инверторов напряжения и активных выпрямителей [32].

Управление величиной напряжения реализуется за счет регулятора напряжения постоянного тока (DC/DC) и алгоритма управления силовыми ключами автономного инвертора напряжения, предусматривающего изменение длительности полуволны открытия транзисторов. Данная технология, как

правило, является причиной ухудшения гармонического состава напряжения, за счет включения регулятора переменного тока [102,103].

На рисунке 1.1 представлена структурная схема преобразователя частоты.

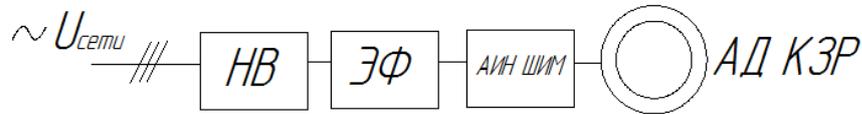


Рисунок 1.1 – Структурная схема статического преобразователя частоты

В состав силовой части статического преобразователя частоты входят:

НВ – неуправляемый выпрямитель,

ЭФ – электрический фильтр,

АИН ШИМ – автономный инвертор напряжения с широтно-импульсной модуляцией,

АД КЗР – асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором.

В основе современных преобразователей частоты лежат различные типы выпрямителей.

В большинстве эксплуатируемых регулируемых электроприводах наиболее часто встречаются диодные выпрямители, выполненные по 3-х фазной двухполупериодной схеме выпрямления (схеме Ларионова) рисунок 1.2.

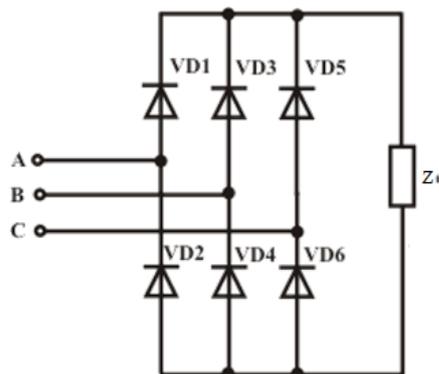


Рисунок 1.2 – Схема неуправляемого выпрямителя

На рисунке 1.2: A , B , C – фазы системы электроснабжения, $VD1$ - $VD6$ – диоды, Z_n – полное сопротивление нагрузки. Неуправляемый выпрямитель осуществляет процесс преобразования 3-х фазного в нерегулируемое постоянное напряжение. После выпрямления, и переходе с переменного на постоянное напряжение, появляется пульсирующая форма, представлена на рисунке 1.3.

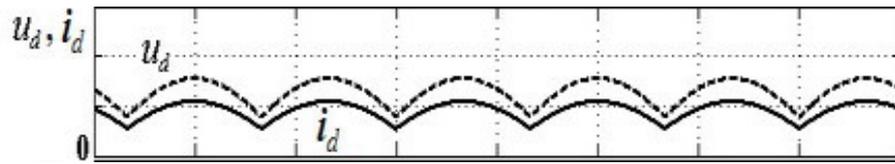


Рисунок 1.3 – Напряжение и ток на выходе неуправляемого выпрямителя

Величина среднего значения выпрямленного напряжения определяется выражением (1.37):

$$U_{dcp} = 2.34 \cdot U_{\phi}, \quad (1.37)$$

где U_{ϕ} – действующее значение фазного напряжения приходящее на вход неуправляемого выпрямителя.

Фазный ток, приходящий на выход неуправляемого выпрямителя, будет иметь несинусоидальную форму и представлять собой периодическую последовательность разнополярных импульсных токов, представленный на рисунок 1.4.

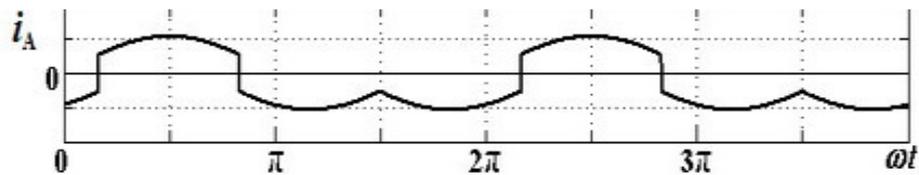


Рисунок 1.4 – Форма фазного тока

Такая периодическая последовательность импульсных токов может записана в виде гармонического ряда, который содержит основную гармонику и набор высших гармонических составляющих (ВГС), порядок которых определяется (1.38) [40]:

$$n = 6m \pm 1, \quad (1.38)$$

где $m = 1, 2, 3$.

Также в состав современных систем частотно-регулируемого электропривода, как основного вида нелинейной нагрузки, входят активные выпрямители (выпрямители с активным передним фронтом), обладающие определенными свойствами [29].

Активные выпрямители напряжения создаются на основании преобразования переменного тока в постоянный. На рисунке 1.5. представлена структурная схема активного выпрямителя.

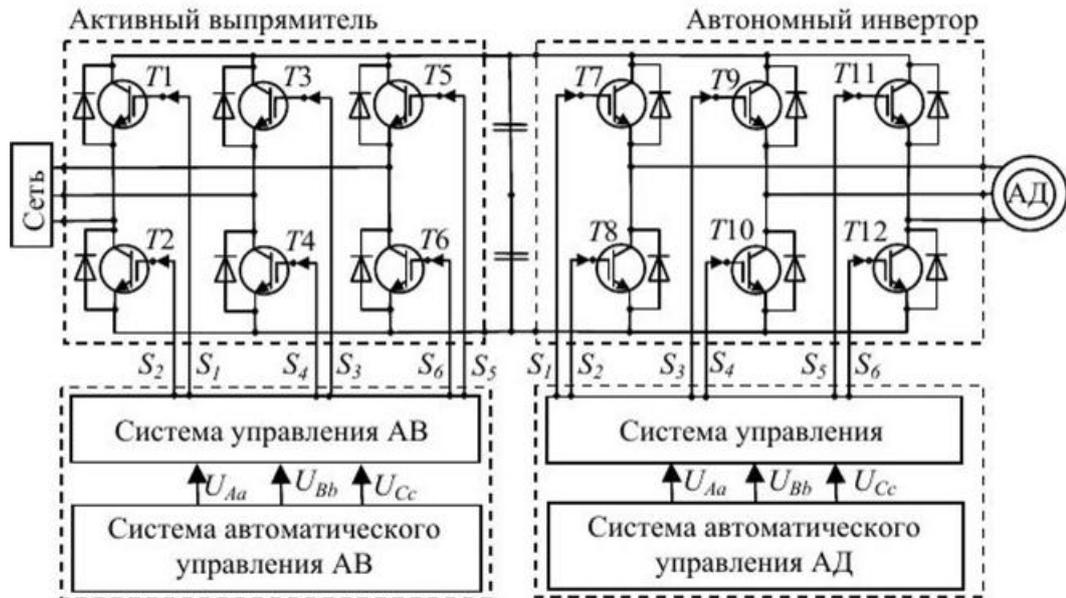


Рисунок 1.5 – Структурная схема электропривода с активным выпрямителем

На рисунке 1.5: $T1-T12$ – $IGBT$ -транзисторы, $S1-S6$ – сигналы управления транзисторами активного выпрямителя и автономного инвертора.

Для определения мощности искажений в системе активный выпрямитель – питающая сеть рассматривают высшие гармоники тока и напряжения. Следует отметить, что среднее значение мгновенной мощности равно нулю, однако мощность искажения приводит к дополнительным потерям энергии в системе. [56,57]

Для определения коэффициента гармоник используют формулу (1.39):

$$K_{\text{гармоник}} = \frac{D}{\sqrt{P^2+Q^2}} = \sqrt{\left(\frac{1}{K_{\text{искажения}}}\right)^2 - 1} \quad (1.39)$$

где $K_{\text{искажения}}$ – коэффициент искажения определяется по выражению:

$$K_{\text{искажения}} = \frac{\sqrt{P^2+Q^2}}{\sqrt{P^2+Q^2+D^2}}.$$

Анализ спектрального анализа высших гармонических составляющих по напряжению содержит большое число гармонических составляющих, начиная с 35-й гармоники, которые превышают допустимые значения согласно проводимым исследованиям [79]. Поэтому существует необходимость применения фильтрокомпенсирующих устройств для коррекции синусоидальной кривой напряжения.

1.5 Влияние высших гармоник на режим работы электрооборудования

Высшие гармонические составляющие тока и напряжения воздействуют на электротехническое оборудование, подключенные к питающим СЭС предприятий нефтедобычи. Влияние ВГС зависят от типа подключаемой нелинейной нагрузки, значения мощности, кратковременного или долговременного режима работы [18,24,25].

Длительное воздействие увеличивает температуру токоведущих частей и обмоток электрического оборудования [23,26].

Несинусоидальность тока и напряжения обуславливает дополнительные и тепловые потери на создание электромагнитных полей и нагрев оборудования, а также ускоренное старение изоляции и, кроме того, негативно сказывается на функционировании различных видов электрооборудования. Экономическая составляющая ущерба, обусловленная дополнительными потерями, как правило, невелика[42].

К мгновенным воздействиям ВГС относят повышение уровня вибрация и шума при работе трансформаторов и вращающихся электрических машин. Воздействия высших гармоник часто приводят к неправильной работе систем автоматики.

Современные системы SCADA чувствительны к воздействию высших гармоник тока и напряжения в системе электроснабжения.

Действие гармоник тока и напряжения также оказывают влияние на погрешность электроизмерительных приборов. На практике при эксплуатации счетчиков активной и реактивной энергии часто возникают погрешности измерения. В большинстве случаев такие приборы при несинусоидальных токах и напряжениях имеют значительную погрешность, которая может достигать до 10 % [83-86]

На рисунке 1.5 представлены графики кратности снижения срока службы γ в зависимости от суммарного коэффициента несинусоидальности TND_U для основного электроэнергетического оборудования предприятий нефтедобычи [7,33]. Рисунок 1.5 показывает снижение срока службы основного

энергетического оборудования с увеличением уровня суммарного коэффициента гармонических составляющих.

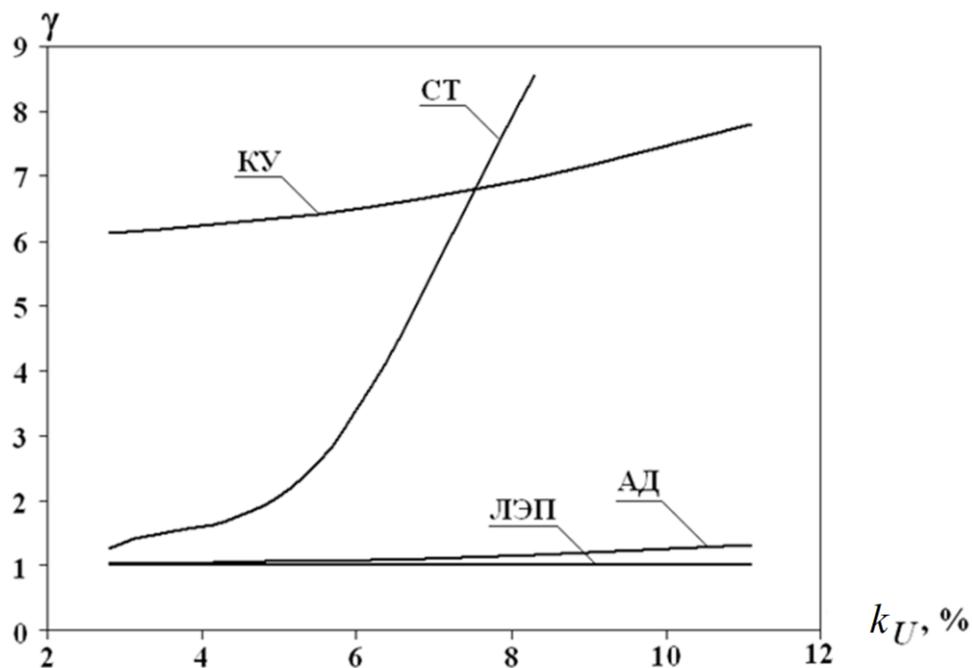


Рисунок 1.5 – График кратности снижения срока службы

На рисунке 1.5: КУ – конденсаторная установка. СТ – силовой трансформатор, ЛЭП – линия электропередач, АД – асинхронный двигатель.

Количественные характеристики допустимых для предприятий значений ВГС определяются главным образом путем экспертной оценки, с учетом линейных и нелинейных нагрузок, входящих в данный электротехнический комплекс предприятия, а также национальной нормативной базы. нормы и требования ГОСТа 32144-2013 служат одной из мер оценки эффективности коррекции качества электрической энергии тем или иным техническим средством или решением, включая активные, пассивные и гибридные фильтрокомпенсирующие устройства.

Таким образом, для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

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.

1.6 Вводы к главе 1

1. Проведен сравнительный анализ отечественных и международных стандартов в области электромагнитной совместимости и качества электрической энергии, по результатам которого определены их основные особенности, влияющие на выбор фильтрокомпенсирующих устройств.

2. Определены основные количественные соотношения и показатели, характеризующие несинусоидальные режимы систем электроснабжения промышленных предприятий с точки зрения гармонических искажений и энергетических процессов, которые необходимо учитывать при выборе фильтрокомпенсирующих устройств и систем.

3. Выявлены основные типы нелинейной нагрузки, ее режимы работы и параметры, оказывающие влияние на формирование несинусоидальных режимов и характеризующие их показатели.

4. Показаны основные виды негативных воздействий несинусоидальных режимов на основное электрооборудование промышленных систем электроснабжения, включая вращающиеся электрические машины, силовые трансформаторы, устройства релейной защиты, системы технического и коммерческого учета электрической энергии.

5. Определены цель, идея, задачи и новизна диссертационного исследования, его теоретическая и практическая значимость, а также положения, выносимые на защиту.

ГЛАВА 2 АНАЛИЗ ОСНОВНЫХ ТИПОВ, СТРУКТУР И СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ АКТИВНЫХ И ПАССИВНЫХ ФИЛЬТРОКОМПЕНСИРУЮЩИХ УСТРОЙСТВ

2.1 Пассивная фильтрация высших гармонических составляющих

Пассивный фильтр (ПФ) представляет собой цепь, состоящую из активного, индуктивного и емкостного сопротивления, которые соединены между собой определенным образом. При этом данная цепь настраивается в резонанс на частоту подавляемой гармонической составляющей [115].

Классификация пассивных фильтров представлена на рисунке 2.1.



Рисунок 2.1 – Классификация пассивных фильтров по числу фаз

Также классификация пассивных фильтров может осуществляться в зависимости от схемы подключения в СЭС – последовательное, параллельное или комбинированное подключение.

Пассивные фильтрокомпенсирующие устройства функционируют на основе резонансных явлений. Существует два вида резонанса: последовательный и параллельный. При последовательном соединении R , L , C (рисунок 2.3) возникает последовательный резонанс или резонанс напряжений. Ток в данном случае будет вычисляться по формуле (2.1) [43]:

$$I = \frac{U}{\sqrt{R^2 + X^2}} = \frac{U}{\sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}} = \frac{U}{\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}} \quad (2.1)$$

Максимальная амплитуда тока при резонансе напряжения достигается при минимальном значении сопротивления, когда (2.2):

$$\omega L = \frac{1}{\omega C} \quad (2.2)$$

При параллельном соединении C и L возникает параллельный резонанс или резонанс токов. При таком резонансе суммарная проводимость минимальна, а,

следовательно, сопротивление максимально. В данном случае общий ток минимален, а вектор напряжения совпадает с вектором тока.

Расчетными параметрами пассивных фильтров являются реактивная мощность Q_{PF} , частота настройки f_s , значение добротности Q [44,45].

Простейший вид пассивного ФКУ является компенсирующий конденсатор (рисунок 2.2). В данном ФКУ C (емкость) образует колебательный контур с L_c (индуктивность).

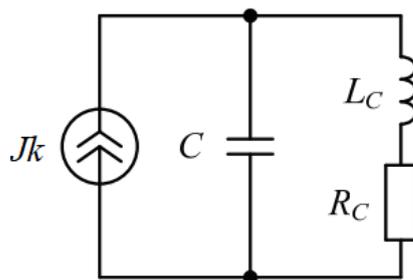


Рисунок 2.2 – Схема простейшего С-фильтра

Коэффициент передачи тока вычисляется (2.3):

$$F_{12}(j\omega) = \frac{1}{-\omega^2 L_c C + j\omega R C + 1} \quad (2.3)$$

Модуль $F_{12}(j\omega)$ определяется максимумом на частоте резонанса $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_c/C}}$.

В данном случае величина максимума (2.4.):

$$F_{12}(j\omega_0) = \frac{1}{j\omega_0 R C} = \frac{\sqrt{L_c/C}}{R} = Q \quad (2.4)$$

где Q – добротность.

Одним из эффективных решений является включение последовательного контура, настроенного на подавление одной гармонической составляющей (рисунок 2.3).

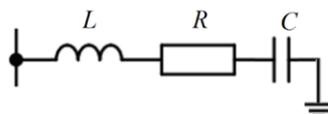


Рисунок 2.3 – Узкополосный пассивный фильтр

Одним видом из узкополосных фильтров служит фильтр второго порядка (рисунок 2.3). Коэффициент передачи определяется (2.5):

$$F_{12}(j\omega) = \frac{\omega^2 + j\omega R C + 1}{-\omega^2 (L + L_c) C + j\omega (R + R_c) C + 1} \quad (2.5)$$

Модуль коэффициента передачи принимает минимум на частоте резонанса равной $\omega_{0н} = \frac{1}{\sqrt{LC}}$, в данном случае ФКУ является узкополосным.

Значение $F_{12}(j\omega)$ достигает максимума при $\omega_{0т} = \frac{1}{\sqrt{(L+L_c)/C}}$ - частоте резонанса.

Также ФКУ (рисунок 2.3) обеспечивает компенсацию реактивной мощности, вычисляемой по формуле (2.6):

$$Q_C = \frac{U^2}{X_c} \quad (2.6)$$

Для первой гармоники (2.7):

$$Q_{LC} = \frac{n^2}{n^2-1} Q_C \quad (2.7)$$

где $n = \frac{\omega_{0н}}{\omega_c}$ - отношение резонансной частоты к частоте основной гармоники.

Повышение компенсации реактивной мощности приводит к увеличению напряжения на конденсаторе (2.8):

$$U_C = U_0 + U_L = \frac{n^2}{n^2-1} U_0 \quad (2.8)$$

где U_0 – напряжение питающей сети.

Существует способ одновременного подавления нескольких гармонических составляющих – применение демпфированных широкополосных фильтров (ШПФ) (рисунки 2.4, 2.5).

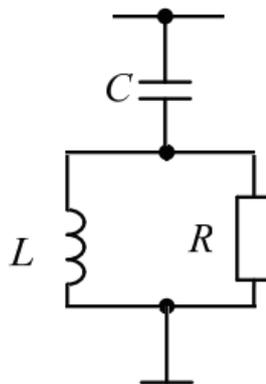


Рисунок 2.4 – Широкополосный фильтр второго порядка

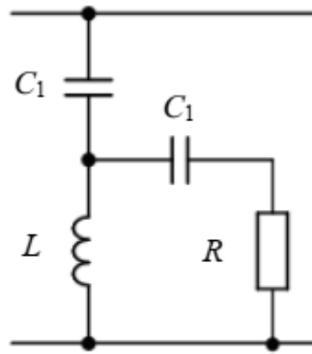


Рисунок 2.5 – Широкополосный фильтр третьего порядка

Для ШПФ второго порядка коэффициент передачи тока в сеть будет вычисляться следующим образом (2.9):

$$F_{12}(j\omega) = \frac{-\omega^2 LCR + j\omega L + R}{-j\omega^3 - \omega^2[(L+L_c)RC + LCR_c] + j\omega(L + CRR_c) + R} \quad (2.9)$$

Модуль коэффициента передачи тока будет иметь минимальное значение на резонансной частоте $\omega_{0н} = \frac{1}{\sqrt{LC}}$. На частотах, больших чем $\omega_{0н}$, ШПФ имеет небольшое сопротивление, и в таком случае добротность (2.10):

$$Q = \frac{R}{\sqrt{L/C}} = \frac{R}{X_L} = \frac{R}{X_C} \quad (2.10)$$

где X_L, X_C - индуктивное и емкостное сопротивления на настраиваемой частоте ШПФ.

Ток n -ой гармоники в индуктивности ШПФ определяется выражением (2.11):

$$I_{Ln} = \frac{R}{\sqrt{R^2 + X_{Ln}^2}} I_{Cn} \quad (2.11)$$

где I_{Cn} - ток n -ой гармоники в конденсаторе ШПФ.

Ток n -ой гармоники в резисторе ШПФ определяется выражением (2.12):

$$I_{Rn} = \frac{X_{Ln}}{\sqrt{R^2 + X_{Ln}^2}} I_{Cn} \quad (2.12)$$

Реактивная мощность на частоте первой гармоники для ШПФ будет вычисляться, как и в резонансном фильтре следующим образом (2.13):

$$Q_{\text{ШПФ}} = \frac{n^2}{n^2 - 1} Q_C \quad (2.13)$$

Активная мощность, которая выделяется на резисторе, определяется по формуле (2.14):

$$P_R = \sum_{n=1} R I_{Rn}^2 = \frac{X_{L1}}{R} \sum_{n=1} (n I_{Ln}^2) \quad (2.14)$$

где X_{L1} – индуктивное сопротивление в ШПФ на частоте первой гармоники.

Существенным недостатком применения ШПФ второго порядка является наличие больших потерь энергии.

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 [3].

Пассивные фильтры позволяют решить следующие проблемы в СЭС промышленных предприятий: снижение потребления реактивной мощности, и как следствие, затрат на электроэнергию, увеличение КПД трансформатора, повышение качества электроэнергии, обеспечение электромагнитную совместимость ответственных потребителей.

2.2 Активная фильтрация высших гармоник

Развитие полупроводниковых элементов на базе энергетической электроники позволило создать активные преобразователи, способные выполнять компенсацию высших гармоник. Данные преобразователи классифицируются как активные фильтры и выполняются на базе автономных инверторов.

На рисунке 2.6 представлена схема трехфазного автономного инвертора напряжения.

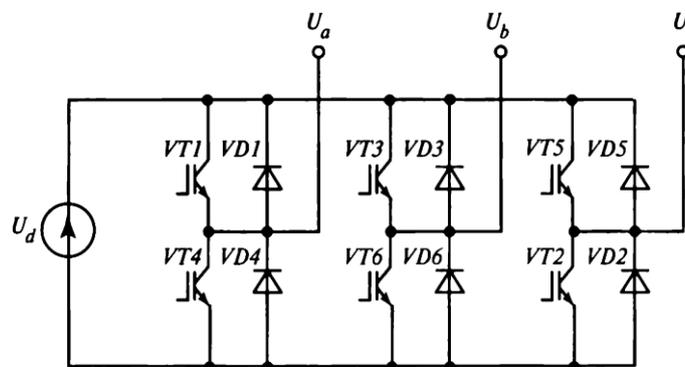


Рисунок 2.6 – Схема трехфазного инвертора напряжения

Действующие значения выходных напряжений равны (2.15) – (2.16):

$$U_{ab} = U_{bc} = U_{ca} = \sqrt{\frac{2}{3}} U_d \quad (2.15)$$

$$U_a = U_b = U_c = \frac{\sqrt{2}}{3} U_d \quad (2.16)$$

На рисунке 2.7 представлена схема трехфазного инвертора тока.

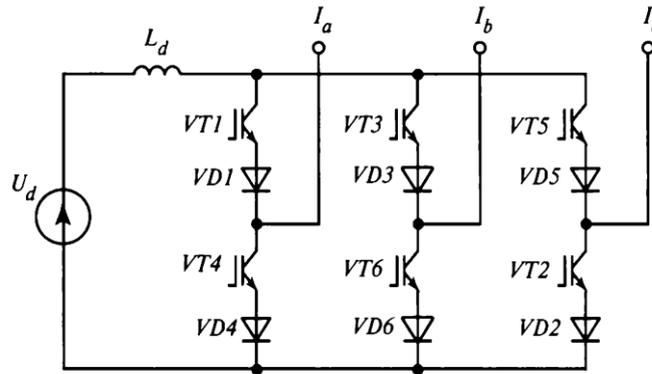


Рисунок 2.7 – Схема трехфазного инвертора тока

Активное фильтрокомпенсирующее устройство состоит из четырехбазовых блоков: инвертор, накопительный элемент (емкость или индуктивность), система автоматического управления (САУ), выходной дроссель или трансформатор. В зависимости от условий применения на выходе инвертора активного фильтра вместо или совместно с дросселями может быть включен пассивный фильтр определенной структуры [9,11,12].

Активный фильтр в зависимости от структуры может быть управляемым источником тока (параллельный активный фильтр) или напряжения (последовательный активный фильтр) заданной величины и гармонического состава.

Активный фильтр в зависимости от структуры и алгоритма управления обеспечивает выполнение:

1. Осуществление компенсации ВГС тока и напряжения.
2. Приближение коэффициента мощности к 1.
3. Уменьшение отклонения напряжения (для последовательного активного фильтра).
4. Минимизация появления параллельных резонансов.

Активный фильтр представляет собой адаптивное устройство, система управления которого отслеживает изменение гармонического спектра компенсируемой сети.

Общая классификация активных фильтров приведена на рисунке 2.8.

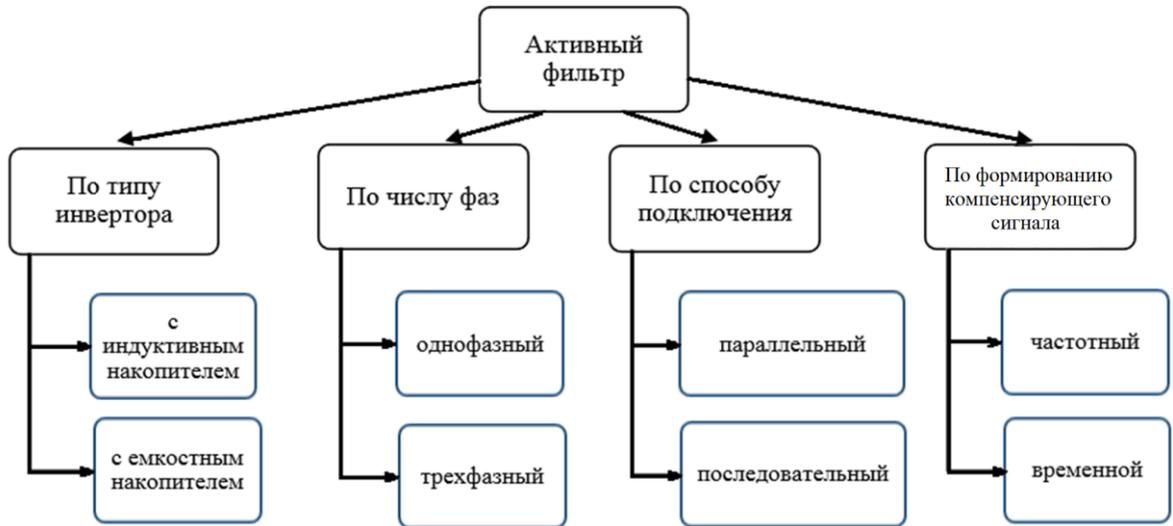


Рисунок 2.8 – Общая классификация активных фильтров

В классификации активных фильтрокомпенсирующих устройств по типу инвертора различают активные фильтрокомпенсирующие устройства с индуктивным или емкостным накопителем. Силовая часть данных активных фильтрокомпенсирующих устройств представляет собой инвертор с ШИМ, выполненный на основе мощных МОП-транзисторов или *IGBT*. Накопителем энергии на стороне постоянного тока в активном фильтре являются конденсаторы или реакторы, однако следует отметить, что технико-экономические преимущества имеются емкостной накопитель, поэтому он чаще всего и используется [100, 102, 113]. На рисунке 2.9 представлен активный фильтр с индуктивным элементом L_d . Инвертор активного фильтра в таком случае обладает свойствами источника тока. С помощью ШИМ формируется сигнал управления по средствам включения и отключения $VT1-VT4$. На выходе автономного инвертора создается импульсный ток $i_{аф}$, который сглаживается выходным пассивным фильтром.

Если в активном фильтрокомпенсирующем устройстве применятся конденсатора C_d , то инвертор данного устройства будет являться источником

напряжения (рисунок 2.10). Принцип работы такого активного фильтра аналогичен принципу работы фильтра с индуктивным накопителем энергии [4].

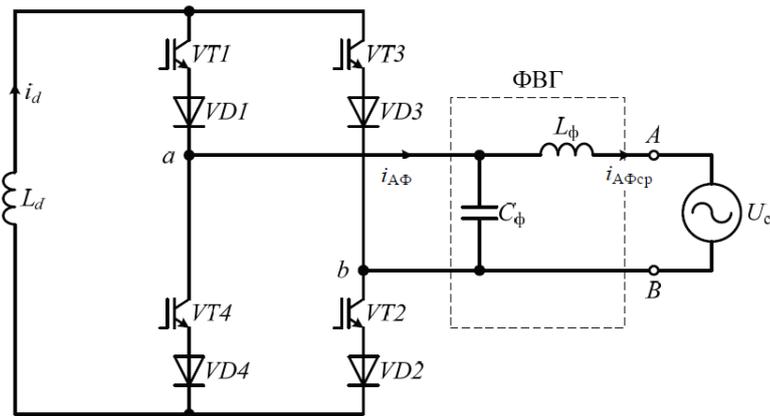


Рисунок 2.9 – Структурная схема активного ФКУ с индуктивным накопителем

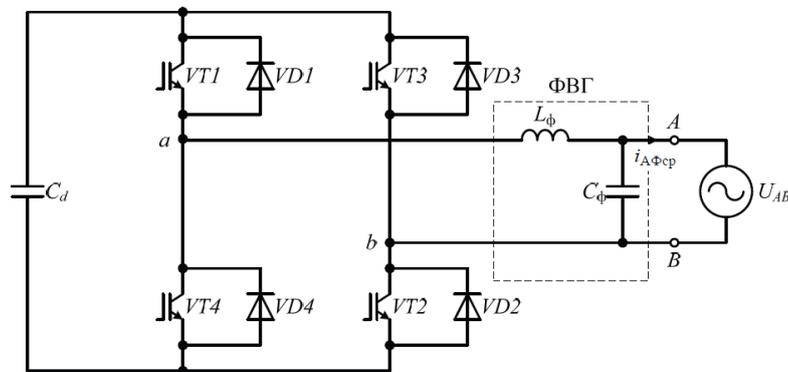


Рисунок 2.10 – Структурная схема активного ФКУ с емкостным накопителем

Структурная схема последовательного активного фильтра показана на рисунке 2.11. Автономный инвертор в таком случае подключается с помощью согласующего трансформатора. При последовательном подключении активного фильтра компенсация ВГС напряжения осуществляется за счет источника дополнительной ЭДС, функцию которого выполняет фильтр.

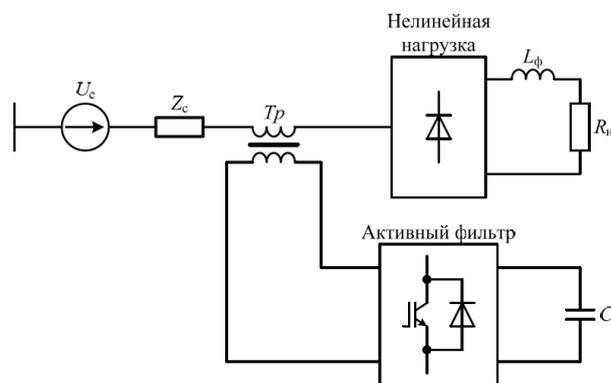


Рисунок 2.11 – Структурная схема последовательного активного фильтрокомпенсирующего устройства с емкостным накопителем

Структурная схема параллельного активного

фильтрокомпенсирующего устройства представлена на рисунке 2.12. В данном случае автономный инвертор активного фильтра генерирует в сеть компенсационный нелинейный ток, который равен по амплитуде и в противофазе току нелинейной нагрузки (рисунок 2.13). Параллельное активное фильтрокомпенсирующее устройство используется для коррекции спектра высших гармоник, компенсации реактивной мощности, провалов. Как правило, параллельный активный фильтр подключается в точках общего присоединения (ТОП), где сосредоточена нелинейная нагрузка.

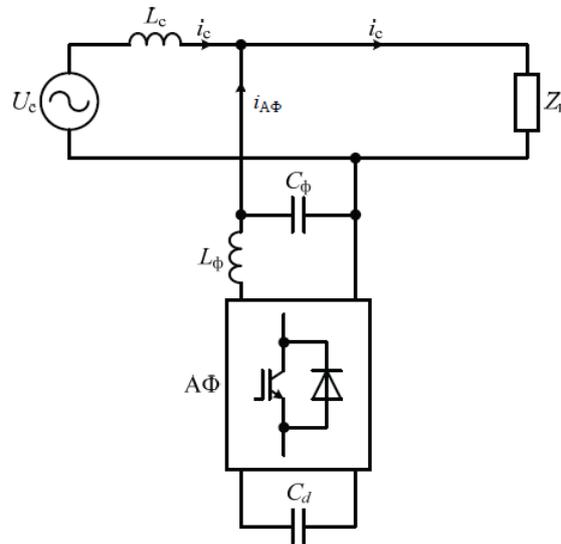


Рисунок 2.12 – Структурная схема параллельного активного фильтра с емкостным накопителем

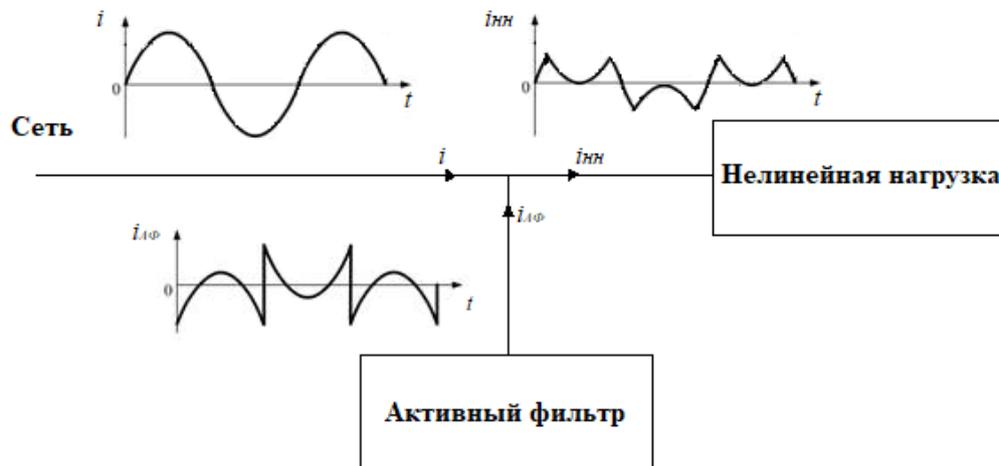


Рисунок 2.13 – Принцип компенсации гармоник параллельным активным фильтром

Таким образом, параллельное активное фильтрокомпенсирующее устройство образует источник тока, не зависящий от сопротивления сети, при

этом мощность накопительного конденсатора должна позволять откорректировать уровень ВГС в соответствии с подключенной нагрузкой.

Также необходимо отметить, что, если основная цель устройства - компенсация высших гармоник и не должно влиять на изменение коэффициента мощности [2,5].

Если помимо компенсации нелинейных искажений активный фильтр предусматривает коррекцию коэффициента мощности сети, то выходной ток фильтра должен содержать реактивную составляющую, что учитывается при выборе параметров и системы управления фильтра.

2.3 Способы управления активными фильтрами

В структуру системы управления параллельным активным фильтрокомпенсирующим устройством (рисунок 2.14) входят блок фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ), блок выделения действующего значения тока, блок формирования опорного тока, блок выделения высших гармонических составляющих и блок формирования импульсов.

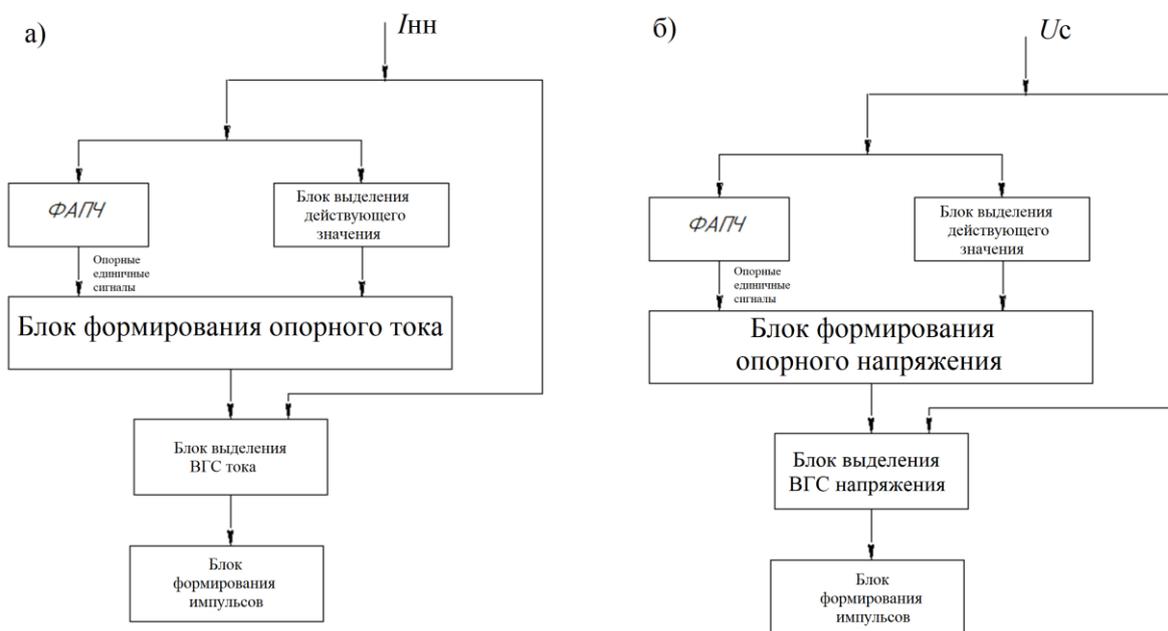


Рисунок 2.14 – Система управления активным фильтром а) для управления ПАФ, б) для управления ПСАФ

Алгоритм работы системы управления активным фильтром зависит от поставленных практических задач и набора реализуемых функций.

Система управления параллельного активного фильтрокомпенсирующего устройства должна содержать блок для выделения основной (первой) гармоники напряжения в системе электроснабжения для формирования тока коррекции.

На рисунке 2.15 представлена структура системы управления параллельным активным фильтрокомпенсирующим устройством, реализованная на основе фазовых преобразований.

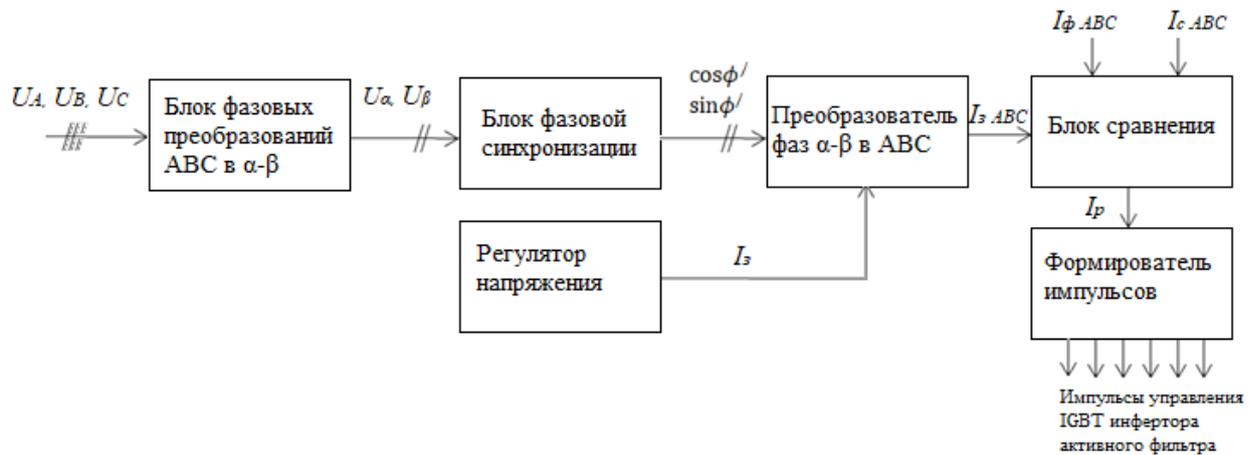


Рисунок 2.15 – Функциональная схема системы управления активным фильтрокомпенсирующим устройством с использованием фазовых преобразований

Формирование сигнала опорного тока (I_{oABC}) осуществляется за счет перехода из трехфазной системы координат ABC в двухфазную α - β согласно следующим выражения (2.17) – (2.18):

$$u_{\alpha} = u_a - \frac{u_b + u_c}{2}, \quad (2.17)$$

$$u_{\beta} = \frac{\sqrt{3}}{2} (u_b - u_c), \quad (2.18)$$

где u_a, u_b, u_c – измеренные напряжения каждой фазы; u_{α}, u_{β} – преобразованные напряжения в α - β - координатах.

Блок фазовых преобразований обеспечивает вычисление угла ϕ между вектором напряжения и проекцией его на ось α .

Исходные направляющие определяются следующим образом (2.19):

$$\cos \phi = u_{\alpha} / u_{sm} ; \sin \phi = u_{\beta} / u_{sm} ; u_{sm} = \sqrt{u_{\alpha}^2 + u_{\beta}^2} \quad (2.19)$$

После обработки направляющие $\cos \phi'$ и $\sin \phi'$ умножаются на сигнал задания по току i_3 (2.20):

$$i_{3\alpha} = i_3 \cos \phi'; \quad i_{3\beta} = i_3 \sin \phi', \quad (2.20)$$

Сигналы $i_{3\alpha}$ и $i_{3\beta}$ формируются в соответствии с (2.21):

$$i_{3a} = i_{3\alpha}; \quad i_{3b} = \frac{\sqrt{3} \cdot i_{3\beta} - i_{3\alpha}}{2}; \quad i_{3c} = \frac{-\sqrt{3} \cdot i_{3\beta} - i_{3\alpha}}{2}. \quad (2.21)$$

В блоке вычитания формируется опорный ток i_{0a}, i_{0b}, i_{0c} (2.22):

$$i_{0a} = i_{3a} - i_{na}, \quad i_{0b} = i_{3b} - i_{nb}, \quad i_{0c} = i_{3c} - i_{nc}; \quad (2.22)$$

где i_{na}, i_{nb}, i_{nc} - сигнал тока нелинейной нагрузки.

Другим способом реализации подобной системы управления является использование фазовых преобразований $d-q$, которое аналогично $\alpha-\beta$. Отличие заключается в том, что $d-q$ преобразование осуществляется во вращающихся осях, в то время как $\alpha-\beta$ – в неподвижных.

Преобразование $d-q$ состоит из матриц преобразования Парка и Кларк [45,80]. Преобразования Кларк осуществляют переход от трехфазной системы ABC в систему $d-q$. Первичным значением преобразования Кларк является выделение части вектора с привязкой к ABC , которая является общей для всех трех компонентов вектора.

Матрица преобразования Кларк имеет вид (2.23):

$$M_K = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (2.23)$$

Соответственно, для перехода из системы ABC необходимо вначале перейти к системе XYZ с помощью предварительного умножения на матрицу преобразования Кларк (2.24):

$$\vec{u}_{XYZ} = M_K \cdot \vec{u}_{ABC} \quad (2.24)$$

Обратное преобразование будет осуществляться с помощью выражения (2.25):

$$\vec{u}_{ABC} = M_K^{-1} \cdot \vec{u}_{XYZ} \quad (2.25)$$

Преобразование Парка осуществляет переход от системы отчета XYZ в систему $d-q$. Основное назначение преобразования Парка заключается в

осуществлении вращения системы отчета на произвольной частоте. Матрица преобразования Парка имеет вид (2.26):

$$M_P = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) & 0 \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.26)$$

где угол θ – мгновенный угол произвольной частоты ω .

Для осуществления перехода из системы координат XYZ в систему отчета $d-q$, необходимо сигнал вектора \vec{u}_{XYZ} умножить на матрицу преобразования Парка (2.27):

$$\vec{u}_{d-q} = M_P \cdot \vec{u}_{XYZ} \quad (2.27)$$

Обратное преобразование будет выглядеть (2.28):

$$\vec{u}_{XYZ} = M_P^{-1} \cdot \vec{u}_{d-q} \quad (2.28)$$

Матрица Парка-Кларк будет иметь вид (2.29):

$$\begin{aligned} M_{PK} &= \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) & 0 \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} = \\ &= \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin(\theta) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{\sqrt{2}}{2} & \frac{\sqrt{2}}{2} & \frac{\sqrt{2}}{2} \end{bmatrix} \quad (2.29) \end{aligned}$$

Обратное преобразование имеет вид (2.30):

$$M_{PK}^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & \frac{\sqrt{2}}{2} \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \frac{\sqrt{2}}{2} \\ \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \frac{\sqrt{2}}{2} \end{bmatrix} \quad (2.30)$$

Таким образом, переход от системы координат ABC к системе $d-q$ будет осуществляться с помощью выражения (2.31):

$$u_{d-q} = M_{PK} \cdot u_{ABC} \quad (2.31)$$

Рассмотренные фазовые преобразования лежат в основе теории мгновенной мощности, разработанной Х. Акаджи, элементы которой используются при управлении активными фильтрами [96].

В данной теории происходит переход от трехпроводной системы координат ABC к системе координат $\alpha\beta 0$.

Мгновенные значения тока и напряжения трехфазной системы электроснабжения в координатах A, B, C преобразуются в вектор на комплексной плоскости с помощью преобразований Кларк согласно выражениям (2.32) – (2.33):

$$\begin{bmatrix} u_0 \\ u_\alpha \\ u_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{2/3} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 1 & -\frac{1}{2} & \frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_A(t) \\ u_B(t) \\ u_C(t) \end{bmatrix} \quad (2.32)$$

$$\begin{bmatrix} i_0 \\ i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{2/3} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 1 & -\frac{1}{2} & \frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_A(t) \\ i_B(t) \\ i_C(t) \end{bmatrix} \quad (2.33)$$

С помощью выражений (2.32), (2.33) происходит выделение нулевой последовательности в фазных напряжениях и токах. Из-за отсутствия тока нулевой последовательности в 3-х фазной системе выражения (2.32) и (2.33) упрощаются до вида (2.34) – (2.35):

$$\begin{bmatrix} u_\alpha(t) \\ u_\beta(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & \frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_A(t) \\ u_B(t) \\ u_C(t) \end{bmatrix} \quad (2.34)$$

$$\begin{bmatrix} i_\alpha(t) \\ i_\beta(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & \frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_A(t) \\ i_B(t) \\ i_C(t) \end{bmatrix} \quad (2.35)$$

Обратное преобразование двухфазной системы координат $\alpha\beta$ в трехфазную ABC для напряжения и тока осуществляется с помощью выражений (2.36) – (2.37):

$$\begin{bmatrix} u_A(t) \\ u_B(t) \\ u_C(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_\alpha(t) \\ u_\beta(t) \end{bmatrix} \quad (2.36)$$

$$\begin{bmatrix} i_A(t) \\ i_B(t) \\ i_C(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha(t) \\ i_\beta(t) \end{bmatrix} \quad (2.37)$$

Следовательно, переменным u_α и u_β соответствует комплексная плоскость с координатами пространственного вектора, который можно разложить на плоскости согласно выражению (2.38):

$$\dot{U}_s(t) = u_\alpha + ju_\beta \quad (2.38)$$

Аналогично записывается пространственный вектор тока (2.39):

$$\dot{I}_s(t) = i_\alpha + ji_\beta \quad (2.39)$$

Таким образом, пространственные векторы напряжения и тока (2.40) – (2.41):

$$\dot{U}_s(t) = u_\alpha + ju_\beta = \sqrt{3}U[\cos\omega t + jsin\omega t] = \sqrt{3}Ue^{j\omega t} \quad (2.40)$$

$$\dot{I}_s(t) = i_\alpha + ji_\beta = \sqrt{3}I[\cos(\omega t - \varphi) + jsin(\omega t - \varphi)] = \sqrt{3}Ie^{j(\omega t - \varphi)} \quad (2.41)$$

где U, I – фазные напряжение и ток, φ – фазовый угол между напряжением и током.

Векторы на комплексной плоскости имеют постоянную амплитуду и вращаются с угловой частотой ω относительно неподвижных осей α и β , как показано на рисунке 2.16.

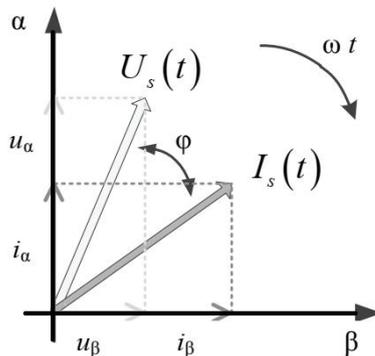


Рисунок 2.16 – Представление пространственных векторов $\dot{U}_s(t)$ и $\dot{I}_s(t)$ на плоскости α - β

Одним из важных аспектов является инвариантность мгновенной мощности при преобразованиях Кларк при переходе от трехфазной системы координат ABC к двухфазной $\alpha\beta 0$

Одним из важных положений pq -теории Х. Акаджи является понятие мгновенной комплексной мощности (2.42) [97-99]:

$$S = \dot{U}_s I_s^* = (u_\alpha + ju_\beta)(i_\alpha - ji_\beta) = (u_\alpha i_\alpha + u_\beta i_\beta) + j(u_\beta u_\alpha - u_\alpha i_\beta) = p(t) + jq(t) \quad (2.42)$$

где p – реальная мощность; q – мнимая мощность.

Мощность в pq -теории может быть записана в координатах $\alpha\beta 0$ через составляющие p_0 (активная мощность нулевой последовательности), p (мгновенная активная мощность), q (мгновенная реактивная мощность) согласно следующему выражению (2.43):

$$\begin{bmatrix} p_0 \\ p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_0 & 0 & 0 \\ 0 & u_\alpha & u_\beta \\ 0 & u_\beta & -u_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_0 \\ i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (2.43)$$

Активная мощность вычисляется следующим образом (2.44):

$$p_{acb} = u_a i_a + u_b i_b + u_c i_c = u_\alpha i_\alpha + u_\beta i_\beta + u_0 i_0 = p + p_0 \quad (2.44)$$

Реактивная мощность вычисляется как (2.45):

$$q = u_\beta i_\alpha - u_\alpha i_\beta = \frac{1}{\sqrt{3}}(u_{ba} i_c + u_{bc} i_a + u_{ca} i_b) \quad (2.45)$$

где, i_a, i_b, i_c и u_a, u_b, u_c – ток и напряжение в системе координат abc : i_α, i_β, i_0 и u_α, u_β, u_0 – ток и напряжение в системе координат $\alpha\beta 0$.

При расчете несимметричных электрических систем применяют метод разложения основанный на симметричные составляющие. Несимметричную трехфазную систему можно разложить на три симметричные составляющие, согласно рисунку 2.17.

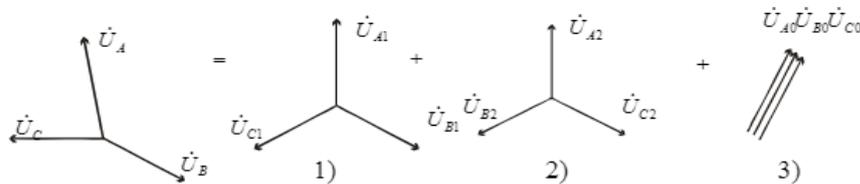


Рисунок 2.17 – Разложение несимметричной трехфазной системы на три симметричные трехфазные системы

На рисунке 2.17: 1 – система напряжения прямой последовательности, 2 – система напряжения обратной последовательности, 3 – система напряжения нулевой последовательности.

Система прямой последовательности состоит из трех векторов \dot{U}_{A1} , \dot{U}_{B1} , \dot{U}_{C1} , равные по модулю и повернутые относительно друг друга на угол 120° , причем вектор \dot{U}_{B1} отстает от вектора \dot{U}_{A1} .

Система обратной последовательности состоит из трех векторов \dot{U}_{A2} , \dot{U}_{B2} , \dot{U}_{C2} , равные по модулю и повернутые относительно друг друга на угол 120° , причем вектор \dot{U}_{B2} опережает вектор \dot{U}_{A2} .

Система нулевой последовательности состоит из трех векторов \dot{U}_{A0} , \dot{U}_{B0} , \dot{U}_{C0} , равных по модулю и совпадающих по фазе.

Таким образом система несимметричных векторов напряжения запишется (2.46) – (2.48):

$$\dot{U}_A = \dot{U}_{A1} + \dot{U}_{A2} + \dot{U}_{A0} \quad (2.46)$$

$$\dot{U}_B = \dot{U}_{B1} + \dot{U}_{B2} + \dot{U}_{B0} \quad (2.47)$$

$$\dot{U}_C = \dot{U}_{C1} + \dot{U}_{C2} + \dot{U}_{C0} \quad (2.48)$$

Для упрощения расчетов используют оператор a – оператор фазы или фазный множитель (2.49):

$$\dot{a} = e^{j \cdot 120^\circ} = e^{j \cdot \frac{2\pi}{3}} \quad (2.49)$$

При этом в любой симметричной системе векторов справедливо равенство (2.50):

$$1 + \dot{a} + \dot{a}^2 = 0 \quad (2.50)$$

Применяя оператор фазы, напряжения систем прямой и обратной последовательности для фаз В, С можно выразить через напряжение фазы А: (2.51) – (2.54)

$$\dot{U}_{B1} = \dot{a}^2 \dot{U}_{A1} = \dot{a}^2 \dot{U}_1 \quad (2.51)$$

$$\dot{U}_{C1} = \dot{a} \dot{U}_{A1} = \dot{a} \dot{U}_1 \quad (2.52)$$

$$\dot{U}_{B2} = \dot{a}^2 \dot{U}_{A2} = \dot{a}^2 \dot{U}_2 \quad (2.53)$$

$$\dot{U}_{C2} = \dot{a} \dot{U}_{A2} = \dot{a} \dot{U}_2 \quad (2.54)$$

В системе нулевой последовательности (2.55):

$$\dot{U}_{A0} = \dot{U}_{B0} = \dot{U}_{C0} = \dot{U}_0 \quad (2.55)$$

Согласно выражениям (2.49) – (2.55) выражения (2.46) – (2.48) переписутся в виде (2.56) – (2.58):

$$\dot{U}_A = \dot{U}_1 + \dot{U}_2 + \dot{U}_0 \quad (2.56)$$

$$\dot{U}_B = a^2 \dot{U}_1 + a \dot{U}_2 + \dot{U}_0 \quad (2.57)$$

$$\dot{U}_C = a \dot{U}_1 + a^2 \dot{U}_2 + \dot{U}_0 \quad (2.58)$$

Данные выражения используются для расчета несимметричных напряжения, если известны их симметричные составляющие.

Для расчета симметричных составляющих используются выражения (2.59) – (2.61):

$$\dot{U}_0 = \frac{1}{3}(\dot{U}_A + \dot{U}_B + \dot{U}_C) \quad (2.59)$$

$$\dot{U}_1 = \frac{1}{3}(\dot{U}_A + a \dot{U}_B + a^2 \dot{U}_C) \quad (2.60)$$

$$\dot{U}_2 = \frac{1}{3}(\dot{U}_A + a^2 \dot{U}_B + a \dot{U}_C) \quad (2.61)$$

Для компактной записи используют матрицу Фортескью (2.62):

$$F = \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 \\ a^2 & a & 1 \\ a & a^2 & 1 \end{vmatrix} \quad (2.62)$$

Разложение в матричной форме будет иметь вид (2.63):

$$\begin{vmatrix} \dot{U}_A \\ \dot{U}_B \\ \dot{U}_C \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 \\ a^2 & a & 1 \\ a & a^2 & 1 \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} \dot{U}_1 \\ \dot{U}_2 \\ \dot{U}_0 \end{vmatrix} \quad (2.63)$$

Преобразование векторов с применением матрицы Фортескью целесообразно применять при расчетах, математическом и имитационном моделировании ГФУ на основе ПСАФ в программном пакете *Matlab*.

2.4 Выводы к главе 2

1. Проведен анализ основных структур пассивных фильтров, определены их особенности, классификация, способы расчета, выявлены их основные функции с точки зрения их применения в составе гибридных фильтрокомпенсирующих устройств.

2. Проведен анализ основных типов активных фильтров, выявлены их классификационные признаки. Рассмотрены топологии и принцип действия

активных фильтров параллельного и последовательного типа, выявлены их достоинства и недостатки.

3. Определены основные этапы функционирования систем управления активными фильтрокомпенсирующими устройствами на основе фазовой автоподстройки частоты для осуществления выполнения операций по повышению качества электрической энергии.

4. Приведено математическое описание функционирования систем управления активными фильтрами с использованием фазовых преобразований, релейных регуляторов, преобразований Фортескью для выявления опорных величин токов и напряжений.

ГЛАВА 3 ОСНОВНЫЕ СТРУКТУРЫ И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ГИБРИДНЫХ ФИЛЬТРОКОМПЕНСИРУЮЩИХ УСТРОЙСТВ ДЛЯ КОМПЕНСАЦИИ ВЫСШИХ ГАРМОНИК

3.1 Общие положения

В настоящий момент актуальным является применение гибридных фильтрокомпенсирующих устройств (ГФУ), состоящих из активных и пассивных фильтров. Главная особенность ГФУ это сочетание следующих достоинств пассивных и активных фильтров:

1. Уменьшение установленной мощности силовой части активного фильтра, как наиболее дорогого элемента ГФУ, и как следствие, снижение массогабаритной части и стоимости ГФУ.

2. Повышение эффективности компенсации уровня ВГС по сравнению с одиночными пассивными фильтрами при изменении параметров и режимов функционирования НН.

3. ГФУ за счет наличия активного фильтра обеспечивает снижение вероятности появления резонансных явлений по сравнению с одиночными пассивными фильтрами.

4. Адаптивность активной части для обеспечения эффективной компенсации ВГС при изменении характеристик нелинейной нагрузки.

5. ГФУ возможно использовать в СЭС с уже установленными пассивными фильтрами, при этом активный фильтр в составе ГФУ способен управлять характеристиками пассивных устройств [65,114].

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

1. Компенсация ВГС управляемым источником тока. На характер потребления высших гармоник нелинейной нагрузкой влияния не оказывает, как и на наличие высших гармоник напряжения со стороны предвключенной сети (параллельная компенсация).

2. Компенсация ВГС напряжения управляемым источником напряжения за счет применения последовательного активного фильтра, на характер потребления

высших гармоник нелинейной нагрузкой данное решение также влияния не оказывает (последовательная компенсация).

3.2 Основные структуры и классификация гибридных фильтрокомпенсирующих устройств

Классификация ГФУ осуществляется по следующим признакам: способ подключения к компенсируемой сети, характер соединения активной и пассивной части между собой, тип активной части как указано на рисунке 3.1.



*ПАФ – параллельный активный фильтр

**ПСАФ – последовательный активный фильтр

Рисунок 3.1 – Классификация гибридных фильтрокомпенсирующих устройств

Из множества модификаций ГФУ необходимо выделить и рассмотреть те структуры, применение которых наиболее эффективно и целесообразно в условиях нефтедобывающих предприятий с учетом особенностей промышленных сетей и подключенной нагрузки.

3.2.1 Гибридная структура на основе последовательного активного и параллельного пассивного фильтров

Схема на рисунке 3.2 показывает главные элементы параллельно-последовательной структуры (первая часть названия – способ компенсации ВГС, вторая часть – тип активной части), а именно:

- блок резонансных пассивных фильтров, соединенных параллельно искажающей нагрузке;
- последовательный активный фильтр на основе вольтодобавочного трансформатора (Тр), первичная обмотка которого соединена последовательно с пассивным фильтром и инвертора, подключенного ко вторичной обмотке данного трансформатора.

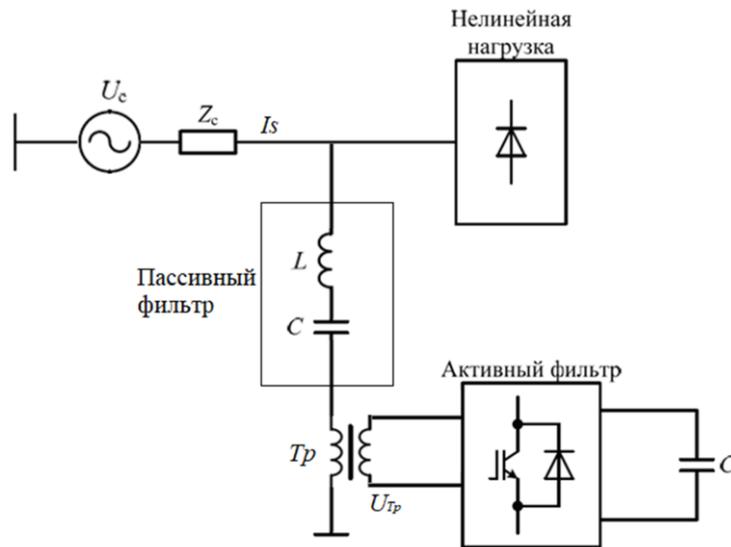


Рисунок 3.2 – Структура параллельно-последовательного ГФУ

В рамках указанной структуры последовательный активный фильтр управляется таким образом, чтобы выполнялось следующее условие (3.1) [100,101]:

$$U_{Тр} = Z \cdot I_{SH} \quad (3.1)$$

где $U_{Тр}$ - напряжение на зажимах трансформатора; Z – значение в Омах, зафиксированное для каждого порядка; I_{SH} – гармонический ток нагрузки.

В этой конфигурации активный фильтр воздействует только на гармонические токи и повышает эффективность компенсации ВГС пассивных фильтров. Это предотвращает усиление гармоник напряжения до рассматриваемой точки на резонансных частотах пассивных фильтров и сетью, а также незначительно ослабляет гармонические токи между нагрузкой и источником путем снижения общего сопротивления сети.

Поскольку в данной структуре не весь ток электрической сети протекает через активный фильтр, то компоненты последнего могут быть уменьшены (по габаритам и числу, в особенности за счет наличия трансформатора).

Главный недостаток структуры заключается в зависимости параметров настройки пассивных фильтров от типа и режима работы нелинейной нагрузки, поэтому требуется ее предварительное исследование с целью исключения резонансных явлений.

Область применения данной структуры в условиях предприятий нефтедобычи достаточно узкая и ограничена в основном высоковольтными сетями.

3.2.2 Гибридная структура на основе последовательного активного и параллельного пассивного фильтров

Схема данной структуры приведена на рисунке 3.3, при этом в ее состав входят те же элементы, что и в предыдущем случае. Ключевое отличие заключается в точке присоединения первичной обмотки трансформатора (последовательно между источником и нагрузкой), что расширяет функциональные возможности данной структуры: последовательный активный фильтр осуществляет компенсацию ВГС напряжения со стороны предвключенной сети, а пассивный фильтр (фильтры) – подавление ВГС тока нелинейной нагрузки.

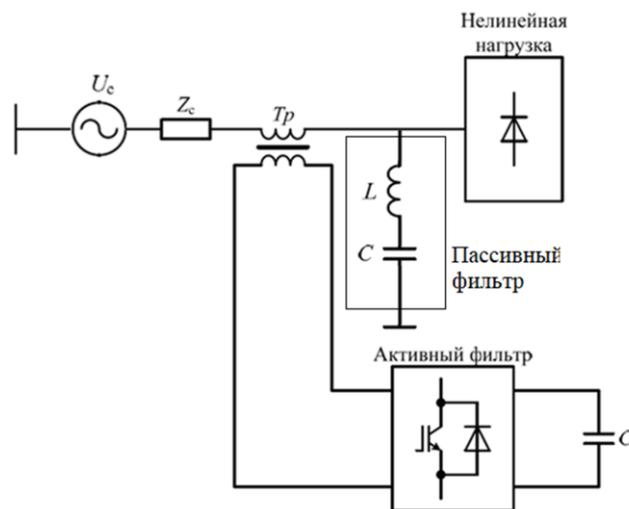


Рисунок 3.3 – ГФУ на основе последовательного активного и параллельного пассивного фильтров

Основная функция активного фильтра в данном случае – формирование компенсационного напряжения в противофазе с гармоническими составляющими предвключенной сети. При этом активный фильтр действует как сопротивление для гармонических частот [28].

В этом случае эффективность пассивной фильтрации повышается. Таким образом, последовательный фильтр изолирует нагрузку от гармонических составляющих со стороны сети, и защищает пассивный фильтр от перегрузки. В зарубежных публикациях эта структура чаще всего называется «гармоническим изолятором», так как в некоторых случаях она изолирует источник от нелинейной нагрузки, вносящей искажения, а также предохраняет от перегрузки пассивный фильтр со стороны нелинейной нагрузки до него. Необходимо отметить, что данная структура обладает следующими недостатками, которые ограничивают область ее применения [129,130]:

- общий ток узла нагрузки протекает через трансформатор;
- высокие значения тока в случае возникновения короткого замыкания.

Для устранения указанных недостатков целесообразно использовать трансформатор с дополнительной вторичной обмоткой (см. рисунок 3.3), что позволяет перераспределить магнитные потоки внутри него.

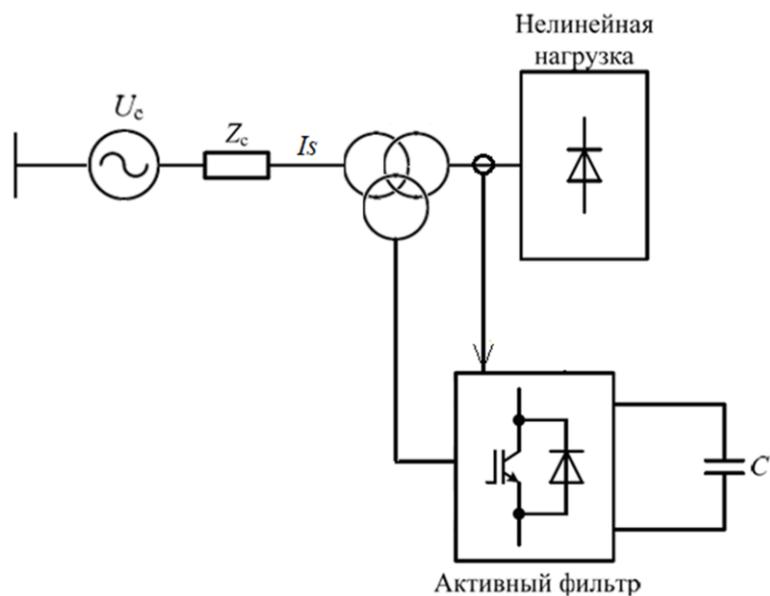


Рисунок 3.4 – Гибридный фильтр с подпиткой от трансформатора

3.2.3 Гибридная структура на основе параллельного активного и параллельного пассивного фильтров для компенсации высших гармоник тока

В основе данной структуры лежит параллельное соединение одного или более настроенных пассивных параллельного активного фильтрокомпенсирующих устройств (см. рисунок 3.5).

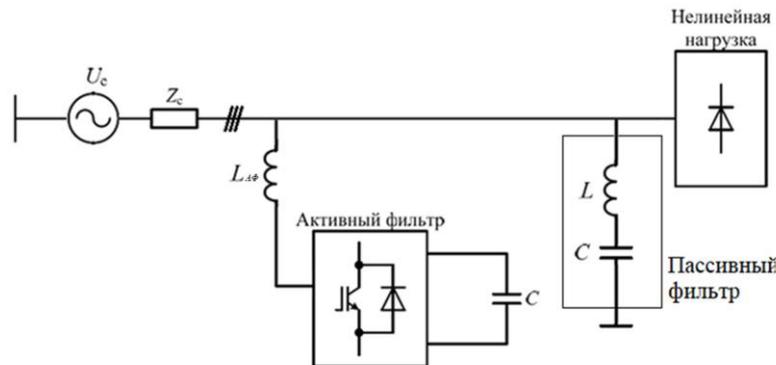


Рисунок 3.5 – Структура гибридного фильтрокомпенсирующего устройства на основе параллельного активного и параллельного пассивного фильтров

Такая комбинация активного и пассивного фильтрокомпенсирующих устройств позволяет достаточно эффективно компенсировать ВГС тока в СЭС. Чаще всего система управления активным фильтром в составе данного ГФУ реализуется на основе быстрого преобразования Фурье, фазовых преобразований или теории мгновенной мощности.

Данная структура применяется для следующих целей:

1. повышения эффективности компенсации гармоник, осуществляемой с использованием пассивных фильтров;
2. ограничения числа пассивных фильтров, настроенных на подавление отдельных гармонических составляющих в сети (3, 5, 7, 11, 13).

Однако, данная структура не предотвращает наличия перегрузки пассивных фильтров или резонансных явлений с сопротивлением электрической сети.

Также, данная гибридная структура не обладает в полной мере всеми свойствами параллельного активного фильтра, так как пассивные фильтры должны быть выбраны в соответствии с величиной гармонических токов, потребляемых нелинейной нагрузкой. При изменении этих токов, пассивные

фильтры необходимо перенастраивать. Наличие параллельного активного фильтра сокращает количество пассивных фильтров и повышает их эффективность. Помимо этого, наличие пассивных фильтров позволяет снизить номинальные параметры активной части как наиболее дорогой [89].

3.3 Математические модели гибридных фильтрокомпенсирующих устройств

3.3.1 Математическая модель гибридной структуры на базе последовательного активного фильтрокомпенсирующего устройства с пассивными фильтрами

На рисунке 3.6. представлена структура данного гибридного фильтрокомпенсирующего устройства.

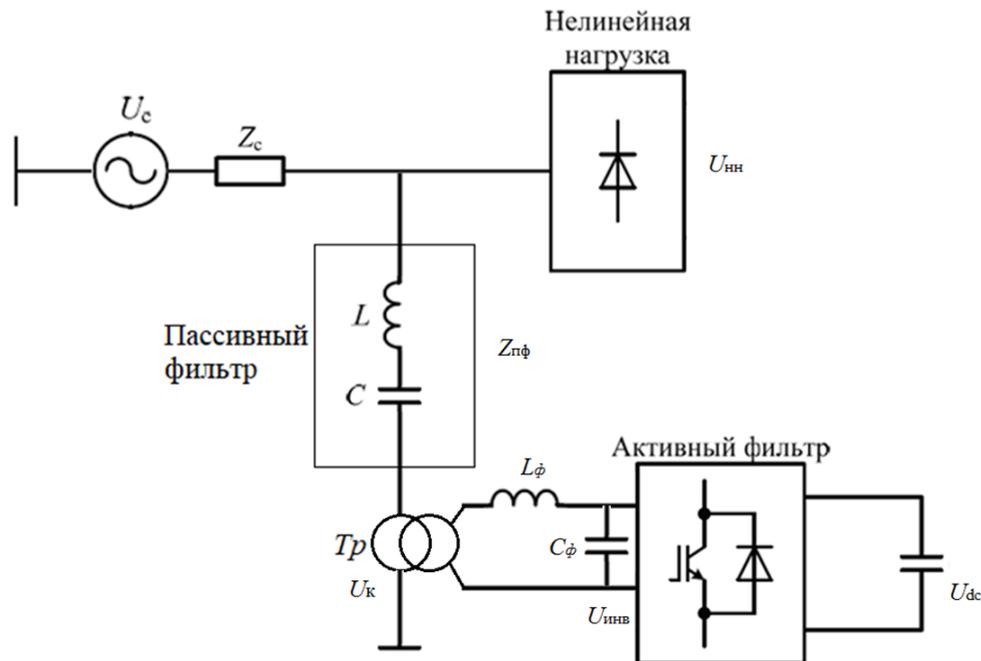


Рисунок 3.6 – Структура гибридного фильтрокомпенсирующего устройства на базе последовательного активного фильтра с пассивным фильтром

Математическая модель данного ГФУ основывается на следующем соотношении (3.2):

$$u_c(t) = \Delta u_c(t) + \Delta u_{пф}(t) + u_k(t) + u_{нн}(t) \quad (3.2)$$

где $u_c(t)$ – мгновенное напряжение в СЭС, $\Delta u_c(t)$ – мгновенное падение напряжения линии от источника до места подключения ГФУ, $\Delta u_{пф}(t)$ – мгновенное падение напряжения на пассивном фильтре, $u_k(t)$ – мгновенное

значение компенсационного высшего напряжения на трансформаторе, $u_{\text{нн}}(t)$ – мгновенное значение напряжения на нелинейной нагрузке.

Также справедливы следующие выражения (3.3) – (3.6):

$$u_c(t) = i_c(t)Z_c + i_{\text{пф}}(t)Z_{\text{пф}} + u_k(t) + u_{\text{нн}}(t) \quad (3.3)$$

$$\Delta u_c(t) = i_c(t)Z_c \quad (3.4)$$

$$\Delta u_{\text{пф}}(t) = i_{\text{пф}}(t)Z_{\text{пф}} \quad (3.5)$$

$$i_c(t) = i_k(t) + i_{\text{нн}}(t) \quad (3.6)$$

где $i_c(t)$ – мгновенное значение тока в СЭС, $i_k(t)$ – мгновенное значение компенсационного тока, $i_{\text{нн}}(t)$ – мгновенное значение тока нелинейной нагрузки.

Ввиду того, что компенсационный ток проходит через пассивный фильтр, справедливо следующее (3.7):

$$i_k(t) = i_{\text{пф}}(t) = K_{\text{Тр}} \cdot i_{\text{Сф}}(t) \quad (3.7)$$

где $K_{\text{Тр}}$ – коэффициент трансформации, $i_{\text{Сф}}(t)$ – ток на выходе инвертора активного фильтра, определяемый следующим образом (3.8):

$$i_{\text{Сф}}(t) = C_{\text{Ф}} \frac{du_{\text{Сф}}(t)}{dt} \quad (3.8)$$

Компенсационное напряжение на выходе трансформатора связано через коэффициент трансформации с низшей ступенью (3.9) – (3.10):

$$u_k(t) = K_{\text{Тр}} \cdot u_{\text{Сф}}(t) \quad (3.9)$$

$$u_{\text{Сф}}(t) = u_{L\text{ф}}(t) + u_{\text{инв}}(t) \quad (3.10)$$

где $u_{\text{Сф}}(t)$ – мгновенное значение напряжения на обкладках конденсатора, $u_{L\text{ф}}(t)$ – мгновенное значение падения напряжения на индуктивности активного фильтра, $u_{\text{инв}}(t)$ – мгновенное значение напряжения на выходе инвертора активного фильтра.

При этом (3.11):

$$u_{L\text{ф}}(t) = L_{\text{Ф}} \frac{di_{\text{инв}}(t)}{dt} \quad (3.11)$$

где $L_{\text{Ф}}$ – индуктивность на выходе активного фильтрокомпенсирующего устройства, $i_{\text{инв}}(t)$ – мгновенное значение тока инвертора активного фильтра.

Также справедливо следующее выражение (3.12):

$$u_{\text{ИНВ}}(t) = K_{\text{ИНВ}}(t) \cdot u_{dc}(t) \quad (3.12)$$

где $K_{\text{ИНВ}}(t)$ – модулирующая функция, характеризующая режим включения и отключения IGBT-транзисторов, $u_{dc}(t)$ – напряжение на обкладках конденсатора активного фильтра.

Таким образом, совокупность уравнений (3.2) – (3.12) являются математической моделью гибридной структуры на основе последовательного активного фильтрокомпенсирующего устройства с выходным пассивным фильтром.

3.3.2 Математическая модель гибридного фильтрокомпенсирующего устройства на основе последовательного активного и параллельно подключенного пассивного фильтрокомпенсирующих устройств

Структура ГФУ на базе последовательного активного и параллельно подключенного пассивного ФКУ представлена на рисунке 3.7.

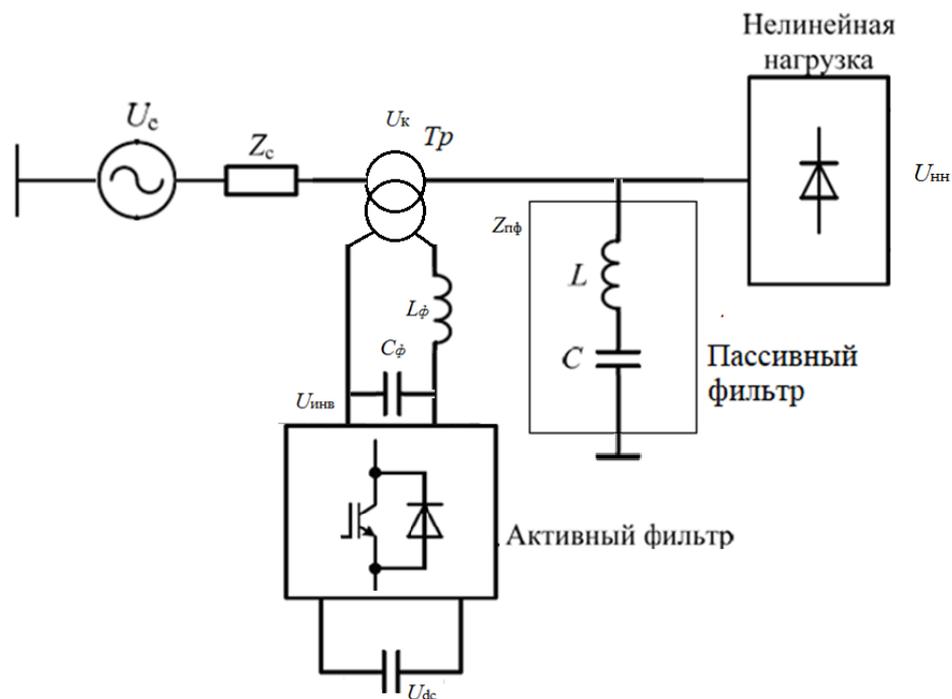


Рисунок 3.7 – Структура ГФУ на основе последовательного активного и параллельно подключенного пассивного ФКУ

Математическая модель данного ГФУ основывается на следующем соотношении (3.13):

$$u_c(t) = \Delta u_c(t) + u_k(t) + u_{\text{пф}}(t) = \Delta u_c(t) + u_k(t) + u_{\text{нн}}(t), \quad (3.13)$$

где $u_c(t)$ – мгновенное значение напряжение в СЭС, $\Delta u_c(t)$ – мгновенное значение падения напряжения на линии от источника до места подключения ГФУ, $u_{пф}(t)$ – мгновенное значение напряжения на пассивном фильтре, $u_k(t)$ – мгновенное значение компенсационного высшего напряжения на трансформаторе, $u_{нн}(t)$ – мгновенное значение напряжения на нелинейной нагрузке.

При этом (3.14):

$$u_c(t) = i_c(t)Z_c + u_k(t) + u_{нн}(t), \quad (3.14)$$

где $\Delta u_c(t) = i_c(t)Z_c$.

Также справедливо следующее (3.15):

$$i_c(t) = i_{пф}(t) + i_{нн}(t), \quad (3.15)$$

где $i_c(t)$ – мгновенное значение тока в СЭС, $i_k(t)$ – мгновенное значение тока устройства компенсации (пассивного фильтра), $i_{нн}(t)$ – мгновенное значение тока нелинейной нагрузки.

Напряжение на выходе трансформатора связано через коэффициент трансформации с низшей ступенью (3.16) – (3.17):

$$u_k(t) = K_{Тр} \cdot u_{сф}(t) \quad (3.16)$$

$$u_{сф}(t) = u_{Lф}(t) + u_{инв}(t), \quad (3.17)$$

где $u_{сф}(t)$ – мгновенное значение напряжения на обкладках конденсатора фильтра на выходе инвертора, $u_{инв}(t)$ – мгновенное значение напряжения на выходе инвертора активного фильтра, $u_{Lф}(t)$ – мгновенное значение падения напряжения на индуктивности фильтра на выходе инвертора, которое определяется следующим образом (3.18):

$$u_{Lф}(t) = L_{ф} \frac{di_{инв}(t)}{dt}, \quad (3.18)$$

где $L_{ф}$ – индуктивность на выходе инвертора, $i_{инв}(t)$ – мгновенное значение тока на выходе инвертора активного фильтрокомпенсирующего устройства.

Напряжение на выходе инвертора определяется следующим образом (3.19):

$$u_{инв}(t) = K_{инв}(t) \cdot u_{dc}(t) \quad (3.19)$$

где $K_{инв}(t)$ – модулирующая функция, характеризующая режим коммутации IGBT-транзисторов, $u_{dc}(t)$ – напряжение на обкладках накопительного конденсатора активного фильтрокомпенсирующего устройства.

Таким образом, совокупность уравнений (3.13)-(3.19) является математической моделью гибридной структуры на основе последовательного активного и параллельного пассивного фильтров.

3.3.3 Математическая модель гибридной структуры на основе параллельного активного и пассивного фильтров, соединенных параллельно

Структура данного ГФУ представлена на рисунке 3.8.

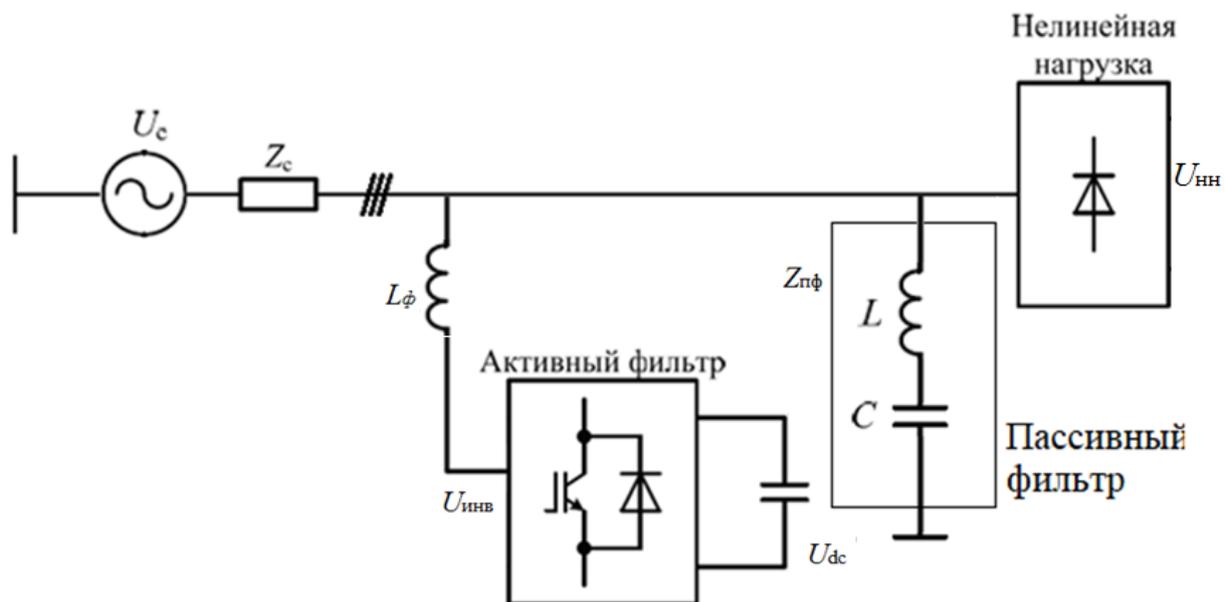


Рисунок 3.8 – Структура ГФУ на основе параллельного активного и пассивного фильтров, соединенных параллельно

Математическая модель данного ГФУ основывается на следующем соотношении (3.20):

$$u_c(t) = \Delta u_c(t) + u_{ПАФ}(t) = \Delta u_c(t) + u_{ПФ}(t) = \Delta u_c(t) + u_{нн}(t), \quad (3.20)$$

где $u_c(t)$ – мгновенное значение напряжение в СЭС, $\Delta u_c(t)$ – мгновенное значение падения напряжения линии от источника до места подключения ГФУ и $\Delta u_c(t) = i_c(t)Z_c$, $u_{ПАФ}(t)$ – мгновенное значение напряжения на параллельном активном фильтрокомпенсирующем устройстве, $u_{ПФ}(t)$ – мгновенное значение напряжения на пассивном фильтрокомпенсирующем устройстве, $u_{нн}(t)$ – мгновенное значение напряжения на нелинейной нагрузке.

При этом (3.21):

$$u_{\text{ПАФ}}(t) = u_{\text{ПФ}}(t) = u_{\text{НН}}(t) \quad (3.21)$$

Выражения (3.20) и (3.21) справедливы только в том случае, если нелинейная нагрузка, параллельное активное фильтрокомпенсирующее устройство, пассивное фильтрокомпенсирующее устройство подключены в одной точке – точке общего присоединения. В противном случае выражения (3.20) и (3.21) видоизменяются с учетом падения напряжения в линии до точки подключения фильтров.

Соотношение, связывающее токи фильтров и нагрузки, следующее (3.22):

$$i_c(t) = i_{\text{ПАФ}}(t) + i_{\text{ПФ}}(t) + i_{\text{НН}}(t) \quad (3.22)$$

где $i_c(t)$ – мгновенное значение тока в СЭС, $i_{\text{ПАФ}}(t)$ – мгновенное значение тока активного фильтрокомпенсирующего устройства, $i_{\text{ПФ}}(t)$ – мгновенное значение тока пассивного фильтрокомпенсирующего устройства, $i_{\text{НН}}(t)$ – мгновенное значение тока нелинейной нагрузки.

Также справедливо следующее (3.23):

$$u_{\text{ПАФ}}(t) = u_{L\phi}(t) + u_{\text{ИНВ}}(t) \quad (3.23)$$

где $u_{\text{ИНВ}}(t)$ – мгновенное значение напряжения на выходе инвертора активного фильтра, $u_{L\phi}(t)$ – мгновенное значение падения напряжения на выходной индуктивности активного фильтра, определяемое следующим образом (3.24):

$$u_{L\phi}(t) = L_{\phi} \frac{di_{\text{ИНВ}}(t)}{dt} \quad (3.24)$$

где L_{ϕ} – индуктивность на выходе активного фильтрокомпенсирующего устройства, $i_{\text{ИНВ}}(t)$ – мгновенное значение тока инвертора активного фильтрокомпенсирующего устройства.

Напряжение на выходе инвертора определяется по выражению (3.25):

$$u_{\text{ИНВ}}(t) = K_{\text{ИНВ}}(t) \cdot u_{dc}(t) \quad (3.25)$$

где $K_{\text{ИНВ}}(t)$ – модулирующая функция, характеризующая режим коммутации IGBT-транзисторов, $u_{dc}(t)$ – напряжение на обкладках накопительного конденсатора активного фильтрокомпенсирующего устройства.

Таким образом, совокупность уравнений (3.20)-(3.25) является математическим обоснованием модели гибридного фильтрокомпенсирующего устройства на базе параллельного активного и пассивного фильтров, соединенных параллельно.

На выходе активного фильтра в рамках данного ГФУ также может быть включен пассивный фильтр определенной конфигурации, как указано на рисунке 3.9.

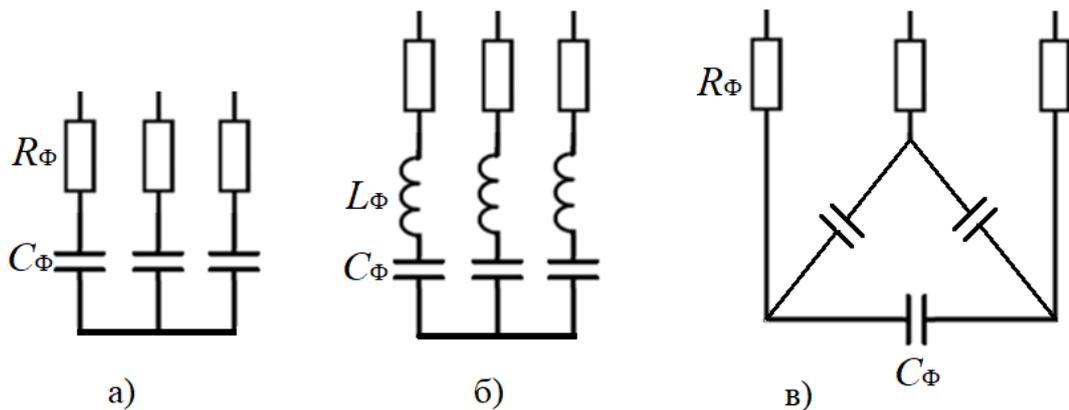


Рисунок 3.9 – Конфигурации пассивных частей фильтра

Для пассивного фильтра, приведенного на рисунке 3.9 а, справедливы следующие соотношения (3.26) – (3.28):

$$u_{\text{ПФ}}(t) = i_{\text{ПФ}}(t) \cdot Z_{\text{ПФ}} \quad (3.26)$$

$$Z_{\text{ПФ}} = \sqrt{R^2 + X^2} = \sqrt{R^2 + \frac{1}{\omega^2 C^2}} \quad (3.27)$$

$$u_{\text{ПФ}}(t) = i_{\text{ПФ}}(t) \cdot \sqrt{R^2 + \frac{1}{\omega^2 C^2}} \quad (3.28)$$

Для пассивного фильтра, приведенного на рисунке 3.9 б, справедливы следующие соотношения (3.29) – (3.31):

$$u_{\text{ПФ}}(t) = i_{\text{ПФ}}(t) \cdot Z_{\text{ПФ}} \quad (3.29)$$

$$Z_{\text{ПФ}} = \sqrt{R^2 + X^2} = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2} \quad (3.30)$$

$$u_{\text{ПФ}}(t) = i_{\text{ПФ}}(t) \cdot \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2} \quad (3.31)$$

Для пассивного фильтра, приведенного на рисунке 3.9 в, справедливы следующие соотношения (3.32) – (3.34):

$$u_{\text{ПФ}}(t) = i_{\text{ПФ}}(t) \cdot Z_{\text{ПФ}} \quad (3.32)$$

$$Z_{\text{ПФ}} = \sqrt{R^2 + X^2} = \sqrt{R^2 + \frac{1}{9\omega^2 C^2}} \quad (3.33)$$

$$u_{\text{ПФ}}(t) = i_{\text{ПФ}}(t) \cdot \sqrt{R^2 + \frac{1}{9\omega^2 C^2}} \quad (3.34)$$

Таким образом, создается электротехнический комплекс на базе параллельного активного фильтрокомпенсирующего устройства с выходным пассивным фильтром и отдельно подключенным пассивным фильтрокомпенсирующими устройствами.

3.4 Принципы регулирования гибридных фильтрокомпенсирующих устройств

В связи с различными теориями и расширением способов и методов активной фильтрации ВГС появляется возможность управления параметрами пассивной части гибридного фильтрокомпенсирующего устройства. Целесообразность применения гибридных фильтрокомпенсирующих устройств становится возможной по ряду причин [131]:

1. Применение отдельных активных фильтрокомпенсирующих устройств с номинальными параметрами силовых элементов, рассчитанных на полную мощность нелинейной нагрузки, ведет к высокой стоимости такого решения.

2. Пассивные фильтрокомпенсирующие устройства обладают ограниченной способностью подавления высших гармонических составляющих.

Таким образом, гибридное фильтрокомпенсирующее устройство позволяет снизить установленную мощность силовых элементов активной части ГФУ за счет наличия пассивных фильтров.

«Принцип действия классического гибридного фильтрокомпенсирующего устройства основывается на реализации и формировании электронными устройствами в цепях пассивного фильтрокомпенсирующего устройства токов и напряжений, которые меняют частотные характеристики фильтра для повышения эффективности компенсации ВГС по току и напряжению в СЭС» [10]. В качестве такого электронного устройства чаще всего используют автономные инверторы

на полностью управляемых преобразователях переменного или постоянного тока с импульсной модуляцией. Наибольшее распространение получили гибридные фильтрокомпенсирующие устройства, в которых активная часть соединяется параллельно пассивной части.

Формирование значений тока и напряжения на выходе активной части гибридного фильтрокомпенсирующего устройства осуществляется за счет широтно-импульсной модуляции (ШИМ).

Для активной части гибридного фильтрокомпенсирующего устройства с емкостным накопительным элементом значение выходного сопротивления может быть получено в следующем виде (3.35) [121,122]:

$$z_{\text{ПАФ}}(t) = \frac{u_{\text{ПАФ}}(t)}{i_{\text{ПАФ}}(t)} = \frac{K_{\text{ИНВ}}(t) \cdot u_{\text{dc}}(t)}{i_{\text{ПАФ}}(t)} \quad (3.35)$$

$z_{\text{ПАФ}}(t)$ – значения выходного сопротивления, $i_{\text{ПАФ}}(t)$ – модулированный ток, $u_{\text{ПАФ}}(t)$ – модулированное напряжения.

Возможно обеспечить значение $\frac{dz_{\text{ПАФ}}(t)}{dt} = 0$ при модуляционной функции $K_{\text{ИНВ}}(t)$, которое будет являться эквивалентным активным сопротивлением.

Таким образом, управляя функцией $K_{\text{ИНВ}}(t)$, можно получить необходимую частотную характеристику гибридного фильтрокомпенсирующего устройства. Данное управление ГФУ можно рассматривать как получение полного эквивалентного сопротивления в пассивном фильтрокомпенсирующем устройстве.

Основными ограничениями при управлении являются частотные характеристики ключей автономного инвертора и емкости накопительного элемента в активной части ГФУ. Характер эквивалентного сопротивления активной части $z_{\text{ПАФ}}(t)$ зависит от структуры ГФУ, места подключения ПАФ, модулирующей функцией $K_{\text{ИНВ}}(t)$.

3.5 Взаимосвязь между функциональными возможностями гибридного фильтра, его структурой и особенностями реализации системы автоматического управления

В качестве сигналов, которые приходят на вход системы автоматического управления (САУ) ГФУ рассматриваются сигналы тока и напряжения ВГС в СЭС, напряжение сети U_c , ток сети I_c , ток нелинейной нагрузки $I_{нн}$, а также ток пассивного фильтрокомпенсирующего устройства $I_{пф}$.

Тип входного сигнала выбирается исходя из функций, которые должно выполнять ГФУ. Если необходимо подавлять высшие гармоники тока со стороны узла нагрузки, то предпочтительнее использовать ток нелинейной нагрузки или ток узла нагрузки при управлении ГФУ для выделения опорных величин. В случае компенсации искажений напряжения со стороны питающей сети целесообразно использовать сигналы по высшим гармоникам напряжения. Для коррекции коэффициента мощности сети необходимо использовать сигналы тока или напряжения основной гармоники. Помимо этого, указанные сигналы могут быть использованы для управления ГФУ при компенсации провалов и отклонений сетевого напряжения.

С точки зрения простоты реализации САУ ГФУ чаще всего в качестве входного сигнала используется ток сети.

Следовательно, применение в качестве входного сигнала тока нелинейной нагрузки $I_{нн}$ возможно для повышения качества фильтрации высших гармоник на частоте настройки пассивного фильтрокомпенсирующего устройства. Следует отметить, что преимуществом тока нелинейной нагрузки перед другими входными сигналами является практически полная независимость от напряжения высших гармонических составляющих.

Таким образом, наибольшее распространение получили системы управления гибридными фильтрокомпенсирующими устройствами с током сети или током пассивного фильтра в качестве входного сигнала.

При оценке эффективности применения структур гибридных фильтрокомпенсирующих устройств при различных входных сигналах и законах

регулирования необходимо учитывать помимо несинусоидальности тока нелинейной нагрузки, несинусоидальность питающего напряжения. Последнее может привести к возникновению резонансных явлений в СЭС и дополнительной нагрузке пассивного фильтрокомпенсирующего устройства токами высших гармонических составляющих (последовательный резонанс).

Структура силовой части ГФУ также определяется реализуемыми им функциями. Например, при компенсации высших гармоник тока в состав ГФУ входит ПАФ, как управляемый источник тока заданной величины и гармонического состава. Аналогично, при подавлении высших гармоник напряжения в структуре ГФУ необходим ПСАФ, как управляемый источник напряжения заданной величины и гармонического состава. Комбинация параллельного и последовательного активных фильтров в рамках одного ГФУ образует более сложный и многофункциональный электротехнический комплекс, который в отечественных и зарубежных научных трудах носит название универсальный компенсатор (*UPFC*).

Способ обработки сигналов в САУ ГФУ может быть реализован на основе следующих основных методов:

- дискретное или быстрое преобразование Фурье;
- фазовые преобразования Парка-Кларк;
- теория мгновенной мощности, разработанная Х. Акадзи;
- нечеткое управление.

При выполнении ГФУ нескольких функций по коррекции качества электроэнергии предпочтительно использование фазовых преобразований Парка-Кларк или соотношений теории мгновенной мощности согласно результатам, изложенным в многочисленных отечественных и зарубежных научных работах. Нечеткое управление имеет ограниченную область применения из-за сложности реализации и настройки параметров при изменении параметров питающей сети и нагрузки. Дискретное или быстрое преобразование Фурье целесообразно использовать при выполнении ГФУ какой-либо одной главной функции по коррекции качества электроэнергии.

3.6 Выводы к главе 3

1. Определены основные особенности гибридных фильтрокомпенсирующих устройств, определяемые сочетанием достоинств активных и пассивных фильтров, влияющие на характер повышения качества электрической энергии.

2. Выявлены основные топологии гибридных фильтрокомпенсирующих устройств с точки зрения целесообразности их применения в электротехнических комплексах нефтедобычи. Проведен анализ достоинств и недостатков выявленных топологий, особенностей их функционирования в системах электроснабжения предприятий нефтедобычи. Приведено математическое описание выявленных топологий гибридных фильтрокомпенсирующих устройств.

3. Рассмотрены основные топологии пассивных фильтров, которые целесообразно устанавливать на выходе активных фильтров в рамках гибридных фильтрокомпенсирующих устройств для повышения эффективности коррекции показателей качества электроэнергии.

4. Приведены основные принципы регулирования гибридных фильтрокомпенсирующих устройств, которые должны учитываться при выборе и обосновании их структуры и алгоритма управления с целью повышения качества электроэнергии.

ГЛАВА 4 ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИБРИДНЫХ ФИЛЬТРОКОМПЕНСИРУЮЩИХ УСТРОЙСТВ В УСЛОВИЯХ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ НЕФТЕДОБЫЧИ

4.1 Общие положения

Имитационное моделирование ГФУ реализовано на основе математических моделей, приведенных в Главе 3 с учетом алгоритмов и методов управления активными фильтрами для различных гибридных структур. Имитационное моделирование осуществлялось для условий предприятий нефтедобычи с учетом параметров электрических сетей и нагрузки, полученных по результатам экспериментальных исследований [8,10,13,14,15,16,31,81].

Имитационное моделирование выполнялось в среде *Simulink* системы *Matlab* с учетом следующих основных допущений и ограничений:

- силовые элементы активных фильтров приняты идеальными ключами (нулевое сопротивление в открытом состоянии, бесконечно большое сопротивление в закрытом состоянии);
- состояние каждого силового ключа описывается функцией $K_{инв}$, принимающей значение 0, если ключ закрыт, и значение 1, если ключ открыт;
- на протяжении одного шага интегрирования все нелинейности рассматриваются как линейные зависимости [58,59].

4.2 Пассивная фильтрация высших гармонических составляющих в системах электроснабжения предприятий нефтедобычи

Перед разработкой имитационной модели пассивных фильтрокомпенсирующих устройств необходимо выполнить расчет их параметров для подавления канонических высших гармоник, потребляемых преобразователями частоты электропогружных установок нефтедобычи. Расчет выполнялся по следующей методике [34-39].

Определим величину компенсируемой реактивной мощности ПФ $Q_{ПФ}$, частоту настройки f_s и типичное значение добротности ПФ Q .

Расчетные формулы для параметров ПФ (4.1) – (4.3):

$$Q_{ПФ} = \frac{U^2}{X_C} = \frac{U^2}{\frac{1}{\omega \cdot C_{ПФ}}} = \omega \cdot C_{ПФ} \cdot U^2 = 2\pi \cdot f \cdot C_{ПФ} \cdot U^2, \text{ вар} \quad (4.1)$$

$$f_s = \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{L_{\text{ПФ}} \cdot C_{\text{ПФ}}}}, \text{ Гц} \quad (4.2)$$

$$Q = \frac{X_0}{R_{\text{ПФ}}} \quad (4.3)$$

где, f – номинальная частота системы, равная 50 Гц; U – действующее значение линейного напряжения системы, равное 380 В, X_0 – индуктивное сопротивление при резонансе.

На основании исходных данных, принятых для моделирования, (таблица 4.1) произведено предварительное моделирование, на основании которого производился расчет и моделирование ГФУ.

Таблица 4.1 – Исходные данные, принятые для моделирования ГФУ

U_c ф, В	$S_{\text{кз}}$, МВА	$U_{\text{нн}}$, В	$S_{\text{тр}}$, кВА	L , км	$R_{\text{лэп}}$, Ом/км	$C_{\text{лэп}}$, пкФ/км	$L_{\text{лэп}}$, мГн/км
6000	100	380	160	0,3	0,3864	775	4,12
C_{af} , мФ	L_{af} , мГн	C_{cf} , мкФ	R_{cf} , Ом	$L_{\text{нн}}$, мГн	$R_{\text{нн}}$, Ом	$C_{\text{нн}}$, мкФ	
20	0,3	25	0,0001	11	3	150	

Реактивная мощность, потребляемая из сети, оказалась равной $Q_c = 26763$ вар, поэтому на отдельной фазе будет потребляться мощность $Q_{\text{ПФ}} = \frac{Q_c}{3} = \frac{26763}{3} = 8921$ вар.

Из выражения (2.1) определим емкость ($C_{\text{ПФ}}$) ПФ (4.4):

$$C_{\text{ПФ}} = \frac{Q_{\text{ПФ}}}{2\pi \cdot f \cdot U^2} = \frac{8921}{2\pi \cdot 50 \cdot 380^2} = 1,96 \cdot 10^{-4} \text{ Ф} \quad (4.4)$$

Из выражения (2.2) найдем индуктивность ($L_{\text{ПФ}}$) ПФ при резонансе:

1. На частоте 250 Гц (для устранения 5 гармонической составляющей) (4.5):

$$L_{\text{ПФ}} = \left(\frac{1}{2\pi \cdot f_s}\right)^2 \cdot \frac{1}{C_{\text{ПФ}}} = \left(\frac{1}{2\pi \cdot 250}\right)^2 \cdot \frac{1}{1,96 \cdot 10^{-4}} = 2,07 \cdot 10^{-3} \text{ Гн} \quad (4.5)$$

2. На частоте 350 Гц (для устранения 7 гармонической составляющей) (4.6):

$$L_{\text{ПФ}} = \left(\frac{1}{2\pi \cdot f_s}\right)^2 \cdot \frac{1}{C_{\text{ПФ}}} = \left(\frac{1}{2\pi \cdot 350}\right)^2 \cdot \frac{1}{1,96 \cdot 10^{-4}} = 1,06 \cdot 10^{-3} \text{ Гн} \quad (4.6)$$

Активное сопротивление ПФ ($R_{\text{ПФ}}$) составляет 0,05 Ом.

Определим добротность ПФ, используя выражение (4.3):

1. Добротность ПФ для устранения 5 гармонической составляющей (4.7):

$$Q = \frac{X_0}{R_{\text{ПФ}}} = \frac{\omega \cdot L_{\text{ПФ}}}{R_{\text{ПФ}}} = \frac{314 \cdot 2,07 \cdot 10^{-3}}{0,05} \approx 13 \quad (4.7)$$

2. Добротность ПФ для устранения 7 гармонической составляющей (4.8):

$$Q = \frac{X_0}{R_{\text{ПФ}}} = \frac{\omega \cdot L_{\text{ПФ}}}{R_{\text{ПФ}}} = \frac{314 \cdot 1,06 \cdot 10^{-3}}{0,05} \approx 6,6 \quad (4.8)$$

Результаты расчетов сведены в таблицы 4.2 и 4.3 и используются в качестве параметров имитационного моделирования.

Таблица 4.2 – Значения параметров пассивного фильтрокомпенсирующего устройства для устранения 5 гармонической составляющей

$Q_{\text{ПФ}}$, Вар	8921	$C_{\text{ПФ}}$, мкФ	196
f_s , Гц	250	$L_{\text{ПФ}}$, мГн	2,07
$R_{\text{ПФ}}$, Ом	0,05	Q	13

Таблица 4.3 – Значения параметров пассивного фильтрокомпенсирующего устройства для подавления 7 гармонической составляющей

$Q_{\text{ПФ}}$, Вар	8921	$C_{\text{ПФ}}$, мкФ	196
f_s , Гц	350	$L_{\text{ПФ}}$, мГн	1,06
$R_{\text{ПФ}}$, Ом	0,05	Q	6,6

По результатам проведенных исследований разработана компьютерная имитационная модель системы электроснабжения электропогружной установки нефтедобычи с двумя пассивными фильтрами, настроенными на подавление 5 и 7 ВГС. Нелинейная нагрузка представлена в виде неуправляемого диодного выпрямителя, который входит в состав многих существующих преобразователей частоты станций управления электропогружными установками нефтедобычи (Борец, Рэда, Электон). Разработанная имитационная модель без установки пассивных фильтров приведена на рисунке 4.1.

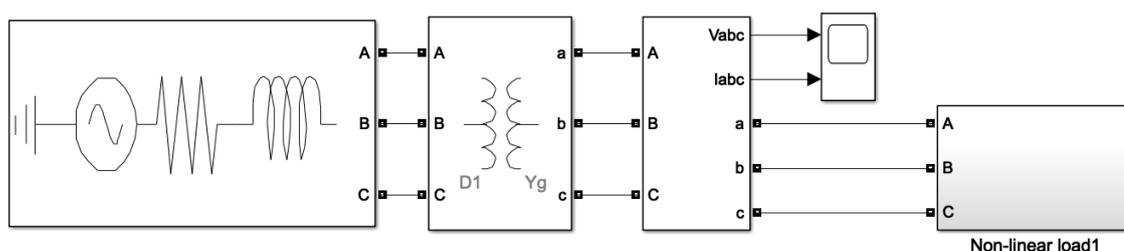


Рисунок 4.1 – Модель системы электроснабжения электропогружной установки

По результатам имитационного моделирования СЭС участка предприятия нефтедобычи с подключенной нелинейной нагрузкой были получены осциллограммы и спектрограммы напряжения и тока, представленные на рисунках 4.2 и 4.3.

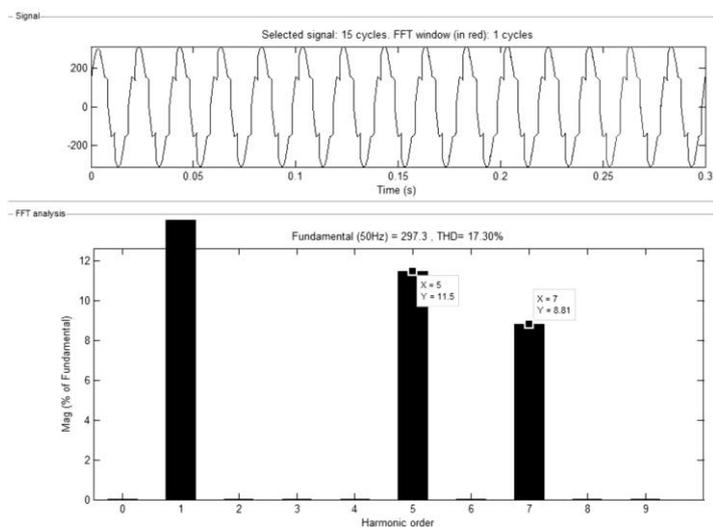


Рисунок 4.2 – Осциллограмма и спектрограмма кривой напряжения одной фазы без применения пассивных фильтров

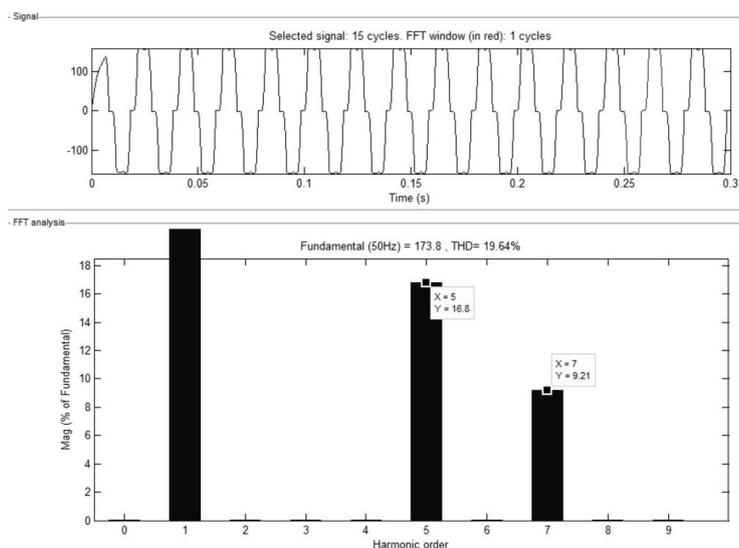


Рисунок 4.3 – Осциллограмма и спектрограмма кривой тока одной фазы без применения пассивных фильтров

Анализ результатов имитационного моделирования участка СЭС показал несоответствие показателей качества электрической энергии в части наличия ВГС согласно требованиям ГОСТ 32144-2013 [41]. Результаты моделирования отображены в таблице 4.3.

Таким образом, необходимо обеспечить качество ЭЭ участка СЭС с помощью ПФ, как наиболее распространенных средств повышения качества ЭЭ.

На рисунке 4.4 приведена имитационная модель с установкой двух ПФ, настроенных на подавление 5 и 7 ВГС, параметры которых указаны в таблицах 4.1 и 4.2.

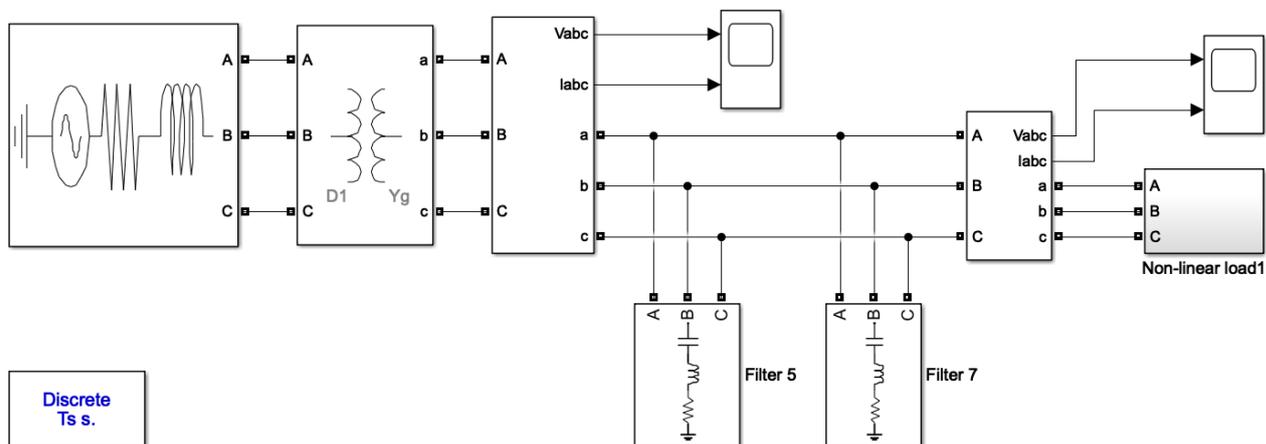


Рисунок 4.4 – Имитационная модель электрической сети нефтедобычи с установкой ПФ для подавления 5 и 7 ВГС

По результатам имитационного моделирования ПФ, настроенных на подавление 5 и 7 ВГС получены осциллограммы и спектрограммы напряжения и тока, представленные на рисунках 4.5 и 4.6.

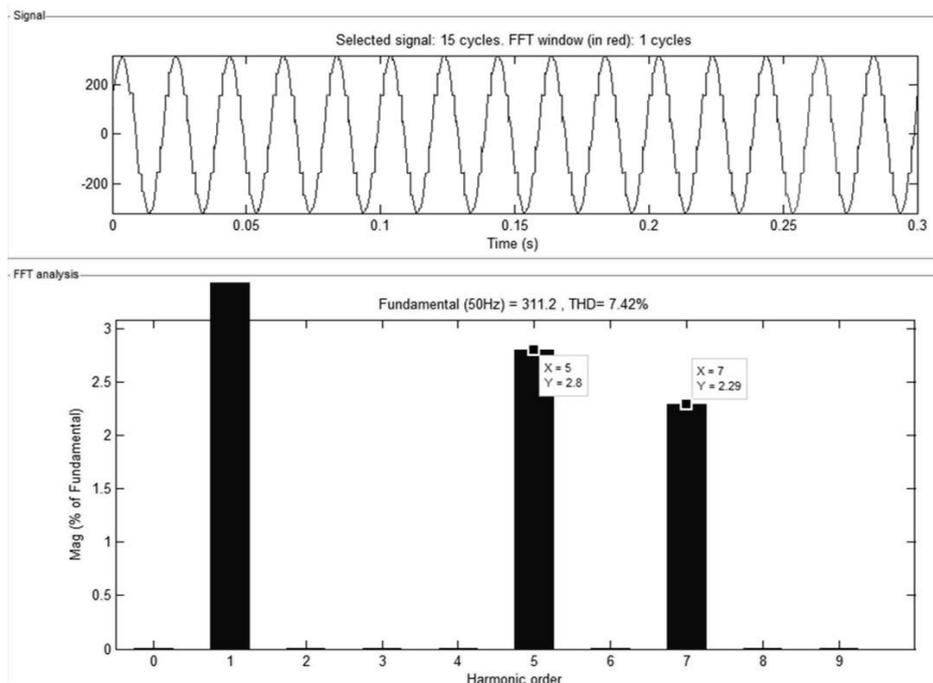


Рисунок 4.5. Осциллограмма и спектрограмма кривой напряжения одной фазы с применением фильтров, настроенных на 5 и 7 высшие гармонические составляющие.

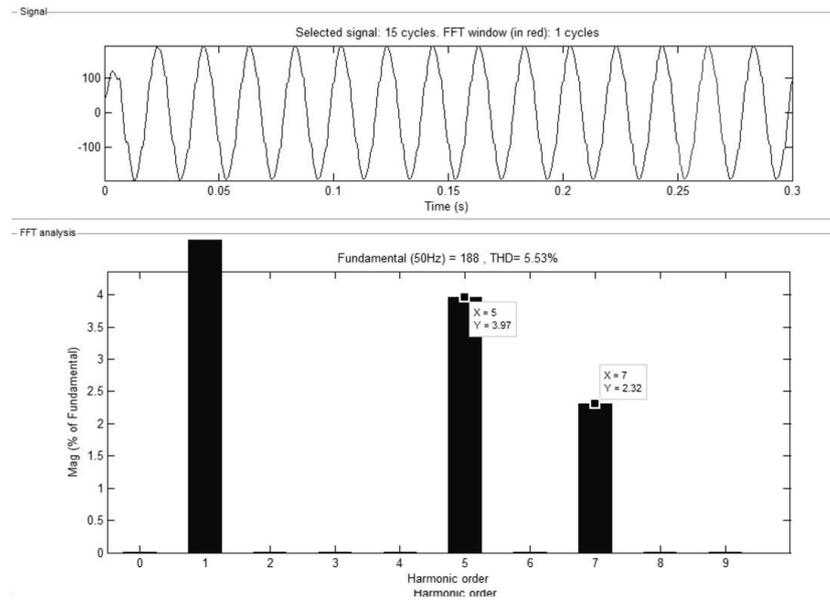


Рисунок 4.6. Осциллограмма и спектрограмма кривой тока одной фазы с применением фильтров, настроенных на 5 и 7 высшие гармонические составляющие.

Показатели работы установленных ПФ приведены в таблице 4.4.

Таблица 4.4 – Результат математического моделирования параметров пассивных фильтров на подавление канонических гармоник

	$k_I, \%$	$k_{I5}, \%$	$k_{I7}, \%$	$k_U, \%$	$k_{U5}, \%$	$k_{U7}, \%$	$U, \text{В}$	$I, \text{А}$	k_M
Без фильтров	19,64	16,8	9,21	17,30	11,5	8,81	362	149	0,87
С применением ПФ	5,5	4,0	2,2	7,4	2,8	2,3	370	146	0,93

Результаты, приведенные в табл. 4.3, показывают соответствие всех показателей качества электроэнергии нормам ГОСТ 32144-2013. Получены степени снижения коэффициентов, характеризующие наличие высших гармонических составляющих в сети до и после применения ПФ, которые представлены в таблице 4.5. Степень снижения на примере k_U и k_I определяется следующим образом (4.9):

$$\Delta k_U = \frac{k_{U1} - k_{U2}}{k_{U1}} 100\%, \quad \Delta k_I = \frac{k_{I1} - k_{I2}}{k_{I1}} 100\%, \quad (4.9)$$

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

Степени снижения для коэффициентов $k_{I5}, k_{U5}, k_{I7}, k_{U7}$ определяются аналогичным образом (4.10) – (4.11):

$$\Delta k_{U5} = \frac{K'_{U5} - K''_{U5}}{K'_{U5}} 100\%, \quad \Delta k_{U7} = \frac{K'_{U7} - K''_{U7}}{K'_{U7}} 100\%, \quad (4.10)$$

$$\Delta k_{I5} = \frac{K'_{I5} - K''_{I5}}{K'_{I5}} 100\%, \quad \Delta k_{I7} = \frac{K'_{I7} - K''_{I7}}{K'_{I7}} 100\%, \quad (4.11)$$

где K'_{U5}, K'_{I5} - коэффициенты до применения ПФ, K''_{U5}, K''_{I5} - коэффициенты после применения ПФ.

Отклонение напряжения определяются (4.12):

$$\Delta U = \frac{U_1 - U_2}{U_1} 100\%, \quad \Delta I = \frac{I_1 - I_2}{I_1} 100\%, \quad (4.12)$$

где U_1, I_1 - напряжение и ток до применения устройства компенсации, U_2, I_2 - напряжение и ток после применения устройства компенсации

Таблица 4.5 – Степени снижения уровней высших гармонических до и после применения ПФ

$\Delta k_I, \%$	$\Delta k_U, \%$	$\Delta k_{I5}, \%$	$\Delta k_{U5}, \%$	$\Delta k_{I7}, \%$	$\Delta k_{U7}, \%$	$\Delta U, \%$	$\Delta I, \%$	$\Delta k_M, \%$
72	57	76	76	76	74	2,2	2	6,9

За счет компенсации реактивной мощности снижается потребление полной мощности, следовательно, происходит разгрузка питающего трансформатора, что позволяет увеличить его срок службы в 2-4 раза согласно рисунку 1.5.

Таким образом, результаты имитационного моделирования показали достаточную эффективность работы ПФ в части снижения высших гармоник.

4.3 Имитационное моделирование активных фильтрокомпенсирующих устройств

На рисунке 4.7 приведена имитационная модель сети нефтедобычи с установкой параллельного активного фильтра, на выходе которого подключен емкостной фильтр. Результаты исследований [6,14,15] показывают целесообразность установки ПФ на выходе параллельного активного фильтр. Параметры сети и нелинейной нагрузки приняты такими же, как и в случае с установкой ПФ.

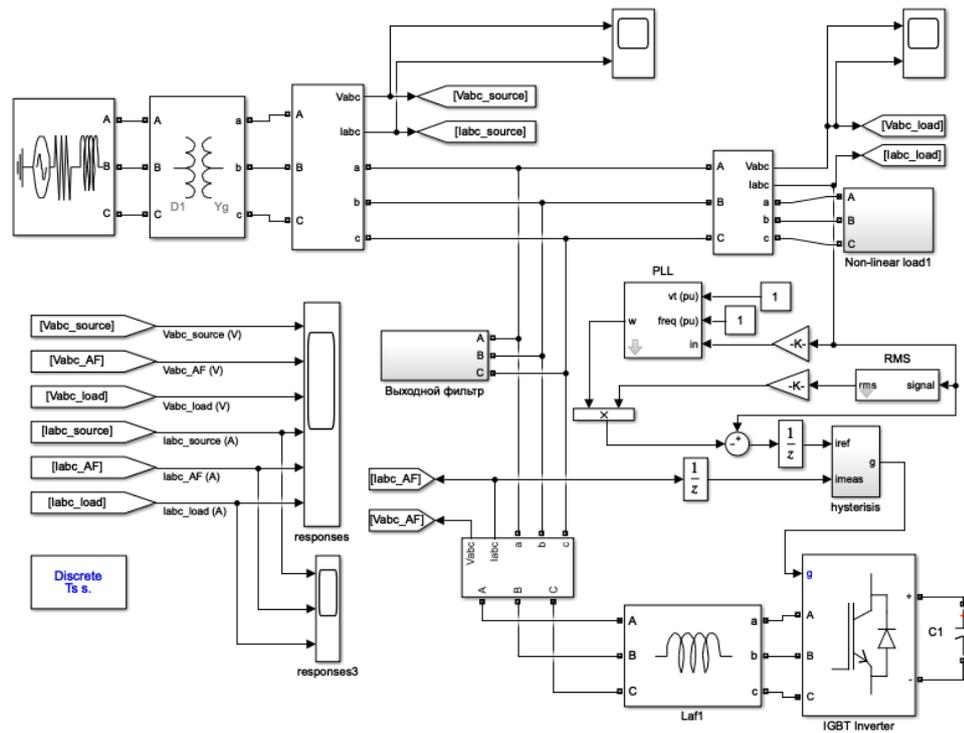


Рисунок 4.7 – Модель системы электроснабжения электропогружной установки нефтедобычи с применением параллельного активного фильтра

В качестве алгоритма управления параллельным активным фильтром принят метод определения опорного тока без каких-либо фазовых преобразований как наиболее простой [91]. Результаты моделирования приведены на рисунках 4.11, 4.12.

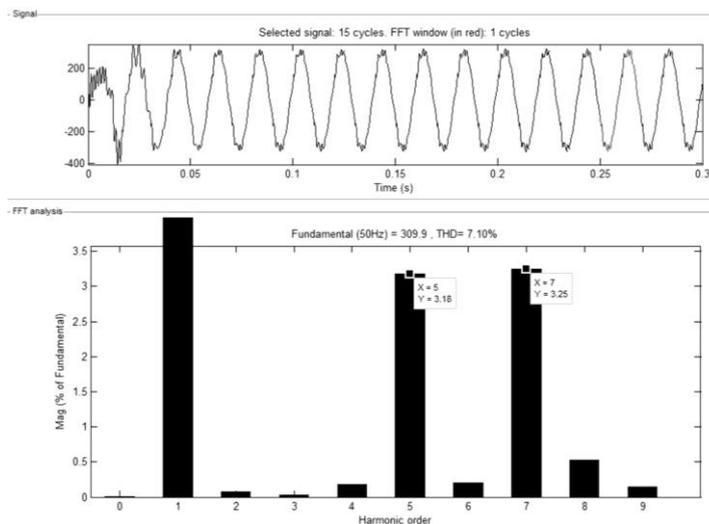


Рисунок 4.11 Осциллограмма и спектрограмма кривой напряжения одной фазы с применением ПАФ, настроенным на подавление высших гармонических составляющих

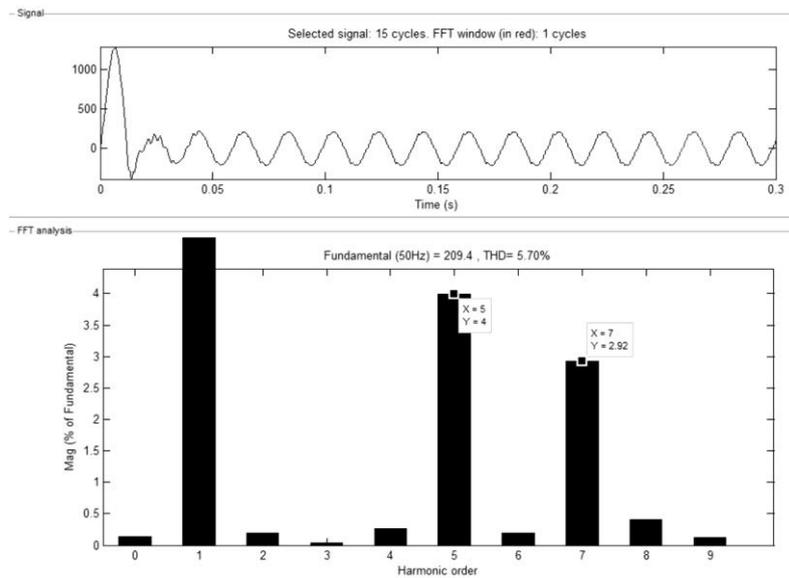


Рисунок 4.12 Осциллограмма и спектрограмма кривой тока одной фазы с применением ПАФ, настроенным на подавление высших гармонических составляющих
 Результаты применения параллельного активного фильтра с данным алгоритмом управления приведены в табл. 4.6.

Таблица 4.6 - Результат работы ПАФ с различными выходными пассивными фильтрами

	$k_I, \%$	$k_{I5}, \%$	$k_{I7}, \%$	$k_U, \%$	$k_{U5}, \%$	$k_{U7}, \%$	$U, \text{В}$	$I, \text{А}$	k_M
Без фильтров	19,64	16,8	9,21	17,30	11,5	8,81	362	149	0,87
С применением ПАФ и выходным активно-емкостным фильтром по схеме звезда	5,7	4,0	2,9	7,1	3,2	3,3	378	143	0,98
С применением ПАФ и выходным активно-емкостным фильтром по схеме треугольник	5,7	4,0	2,9	7,1	3,2	3,2	378	143	0,98
С применением ПАФ и выходным активно-индуктивно-емкостным фильтром	5,6	3,9	2,8	7,0	3,0	3,1	379	141	0,98

Результаты, приведенные в табл. 4.5, показывают соответствие всех показателей качества электроэнергии нормам ГОСТ 32144-2013, полученные степени снижения коэффициентов, характеризующие наличие высших

гармонических составляющих в сети до и после применения ПАФ с различными выходными фильтрами, которые представлены в таблице 4.7.

Степени снижения для THD_U , THD_I , K_{I5} , K_{U5} , K_{I7} , K_{U7} определяются согласно формулам 4.9 – 4.12.

Таблица 4.7 – Степени снижения уровней высших гармонических до и после применения ПАФ с различными выходными ПФ

	$\Delta k_I, \%$	$\Delta k_{I5}, \%$	$\Delta k_{I7}, \%$	$\Delta k_U, \%$	$\Delta k_{U5}, \%$	$\Delta k_{U7}, \%$	$\Delta U, \%$	$\Delta I, \%$	$\Delta k_M, \%$
ПАФ и выходным емкостным фильтром	71,0	76,2	68,3	59,0	72,4	63,1	4,4	4,0	12,6
ПАФ и выходным активно-емкостным фильтром	71	76,3	68,2	58,8	72,3	63,22	4,4	4,0	12,6
ПАФ и выходным активно-индуктивно-емкостным фильтром	71	76,5	68,9	59,4	73,8	65,1	4,7	5,4	12,6

На рисунке 4.13 приведена имитационная модель сети нефтедобычи с установкой ПАФ с алгоритмом системы управления на основе фазовых преобразований, приведенных на рисунке 2.16. На рисунке 4.14 представлена реализация САУ.

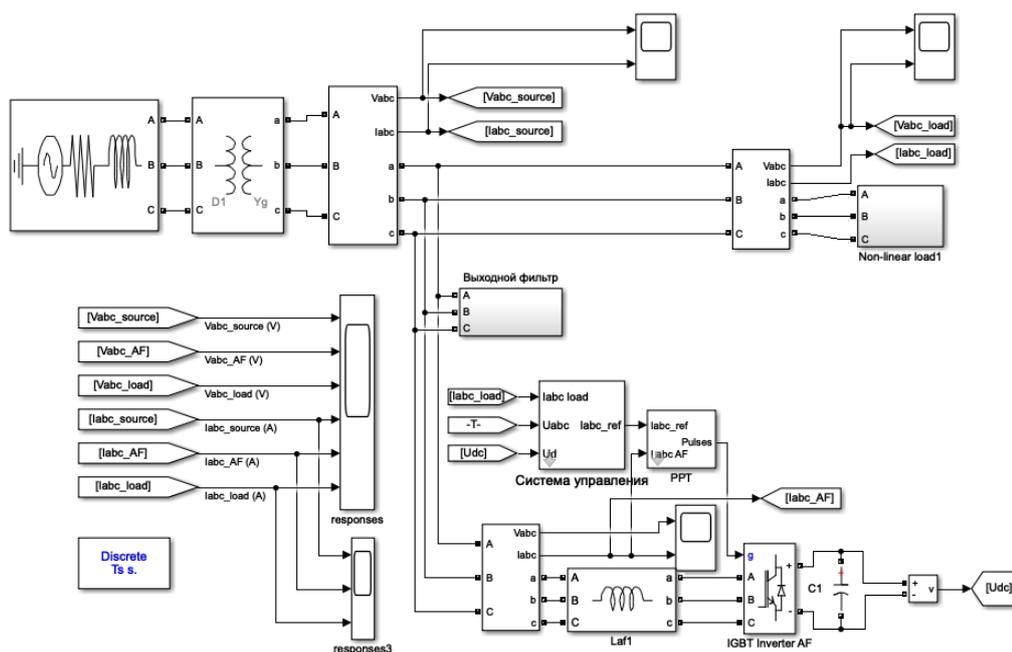


Рисунок 4.13 – Модель СЭС с параллельным активным фильтрокомпенсирующим устройством

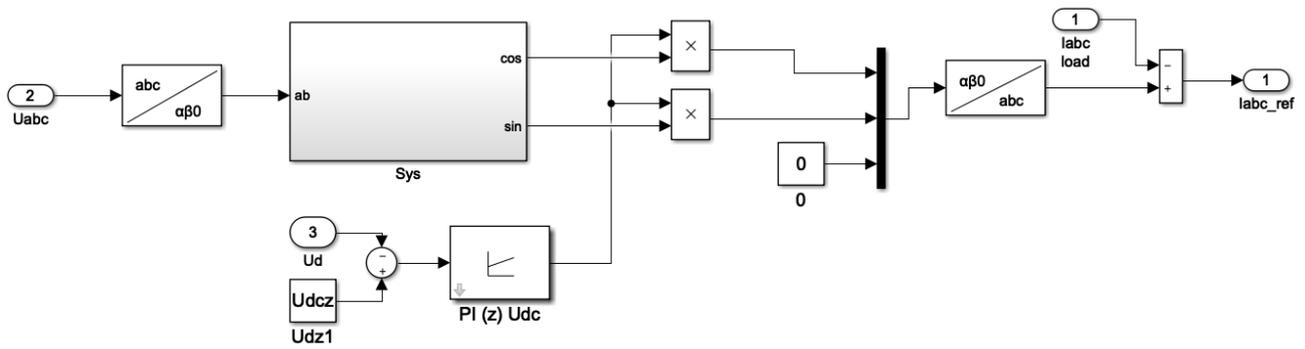


Рисунок 4.14 – Математическая модель САУ параллельным активным
фильтрокомпенсирующим устройством

Результаты моделирования параллельного активного
фильтрокомпенсирующего устройства с алгоритмом управления, основанным на
фазовых преобразованиях, приведены в таблице 4.8.

Таблица 4.8 - Результат работы ПАФ с различными выходными пассивными фильтрами

	$k_I, \%$	$k_{I5}, \%$	$k_{I7}, \%$	$k_U, \%$	$k_{U5}, \%$	$k_{U7}, \%$	$U, \text{В}$	$I, \text{А}$	k_M
Без фильтров	19,64	16,8	9,21	17,30	11,5	8,81	362	149	0,87
С применением ПАФ и выходным активно- емкостным фильтром по схеме звезда	4,2	3,5	2,0	5,7	2,8	2,6	378	142	0,985
С применением ПАФ и выходным активно- емкостным фильтром по схеме треугольник	4,2	3,5	2,0	5,7	2,8	2,6	378	142	0,985
С применением ПАФ и выходным активно- индуктивно-емкостным фильтром	4,2	3,5	1,9	5,4	2,8	2,5	379	140	0,985

Результаты, приведенные в табл. 4.7, показывают соответствие всех показателей качества электроэнергии нормам ГОСТ 32144-2013, полученные степени снижения коэффициентов, характеризующие наличие высших гармонических составляющих в сети до и после применения ПАФ с различными выходными фильтрами, которые представлены в таблице 4.9.

Степени снижения для THD_U , THD_I , K_{I5} , K_{U5} , K_{I7} , K_{U7} определяются согласно формулам 4.9 – 4.12.

Таблица 4.9 – Степени снижения уровней высших гармонических до и после применения ПАФ с различными выходными ПФ

	$\Delta k_b, \%$	$\Delta k_{I5}, \%$	$\Delta k_{I7}, \%$	$\Delta k_U, \%$	$\Delta k_{U5}, \%$	$\Delta k_{U7}, \%$	$\Delta U, \%$	$\Delta I, \%$	$\Delta k_M, \%$
ПАФ и выходным емкостным фильтром	78,5	79,1	78,1	66,9	75,5	70,3	4,42	4,7	13,2
ПАФ и выходным активно-емкостным фильтром	78,5	79,1	78,2	67,0	75,5	70,5	4,4	4,7	13,2
ПАФ и выходным активно-индуктивно-емкостным фильтром	78,7	78,8	67,7	68,3	76,0	71,4	4,5	6,1	13,2

Представленные системы управления обеспечивают компенсацию ВГС с разной степенью. Имитационная модель с алгоритмом системы управления на основе фазовых преобразований обеспечивает эффективную компенсацию ВГС тока и напряжения [94].

Таким образом, для разработки ГФУ целесообразнее использовать ПАФ с системой управления основанной на фазовых преобразованиях.

На рисунке 4.15 приведена имитационная модель сети нефтедобычи с установкой ПСАФ с алгоритмом системы управления на основе преобразований Фортескью, согласно выражениям 2.42 – 2.60.

В качестве алгоритма управления последовательным активным фильтром принят метод преобразований Фортескью, как наиболее простой. Результат моделирования приведен на рисунке 4.16 [125].

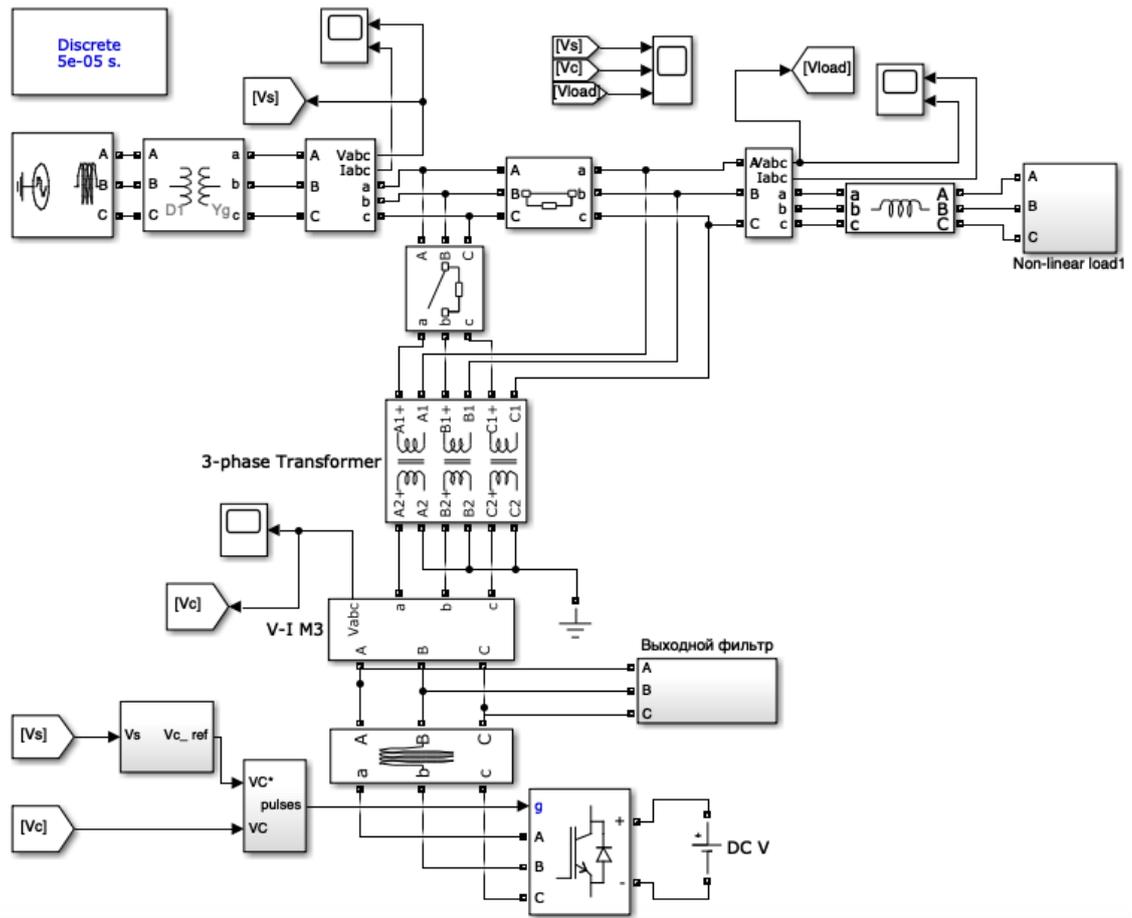


Рисунок 4.15 – Модель системы электроснабжения электропогружной установки нефтедобычи с применением последовательного активного фильтра

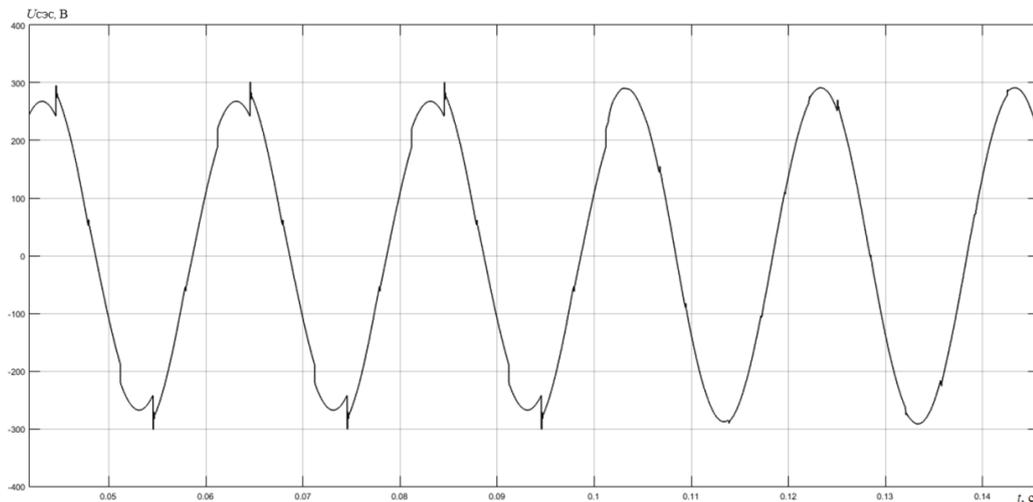


Рисунок 4.16 – Осциллограмма напряжения в системе электроснабжения электропогружной установки нефтедобычи с применением последовательного активного фильтра

По результатам моделирования были получены следующие показатели качества электрической энергии, представленные в таблице 4.10 и степень снижения ВГС напряжения, представленные в таблице 4.11.

Таблица 4.10. – Значения высших гармонических составляющих по напряжению до и после применения последовательного активного фильтра

	$k_U, \%$	$k_{U5}, \%$	$k_{U7}, \%$	$U, В$	k_M
Без фильтров	17,30	11,5	8,81	362	0,87
ПСАФ и выходным емкостным фильтром	3,3	2,1	1,8	380	0,91
ПСАФ и выходным активно-емкостным фильтром	3,3	2,1	1,8	380	0,91
ПСАФ и выходным активно-индуктивно-емкостным фильтром	3,3	2,1	1,8	380	0,915

Таблица 4.11. – Степень снижения высших гармонических составляющих по напряжению до и после применения последовательного активного фильтра

	$\Delta k_U, \%$	$\Delta k_{U5}, \%$	$\Delta k_{U7}, \%$	$\Delta U, \%$	$\Delta k_M, \%$
ПСАФ и выходным емкостным фильтром	80,8	81,7	79,5	4,9	4,6
ПСАФ и выходным активно-емкостным фильтром	81,0	81,7	79,5	4,9	4,6
ПСАФ и выходным активно-индуктивно-емкостным фильтром	81,0	82,7	79,5	4,9	5,17

По результатам математического моделирования установлено, что ПАФ с системой управления основанной на фазовых преобразованиях обеспечивает компенсацию ВГС тока и напряжения лучше ПАФ с системой управления основанной на методе определения опорного тока. ПСАФ обеспечивает компенсацию ВГС напряжения и отклонения напряжения со стороны сети и не влияет на уровень ВГС тока в отличие от ПАФ [90].

Таким образом, при разработке имитационных моделей ГФУ следует учитывать наличие уровня ВГС тока и напряжения в СЭС предприятия нефтедобычи и применять ГФУ на основе ПАФ с системой управления основанной на фазовых преобразованиях и на основе ПСАФ для эффективной компенсации ВГС напряжения. [22]

Существует ряд исследований [10,17,24,78], которые подтверждают целесообразность установки пассивных фильтров на выходе ПАФ. Поэтому представляется необходимым рассмотреть структуру гибридного электротехнического комплекса на основе ПАФ, на выходе которого подключен ПФ определенной конфигурации. Стоит отметить, что применение ПАФ без

выходного пассивного фильтрокомпенсирующего устройства повышает уровень высших гармонических составляющих по напряжению.

4.4 Имитационное моделирование структур гибридных фильтрокомпенсирующих устройств

При имитационном моделировании рассмотрены структуры ГФУ на основе ПАФ и ПСАФ, а также ПФ, настроенных на подавление канонических ВГС. Параметры питающей сети и подключенной нагрузки приняты аналогично моделированию активных и пассивных фильтров для условий предприятий нефтедобычи.

4.4.1 Моделирование гибридной структуры на основе параллельного активного фильтра

На рисунке 4.17 представлена имитационная модель гибридного фильтрокомпенсирующего устройства на основе параллельного активного фильтрокомпенсирующего устройства.

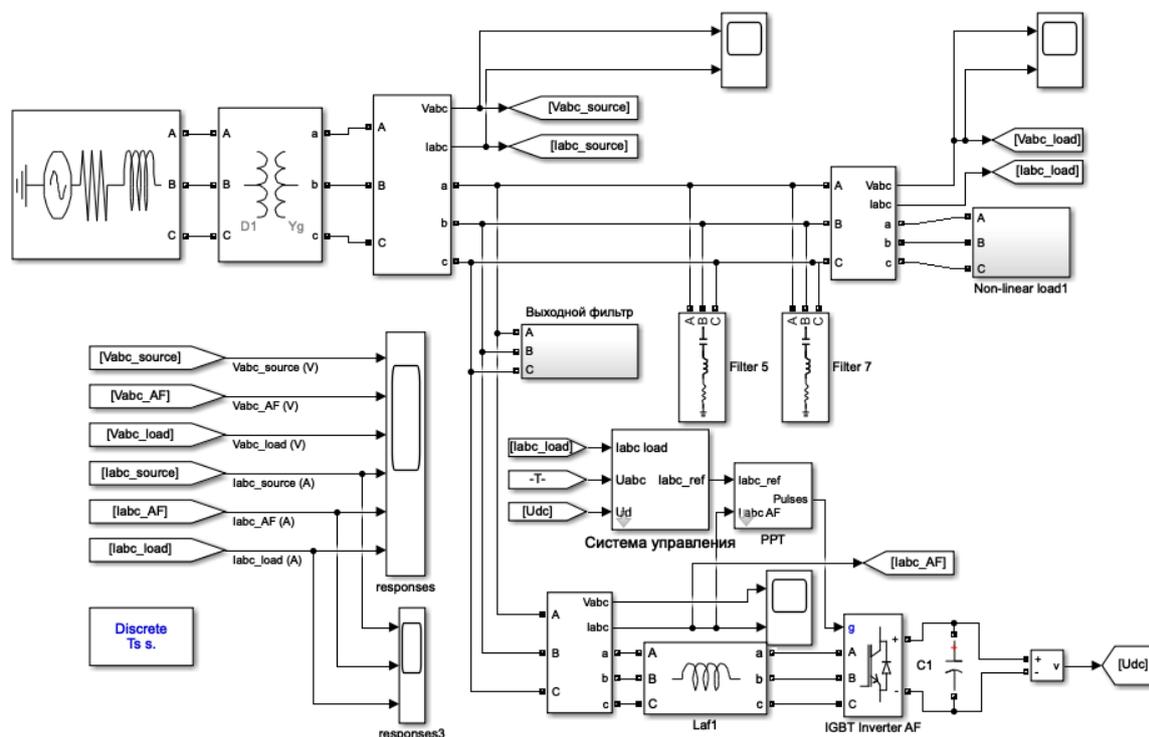


Рисунок 4.17 – Имитационная модель гибридного фильтрокомпенсирующего устройства на основе параллельного активного фильтрокомпенсирующего устройства.

Разработанная имитационная модель состоит из источника неограниченной мощности, соответствующего централизованной системе электроснабжения, и

силового трансформатора классом напряжения 6/0,4 кВ со схемой соединений обмоток треугольник/звезда с глухозаземленной нейтралью, ПАФ без выходного фильтра и двух ПФ, настроенных на подавление 5 и 7 ВГС тока НН.

При разработке имитационной модели параметры питающей сети и подключенной нагрузки задавались в относительных единицах (о.е.), где за базис принимались усредненные величины мощностей и сопротивлений элементов. При этом за базисные принимались величины мощности нагрузки в часы максимума. Моделирование осуществлялось на примере технологических установок нефтедобычи, где мощности погружных технологических электроустановок могут превышать несколько сотен кВт [1,6]. Также при моделировании уровень искажения тока нагрузки задавался в диапазоне от 9 до 30 %, а уровень искажения напряжения сети – от 2 до 15 %, что соответствует результатам экспериментальных исследований в сетях нефтедобычи [1].

Графики изменения полной, активной и реактивной мощности в СЭС до применения ГФУ на основе ПАФ представлены на рисунке 4.18.

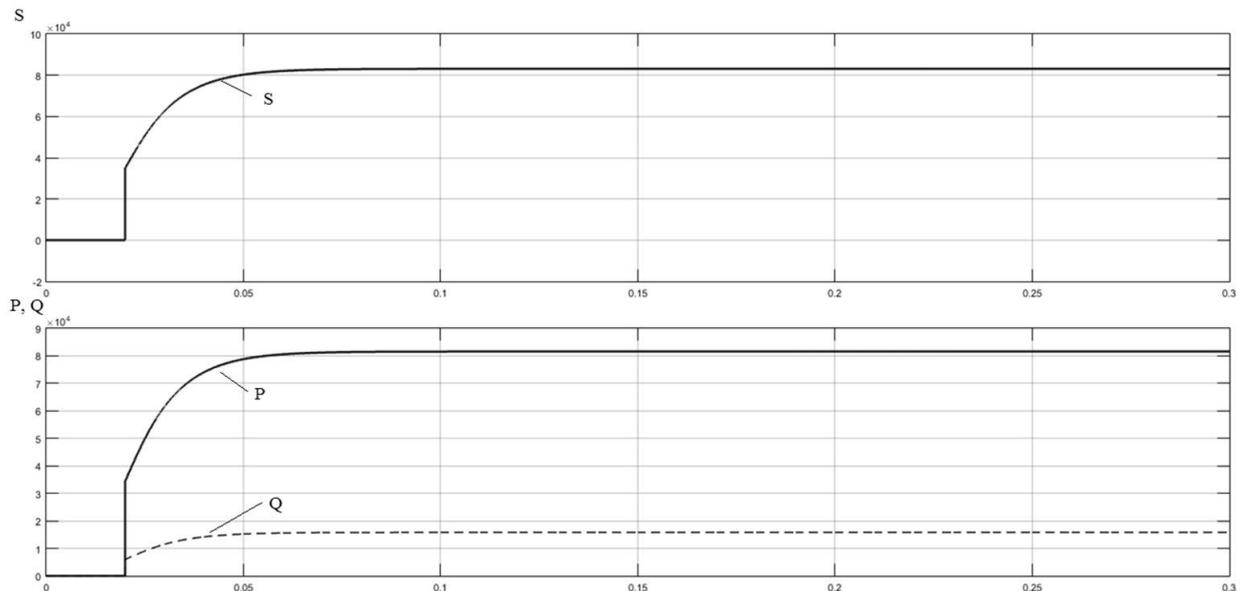


Рисунок 4.18 – Графики мощностей в СЭС без применения ГФУ

После применения ГФУ на основе ПАФ происходит компенсация реактивной мощности и как следствие, снижение полной мощности. Графики мощностей с применением ГФУ на основе ПАФ представлены на рисунке 4.19.

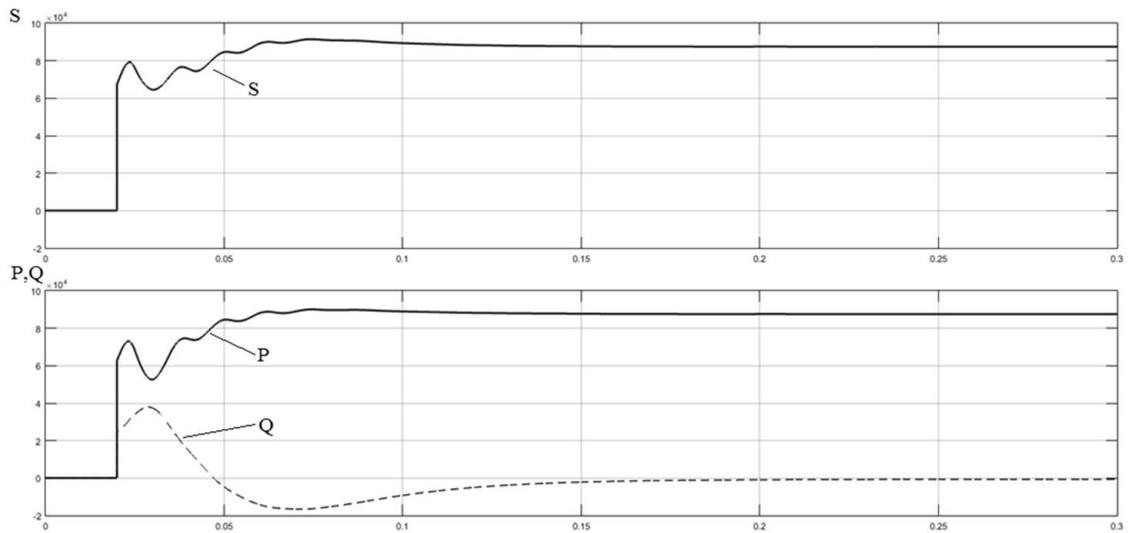


Рисунок 4.19 – Графики мощностей в СЭС по результатам применения ГФУ

Таким образом, с помощью ГФУ на основе ПАФ удастся максимально приблизить величину коэффициента мощности k_M на частоте основной составляющей к 1. График изменения k_M на частоте основной составляющей с применением ГФУ на основе ПАФ представлен на рисунке 4.20.

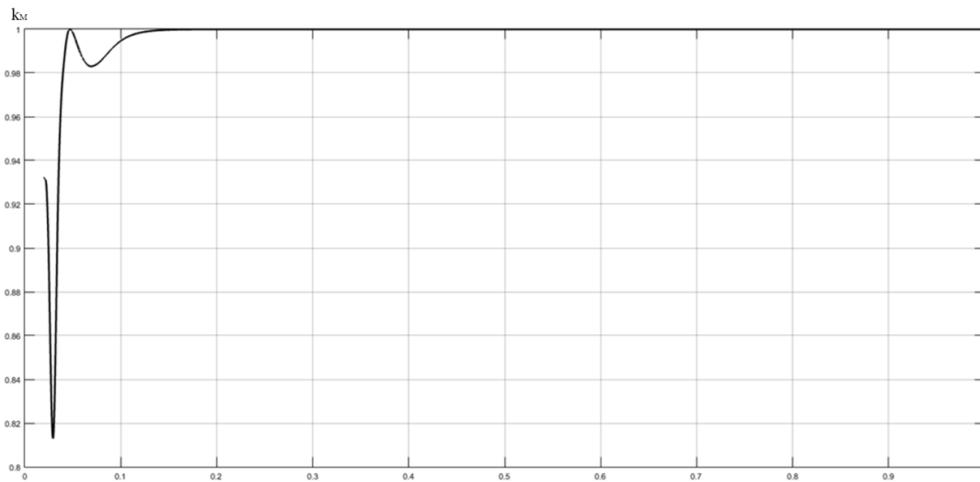


Рисунок 4.20 – График изменения k_M сети по результатам применения ГФУ

Данные по активным и реактивным мощностям, а также по значениям k_M в результате применения ГФУ на базе ПАФ представлены в таблице 4.12.

Таблица 4.12 – Энергетические показатели применения ГФУ на базе ПАФ

Режим работы	P , о.е.	Q , о.е.	k_M
Без ГФУ	0,292	0,067	0,974
С ГФУ	0,293	0,001	0,999

По результатам моделирования были получены показатели качества и степени снижения коэффициентов, характеризующих наличие высших

гармонических составляющих в сети до и после применения ФКУ, которые представлены в таблице 4.13. Степени снижения определялись аналогично по выражениям 4.9 – 4.12.

Таблица 4.13 – Показатели качества электрической энергии и степени снижения уровней высших гармонических после применения гибридного ГФУ на базе ПАФ

$k_I, \%$	$k_U, \%$	$k_{I5}, \%$	$k_{U5}, \%$	$k_{I7}, \%$	$k_{U7}, \%$	$U, \text{В}$	$I, \text{А}$	k_M
0,5	1,4	0,4	1,2	0,3	1,1	380	192	0,999
$\Delta k_I, \%$	$\Delta k_U, \%$	$\Delta k_{I5}, \%$	$\Delta k_{U5}, \%$	$\Delta k_{I7}, \%$	$\Delta k_{U7}, \%$	$\Delta U, \%$	$\Delta I, \%$	$\Delta k_M, \%$
97	86	93	83	92	83	5,1	0,4	2,6

Также по результатам моделирования получены осциллограммы кривых тока сети, активного фильтра ГФУ и нелинейной нагрузки, представленные на рисунке 4.21.

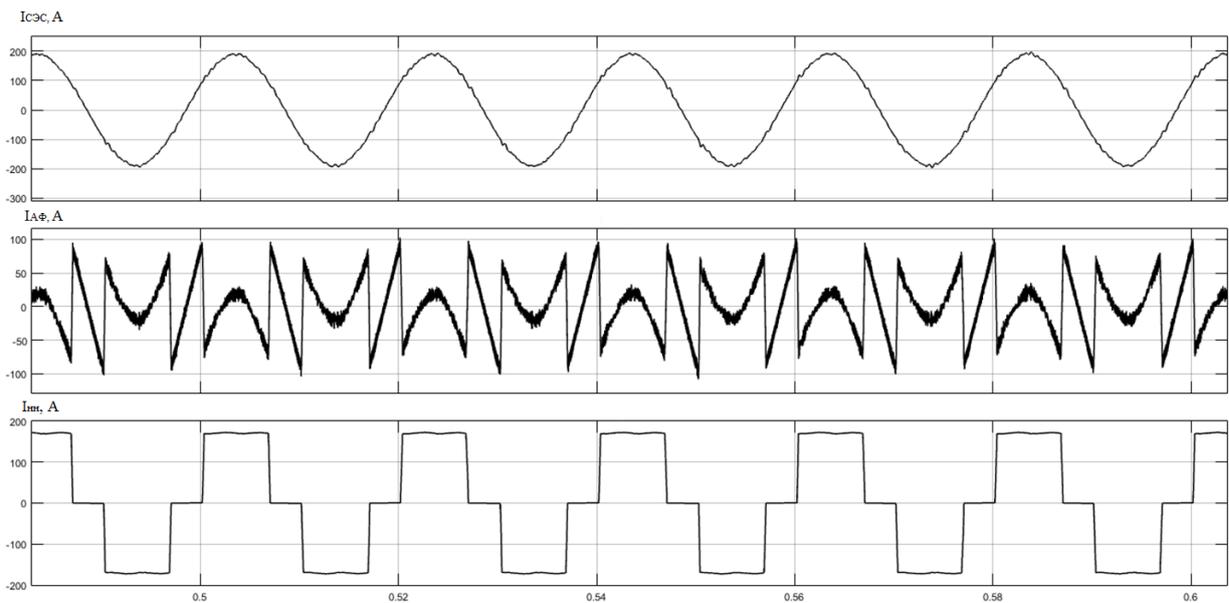


Рисунок 4.21 – Осциллограммы формы кривых: 1 – тока в системе электроснабжения, 2 – тока активной части ГФУ, 3 – тока нелинейной нагрузки.

Уровень напряжения по результатам математического моделирования не изменяется. Следует отметить, что степень снижения уровней ВГС тока и напряжения ГФУ на основе ПАФ и ПФ обеспечивает более эффективную компенсацию гармоник по сравнению с отдельным использованием ПАФ и ПФ. При этом для обеспечения компенсации высших гармоник ГФУ на основе ПАФ можно уменьшить индуктивность на выходе автономного инвертора ГФУ, что позволяет снизить массогабаритную часть.

Таким образом, результаты имитационного моделирования показывают возможность гибридного фильтрокомпенсирующего устройства на основе параллельного фильтра позволяет обеспечить компенсацию реактивной мощности в системе электроснабжения, коэффициента мощности, а также уровня высших гармоник, что позволяет рассматривать данное ГФУ в качестве multifunctional устройства повышения качества электрической энергии.

4.4.2 Моделирование гибридной структуры на основе последовательного активного фильтра

На рисунке 4.22 представлена имитационная модель гибридного фильтрокомпенсирующего устройства на основе последовательного активного фильтрокомпенсирующего устройства.

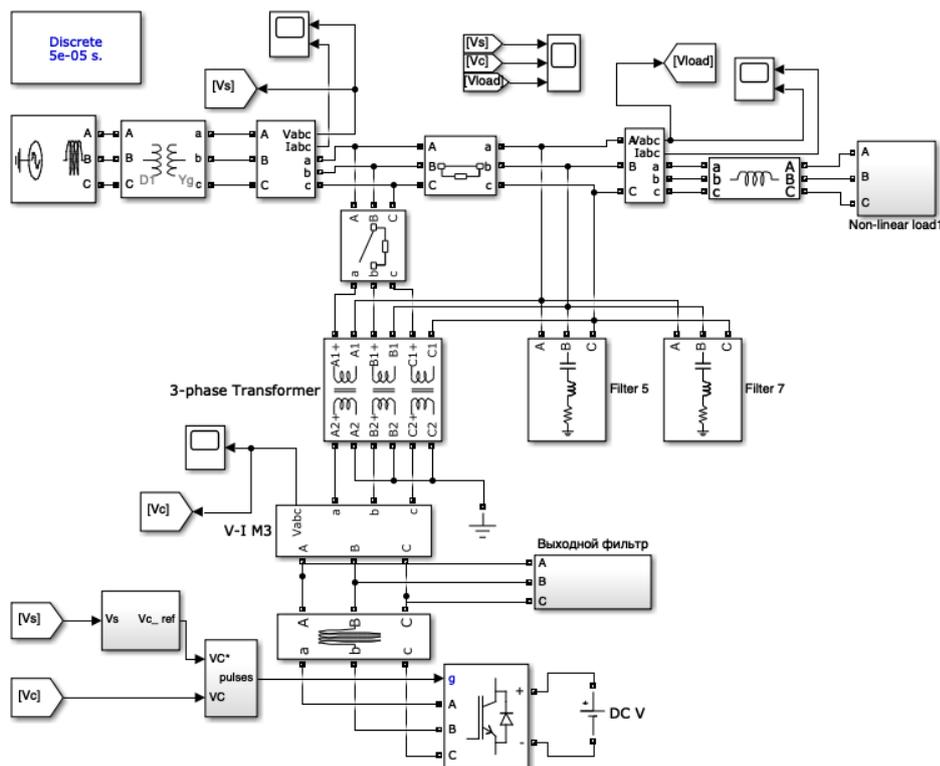


Рисунок 4.22 – Модель гибридного фильтрокомпенсирующего устройства на основе последовательного активного фильтрокомпенсирующего устройства

В ходе имитационного моделирования были получены осциллограммы формы кривой напряжения в системе электроснабжения до и после подключения ГФУ на базе ПСАФ, представленные на рисунках 4.23 и 4.24 соответственно.

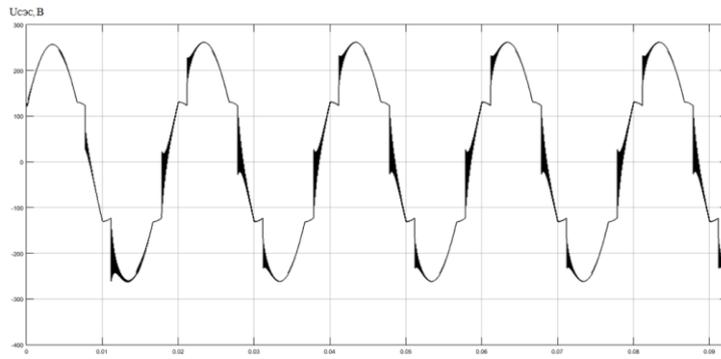


Рисунок 4.23 – Осциллограмма формы кривой напряжения в СЭС до применения ГФУ на базе ПСАФ

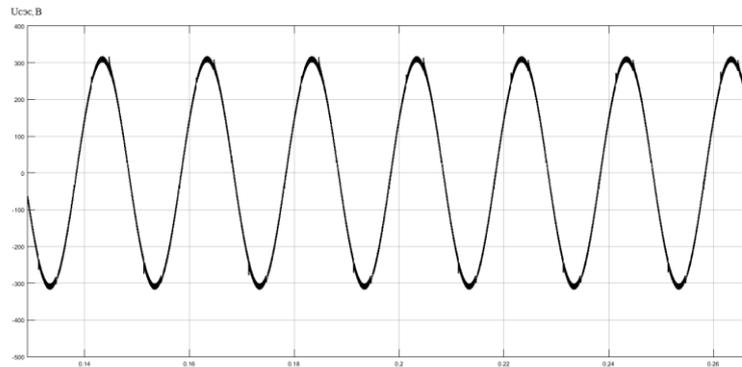


Рисунок 4.24 – Осциллограмма формы кривой напряжения в СЭС по результатам применения ГФУ на базе ПСАФ

В ходе имитационного моделирования регистрировались осциллограммы формы кривой напряжения в системе электроснабжения до и после подключения ГФУ на основе ПСАФ. Также по результатам моделирования были получены степени снижения уровня гармонических искажений по напряжению, представленные в таблице 4.14.

Таблица 4.14 – Показатели качества электрической энергии и степени снижения высших гармонических составляющих по напряжению до и после применения ГФУ на базе ПСАФ

$k_U, \%$	$k_{U5}, \%$	$k_{U7}, \%$	$U, \text{В}$
2,2	2,0	1,9	380
$\Delta k_U, \%$	$\Delta k_{U5}, \%$	$\Delta k_{U7}, \%$	$\Delta U, \%$
85	76,5	73	5,1

Соответствующие степени снижения определялись аналогично по выражениям 4.9 – 4.12.

На рисунках 4.25 и 4.26 представлены спектрограммы напряжения в СЭС до и после применения ГФУ на базе ПСАФ.

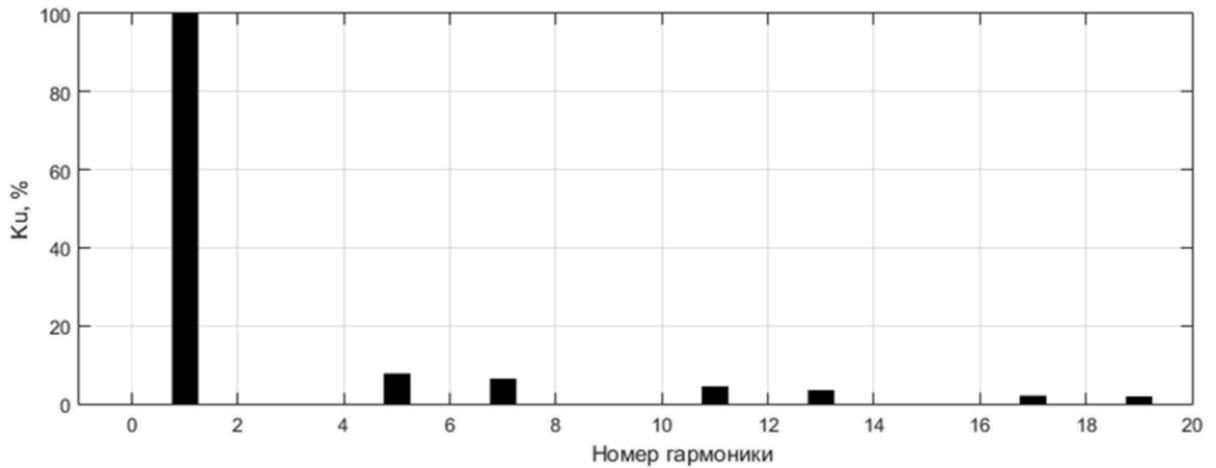


Рисунок 4.25 – Спектрограмма напряжения в СЭС до применения ГФУ на базе ПСАФ

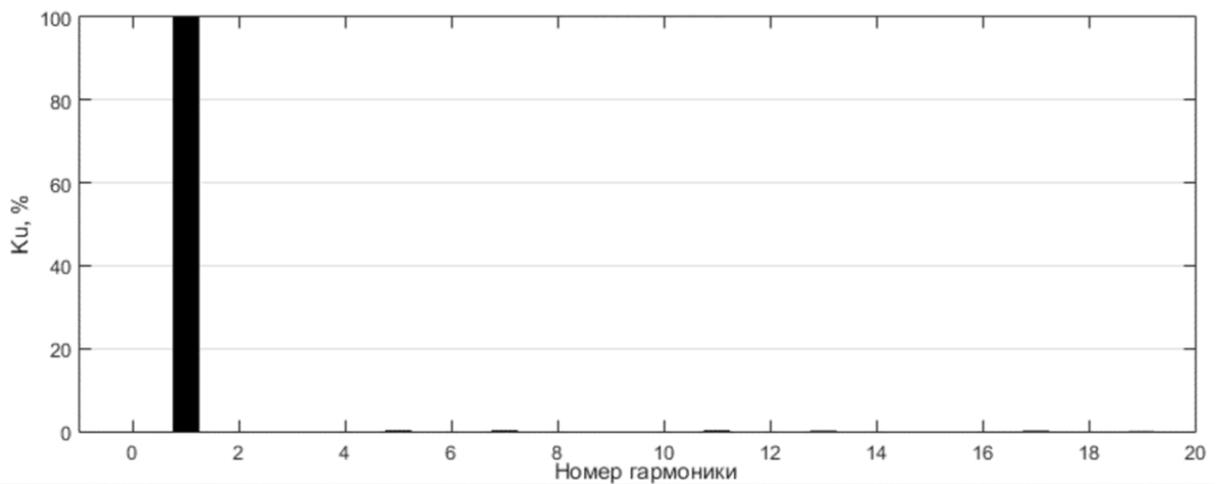


Рисунок 4.26 – Спектрограмма напряжения в СЭС после применения ГФУ на базе ПСАФ

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. В частности, при моделировании действующее значение напряжения в момент подключения нагрузки составляет 0,84 о.е. (за базис принято номинальное значение), что недопустимо согласно требованиям ГОСТ 32144-2013 по допустимому отклонению напряжения. При подключении данного ГФУ создается добавка напряжения и действующее значение составляет 1 о.е., следовательно, ФКУ №2 создает добавку напряжения ΔU (4.13):

$$\delta U = \frac{U_{\text{ном}} - U_{\text{нагр}}}{U_{\text{ном}}} 100\% = \frac{1 - 0,84}{1} 100\% = 16\% \quad (4.13)$$

Помимо этого, ГФУ на основе последовательного активного фильтра одновременно с компенсацией провалов напряжения способно подавлять высшие гармоники напряжения, что также подтверждает многофункциональность подобного устройства [93]. При этом уровень гармоник напряжения снижается на 85%.

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

4.4.3 Моделирование гибридного фильтрокомпенсирующего устройства на основе параллельного активного фильтра с частотно-регулируемым электроприводом

В классическом исполнении на выходе активных фильтров устанавливаются дроссели или согласующие трансформаторы. Дроссели подключаются на выходе классических параллельных активных фильтров для сглаживания пульсаций компенсационных токов, формируемых инверторами. Согласующие трансформаторы включаются на выходе последовательных активных фильтров и выполняют функцию вольтодобавочных трансформаторов для формирования компенсационного напряжения. Также согласующие трансформаторы могут быть установлены на выходе ПАФ в случае их применения в сетях высокого напряжения.

Разработана имитационная модель данного комплекса в среде *Simulink* системы *Matlab*. При этом для повышения достоверности результатов нелинейная нагрузка представлена в виде системы частотно-регулируемого асинхронного электропривода с векторной системой управления, что является наиболее распространенным случаем в промышленных условиях [88]. Исходная структура данной модели без фильтров приведена на рисунке 4.27.

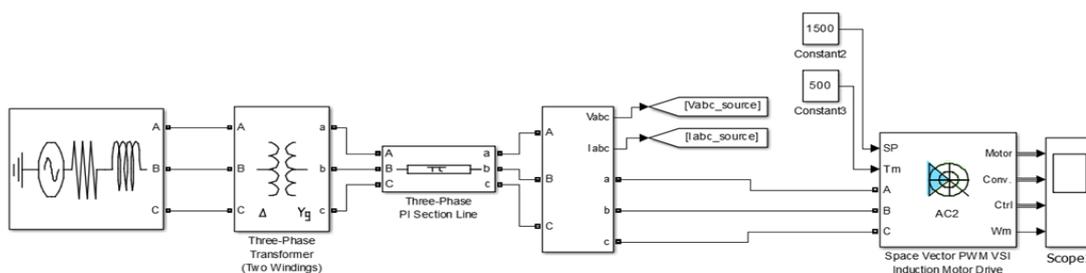


Рисунок 4.27 – Математическая модель сети с нелинейной нагрузкой в виде частотно-регулируемого электропривода с алгоритмом векторного управления

Параметры разработанной модели подобраны с учетом результатов экспериментальных исследований [13,15]. В качестве алгоритма функционирования активной части гибридного фильтрокомпенсирующего устройства приняты фазовые преобразования токов и напряжений компенсируемой сети с использованием системы фазовой автоподстройки частоты. На выходе ПАФ помимо дросселей установлен емкостной фильтр, со стороны НН установлено два ПФ для подавления 5 и 7 ВГС [89,92].

На рисунках 4.28 и 4.29 приведены осциллограммы и спектрограммы напряжения и тока сети соответственно в исходном режиме.

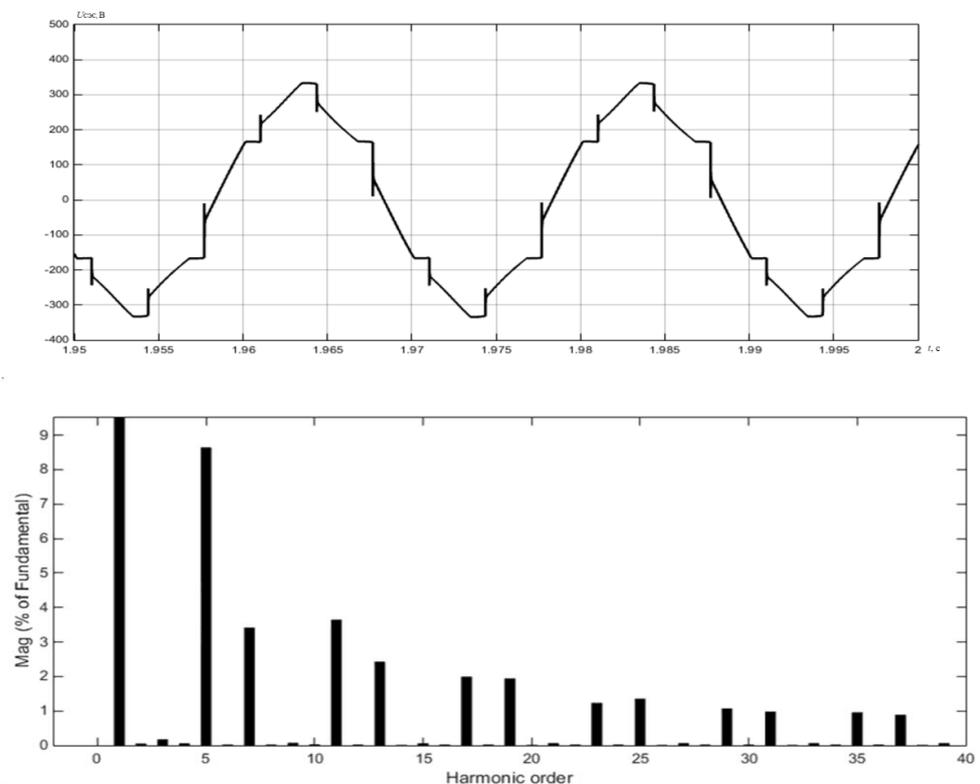


Рисунок 4.22 – Осциллограмма и спектрограмма кривой напряжения одной фазы без применения гибридного фильтрокомпенсирующего устройства

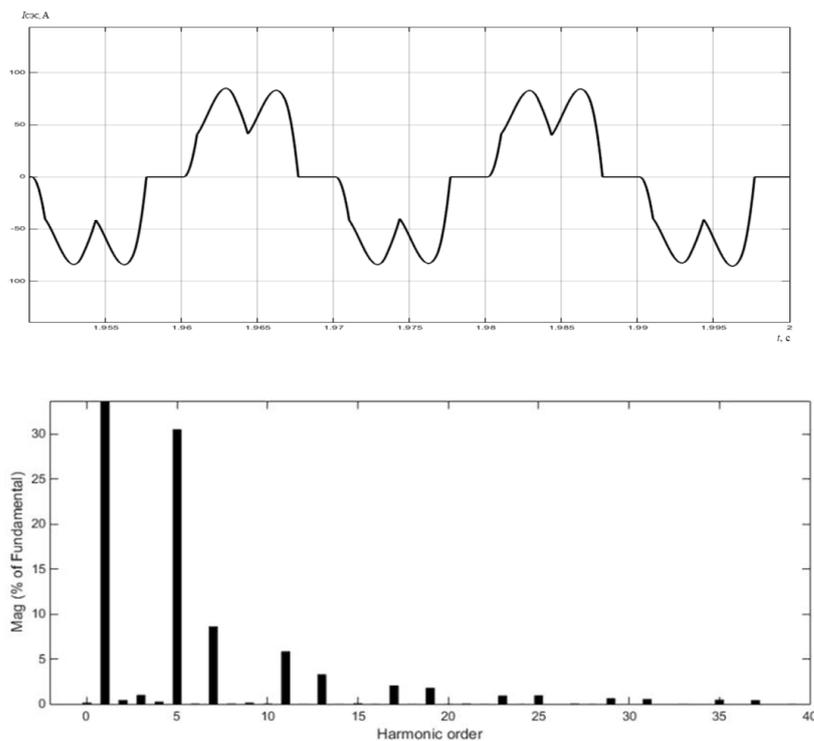


Рисунок 4.29 – Осциллограмма и спектрограмма кривой тока одной фазы без применения гибридного фильтрокомпенсирующего устройства

На рисунке 4.30 приведена имитационная модель гибридного электротехнического комплекса.

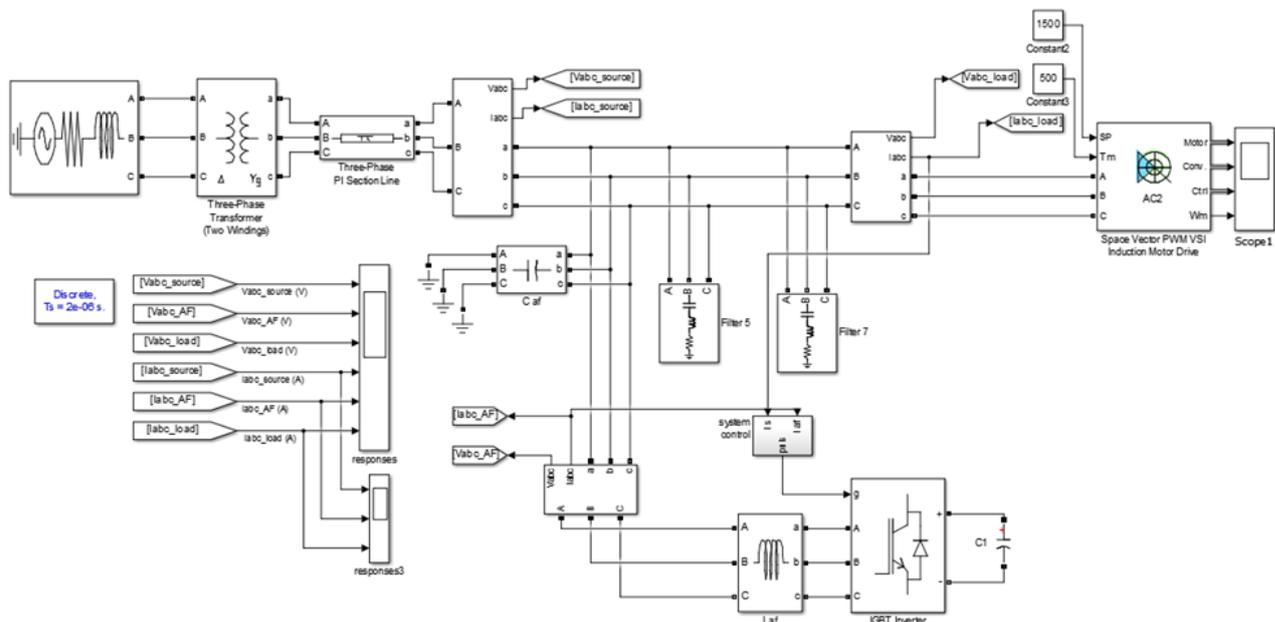


Рисунок 4.30 – Имитационная модель гибридного фильтрокомпенсирующего устройства с частотно-регулируемым электроприводом с алгоритмом векторного управления

На рисунках 4.31 и 4.32 приведены осциллограммы и спектрограммы напряжения и тока сети соответственно по результатам применения гибридного электротехнического комплекса.

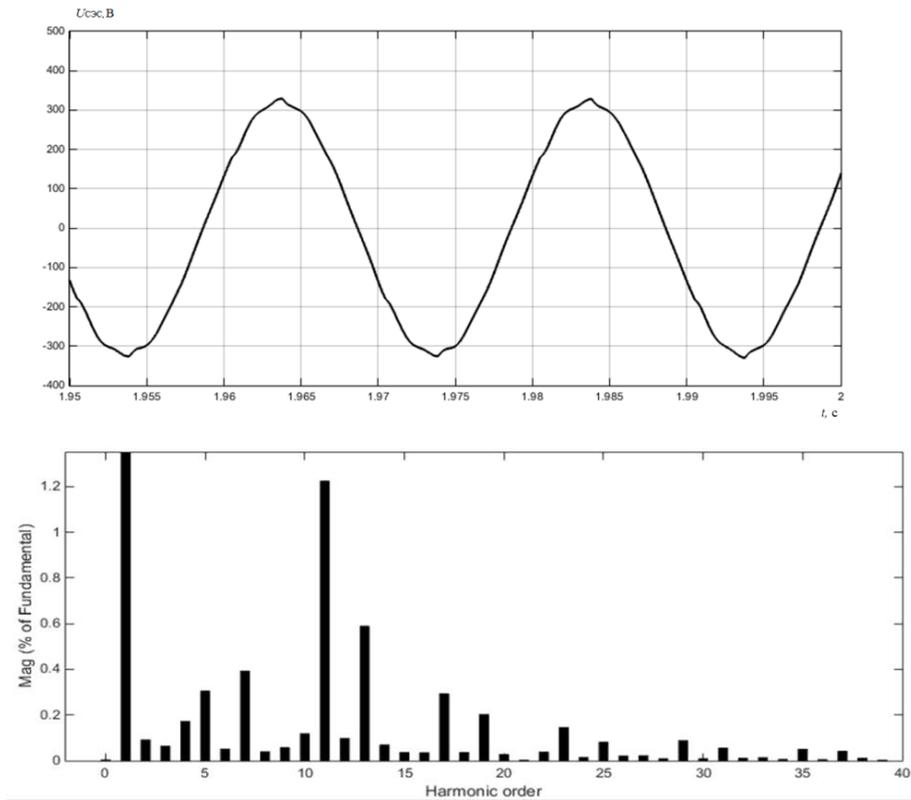


Рисунок 4.31 - Осциллограмма и спектрограмма кривой напряжения одной фазы с применением гибридного фильтрокомпенсирующего устройства

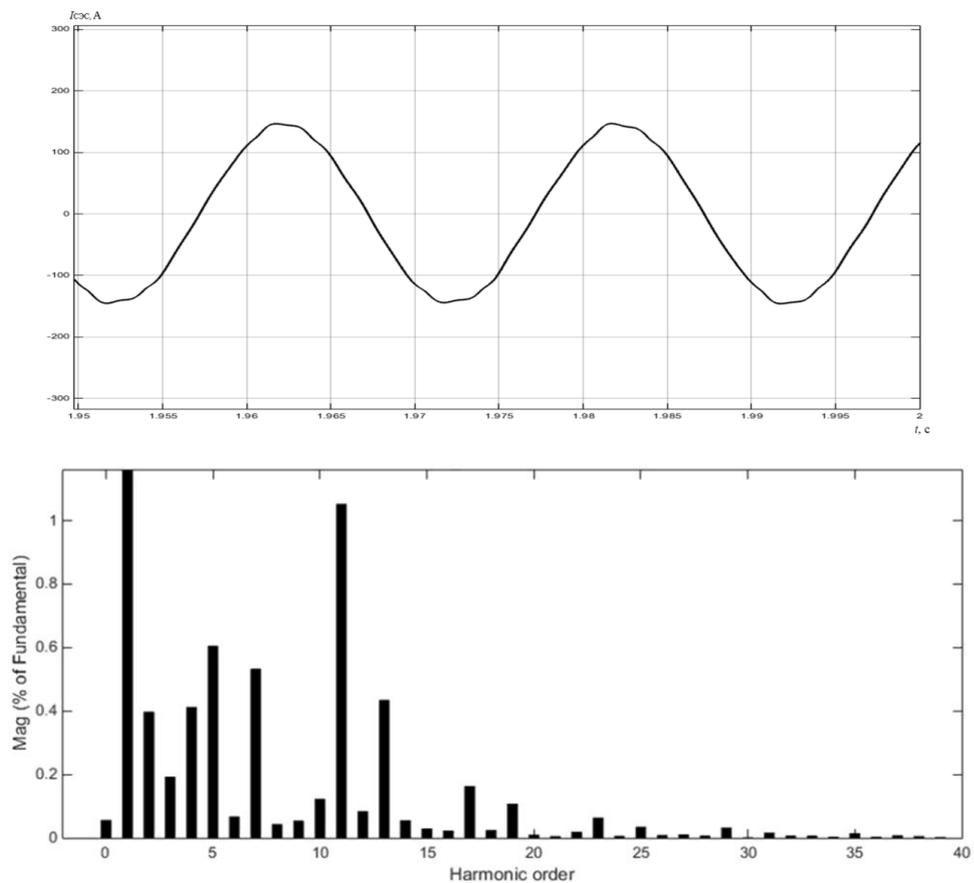


Рисунок 4.32 – Осциллограмма и спектрограмма кривой тока одной фазы с применением гибридного фильтрокомпенсирующего устройства

В таблице 4.15 приведены результаты применения гибридного электротехнического комплекса в виде степеней снижения соответствующих коэффициентов.

Таблица 4.15 – Степени снижения высших гармонических составляющих по напряжению до и после применения гибридного фильтрокомпенсирующего устройства

$\Delta k_I, \%$	$\Delta k_{I5}, \%$	$\Delta k_{I7}, \%$	$\Delta k_U, \%$	$\Delta k_{U5}, \%$	$\Delta k_{U7}, \%$
95,2	98,1	94,0	86,3	96,2	88,2

Результаты моделирования показывают достаточную эффективность компенсации высших гармоник, k_U уменьшился на 86,3%, а k_I уменьшился на 95,25%.

Энергетические показатели гибридного фильтрокомпенсирующего устройства представлены в таблице 4.16.

Таблица 4.16– Энергетические показатели применения гибридного фильтрокомпенсирующего устройства

Режим работы	S , о.е.	P , о.е.	Q , о.е.	k_M
Без ГФУ	0,339	0,329	0,084	0,97
С ГФУ	0,329	0,329	-0,001	1

Полученные значения показывают, что компенсация реактивной мощности гибридным электротехническим комплексом составила $Q_{КОМ} = 0,085$ о.е. Таким образом, обеспечивается компенсация реактивной мощности, что позволяет увеличить пропускную способность линий электропередач, осуществить разгрузку силового трансформатора, питающего нелинейную нагрузку.

4.5 Оценка влияния различных факторов на эффективность работы гибридного фильтрокомпенсирующего устройства

Эффективность работы гибридного фильтрокомпенсирующего устройства на основе ПАФ с выходным ПФ оценивалась по степеням снижения соответствующих показателей THD_U , THD_I , K_{I5} , K_{U5} , K_{I7} , K_{U7} , k_M .

В качестве факторов, влияющих на эффективность работы комплекса, рассматривались: отношение полной мощности нелинейной нагрузки к полной мощности силового трансформатора, отношение реактивной мощности

пассивного фильтра настроенного на подавление 5 гармоника к реактивной мощности нелинейной нагрузки, отношение реактивной мощности пассивного фильтра настроенного на подавление 7 гармоника к реактивной мощности нелинейной нагрузки, это можно прикинуть в блоке источника питания.

Рассмотрим влияние степени загрузки трансформатора на эффективность компенсации высших гармонических составляющих гибридным фильтром (рисунок 4.33).

По результатам моделирования построим следующие зависимости (4.14-4.16):

$$k_U = f\left(\frac{S_{НН}}{S_{Тр}}\right), \quad (4.14)$$

где k_U – коэффициент несинусоидальности по напряжению, $S_{НН}$ – полная мощность нелинейной нагрузки, $S_{Тр}$ – полная мощность трансформатора.

$$k_I = f\left(\frac{S_{НН}}{S_{Тр}}\right), \quad (4.15)$$

k_I – коэффициент несинусоидальности по току.

$$k_M = f\left(\frac{S_{НН}}{S_{Тр}}\right) \quad (4.16)$$

k_M – коэффициент мощности.

Отношение $\frac{S_{НН}}{S_{Тр}}$ рассматривается в процентном соотношении.

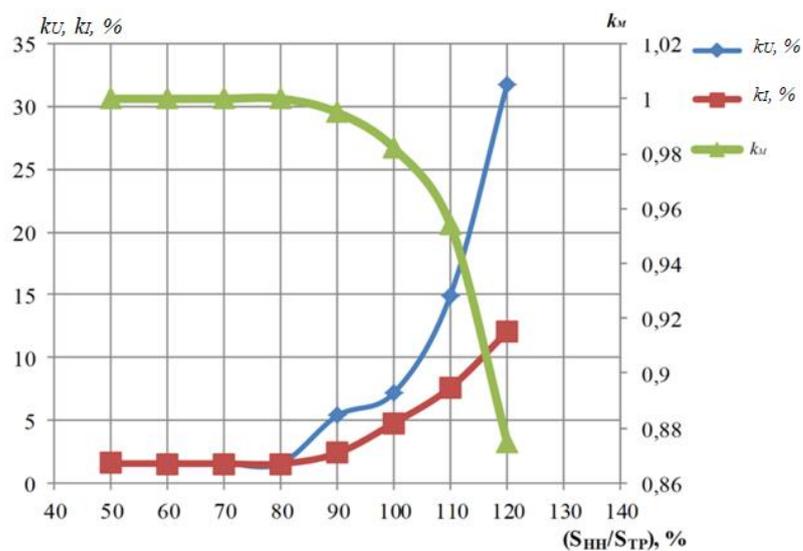


Рисунок 4.33 – График зависимости влияния загрузки трансформатора на значение $k_U, k_I,$

k_M

Полученные закономерности показывают, что максимальная эффективность компенсации высших гармонических составляющих достигается при отношении до $\frac{S_{НН}}{S_{ТР}} \leq 80\%$.

При перегрузке трансформатора возникают резонансные явления на 5 гармонической составляющей, повышаются токи кратные 3 гармонической составляющей, происходит рост потребления реактивной мощности и, как следствие, снижение коэффициента мощности нагрузки (k_M).

Рассмотрим влияние соотношения реактивной мощности пассивного фильтра $Q_{ПФ5}$, настроенного на 5 высшую гармоническую составляющую, и реактивной мощностью нелинейной нагрузки $Q_{НН}$ на эффективность компенсации высших гармонических составляющих гибридным фильтрокомпенсирующим устройством.

По результатам моделирования построим следующие зависимости (рисунок 4.34) (4.17-4.19):

$$k_U = f\left(\frac{Q_{ПФ5}}{Q_{НН}}\right), \quad (4.17)$$

где k_U – коэффициент несинусоидальности по напряжению, $Q_{НН}$ - реактивная мощность нелинейной нагрузки, $Q_{ПФ5}$ - реактивная мощность пассивного фильтрокомпенсирующего устройства, настроенного на подавление 5-ой гармонической составляющей.

$$k_I = f\left(\frac{Q_{ПФ5}}{Q_{НН}}\right), \quad (4.18)$$

k_I – коэффициент несинусоидальности по току.

$$k_M = f\left(\frac{Q_{ПФ5}}{Q_{НН}}\right) \quad (4.19)$$

k_M – коэффициент мощности.

Отношение $\frac{Q_{ПФ5}}{Q_{НН}}$ рассматривается в процентном соотношении.

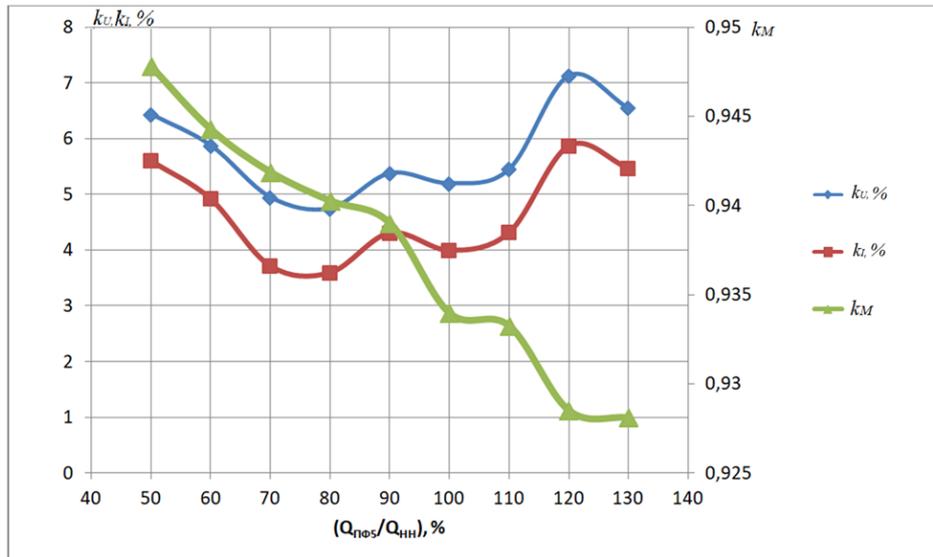


Рисунок 4.34 – Зависимость k_U , k_I , k_M от соотношения реактивной мощности пассивного фильтра, подавляющего 5 гармоническую составляющую, к реактивной мощности нелинейной нагрузки

Полученные закономерности показывают, что максимальная эффективность компенсации высших гармонических составляющих достигается при отношении $\frac{Q_{ПФ5}}{Q_{НН}} = 80\%$.

Рассмотрим влияние соотношения реактивной мощности пассивного фильтра $Q_{ПФ7}$, настроенного на 7 высшую гармоническую составляющую, и реактивной мощностью нелинейной нагрузки $Q_{НН}$ на эффективность компенсации высших гармонических составляющих гибридным фильтрокомпенсирующим устройством.

По результатам моделирования построим следующие зависимости (рисунок 4.35) (4.20-4.22):

$$k_U = f\left(\frac{Q_{ПФ7}}{Q_{НН}}\right), \quad (4.20)$$

где k_U – коэффициент несинусоидальности по напряжению, $Q_{НН}$ – реактивная мощность нелинейной нагрузки, $Q_{ПФ5}$ – реактивная мощность пассивного фильтрокомпенсирующего устройства, настроенного на подавление 7-ой гармонической составляющей.

$$k_I = f\left(\frac{Q_{ПФ7}}{Q_{НН}}\right), \quad (4.21)$$

k_I – коэффициент несинусоидальности по току.

$$k_M = f\left(\frac{Q_{ПФ7}}{Q_{НН}}\right) \quad (4.22)$$

k_I – коэффициент мощности.

Отношение $\frac{Q_{ПФ7}}{Q_{НН}}$ рассматривается в процентном соотношении.

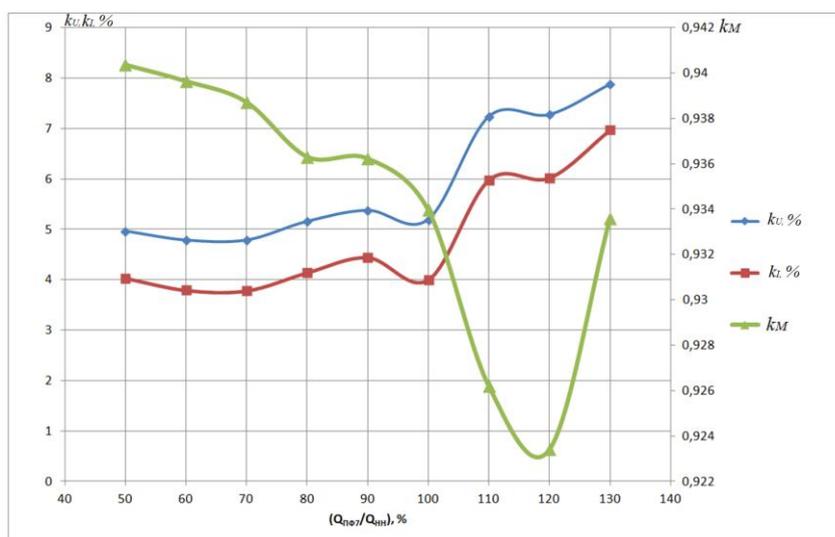


Рисунок 4.35 – Зависимость на значение k_U , k_I , k_M от соотношения реактивной мощности пассивного фильтра, подавляющего 7 гармоническую составляющую, к реактивной мощности нелинейной нагрузки

Полученные закономерности показывают, что максимальная эффективность компенсации высших гармонических составляющих достигается при отношении $\frac{Q_{ПФ7}}{Q_{НН}} = 70\%$.

Полученные закономерности позволяют выбрать параметры гибридного электротехнического комплекса на основе ПАФ с выходным ПФ, исходя из заданной степени коррекции показателей качества электроэнергии, а также факторов, характеризующих питающую сеть и подключенную нагрузку.

4.6. Имитационное моделирование электротехнического комплекса в условиях автономных систем электроснабжения

4.6.1. Математическая модель автономной электроэнергетической системы

В условиях территориально-рассредоточенных потребителей при удалении от централизованных систем электроснабжения оборудование предприятий

нефтедобычи, получает электрическую энергию от систем автономного электроснабжения. При отсутствии централизованного энергоснабжения главным источником электроэнергии на автономных объектах предприятий нефтедобычи часто являются дизель-электрические станции или микрогазотурбинные установки [23].

Имитационная модель автономной электроэнергетической системы, где в качестве нелинейной нагрузки принят частотно-регулируемый электропривод с векторной системой управления, представлена на рисунке 4.36.

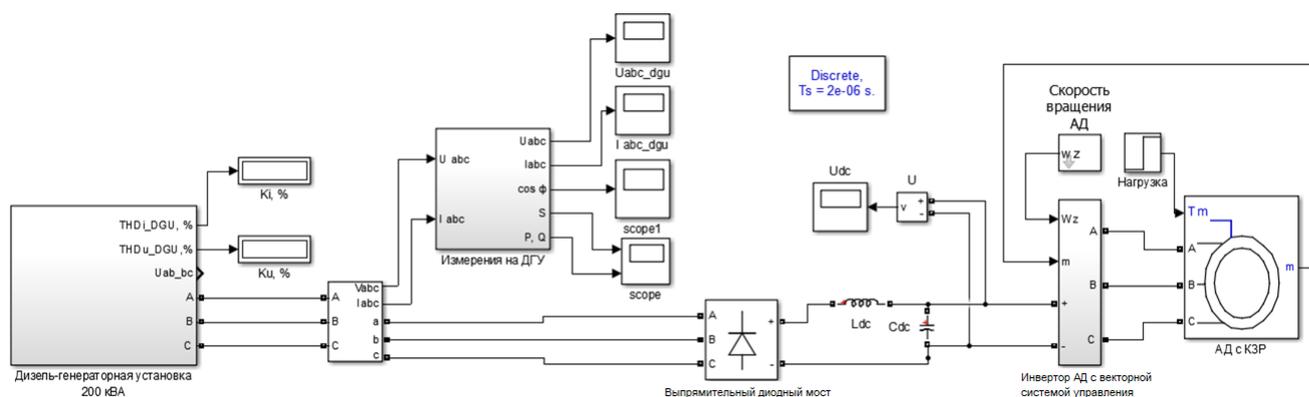


Рисунок 4.36 – Имитационная модель автономной электроэнергетической системы

При разработке имитационной модели были использованы следующие параметры оборудования согласно результатам экспериментальных исследований в автономных энергосистемах [15,78]:

1. Дизель-генераторная установка *SDMO J220C2/M*, с номинальной мощностью 220 кВА/160 кВт.

2. Асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором *AIP280M2* с номинальной мощностью 132 кВт.

В процессе моделирования был произведен запуск АД с КЗР с временем разгона равным 1 с., задание по скорости – 120 рад/с. С момента времени 1 с. до 2 с. двигатель работал на холостом ходу. В момент времени 2 с. к электродвигателю подключалась нагрузка, равная 108 кВт, таким образом, момент составлял 900 Н·м.

Графики переходных процессов, характеризующих режим работы электропривода с векторной системой управления без подключения комплекса представлены на рисунке 4.37.

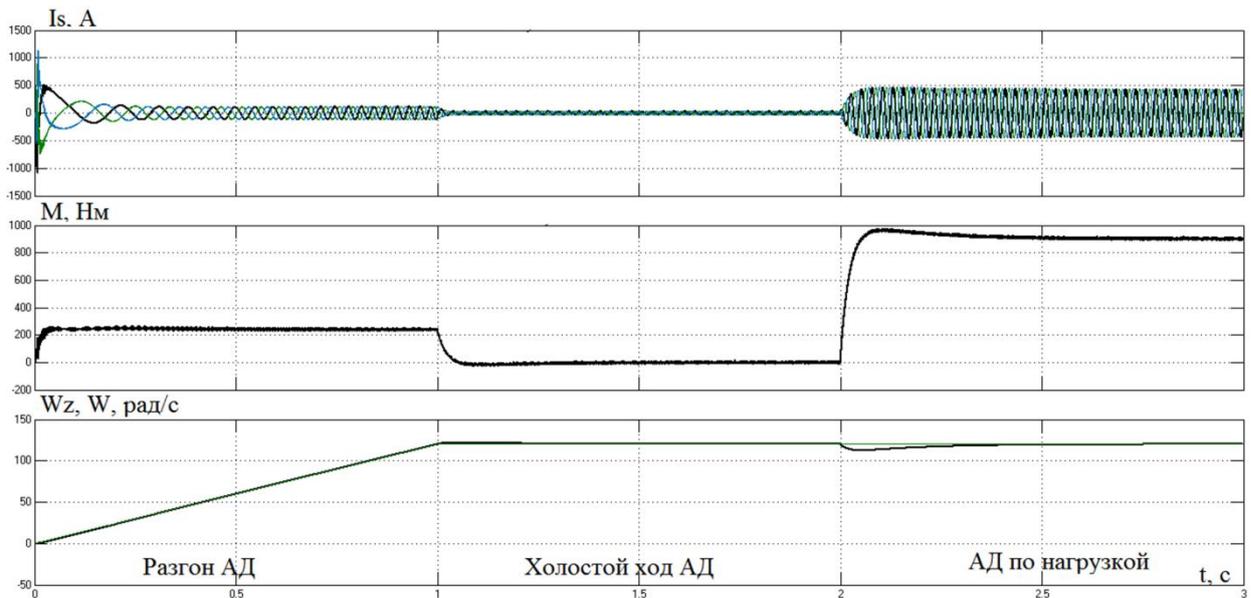


Рисунок 4.37 – Динамические характеристики электропривода

На рисунках 4.38-4.39 получены результаты моделирования автономной энергетической системы.

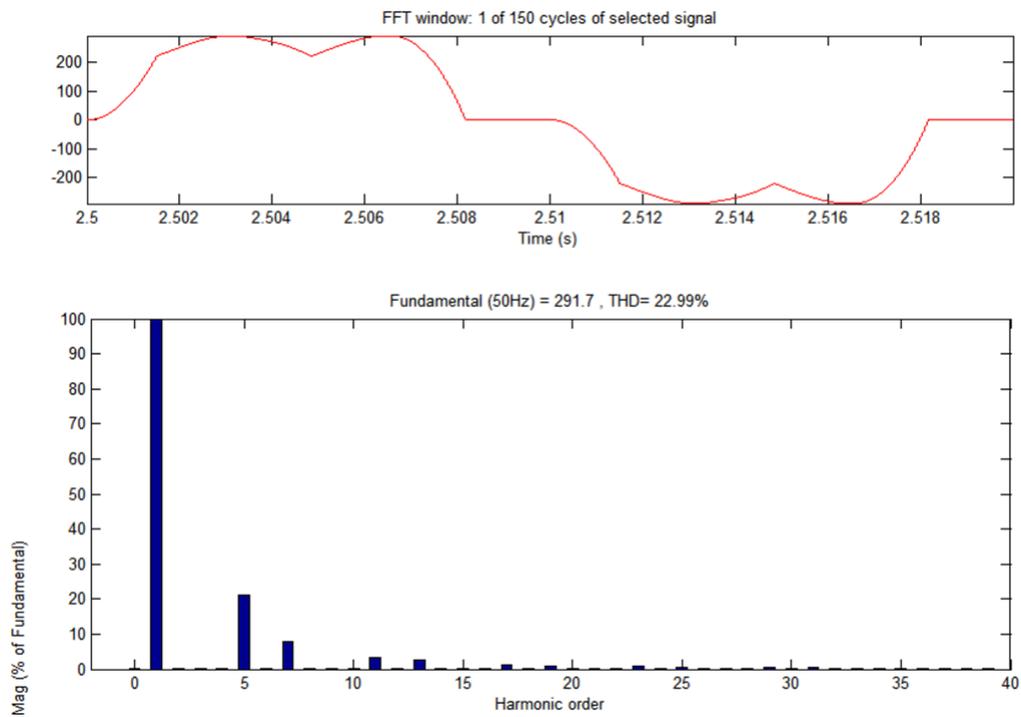


Рисунок 4.38 – Осциллограмма и спектрограмма тока на выходе ДГУ для определения показателей качества электроэнергии

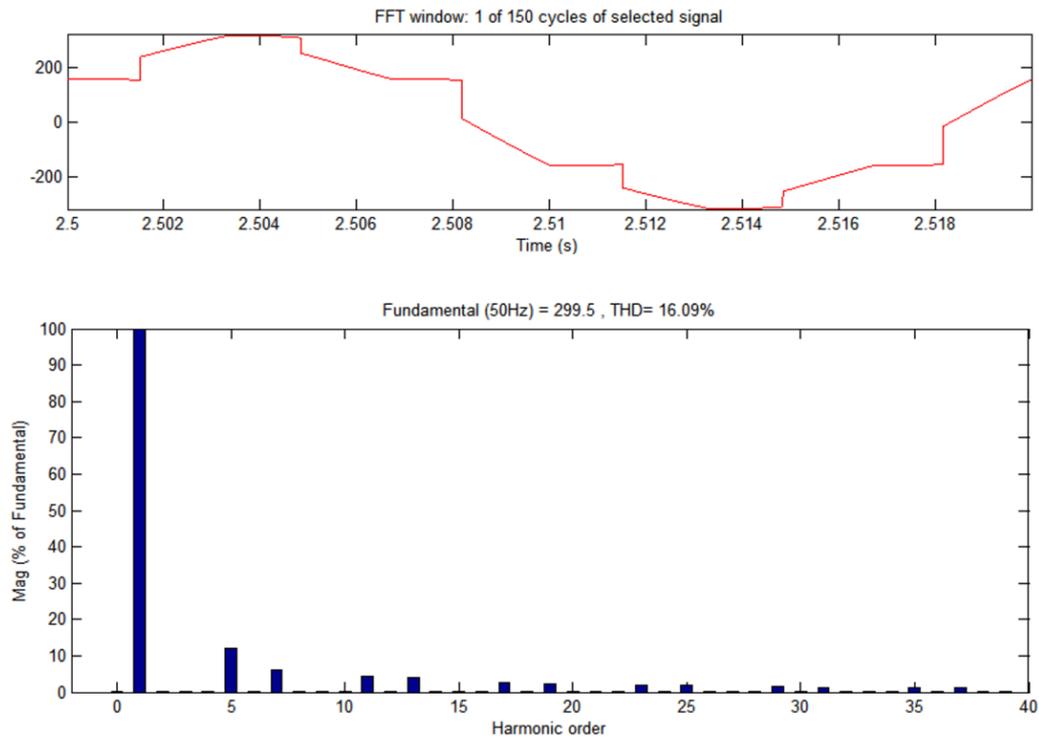


Рисунок 4.39 – Осциллограмма и спектрограмма напряжения на выходе ДГУ для определения показателей качества электроэнергии

В таблице 4.17 приведены исходные показатели качества электрической энергии по наличию ВГС тока и напряжения без применения электротехнического комплекса.

Таблица 4.17 – Показатели качества электрической энергии в автономной системе электроснабжения с подключенной нелинейной нагрузкой

	$k_I, \%$	$k_{I5}, \%$	$k_{I7}, \%$	$k_U, \%$	$k_{U5}, \%$	$k_{U7}, \%$
ГОСТ	-	-	-	12	6	5
Модель	23	21,3	11,4	16,1	13,8	8,8

Согласно спектральному анализу тока, потребляемого из автономной сети электроснабжения, следует, что имеет место насыщенный гармонический состав, при этом в большей степени присутствуют канонические гармоники (5, 7, 11, 13...), однако также в составе присутствуют интергармоники и субгармоники.

По результатам анализа спектрограммы напряжения следует, что уровень качества электроэнергии не соответствует требованию ГОСТ 32144-2013.

На рисунке 4.40 приведен график изменения коэффициента мощности по частоте основной составляющей исходя из режимов работы электропривода, полученный по результатам моделирования.

Анализируя полученный график, можно произвести расчет полной мощности.

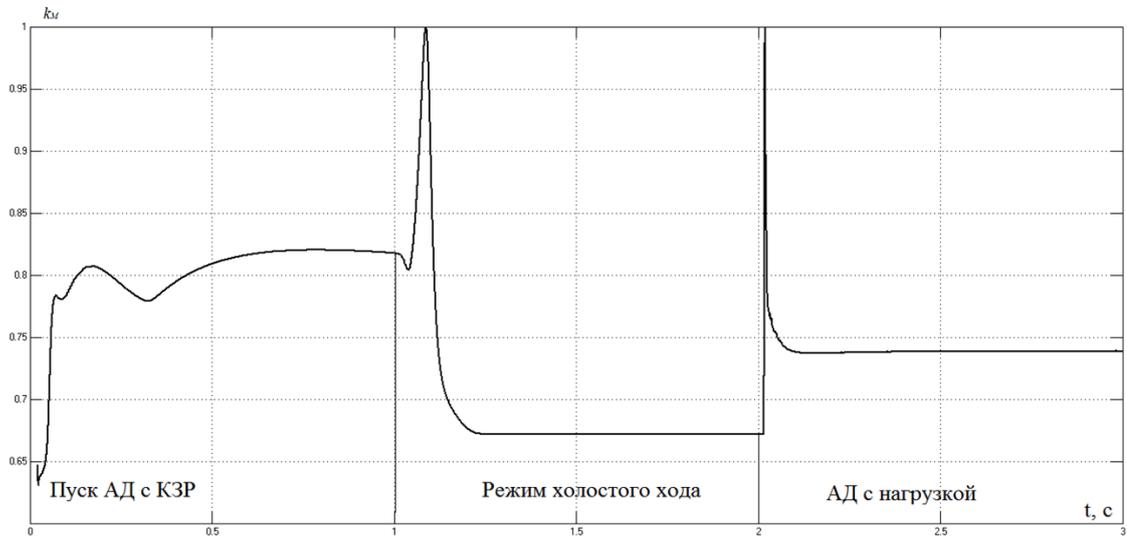


Рисунок 4.40 – График коэффициента мощности в системе электроснабжения

В качестве примера, если принять мощность подключенной нагрузки $P_{НН} = 108$ кВт, тогда полная мощность будет следующей (4.23):

$$S = \frac{P_{НН}}{k_M} = \frac{108}{0,738} = 146,341 \text{ кВА} \quad (4.23)$$

Произведем расчет потребления дизельного топлива автономной энергосистемой согласно следующей формуле (4.24):

$$\begin{aligned} g &= 0,0001 \cdot S + 16 \\ g &= 0,0001 \cdot 146341 + 16 = 30,63 \text{ л/час} \end{aligned} \quad (4.24)$$

Существуют работы [44-52] по исследованию активного фильтра электроэнергии, адаптированного к электроприводу переменного тока, в которых предлагается внедрение активных фильтрокомпенсирующих устройств с общим звеном постоянного тока у активной части и нелинейной нагрузки. Результат моделирования данных структур является превышение допустимого уровня высших гармонических составляющих по напряжению в условиях резкопеременной нелинейной нагрузки. Следовательно, необходимо разрабатывать гибридные фильтрокомпенсирующие структуры для компенсации высших гармоник в условиях резкопеременной нелинейной нагрузки и аварийных режимах.

На рисунке 4.41 представлена разработанная и запатентованная структура электротехнического комплекса с общим звеном постоянного тока (ОЗПТ).

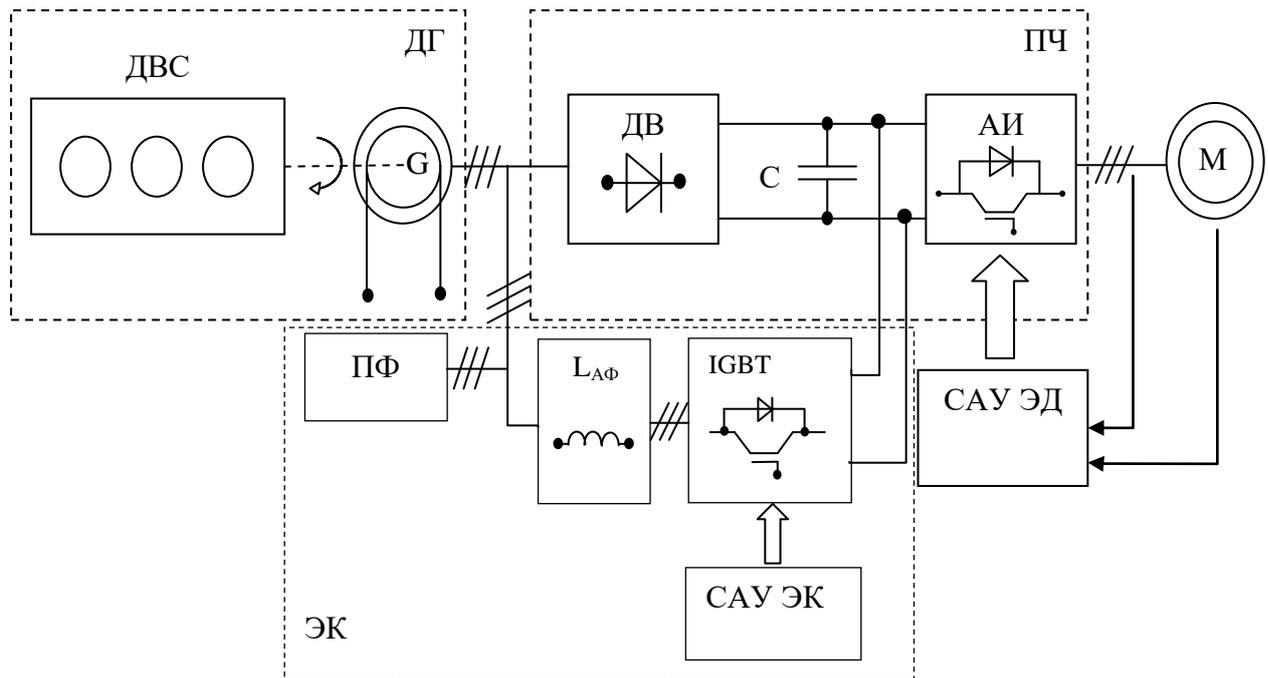


Рисунок 4.41 – Структурная схема электротехнического комплекса с ОЗПТ

На структуре рисунка 4.38 обозначено: ДГ – дизель-генератор, ДВС – двигатель внутреннего сгорания, G – генератор, ПЧ – преобразователь частоты, AI – автономный инвертор, C – емкостной элемент, M – асинхронный двигатель, ДВ – диодный выпрямитель, САУ ЭД – система управления двигателем, ЭК – электротехнический комплекс; IGBT – инвертор устройства компенсации; САУ ЭК – система автоматического управления электротехнического комплекса; $L_{АФ}$ – индуктивность (выходной дроссель); ПФ – пассивное фильтрокомпенсирующее устройство (выходной фильтр).

«Разработанный ЭК имеет ряд отличительных особенностей. Входящий в его состав активный фильтр подключен с звеном постоянного тока преобразователя частоты, что значительно удешевляет стоимость данного фильтрокомпенсирующего устройства по сравнению с существующими аналогами, имеющими в своей структуре собственный емкостной элемент. Таким образом, в разработанном ЭК нет необходимости предварительной зарядки конденсатора» [20]

Помимо активного фильтрокомпенсирующего устройства состав ЭК дополнительно входит пассивный фильтр, являющийся высокочастотным емкостным фильтром, что служит компенсацией ВГС высокого порядка.

4.6.2 Система управления электротехническим комплексом

С учетом результатов исследования [6,7,8,9,10] в качестве теоретической базы построения системы управления для разработанного ЭК являются фазовые преобразования в dq -координатах. Вначале происходит преобразование a - b - c в α - β - 0 , которое называется прямым преобразованием Кларка.

Прямое и обратное преобразование для напряжения без нулевого провода в упрощенном варианте (4.25) – (4.26):

$$\begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} \quad (4.25)$$

$$\begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \end{bmatrix} \quad (4.26)$$

Следующим шагом осуществляется преобразование из α - β в d - q , которое называется преобразованием Парка (4.27):

$$\begin{aligned} u_d &= u_\alpha \cos \theta + u_\beta \sin \theta \\ u_q &= u_\beta \cos \theta - u_\alpha \sin \theta \end{aligned} \quad (4.27)$$

Реализация разработанной системы управления электротехническим комплексом с фильтром выделения основной гармоники напряжения и формирования заданного тока сети в среде *Simulink Matlab* представлена на рисунке 4.42.

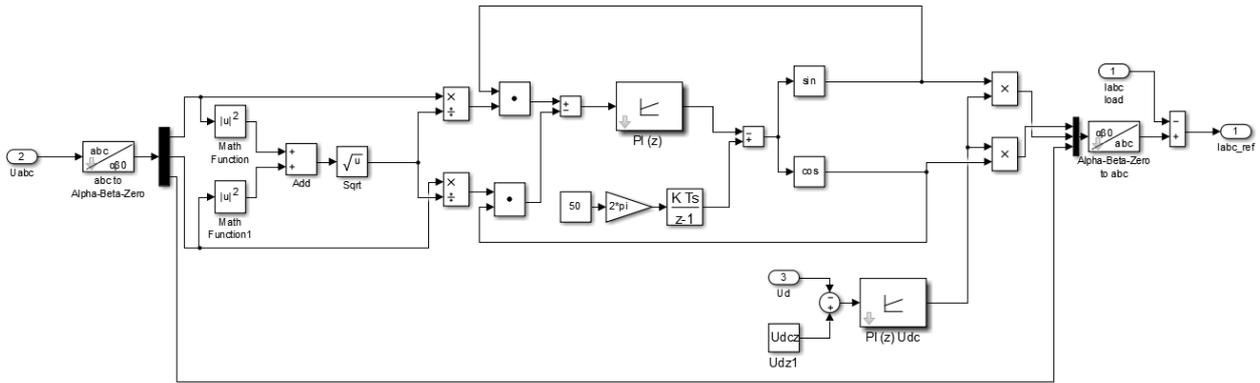


Рисунок 4.42 – Система управления электротехническим комплексом в среде *Simulink* *Matlab*

Входной фильтр системы управления должен выделять основную гармонику напряжения сети, входные сигналы которого преобразуются (4.28):

$$\begin{aligned}\cos \theta &= \frac{u_{\alpha}}{U} \\ \sin \theta &= \frac{u_{\beta}}{U}\end{aligned}\quad (4.28)$$

где u_{α}, u_{β} - напряжения в двухфазной системе координат, $U = \sqrt{u_{\alpha}^2 + u_{\beta}^2}$.

В системе управления присутствует регулятор напряжения в общем звене постоянного тока (ОЗПТ). ПИ-регулятор стабилизирует напряжение на конденсаторе в ОЗПТ, формируя амплитуду заданного тока ЭК. Заданный ток из системы координат α - β преобразуется в трехфазную систему координат a - b - c согласно следующим формулам (4.29) – (4.30):

$$i_{a_ref} = i_{\alpha} \quad (4.29)$$

$$i_{b_ref} = \frac{\sqrt{3} \cdot i_{\beta} - i_{\alpha}}{2} \quad (4.30)$$

$$i_{c_ref} = -\frac{\sqrt{3} \cdot i_{\beta} + i_{\alpha}}{2} \quad (4.31)$$

Полученные вычисленные значения токов сравниваются с токами нелинейной нагрузки и током на выходе активного фильтра. Сигналы рассогласования поступают на релейные регуляторы тока (РРТ), в которых формируются импульсы для управления ключами инвертора, как показано на блок-схеме рисунка 4.43.

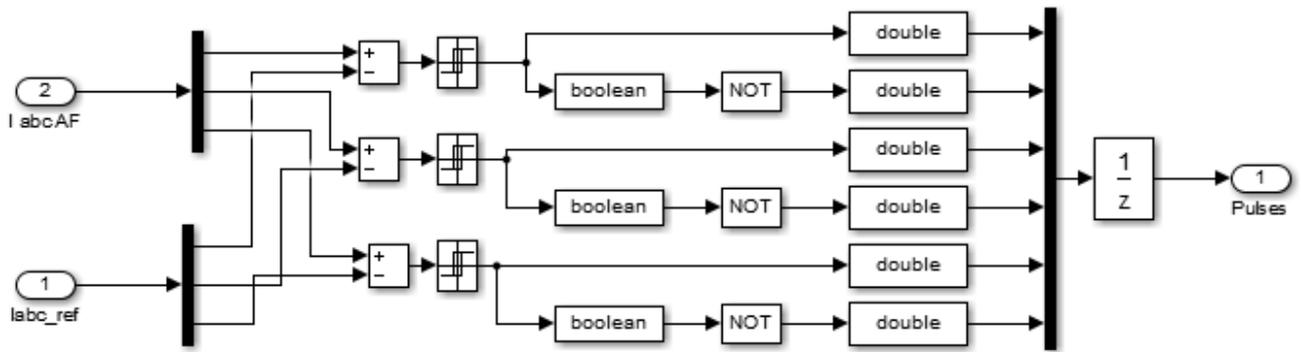


Рисунок 4.43 – Реализация релейного регулятора тока в среде *Simulink* программы *Matlab*

Для настройки релейного регулятора тока применяется величина зоны нечувствительности $\pm \Delta H$.

Для обеспечения минимальной пульсаций выходного тока автономного инвертора электротехнического комплекса, а также снизить тепловые потери в силовых ключах автономного инвертора необходимо увеличить диапазон регулирования ток. С уменьшением ширины зоны нечувствительности $\pm \Delta H$ повышается частота переключений силовых ключей релейного регулятора в системе управления электротехнического комплекса. Однако, высокая частота импульсов управления силовыми ключами инвертора устройства компенсации не может превышать предельную частоту коммутации, обусловленную временем срабатывания и их способность отдавать тепловую энергию, которая является потерями и снижает КПД силовых ключей [30].

Следовательно, для настройки релейного регулятора электротехнического комплекса необходимо обеспечить оптимальные настроечные характеристики по заданной степени снижения показателей качества электроэнергии. Для этого необходимо выявить зависимость между этим режимом и шириной зоны гистерезиса.

4.6.3 Оценка эффективности разработанного ЭК в автономной СЭС

Имитационная модель автономной электроэнергетической системы с нелинейной нагрузкой и подключенным электротехническим комплексом представлена на рисунке 4.44.

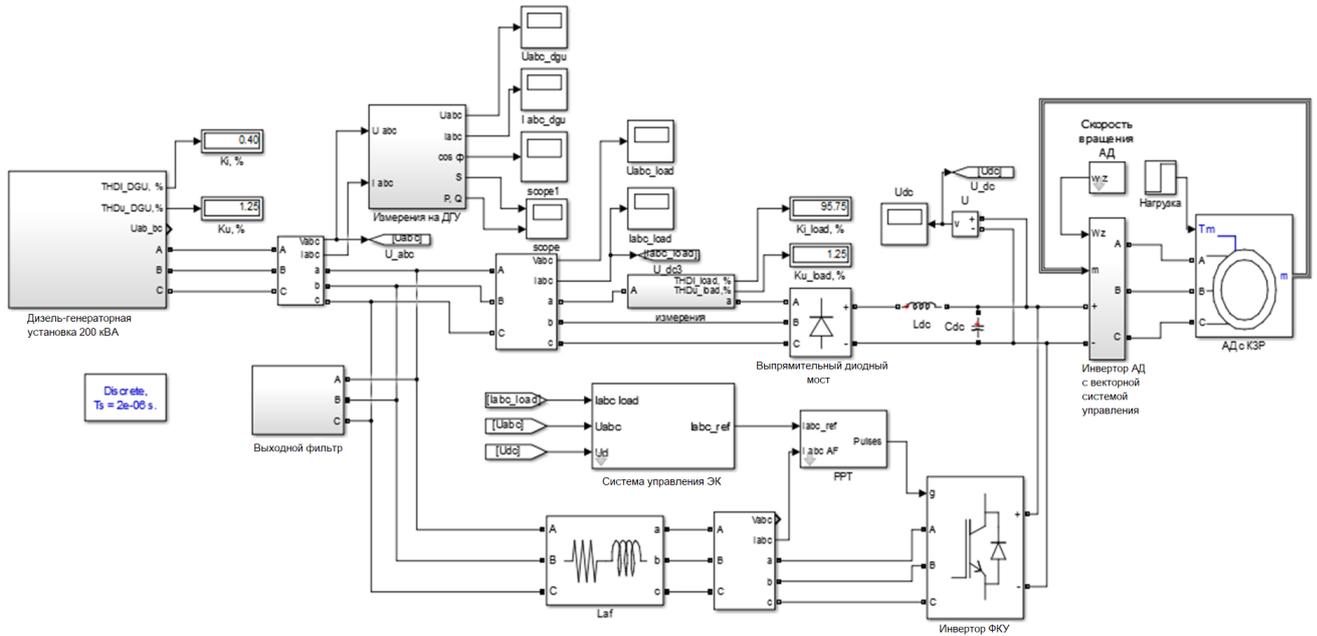


Рисунок 4.44 – Математическая модель ЭК с общим звеном постоянного тока в условиях автономной СЭС

На рисунках 4.45 и 4.46 приведены осциллограммы и спектрограммы тока и напряжения в автономной системе электроснабжения соответственно по результатам применения электротехнического комплекса.

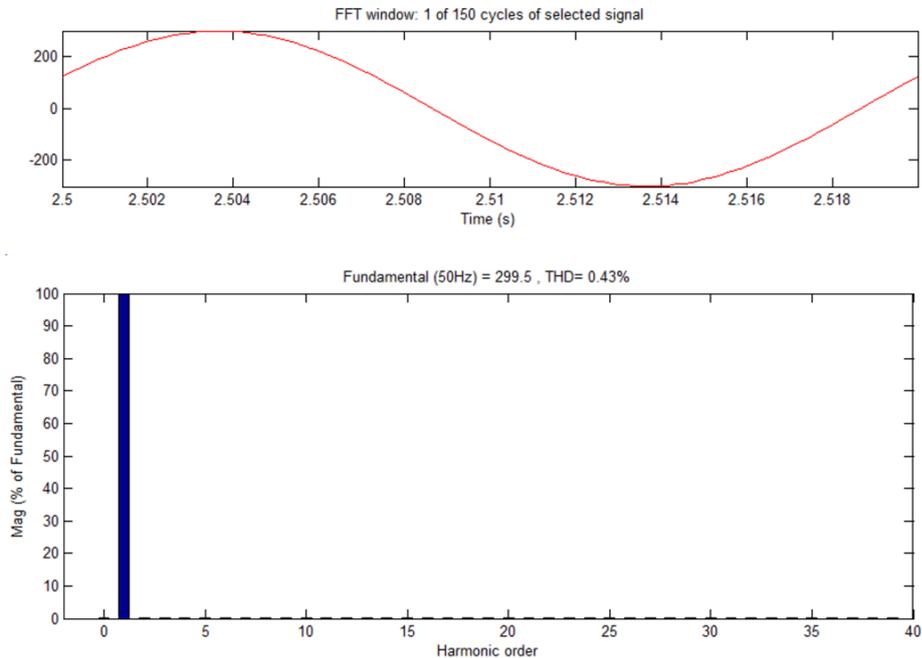


Рисунок 4.45 – Осциллограмма и спектрограмма кривой тока с применением электротехнического комплекса

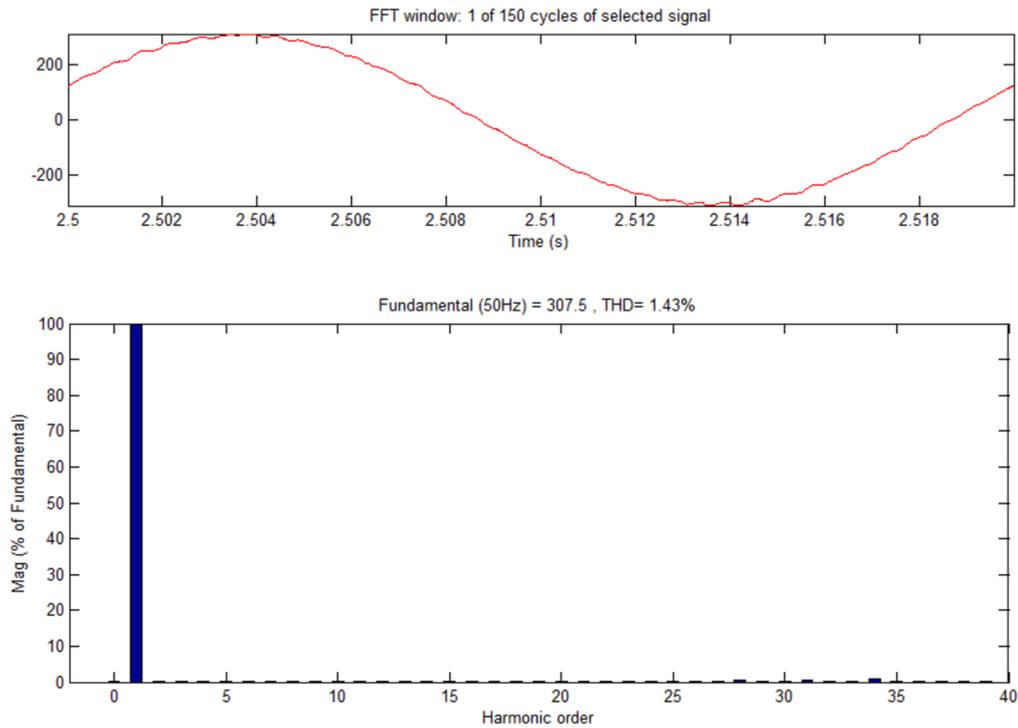


Рисунок 4.46 – Осциллограмма и спектрограмма кривой напряжения с применением электротехнического комплекса

В таблице 4.18 приведены степени снижения показателей качества электроэнергии по результатам применения разработанного ЭК.

Таблица 4.18 – Степени снижения высших гармонических составляющих по напряжению до и после применения электротехнического комплекса в автономной системе электроснабжения

$\Delta k_B, \%$	$\Delta k_{I5}, \%$	$\Delta k_{I7}, \%$	$\Delta k_U, \%$	$\Delta k_{U5}, \%$	$\Delta k_{U7}, \%$
98,1	99,4	99,8	91,1	99,4	99,8

Результат моделирования показывает эффективную степень компенсации ВГС тока и напряжения ЭК. При этом k_U уменьшился на 91,1 %, а k_I – 98,1 %.

Анализируя график зависимости коэффициента мощности сети после подключения ЭК (рисунок 4.47), можно произвести расчет полной мощности по аналогии с исходным режимом.

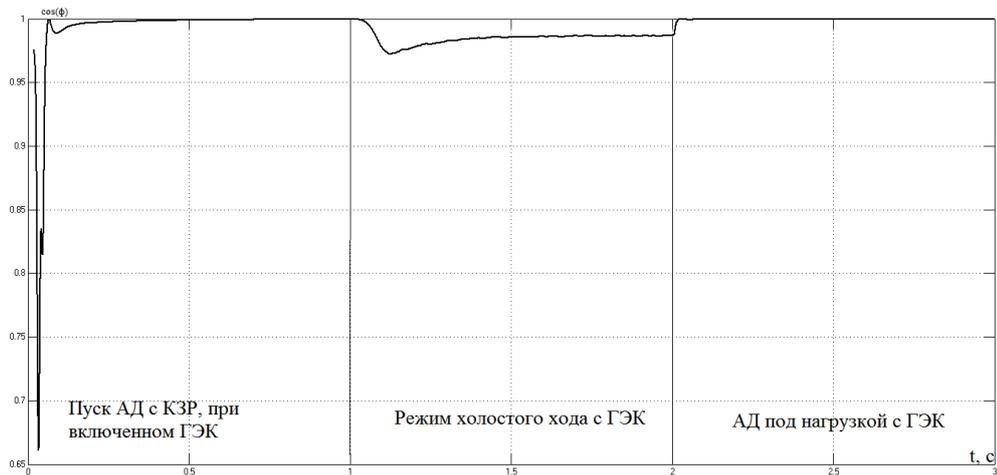


Рисунок 4.47 – График коэффициента мощности после компенсации ВГС

Для исходного примера мощность подключенной нагрузки составляла $P_{HH} = 108$ кВт, тогда полная мощность определяется следующим образом (4.32):

$$S = \frac{P_{HH}}{k_M} = \frac{108}{0,999} = 108,108 \text{ кВА} \quad (4.32)$$

Произведем расчет потребления дизельного топлива согласно формуле (4.33):

$$g = 0,0001 \cdot S + 16 \quad (4.33)$$

$$g_2 = 0,0001 \cdot 108108 + 16 = 26,81 \text{ л/час}$$

Таким образом, при подключении ЭК с ОЗПТ коэффициент мощности стремится к 1, что приводит к полной компенсации реактивной мощности, потребляемой из автономной сети электроснабжения. При режиме холостого хода с 1 с. до 2 с. происходит перекомпенсация реактивной мощности, поэтому $\cos\varphi$ является опережающим.

Исходя из расчета потребления дизельного топлива до подключения ЭК с ОЗПТ и после его включения происходит снижение расхода топлива (4.34):

$$\Delta g = g_1 - g_2 = 30,63 - 26,81 = 3,82 \text{ л/час} \quad (4.34)$$

Данный расчет подтверждает эффективность разработанного ЭК в условиях автономных СЭС.

Проведем исследование зависимости суммарного коэффициента гармонических составляющих по току и напряжению от величины зоны нечувствительности релейного регулятора тока, построив функции:

$$k_U = f(\pm\Delta H); k_I = f(\pm\Delta H).$$

Результаты моделирования представлены в таблице 4.19 и на рисунке 4.48.

Таблица 4.19 – Значения k_I и k_U от величины зоны нечувствительности релейного регулятора тока

Номер исследования	$\pm \Delta H$	k_U	k_I	$C_{ПЧ}$	$L_{ПЧ}$	$L_{АФ}$	Q_c
	А	%	%	Ф	Гн	Гн	квар
1	5	5,12	1,39	0,005	0,0002	0,0003	0
2	4	3,57	0,99				
3	3	2,97	0,87				
4	2	2,92	0,81				
5	1	1,86	0,52				
6	0,5	1,82	0,52				
7	0,25	1,71	0,52				
8	0,2	1,68	0,48				
9	0,1	1,43	0,43				
10	0,05	1,48	0,44				

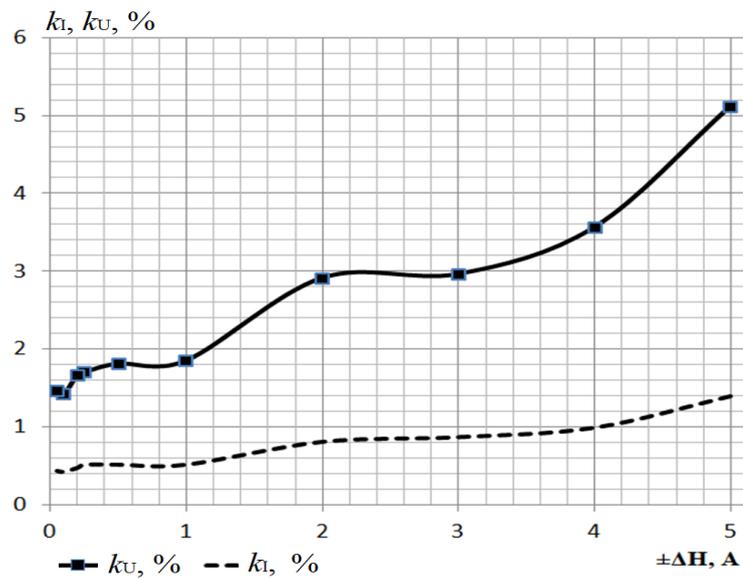


Рисунок 4.48 – График k_U и k_I от величины ΔH

Из анализа графика по исследованию РРТ, полученного в ходе компьютерного моделирования, следует, что изменение величины гистерезиса $\pm \Delta H$ непосредственно влияет на качество тока и напряжения в точке подключения ЭК. При увеличении зоны гистерезиса до ± 1 А уровень ВГС остается примерно равномерным в течение всего исследования, в том числе и при динамическом изменении нагрузки (пуске двигателя, подключении нагрузки).

Но следует иметь в виду следующее обстоятельство, чем меньше ширина зоны нечувствительности РРТ, тем меньше и быстродействие всей системы. Поэтому для разработанного ЭК с ОЗПТ целесообразным будет значение величины зоны нечувствительности ± 1 А.

При моделировании ЭК в автономной системе электроснабжения был проведен опыт короткого замыкания на диодном выпрямителе преобразователя частоты. На рисунке 4.49 представлена математическая модель исследования короткого замыкания.

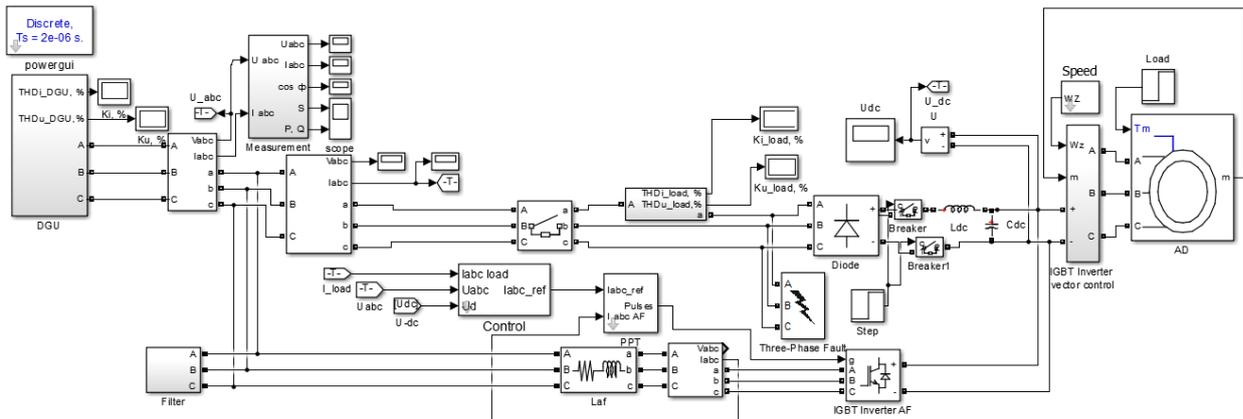


Рисунок 4.49 – Модель электротехнического комплекса с общим звеном постоянного тока при коротком замыкании на диодном выпрямителе

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

На рисунках 4.50 – 4.52 показаны осциллограмма фазного напряжения на асинхронном двигателе, уровень напряжения в общем звене постоянного тока преобразователя частоты и динамические характеристики асинхронного двигателя соответственно.

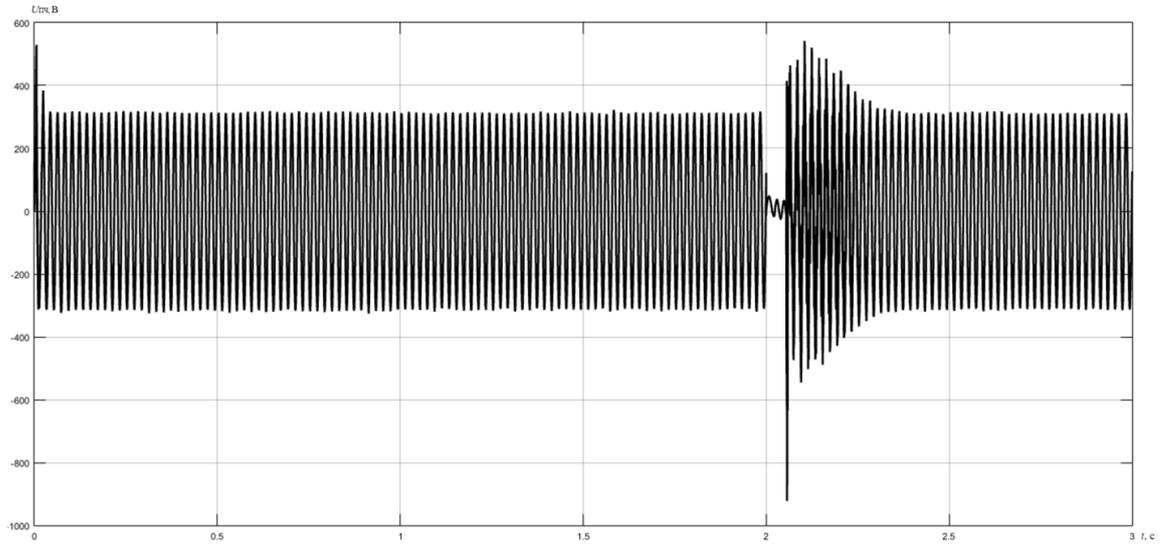


Рисунок 4.50 – Осциллограмма напряжения на выходе преобразователя частоты

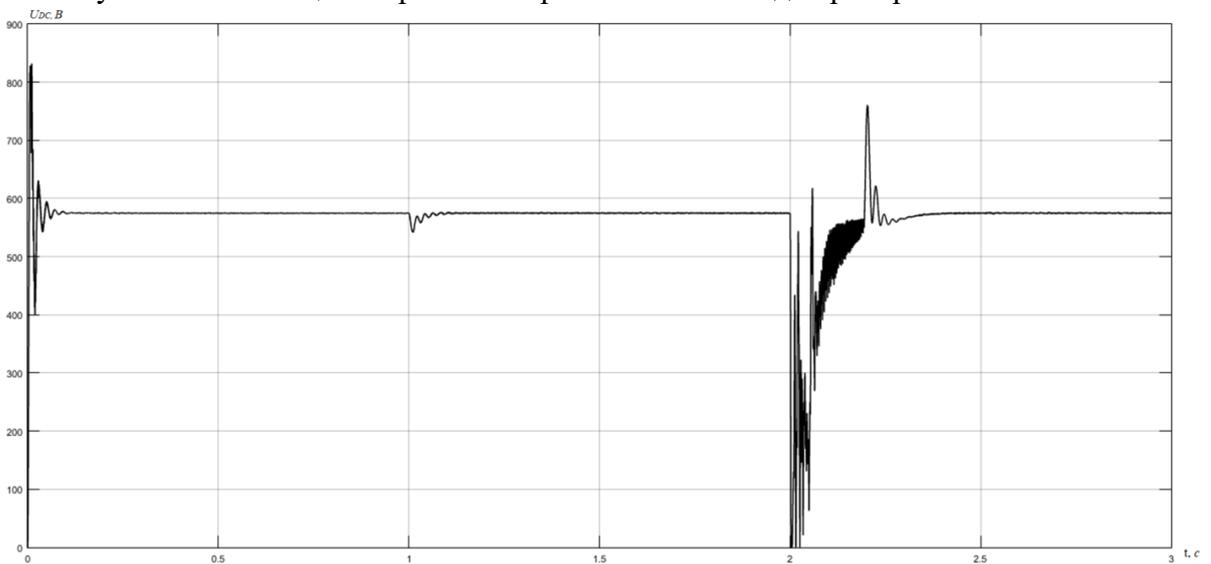


Рисунок 4.51 – Напряжение в звене постоянного тока на обкладках конденсатора

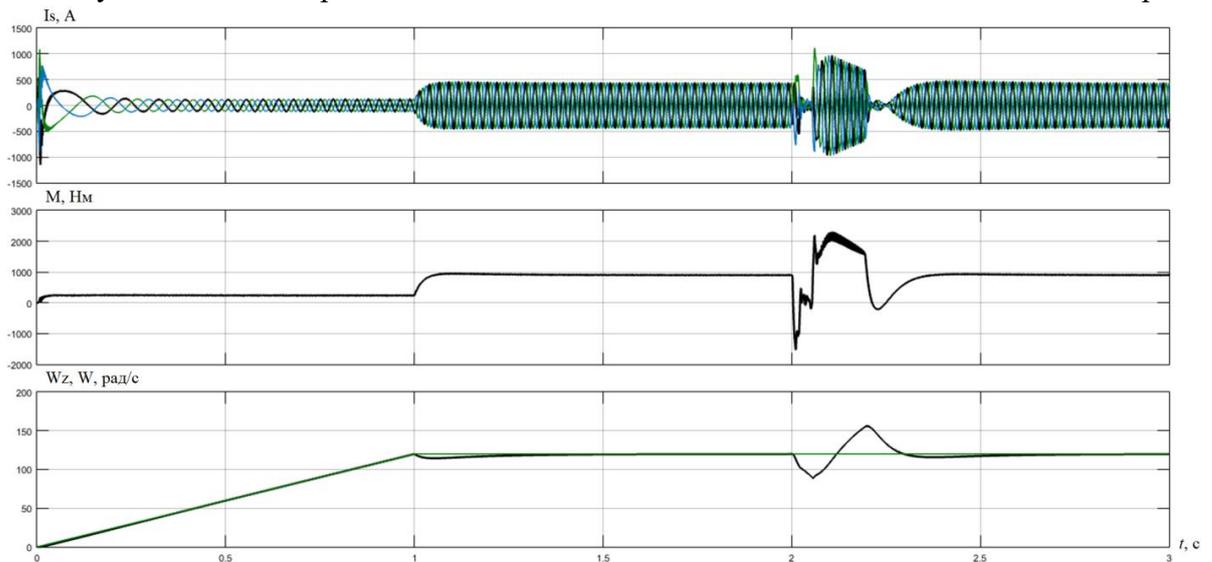


Рисунок 4.52 – Динамические характеристики асинхронного двигателя

Разработанная система управления ЭК 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.

Таким образом, разработанный ЭК с ОЗПТ обеспечивает снижение ВГС, а также обеспечивает компенсацию реактивной мощности, энергоэффективные режимы работы электроприводов и бесперебойное электроснабжение при коротком замыкании на зажимах выпрямительного устройства.

4.7 Выводы к главе 4

1. Разработаны имитационные модели гибридных фильтрокомпенсирующих устройств на основе параллельных и последовательных активных фильтров для электротехнических комплексов нефтедобывающих предприятий с нелинейной нагрузкой и искажениями со стороны питающей сети.

2. Результаты моделирования показали достаточную эффективность функционирования предложенных гибридных фильтрокомпенсирующих устройств по условию снижения величин показателей качества электроэнергии до допустимых значений.

3. Выявлены зависимости показателей качества электрической энергии от структуры и основных параметров гибридных фильтрокомпенсирующих устройств на базе параллельных и последовательных активных фильтров, которые позволяют произвести обоснованный выбор структуры и алгоритма управления данных устройств в условиях вариации характеристик электротехнических комплексов предприятий нефтедобычи.

4. Разработан электротехнический комплекс на основе параллельного активного фильтра с пассивным фильтром на выходе, со звеном постоянного тока, являющимся общим для нелинейной нагрузки и фильтра, позволяет повысить качество электрической энергии по заданной совокупности показателей, а также выполнять функцию источника бесперебойного питания при аварийных режимах в питающей сети на время восстановления электроснабжения, в том числе в условиях распределенной генерации.

5. Результаты моделирования ЭК показали возможность реализации им функции бесперебойного электроснабжения ответственной нелинейной нагрузки на период безаварийного завершения технологического процесса.

6. Обоснована целесообразность изменение величины зоны нечувствительности релейных регуляторов тока системы управления гибридных фильтрокомпенсирующих устройств исходя из требуемой степени коррекции показателей качества электрической энергии.

ГЛАВА 5 АЛГОРИТМ УПРАВЛЕНИЯ ГИБРИДНЫМИ ФИЛЬТРОКОМПЕНСИРУЮЩИМИ УСТРОЙСТВАМИ, ИХ ТЕХНИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ И ЭКОНОМИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ ОТ ВНЕДРЕНИЯ В СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ НЕФТЕДОБЫЧИ

Разработанный электротехнический комплекс является универсальным при нелинейной нагрузке, характеризующейся переменной амплитудой и спектральным составом потребляемого несинусоидального тока. Это обеспечивается при:

- изменении режима работы какой-либо одной нелинейной нагрузки;
- отключении группы нелинейных нагрузок в аварийном режиме при переходе электроснабжения с одного источника на другой.

В первом случае в зависимости от технологического режима работы нелинейной нагрузки можно использовать пассивную часть указанного электротехнического комплекса или его активную часть с меньшим номинальным компенсационным током.

Во втором случае, при переходе электроснабжения от основного на резервный источник другой мощности в аварийном режиме существует необходимость отключения неответственных с точки зрения технологического процесса нелинейных потребителей. Примером такого режима может быть отключение части нелинейной нагрузки и переключение наиболее ответственных потребителей от газотурбинной установки. При этом режим коррекции высших гармоник также необходимо менять.

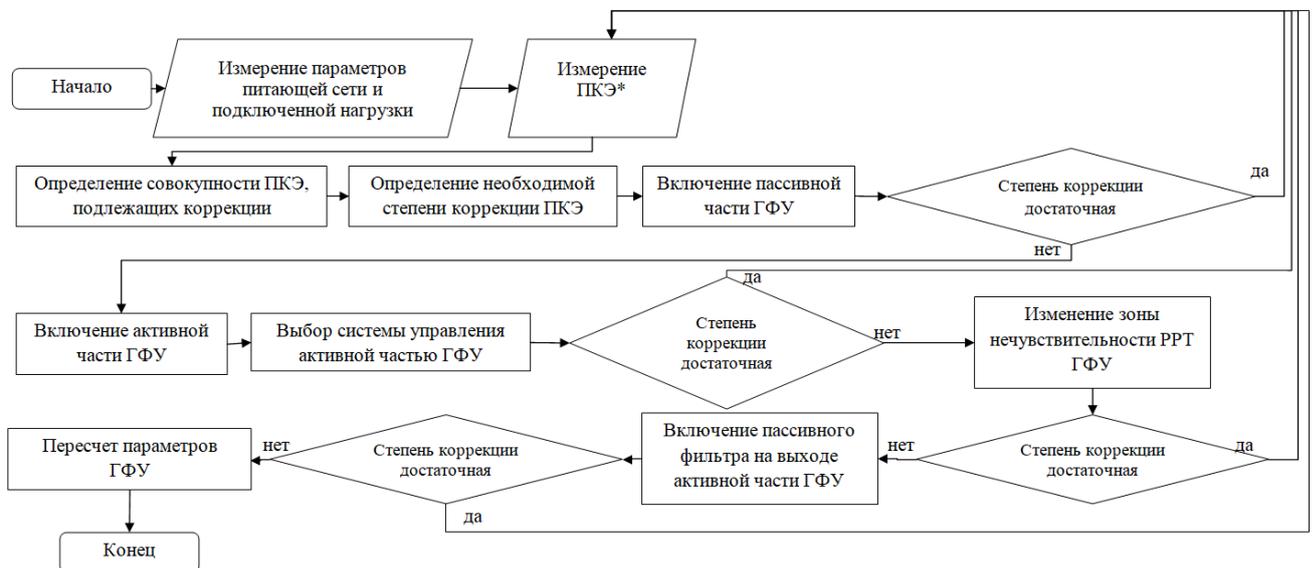
Таким образом, в условиях распределенной генерации при изменении режимов энергообеспечения и энергопотребления разработанный электротехнический комплекс с гибридной и пассивной коррекцией высших гармоник является актуальным техническим решением.

5.1 Алгоритм управления гибридными фильтрокомпенсирующими устройствами

Для выбора параметров и конфигурации гибридного фильтрокомпенсирующего устройства следует воспользоваться алгоритмом, приведенным на рисунке 5.1.

На первом этапе происходит измерение параметров СЭС и подключенной нагрузки и определение степени компенсации уровня ВГС тока и напряжения.

С целью минимизации стоимости установки компенсации и как наиболее простое фильтрокомпенсирующее устройство применяется ПФ, настроенный на подавление определенных гармонических составляющих. Если ПФ не достаточен для компенсации уровня ВГС, то создается ГФУ с выбором активной части. Активной частью ГФУ является ПАФ или ПСАФ с различными системами управления. При недостаточной степени компенсации высших гармоник применяется дополнительный ПФ, устанавливаемый на выходе активной части.



*ПКЭ – показатели качества электроэнергии

Рисунок 5.1 – Алгоритм управления гибридной фильтрокомпенсирующим устройством

5.2 Техническая реализация гибридных фильтрокомпенсирующих устройств

5.2.1 Устройство подавления высших гармоник и коррекции коэффициента мощности сети

Задачей применения предлагаемого устройства является компенсация ВГС тока НН, компенсация ВГС напряжения СЭС, коррекция коэффициента мощности по основной гармонике. Выбор той или иной из указанных функций осуществляется с помощью системы управления.

Схема представлена на рисунке 5.2.

5.2.2 Устройство гибридной компенсации высших гармоник

Схема устройства гибридной компенсации высших гармоник представлена на рисунке 5.3.

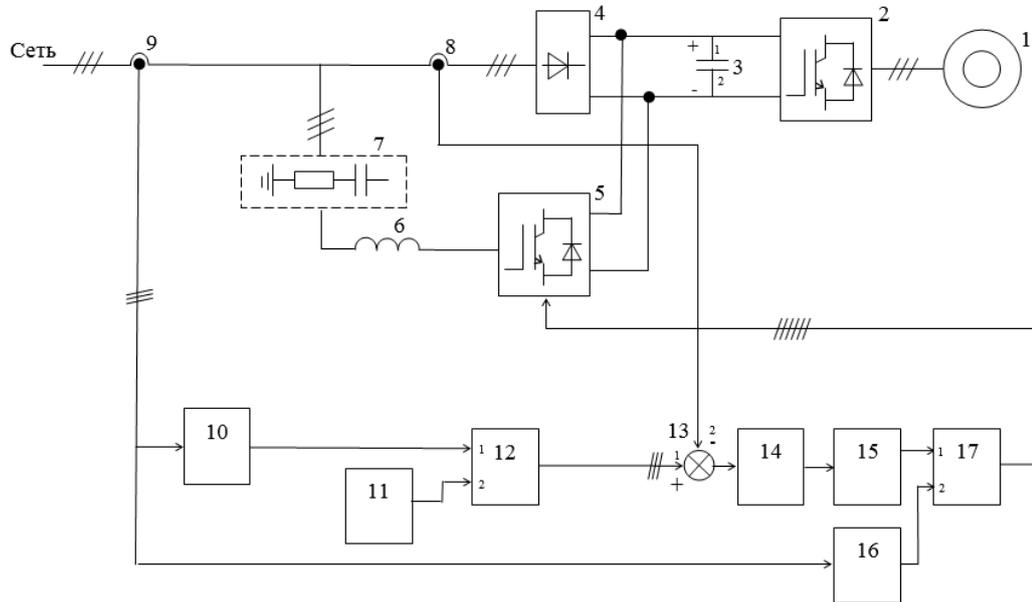


Рисунок 5.3 – Схема устройства гибридной компенсации высших гармоник

«Устройство состоит из неуправляемого выпрямителя преобразователя частоты (4) подключенного через датчик переменного тока преобразователя частоты (8) к сети, зажимы «+» и «-» неуправляемого выпрямителя преобразователя частоты (4) подключены соответственно через первую и вторую обкладки накопительного конденсатора преобразователя частоты (3) к зажимам «+» и «-» инвертора преобразователя частоты (2), зажимы «+» и «-» инвертора устройства компенсации (5) подключены к зажимам «+» и «-» неуправляемого выпрямителя преобразователя частоты (4), выход инвертора устройства компенсации 5 подключен к входу сглаживающих дросселей (6), выход которых через выходной пассивный фильтр (7) подключен к сети. На входе устройства компенсации установлен датчик переменного тока сети (9), который подключен к блоку преобразования Фурье (10). Выход блока преобразования Фурье (10) соединен с первым входом блока выделения основной гармоники (12). Вторым входом блока вычисления основной гармоники (12) соединен с выходом задатчика основной гармоники (11). Выход блока выделения основной гармоники соединен с первым входом блока вычитания (13). Вторым входом блока вычитания (13)

соединен с датчиком тока преобразователя частоты (8). Выход блока вычитания (13) подключен к входу блока фазовой синхронизации (14), выход которого соединен с входом блока смещения (15), где осуществляется вычисление опорного тока устройства компенсации. Выход блока смещения (15) соединен с первым входом блока широтно-импульсной модуляции (17). Вторым входом блока широтно-импульсной модуляции соединен с выходом блока регулирования частоты широтно-импульсной модуляции (16), вход которого соединен с выходом датчика переменного тока сети (9). Выход блока широтно-импульсной модуляции (17) соединен с инвертором устройства компенсации (5)» [18].

Техническим результатом является создание устройства компенсации высших гармонических составляющих по напряжению и току, а также отдельных гармонических составляющих по напряжению за счет наличия пассивного фильтра на выходе активной части гибридного фильтрокомпенсирующего устройства.

5.2.3 Устройство гибридной компенсации высших гармоник, адаптированное к электроприводу переменного тока

На рисунке 5.4 представлена схема ГФУ, адаптированного к частотно-регулируемому электроприводу.

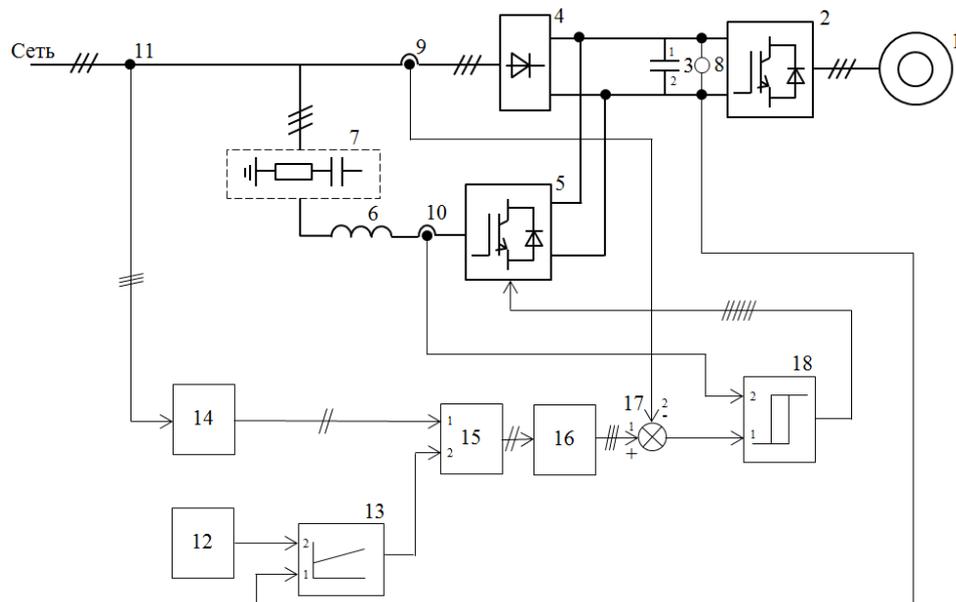


Рисунок 5.4 – Схема ГФУ, адаптированного к частотно-регулируемому электроприводу

«В устройстве ГФУ, адаптированное к частотно-регулируемому электроприводу: 1 – асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором; 2 – инвертор; 3 – накопительный конденсатор преобразователя частоты; 4 – неуправляемый выпрямитель преобразователя частоты; 5 – инвертор устройства компенсации; 6 – сглаживающие дроссели; 7 – выходной пассивный фильтр; 8 – датчик напряжения накопительного конденсатора преобразователя частоты; 9 – датчик переменного тока преобразователя частоты; 10 – датчик переменного тока устройства компенсации; 11 – датчик напряжения сети; 12 – датчик напряжения накопительного конденсатора; 13 – регулятор напряжения накопительного конденсатора; 14 – первый блок фазовых преобразований; 15 – блок фазовой синхронизации; 16 – второй блок фазовых преобразований; 17 – блок вычитания; 18 – блок релейных регуляторов» [20].

Разработанные и запатентованные устройства [18,19,20,21] позволяют обеспечить степень компенсации гармоник тока и напряжения до уровня не ниже требуемого ГОСТ 32144-2013.

5.3 Расчет экономического эффекта от внедрения гибридного фильтрокомпенсирующего устройства

Расчет потенциального экономического эффекта от внедрения гибридного электротехнического комплекса, содержащего параллельный активный и пассивные фильтры, производится для условий предприятий нефтедобычи. В качестве исходных данных применяются следующие показатели:

1. Сметная стоимость строительства гибридного фильтрокомпенсирующего устройства.
2. Стоимость электроэнергии.
3. Коэффициент падения.
4. Налог на прибыль.
5. Налог на имущество.
6. Эксплуатационные затраты на весь объем.
7. Коэффициент эксплуатации.
8. Норма дисконтирования.

Пример расчета выполнен согласно представленной методике. В таблице 5.1 приведены данные для расчета экономического эффекта при применении гибридного фильтрокомпенсирующего устройства в системе электроснабжения предприятия нефтедобычи (5.1) – (5.28)

Таблица 5.1 – Данные для расчета экономического эффекта

Наименование показателя	Единица измерения	Значение показателя
Сметная стоимость строительства	руб.	600000
Экономия реактивной мощности	квар·ч	509 747,9
Экономия активной мощности за счет коэффициента мощности	кВт·ч	22 867,3
Цена 1 кВт·ч	руб.	2,9
Цена 1 квар·ч	руб.	0,42
Коэффициент падения		0,985
Налог на прибыль	%	20
Налог на имущество	%	2,2
Эксплуатационные затраты на весь объем	руб.	30000
Коэффициент эксплуатации		0,975
Норма дисконтирования	%	10

Потребление реактивной мощности за год (5.1):

$$W_Q = (Q_H - Q_C) \cdot t_{\text{раб}} \cdot k_{\text{заг}} = (72,738 - 0) \cdot 8760 \cdot 0,8 = 509 747,9 \text{ квар} \cdot \text{ч}, \quad (5.1)$$

где Q_H – потребление реактивной мощности до компенсации, квар; Q_C – потребление реактивной мощности с применением гибридного электротехнического комплекса, квар; $t_{\text{раб}}$ – число часов работы в год, час; $k_{\text{заг}}$ – коэффициент загрузки оборудования.

Стоимость 1 квар·ч составляет 0,42 руб.

Годовая экономия активной мощности за счет увеличения коэффициента мощности (k_M):

$$\begin{aligned} W_P &= P_2 \cdot t_{\text{раб}} \cdot k_{\text{заг}} \left(1 - \frac{k_{\text{МН}}^2}{k_{\text{Мс}}^2} \right) = 108 \cdot 8760 \cdot 0,8 \cdot 0,12 \cdot \left(1 - \frac{0,865^2}{1} \right) = \\ &= 22 867,3 \text{ кВт} \cdot \text{ч}, \end{aligned} \quad (5.2)$$

где P_2 – потребление активной мощности, кВт; $t_{\text{раб}}$ – число часов работы в год, час; $k_{\text{заг}}$ – коэффициент загрузки оборудования; $k_{\text{П}}$ – коэффициент падения; $k_{\text{МН}}$ – коэффициент мощности до компенсации; $k_{\text{Мс}}$ – коэффициент мощности после компенсации.

$$B_Q = C \cdot W_Q, \text{ руб.}, \quad (5.3)$$

где B_Q - выручка компенсации реактивной мощности; C – стоимость 1 квар·ч реактивной электроэнергии; W_Q – количество скомпенсированной реактивной энергии.

$$B_P = C \cdot W_P, \text{ руб.}, \quad (5.4)$$

где B_P - выручка компенсации активной мощности; C – стоимость 1 кВт·ч активной электроэнергии; W_P – количество скомпенсированной активной энергии.

$$ПЗ = ЭЗ, \text{ тыс. руб.}, \quad (5.5)$$

где $ПЗ$ – производственные затраты – затраты, входящие в себестоимость продукции. Это материальные затраты, и поэтому их можно проинвентаризировать, в данном случае производственные затраты равны эксплуатационным затратам, $ЭЗ$ - эксплуатационные затраты.

$$ЭЗ = -\frac{ЭЗ_V}{k_3}, \text{ руб.}, \quad (5.6)$$

где $ЭЗ_V$ - эксплуатационные затраты на весь объем.

$$C_{OF} = 2\,000\,000,00 \text{ руб.}, \quad (5.7)$$

где C_{OF} - стоимость основных фондов.

$$A_{OF} = 60\,000 \text{ руб.}, \quad (5.8)$$

где A_{OF} - амортизация основных фондов – это процесс постепенного переноса стоимости основных средств на производимую продукцию (работы, услуги).

$$\text{На начало: } C_{OF1} = C_{OF} \quad (5.9)$$

$$\text{На конец: } C_{OF2} = C_{OF} - A_{OF} \quad (5.10)$$

$$ВП = B_Q + B_P - ПЗ - A_{OF}, \quad (5.11)$$

где $ВП$ - Валовая прибыль .

$$Н_{И} = -\frac{C_{OF1} + C_{OF2}}{2} \cdot 0,022, \text{ руб.}, \quad (5.12)$$

где $Н_{И}$ - налог на имущество.

$$ПрН = ВП + Н_{И}, \text{ тыс. руб.}, \quad (5.13)$$

где $ПрН$ – налогооблагаемая прибыль.

$$Н_{пр} = -ПрН \cdot 0,2, \text{ руб.}, \quad (5.14)$$

где $N_{\text{пр}}$ - налог на прибыль – прямой налог, взимаемый с прибыли организации (предприятия, банка, страховой компании и т. д.).

$$ПР + А = ПрН + N_{\text{пр}} + A_{\text{оф}}, \text{руб.}, \quad (5.15)$$

где ПР - Прибыль после налогообложения, А – амортизация.

$$\alpha = \frac{1}{(1+r)^{t-1}}, \quad (5.16)$$

где α - коэффициент дисконтирования, r - норма дисконтирования, t – год.

$$C_{\text{сп}} = ПР + А + И, \text{руб.}, \quad (5.17)$$

где $C_{\text{сп}}$ – сальдо суммарного потока – это прибыль после всех налогов, то есть прибыль после налогообложения за вычетом амортизации и затрат на строительство.

$$C_{\text{сп}n1} = C_{\text{сп}1} \quad (5.16)$$

$$C_{\text{сп}ni} = C_{\text{сп}ni-1} + C_{\text{сп}i}, \text{руб.}, \quad (5.17)$$

где $C_{\text{сп}n}$ – сальдо суммарного потока накопленное.

$$C_{\text{д}} = C_{\text{сп}} \cdot \alpha, \text{руб.}, \quad (5.18)$$

где $C_{\text{д}}$ – дисконтированное сальдо.

$$ЧДД_i = C_{\text{д}i}, \text{руб.} \quad (5.19)$$

$$ЧДД_i = ЧДД_{i-1} + C_{\text{д}i}, \text{руб.}, \quad (5.20)$$

где ЧДД – чистый дисконтированный доход.

$$СОД = 3,2 \text{ года} \quad (5.21)$$

где СОД – дисконтированный срок окупаемости – точка пересечения графика и нулевой оси.

$$Пр = В, \text{руб.}, \quad (5.22)$$

где Пр – притоки, В – выручка от реализации нефти.

$$Пр_{\text{д}} = Пр \cdot \alpha, \text{руб.}, \quad (5.23)$$

где $Пр_{\text{д}}$ – дисконтированные притоки.

$$Пр_{\text{д} \text{ сумм}} = \sum Пр_{\text{д}}, \text{руб.}, \quad (5.24)$$

где $Пр_{\text{д} \text{ сумм}}$ – сумма дисконтированных притоков.

$$От = И + ПЗ + Ни + N_{\text{пр}}, \text{руб.}, \quad (5.26)$$

где От – оттоки.

$$O_{T_d} = O_T \cdot \alpha, \text{ руб,} \quad (5.27)$$

где O_{T_d} – оттоки дисконтирования.

$$\text{ИДДЗ} = \frac{\text{Прд сумм}}{|O_{T_d}|}, \quad (5.28)$$

где ИДДЗ – индекс доходности дисконтированных затрат.

$\text{ИД} = \frac{\text{Пр}}{\text{От}} = 1,3$ – проект считается рентабельным, где ИД – индекс доходности.

Расчет экономического эффекта представлен в таблице 5.2 и график чистого дисконтированного дохода представлен на рисунке 5.5.

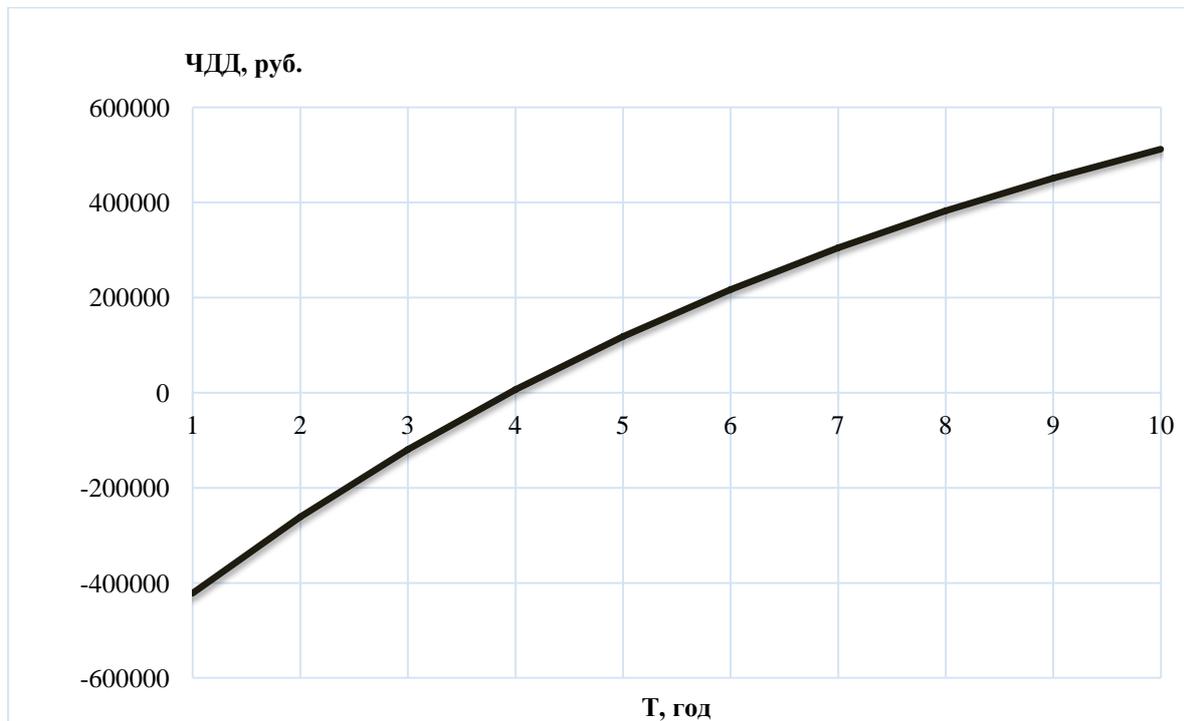


Рисунок 5.5 – График чистого дисконтированного дохода

В результате экономического расчета установлено, что проект по установке гибридного электротехнического комплекса рентабелен, так как индекс доходности составляет 1,3, а срок окупаемости гибридного комплекса составляет 4 года.

Таблица 5.2 – Расчет экономического эффекта при внедрении гибридного фильтрокомпенсирующего устройства

Показатель	Нормативная продолжительность эффекта, лет.										ИТОГО	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
Инвестиционная деятельность	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Инвестиции на строительство	-600000	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Операционная деятельность	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Выручка от экономии реактивной энергии	214094,12	210882,71	205610,64	200470,37	195458,61	190572,15	185807,84	181162,65	176633,58	172217,74	0,00	
Выручка от экономии активной электроэнергии	66315,17	65320,44	63687,43	62095,25	60542,86	59029,29	57553,56	56114,72	54711,85	53344,06	0,00	
Производственные затраты	29250,00	28811,25	28811,25	28811,25	28811,25	28811,25	28811,25	28811,25	28811,25	28811,25	288551,25	
Эксплуатационные затраты	29250,00	28811,25	28811,25	28811,25	28811,25	28811,25	28811,25	28811,25	28811,25	28811,25	28811,25	
Стоимость ОФ	2000000,00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Амортизация основных фондов	60000,00	60000,00	60000,00	60000,00	60000,00	60000,00	60000,00	60000,00	60000,00	60000,00	500000,00	
Остаточная стоимость основных фондов	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
на начало	2000000,00	1940000,00	1880000,00	1820000,00	1760000,00	1700000,00	1640000,00	1580000,00	1520000,00	1460000,00	-	
на конец	1940000,00	1880000,00	1820000,00	1760000,00	1700000,00	1640000,00	1580000,00	1520000,00	1460000,00	1400000,00	-	
Валовая прибыль	191159,29	187391,90	180486,82	173754,37	167190,23	160790,19	154550,15	148466,12	142534,19	136750,55	2320176,30	
Налог на имущество	-43340,00	-42020,00	-40700,00	-39380,00	-38060,00	-36740,00	-35420,00	-34100,00	-32780,00	-31460,00	0,00	
Налогооблагаемая прибыль	147819,29	145371,90	139786,82	134374,37	129130,23	124050,19	119130,15	114366,12	109754,19	105290,55	1935176,30	
Налог на прибыль	-29563,86	-29074,38	-27957,36	-26874,87	-25826,05	-24810,04	-23826,03	-22873,22	-21950,84	-21058,11	-387035,26	
Прибыль после налогообложения + амортизация	178255,43	176297,52	171829,46	167499,49	163304,18	159240,15	155304,12	151492,90	147803,35	144232,44	2048141,04	
Коэффициент дисконтирования	1,00	0,91	0,83	0,75	0,68	0,62	0,56	0,51	0,47	0,42	-	
Сальдо суммарного потока	-421744,57	176297,52	171829,46	167499,49	163304,18	159240,15	155304,12	151492,90	147803,35	144232,44	1548141,04	
Сальдо суммарного потока накопленное	-421744,57	-245447,05	-73617,59	93881,90	257186,08	416426,23	571730,36	723223,25	871026,60	1015259,04	-	
Дисконтированное сальдо	-421744,57	160270,47	142007,81	125844,85	111538,95	98875,61	87665,13	77739,81	68951,35	61168,63	906052,93	
Чистый дисконтированный доход	-421744,57	-261474,10	-119466,28	6378,57	117917,52	216793,13	304458,26	382198,06	451149,42	512318,05	-	
Дисконтированный срок окупаемости	4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Притоки	178255,43	176297,52	171829,46	167499,49	163304,18	159240,15	155304,12	151492,90	147803,35	144232,44	2048141,04	
Дисконтированные притоки	178255,43	160270,47	142007,81	125844,85	111538,95	98875,61	87665,13	77739,81	68951,35	61168,63	1406052,93	
Сумма дисконтированных притоков	1406052,93	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Оттоки	-702153,86	-99905,63	-97468,61	-95066,12	-92697,30	-90361,29	-88057,28	-85784,47	-83542,09	-81329,36	-1560586,51	

Продолжение талицы 5.2

Показатель	Нормативная продолжительность эффекта, лет.										ИТОГО
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Оттоки дисконтированные	-702153,86	-90823,30	-80552,57	-71424,59	-63313,50	-56107,25	-49706,04	-44021,00	-38973,00	-34491,59	-1228181,17
Абс. сумма дисконтированных оттоков	1228181,17	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Индекс доходности дисконтированных затрат	1,145	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Индекс доходности	1,312	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

5.4 Выводы к главе 5

1. Разработана методика применения гибридных фильтрокомпенсирующих устройств в электротехнических комплексах предприятий нефтедобычи с учетом результатов проведенных исследований.

2. Разработан алгоритм управления гибридными фильтрокомпенсирующими устройствами в условиях электротехнических комплексов нефтедобычи.

3. Выполнена техническая реализация гибридных фильтрокомпенсирующих устройств в электротехнических комплексах нефтедобычи в соответствии с результатами исследований.

4. Проведена экономическая оценка эффективности внедрения гибридного фильтрокомпенсирующего устройства в электротехнических комплексах предприятий нефтедобычи в условиях автономных и централизованных систем электроснабжения, срок окупаемости составляет 4 года.

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

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 электроснабжение 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 постоянного 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 ПИТ «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 СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

- КЭ – качество электрической энергии;
- ЭМС – электромагнитная совместимость;
- ПКЭ – показатели качества электроэнергии;
- СЭС – система электроснабжения;
- ВГС – высшие гармонические составляющие;
- КПД – коэффициент полезного действия;
- ШИМ – широтно-импульсная модуляция;
- СТ – силовой трансформатор;
- Тр – трансформатор;
- АД – асинхронный двигатель;
- АД КЗР – асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором;
- АВ – активный выпрямитель;
- КУ – конденсаторная установка;
- ЛЭП – линия электропередач;
- ТОП – точка общего присоединения;
- НН – нелинейная нагрузка;
- ФАПЧ – фазовая автоподстройка частоты;
- САУ – система автоматического управления
- ФКУ – фильтрокомпенсирующее устройство;
- ШПФ – широкополосный фильтр;
- ПФ – пассивный фильтр;
- АФ – активный фильтр;
- ПАФ – параллельный активный фильтр;
- ПСАФ – последовательный активный фильтр;
- ГФУ – гибридное фильтрокомпенсирующее устройство;
- ЭК – электротехнический комплекс;
- АИН – автономный инвертор напряжения;
- ОЗПТ – общее звено постоянного тока;
- РРТ – релейный регулятор тока.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абрамович, Б.Н. Проблемы проектирования подстанций, систем контроля качества электроэнергии и учета электропотребления для предприятий горной промышленности / Абрамович Б.Н., Грин А.В., Виноградов И.В., Сергеев А.М., Лозовский С.Е. - Санкт-Петербург: Сборник научных трудов СПГГИ, 1996.
2. Абрамович, Б.Н. Перенапряжения и электромагнитная совместимость оборудования электрических сетей 6÷35 кВ / Абрамович Б.Н., Кабанов С.О., Сергеев А.М., Полищук В.В. // Новости электротехники. 2002. - №5.
3. Абрамович, Б.Н. Практические вопросы поддержания режима напряжения на предприятиях по добыче, транспортировке и переработке нефти и газа / Абрамович Б.Н., Лозовский С.Е., Тарасов Д.М. // Энергетика в нефтедобыче. 2003. - №1. - С. 8-11.
4. Абрамович, Б.Н. Электромеханические комплексы с синхронным двигателем и тиристорным возбуждением / Абрамович Б.Н., Чаронов В.Я., Дубинин Ф.Д., Коновалов Ю.В. - Санкт-Петербург: Наука, 1995. - 264 с.
5. Абрамович, Б.Н. Электромагнитная совместимость оборудования на предприятиях по транспортировке и переработке нефти и газа при наличии источников высших гармоник / Абрамович Б.Н., Гульков Ю.В., Волошкин М.М. // Энергетика в нефтегазодобыче. 2005. - №1-2. - С. 23-26.
6. Абрамович, Б.Н. Комбинированная энергетическая установка для энергоснабжения горных предприятий / Абрамович Б.Н., Сычев Ю.А., Моренов В.А. // Горное оборудование и электромеханика. 2016. - № 4 (122). - С. 36-41.
7. Абрамович, Б.Н. Комплексная система контроля и повышения качества электрической энергии в системах электроснабжения нефтедобывающих предприятий / Абрамович Б.Н., Сычев Ю.А., Устинов Д.А., Жуковский Ю.Л. // Энергобезопасность и энергосбережение. 2011. № 5. С. 37-40.
8. Абрамович, Б.Н. Повышение надежности электроснабжения предприятий минерально-сырьевого комплекса. / Абрамович Б.Н., Сычев Ю.А., Бабурин С.В., Жуковский Ю.Л. // Инженерная защита. 2016. - № 1 (12). - С. 60-68.
9. Абрамович, Б.Н. Методы и средства повышения уровня

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

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

11. Абрамович, Б.Н. Многоступенчатая система автоматического ввода резерва на основе источников бесперебойного питания в системах электроснабжения объектов горных предприятий / Абрамович Б.Н., Сычев Ю.А., Федоров А.В. // Горное оборудование и электромеханика. 2015. № 6 (115). С. 17-20.

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

13. Абрамович, Б.Н. Система гарантированного электроснабжения предприятий минерально-сырьевого комплекса с использованием альтернативных и возобновляемых источников энергии / Абрамович Б.Н., Сычев Ю.А., Устинов Д.А., Федоров А.В. // Промышленная энергетика. 2013. - № 1. - С. 14-16.

14. Абрамович, Б.Н. Интеллектуальная система комплексного мониторинга использования энергоресурсов и контроля уровня качества электрической энергии в условиях распределенной генерации на основе альтернативных и возобновляемых источников энергии / Абрамович Б.Н., Сычев Ю.А. // Промышленная энергетика. 2014. - № 12. - С. 40-44.

15. Абрамович, Б.Н. Энергобезопасность предприятий минерально-сырьевого комплекса / Абрамович Б.Н., Сычев Ю.А. // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2015. - № S7. - С. 737-744.

16. Абрамович, Б.Н. Устройство компенсации высших гармоник и коррекции коэффициента мощности сети. / Абрамович Б.Н., Сычев Ю.А. // Патент на изобретение № 2446536, заявитель и правообладатель Санкт-Петербургский горный университет. – заявл. 26.04.2013; опубл. 10.04.2014, бюл. №10

17. Абрамович, Б.Н. Методы компенсации провалов и искажений

напряжения в электрических сетях нефтедобывающих предприятий / Абрамович Б.Н., Устинов Д.А., Сычев Ю.А., Шклярский А.Я // Нефтяное хозяйство. 2014. - № 8. - С. 110-112.

18. Абрамович, Б.Н. Устройство компенсации высших гармоник, адаптированное к электроприводу переменного тока / Абрамович Б.Н., Сычев Ю.А., **Зимин Р.Ю.** // Патент на изобретение № 2619919; заявитель и правообладатель Санкт-Петербургский горный университет. – заявл. 15.06.2016: опубл. 19.05.2017, бюл. №14

19. Абрамович, Б.Н. Устройство гибридной компенсации высших гармоник / Абрамович Б.Н., Сычев Ю.А., **Зимин Р.Ю.** // Патент на полезную модель № 176107; заявитель и правообладатель Санкт-Петербургский горный университет. – заявл. 10.07.2017: опубл. 09.01.2018, бюл. №1

20. Абрамович, Б.Н. Устройство гибридной компенсации высших гармоник / Абрамович Б.Н., Сычев Ю.А., **Зимин Р.Ю.** // Патент на полезную модель № 185875; заявитель и правообладатель Санкт-Петербургский горный университет. – заявл. 11.10.2018: опубл. 21.12.2018, бюл. №36

21. Абрамович, Б.Н. Устройство подавления высших гармоник и коррекции коэффициента мощности / Абрамович Б.Н., Сычев Ю.А., **Зимин Р.Ю.** // Патент на полезную модель № 198721; заявитель и правообладатель Санкт-Петербургский горный университет. – заявл. 03.03.2020: опубл. 23.07.2020, бюл. №21

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

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

24. Абрамович, Б.Н., Гибридная система коррекции уровня высших гармоник и обеспечение бесперебойного электроснабжения ответственных потребителей нефтедобычи/ Абрамович Б.Н., Сычев Ю.А., **Зимин Р.Ю.** //

Промышленная энергетика. – 2018. – № 11. – С.50-57.

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

26. Абрамович, Б.Н. Коррекция коэффициента мощности в сетях нефтепромыслов с помощью активного фильтра / Абрамович Б.Н., Сычев Ю.А., Медведев А.В., Старостин В.В., Аболемов Е.Н., Полищук В.В. // Нефтяное хозяйство. 2008. - № 5. - С. 88-90.

27. Абрамович, Б.Н. Промышленные испытания активного фильтра в промысловых сетях ОАО "Оренбургнефть ТНК-ВР" / Абрамович Б.Н., Сычев Ю.А., Медведев А.В., Старостин В.В., Аболемов Е.Н., Полищук В.В. // Промышленная энергетика. 2008. - № 10. - С. 42-46.

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

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

30. Бурман, А.П. Перспективы применения в ЕЭС России гибких (управляемых) систем электропередачи переменного тока / Бурман А.П., Розанов Ю.К., Шакарян Ю.Г. // Электротехника. 2004. № 8. С. 30.

31. Гамазин, С.И. Математическая оценка подавления фликера с помощью СТК. / Гамазин С.И., Кулага М.А., Ненахов А.И. // Энерго- и ресурсосбережение - XXI век сборник материалов XI международной научно-практической интернет-конференции. 2013. - С. 60-62.

32. Гамазин, С.И., Применение тиристорных компенсаторов в системах электроснабжения / Гамазин С.И., Ненахов А.И. // Главный энергетик. 2014.- № 4. - С. 55-58.

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

34. Герман-Галкин, С.Г. Спектральные характеристики многоуровневых преобразователей для транспортных систем электропривода / Герман-Галкин С.Г., Дмитриев Б.Ф. //Труды VIII международной (XIX всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу АЭП-2014. - 2014. - С. 277-281.

35. Герман-Галкин, С.Г. Исследование спектральных характеристик многоуровневых полупроводниковых преобразователей / Герман-Галкин С.Г., Дмитриев Б.Ф. // Электротехника. 2014. - № 3. - С. 45-53.

36. Герман-Галкин, С.Г. Виртуальные лаборатории устройств силовой электроники в среде Matlab-Simulink урок 19. Переходные процессы в параллельном активном фильтре. / Силовая электроника. 2015. - № 53. - С. 90-95.

37. Герман-Галкин, С.Г. Аналитическое и модельное исследование активного полупроводникового преобразователя в системах электропривода / Герман-Галкин С.Г., Звежевич З.Ч., Поляков Н.А. // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2014. - № 3 (91). - С. 131-139

38. Герман-Галкин, С.Г. Школа Matlab виртуальные лаборатории устройств силовой электроники в среде Matlab-Simulink урок 16. Исследование электрической цепи с трехфазным активным фильтром / Силовая электроника. 2013. - № 40. - С. 80-86.

39. Герман-Галкин, С.Г. Школа Matlab виртуальные лаборатории устройств силовой электроники в среде Matlab-Simulink урок 15. Исследование однофазного активного выпрямителя / Силовая электроника. 2012. - № 37. - С. 72-79.

40. Герман-Галкин, С.Г. Исследование активного полупроводникового преобразователя в среде Matlab-Simulink / Герман-Галкин С.Г., Гаврилов Р.С // Электротехника. 2011. - № 4. – с.51-56.

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

42. ГОСТ 30372-95 Совместимость технических средств электромагнитная. Термины и определения / ИПК Издательство стандартов 1998. - 11 с.

43. ГОСТ Р 51317.3.2-99 (МЭК 61000-3-2-95). Совместимость технических

средств электромагнитная. Эмиссия гармонических составляющих тока техническими средствами с потребляемым током не более 16 А (в одной фазе). Нормы и методы испытаний. – Введ. 1999-12-24. – М.: Госстандарт России: Изд-во стандартов, 1999.

44. Жежеленко, И.В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промышленных предприятий. – 2-е изд. М.: Энергоатомиздат, 1984. - 160 с.

45. Жежеленко, И.В. Показатели качества электроэнергии и их контроль на промышленных предприятиях. - М.: Энергоатомиздат, 1986. - 167 с.

46. Железко, Ю.С. Компенсация реактивной мощности и повышение качества электрической энергии. - М.: Энергоатомиздат, 1985.

47. Мещеряков, В.Н. Система управления параллельным активным фильтрокомпенсирующим устройством на базе релейного регулятора тока в трехфазных электрических сетях / Мещеряков В.Н., Хабибуллин М.М. // Электротехнические комплексы и системы управления. – 2012. – №2. – С. 49-54.

48. Мещеряков, В.Н. Компенсация гармонических искажений и реактивной мощности в однофазных электрических сетях посредством параллельного активного фильтра электроэнергии на базе релейного регулятора тока / В.Н. Мещеряков, М.М. Хабибуллин // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. Новочеркасск. – 2013. – №4. – С. 54-57.

49. Мещеряков, В.Н. Активный фильтр электроэнергии с общим звеном постоянного тока и системой управления на основе релейного регулятора тока / В.Н. Мещеряков, М.М. Хабибуллин // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2014. – №7. – С. 26-33.

50. Мещеряков, В.Н. Устройство компенсации гармонических токов и реактивной мощности / Мещеряков В.Н., Хабибуллин М.М., Безденежных Д.В., Мещерякова О.В. (Россия) // заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО Липецкий государственный технический университет (RU) – №2012133757/07; заявл. 07.08.2012; опубл. 10.05.2013, Бюл. № 13 – 2 с.

51. Мещеряков, В.Н. Устройство компенсации высших гармоник, адаптированное к электроприводу переменного тока / Мещеряков В.Н., Безденежных Д.В., Хабибуллин М.М., Мещерякова О.В. (Россия) // заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО Липецкий государственный технический

университет (RU) – №2012133840/07; заявл. 07.08.2012; опубл. 27.04.2014, Бюл. № 5 – 10 с.

52. Мещеряков, В.Н. Компенсация высших гармоник тока и напряжения на основе активного фильтра с релейным регулированием в сетях питания радиотехнических устройств и компьютерных систем / В.Н. Мещеряков, М.М. Хабибуллин // Материалы XIX международной научно-технической конференции «Информационные системы и технологии» ИСТ-2013. – Н. Новгород: Изд-во НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – 2013. – 2 с.

53. Мещеряков, В.Н. Оптимизация системы управления параллельным активным фильтром электроэнергии для компенсации нелинейных искажений в трехфазных электрических сетях / В.Н. Мещеряков, М.М. Хабибуллин // Материалы XIX международной научно-технической конференции студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика». – Москва: Изд-во МЭИ. 2013. – 4 с.

54. Мещеряков, В.Н. Система управления параллельным активным фильтрокомпенсирующим устройством на базе релейного регулятора тока в трехфазных электрических сетях / В.Н. Мещеряков, М.М. Хабибуллин // Сборник тезисов докладов 9-й Всероссийской школы-конференции молодых ученых. Управление большими системами. – Липецк: Изд-во ЛГТУ. – 2012. – С.173-176.

55. Мещеряков, В.Н. Активный фильтр высших гармоник адаптированный к электроприводу переменного тока / В.Н. Мещеряков, Д.В. Безденежных, М.М. Хабибуллин // Сборник тезисов докладов 9-й Всероссийской школы-конференции молодых ученых. Управление большими системами. – Липецк: Изд-во ЛГТУ. – 2012. – С.164-167.

56. Поляков, Н.А. Синтез системы фазовой автоподстройки частоты для трехфазного активного выпрямителя напряжения / Н.А. Поляков, А.А. Абдуллин // Известия ВУЗов. Приборостроение.– СПб: НИУ ИТМО, 2013. –Т. 56, № 12. – С. 38–40.

57. Поляков, Н.А. Синхронизация трехфазных активных выпрямителей напряжения с питающей сетью / Поляков Н.А., Борисов П.А. // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – СПб: НИУ ИТМО, 2012. –№ 4 (80). – С. 55–60.

58. Пронин, М.В. Силовые полностью управляемые полупроводниковые преобразователи (моделирование и расчет) / Пронин М.В. Воронцов А.Г. - СПб.: ОАО «Электросила», 2003. - 172 с.

59. Пронин, М.В. Создание систем с электрическими машинами и полупроводниковыми преобразователями на основе комплекса быстродействующих уточненных моделей. Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук / Санкт-Петербургский государственный горный институт им. Г.В. Плеханова. - Санкт-Петербург. - 2006.

60. Пронин, М.В. Создание систем с электрическими машинами и полупроводниковыми преобразователями на основе комплекса быстродействующих уточненных моделей. Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Санкт-Петербургский государственный горный институт им. Г.В. Плеханова. - Санкт-Петербург. -2006.

61. Пронин, М.В. Активная фильтрация напряжений и токов сети в установках с высоковольтными тиристорными преобразователями./ Пронин М.В., Воронцов А.Г. // Горное оборудование и электромеханика. 2005. - № 5. - С. 41.

62. Пронин, М.В. Активные фильтры высших гармоник. Направления развития./ Новости электротехники. 2006. - № 2.- С. 102.

63. Пронин, М.В. Система с многофазным асинхронным генератором и несколькими активными преобразователями / Пронин М.В., Воронцов А.Г. // Электротехника. 2007.- № 10. - С. 41-45.

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

65. Розанов, Ю.К. Управление потоками электроэнергии и повышение эффективности электроэнергетических систем / Розанов Ю.К., Бурман А.П., Шакарян Ю.Г. // М.: Издательский дом «МЭИ». - 2012. - 336 с.

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

67. Розанов, Ю.К. Силовая электроника. Учебник для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению подготовки «Электротехника, электромеханика и электротехнологии» / Ю. К. Розанов, М. В. Рябчицкий,

А. А. Кваснюк. – Москва. - 2007.- С. 636

68. Розанов, Ю.К. Современные методы улучшения качества электроэнергии (аналитический обзор) / Розанов Ю.К., Рябчицкий М.В. // Электротехника. - 1998. - № 3.

69. Розанов, Ю.К. Цифровая система управления статическим компенсатором реактивной мощности / Розанов Ю.К., Кошелев К.С., Смирнов М.И. // Электричество. - 2006. - № 7. С. - 25-30.

70. Розанов, Ю.К. О мощностях в цепях переменного и постоянного токов // Электричество. - 2009. - № 4. - С. 32-36.

71. Розанов, Ю.К. Гибридные фильтры для снижения несинусоидальности тока и напряжения в системах электроснабжения / Розанов Ю.К., Гринберг Р.П. // Электротехника. - 2006. - № 10. - С. 55.

72. Розанов, Ю.К. Управление потоками электроэнергии в преобразователе со сверхпроводящим индуктивным накопителем / Розанов Ю.К., Рябчицкий М. В., Лепанов М.Г., Киселев М.Г. // Электричество. - 2008. - № 8. - С. 22-27.

73. Розанов, Ю.К. Устройство регулирования качества электрической энергии для трехфазных распределительных систем электроснабжения / Розанов Ю.К., Лепанов М.Г., Киселев М.Г., Крюков К.В. // Управление качеством электрической энергии Сборник трудов Международной научно-практической конференции. - 2014. - С. 115-122.

74. Розанов, Ю.К. Гибридные фильтры для снижения несинусоидальности тока и напряжения в системах электроснабжения / Розанов Ю.К., Гринберг Р.П. // Электротехника. -2006. - № 10. - С. 55а-60.

75. Розанов, Ю.К. Повышение эффективности систем электроснабжения с нетрадиционными источниками электроснабжения / Розанов Ю.К., Соломатин А.В., Крюков К.В. // Электротехника. 2006. № 10. С. 63а-67.

76. Розанов, Ю.К. Многофункциональный регулятор качества электроэнергии на основе силового электронного преобразователя / Розанов Ю.К., Лепанов М.Г., Киселев М.Г. // Электротехника. 2014. - № 8. - С. 51-59.

77. Розанов, Ю.К. Применение аппарата нечеткой логики для улучшения динамических характеристик гибридных фильтров высших гармоник / Розанов

Ю.К., Рябчицкий М.В., Смирнов М.И., Гринберг Р.П // Электричество. - 2007. - № 1. - С. 23-31.

78. Сычев, Ю.А., Проблемы компенсации высших гармоник тока и напряжения в условиях распределенной генерации / Сычев Ю.А., Кузнецов П.А., **Зимин Р.Ю.**, Соловьева Я.А // Вестник московского авиационного института. – 2018. – № 4(25). – С.216-228.

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

80. Тонкаль, В.Е. Анализ и оптимизация энергопроцессов в электросистемах с искажающими нелинейными нагрузками / Тонкаль В.Е., Денисюк С.П. // Тезисы докладов III Всесоюзной научно-технической конференции «Проблемы нелинейной электротехники» - Киев, 1988. – часть 2. – С. 7-10.

81. Тонкаль, В.Е. Применение обменной энергии к анализу энергетических процессов в системах с вентильными преобразователями / Тонкаль В.Е., Жуйков В.Я., Денисюк С.П. // Тезисы докладов I Всесоюзной конференции по теоретической электротехнике. – Ташкент: ТПИ, 1987. – С. 21-22.

82. Тонкаль, В.Е. Сопряженные формы интегральных составляющих мощности / Тонкаль В.Е., Новосельцев А.В., Стрелков М.Т. // Электронное моделирование. – 1989. - №1. – С. 26-35.

83. Шклярский, А.Я. Проблемы эксплуатации электрооборудования буровых установок / Шклярский А.Я., Устинов Д.А., Сычев Ю.А. // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. - 2013. - № 166. - С. 93-98.

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

85. Шклярский, Я.Э. К вопросу оплаты предприятиями потребляемой электроэнергии при наличии искажений в сети / Шклярский Я.Э., Пудкова Т.В., Замятин Е.О. // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. - 2019. - № 9. - С. 611-617.

86. Шклярский, Я.Э. Оценка энергетической эффективности электротехнического комплекса / Шклярский Я.Э., Замятина Е.Н., Замятин Е.О. // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. - 2020. - № 3. - С. 339-347.

87. Шклярский, Я.Э. Управление активным выпрямителем напряжения в составе частотно-регулируемого привода при провалах напряжения / Шклярский Я.Э., Барданов А.И. // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. - 2018. - № 4. - С. 414-425.

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

89. Abramovich, B.N. Efficiency estimation of hybrid electrotechnical complex for non-sinusoidal signals level correction in autonomous power supply systems for oil fields / B.N. Abramovich, Y.A. Sychev, P.A. Kuznetsov, **R.Yu. Zimin** // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, DOI: 10.1088/1755-1315/194/5/052001. – 2018. – Volume 194. – Issue 5. – 052001.

90. Abramovich, B.N. The hybrid correction system, based on active and passive filters for harmonic compensation in networks of oil enterprises / B.N. Abramovich, Y.A. Sychev, **R.Y. Zimin** // 2018 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies, FarEastCon 2018, DOI: 10.1109/FarEastCon.2018.8602638. – 2018. – Volume 1. - 8602638.

91. Abramovich, B.N. Selection of shunt active filter main parameters in conditions of centralized and distributed power supply systems / Abramovich B.N., Sychev Y.A., **Zimin R.Y.** // Proceedings - 2018 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM. – 2018. – Volume 1. – 8728566.

92. Abramovich, B.N. Mathematical modeling of harmonic correction by parallel active filter in conditions of distributed generation / B.N. Abramovich, Yu.A. Sychev, **R.Yu. Zimin**, P.A. Kuznetsov // Journal of Physics: Conference Series, DOI: 10.1088/1742-6596/1333/3/032081. – 2019. – Volume 1333. – 032081.

93. Abramovich, B.N. The Application of Series Active Filter for Improvement of Power Quality in Networks of Oil Enterprises / B.N. Abramovich, Yu.A. Sychev,

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)

94. Abramovich, B.N. Modelling and analysis of functional modes of active compensators in distributed generation systems / B.N. Abramovich, Yu.A. Sychev, **R.Yu. Zimin** // Journal of Physics: Conference Series, DOI: 10.1088/1742-6596/1333/6/062028. – 2019. – Volume 1333. – 062028.

95. Abramovich, B.N. Efficiency estimation of hybrid electrical complex for voltage and current waveform correction in power systems of oil enterprises / B.N. Abramovich, Y.A. Sychev, **R.Y. Zimin** // Proceedings of the 2019 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, ElConRus 2019, DOI: 10.1109/EIConRus.2019.8657081. – 2019. – Volume 1. - pp. 401-406.

96. Akagi, H. Active Harmonic Filters / Proceedings of the IEEE. 2005. - Vol. 93. - №12. pp. 2128-2141. doi:10.1109/JPROC.2005.859603

97. Akagi, H. Instantaneous Power Theory and Applications to Power Conditioning (IEEE Press Series on Power Engineering) / H. Akagi, E. Watanabe, - M. Aredes. – New York: Wiley, 2007.

98. Akagi, H. Generalized Theory of the Instantaneous Reactive Power in Three-Phase Circuits / H. Akagi, Y. Kanazawa, A. Nabae // IPEC'83 – Int. Power Electronics Conf. – Tokyo, Japan, 1983. – P. 1375–1386.

99. Akagi, H. Instantaneous Reactive Power Compensator Comprising Switching Devices without Energy Storage Components / H. Akagi, Y. Kanazawa, A. Nabae // IEEE Trans. Industry Applic. – May/June 1984. – Vol. 20. – P. 625–630.

100. Bettega, E. Active harmonic conditioners and unity power factor rectifiers. / Bettega E., Fiorina J.N. // Cahier technique № 183. Schneider Electric. - 1999. - 36 p.

101. Buso, S. Power supply distribution system for calorimeters at the LHC beyond the nominal luminosity. // Buso S., Spiazzi G., Tenti P., Riva M., Maranesi P., Belloni F., Cova P., Menozzi R., Delmonte N., Bernardoni M., Iannuzzo F., Busatto G., Porzio A., Velardi F., Lanza A., Citterio M., Meroni C. /Journal Of Instrumentation, 2013 – Vol.1 - doi: 10.1088/1748-0221/6/06/P06005.

102. Collombet, C. Harmonic disturbances in networks, and their treatment / Collombet C., Lupin J.M., Schonek J. //Cahier technique № 152. Schneider Electric.-

1999. - 31 p.

103. Costabeber, A. Selective compensation of reactive, unbalance, and distortion power in smart grids by synergistic control of distributed switching power interfaces./ Costabeber A., Tenti P., Caldognetto T., Verri Liberado E. // 15th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE). - 2013.- Vol. 1. – pp 1-9.

104. Costabeber, A. Distributed control of smart microgrids by dynamic grid mapping / Costabeber A., Tenti P., Erseghe T., Tomasin S., Mattavelli P. // IEEE Industrial Electronics Conference Melbourne. -2011. - pp. 1323-1328. DOI: 10.1109/IECON.2011.6119500.

105. Costabeber, A. Optimization of Micro-Grid Operation by Dynamic Grid Mapping and Token Ring Control / Costabeber A., Tenti P., Mattavelli P., Erseghe T., Tomasin S. // European Power Electronics Conference (EPE), 2011. - pp.1-10

106. Costabeber, A. Distributed cooperative control of low-voltage residential microgrids / Costabeber A., Tenti P., Mattavelli P // 3rd IEEE International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems, 2012. - p. 457-463, DOI: 10.1109/PEDG.2012.6254042.

107. Ferracci, P. Power quality //Cahier technique № 199. Schneider Electric. - 2001. - 36 p.

108. Fiorina, J.N. Inverters and harmonics (case studies of non-linear loads) // Cahier technique № 159. Schneider Electric. – 1999. - 20 p.

109. IEEE Std 519-2014. IEEE Recommended practices and requirements for harmonic control in electrical power systems / American national standards institute. - 2014. - 29 p.

110. IEEE Std 1459-2010. IEEE Standard Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balanced, or Unbalanced Conditions / American national standards institute. - 2010. - 52 p.

111. IEEE Std. 1159-2009. IEEE Recommended practice for monitoring electric power quality / American national standards institute. - 2009. -91 p.

112. Fiorina, J.N. Harmonics upstream of rectifiers in UPS. // Cahier technique № 160. Schneider Electric. – 1999. - 20 p.

113. Lepanov, M.G. Operation modes of converters with SMES on DC-side used for improving of electrical systems efficiency. / Lepanov M.G., Rozanov Y.K. // 15th

International Power Electronics and Motion Control Conference and Exposition, EPE-PEMC 2012 ECCE Europe. - 2012. – p. 6397438.

114. Lepanov, M., Rozanov Y. Multifunctional regulator based on SMES and power electronic converter for increase of power quality and power supply reliability / Lepanov M., Rozanov Y. // International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives Cep. «Proceedings of 2013 4th International Conference on Power Engineering Energy and Electrical Drives, POWERENG 2013» - 2013. - pp. 1387-1391.

115. Litran, S. P. Control strategy for an interface to improve the power quality at the connection of AC microgrids /Litran S. P., Revuelta P. S., Prieto J., Valles A. P.// International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ'14). -2014. – p. 498.

116. Meshcheryakov, V.N. Active power filter with relay current regulator and common DC link for compensation of harmonic distortion in power grids / V.N. Meshcheryakov, M.M. Khabibullin, I.S. Pavlov, S.Valtchev // IFIP Advances in Information and Communication Technology 423. Technological Innovation for Collective Awareness Systems. 5th IFIP WG 5.5/SOCOLNET Doctoral Conference on Computing, Electrical and Industrial Systems DoCEIS 2014. Lisbon. – 2014. – pp. 427-434.

117. Meshcheryakov, V.N. Active Power Filter with Common DC Link for Compensation of Harmonic Distortion in Power Grids / V.N. Meshcheryakov, M.M. Khabibullin, V.V. Pikalov, S.Valtchev // 16th International Power Electronics and Motion Control Conference and Exposition (PEMC 2014). Antalya. – 2014. – pp. 1586-1590.

118. Pronin, M., Control system of the multistage active rectifier energizing power shovel multi-motor variable-frequency drive for mining applications. / Pronin M., Vorontsov A., Gogolev G., Shonin O. // Proceedings of the 2011 14th European Conference on Power Electronics and Applications, EPE 2011. - 2011. - p. 6020295.

119. Rozanov, Yu.K. Modern methods for electric power quality control by means of power electronics./ Rozanov Yu.K., Ryabchitskij M.V., Kvasnyuk A.A. // Электротехника. - 1999. - № 4. - С. 28-32.

120. Rozanov, Yu.K. Power electronics and power quality / Rozanov Yu.K., Ryabchitskij M.V., Kvasnyuk A.A., Greenberg R.P. // Электротехника. - 2002. - № 2. - С. 16-23.

121. Rozanov, Yu.K. Modern methods of regulating the quality of electrical energy by means of power electronics / Rozanov Yu.K., Ryabchitskii M.V., Kvasnyuk A.A. // *Электротехника*. -1999. - № 4. - С. 36.
122. Rozanov, Yu.K. Power electronics in systems with non-traditional power sources / Rozanov Yu.K., Baranov N.N., Antonov B.M., Efimov E.N., Solomatin A.V. // *Электричество*. - 2002. - № 3. - С. 20-28.
123. Sainz, L. Currents' physical components (CPC) concept in wind farm harmonic current studies / Sainz L., Cunill-Sola J. // *International Conference on Renewable Energies and Power Quality*. -2011. – Vol.1 doi: 10.24084/repqj09.351.
124. Salmeron, P. Improvement of the electric power quality using series active and shunt passive filters / Salmeron P., Litran S. P. // *IEEE transactions on power delivery*. -2010. – Vol.1.- pp 1058-1067.
125. Sychev, Yu. The assessment of the series active filter efficiency in power supply systems of oil production enterprises / **R. Zimin**, M. Aladin // *E3S Web of Conferences*, DOI: 10.1051/e3sconf/201914004003. – 2019. - Volume 140. - 04003.
126. Tedeschi, E. Cooperative control of electronic power processors in micro-grids./ Tedeschi E., Tenti P., Mattavelli P., Trombetti D. // *Eletrônica de Potência*. 2009. - Vol. 14. - p. 241-249.
127. Tedeschi, E. Cooperative Design and Control of Distributed Harmonic and Reactive Compensators / Tedeschi E., Tenti P. // *Przegląd Elektrotechniczny*. 2008.- Vol. 6. - p. 23-27.
128. Tenti, P. Improving power quality and distribution efficiency in micro-grids by cooperative control of switching power interfaces / Tenti P., Costabeber A., Mattavelli P., // *Proceedings of 2010 International Power Electronics Conference (IPEC-Sapporo 2010)*, Sapporo (Japan), 2010. – Vol.1.- pp. 472-479.
129. Wölfle ,W.H. Power factor correction for ac/dc converters with cost effective inductive filtering / W.H. Wölfle, W.G. Hurley, S. Arnoult // *Power Electron. Spec. Conf. (PESC'00)*, Galway, Ireland, June 2000. - Vol. 1. – pp. 332 - 337.
130. Wölfle, W.H. Quasi-active power factor correction with a variable inductive filter: theory, design and practice / W. H. Wölfle, W.G. Hurley // *IEEE Trans. on Power Electron.*, Jan. 2003. - Vol. 18. - No. 1. – pp. 248 - 255.
131. Yoshida, T. An improvement technique for the efficiency of high-frequency

switch-mode rectifiers / T. Yoshida, O. Shiizuka, O. Miyashita, K. Ohniwa // IEEE Trans. on Power Electron., Nov. 2000. - Vol. 15. - No. 6. – pp. 1118 - 1123.

ПРИЛОЖЕНИЕ А**Акт об использовании материалов диссертации в АО «Особая экономическая зона промышленно-производственного типа «Алабуга»****АКТ ВНЕДРЕНИЯ**

результатов диссертации Зими́на Р.Ю.
на тему «Повышение качества электроэнергии в электротехнических комплексах предприятий нефтедобычи гибридными фильтрокомпенсирующими устройствами», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук

Диссертационная работа Зими́на Романа Юрьевича посвящена решению актуальной научно-технической задачи повышения качества электроэнергии в электротехнических комплексах нефтедобывающих предприятий путем снижения уровня высших гармоник тока и напряжения с помощью гибридных фильтрокомпенсирующих устройств.

Теоретические и практические научно-технические результаты, полученные в диссертационной работе Зими́на Р.Ю., представляют ценность при планировании, организации и внедрении комплексных мероприятий по повышению качества электрической энергии и обеспечению электромагнитной совместимости электрооборудования в системах электроснабжения промышленных предприятий с нелинейной нагрузкой.

Результаты диссертационной работы Зими́на Р.Ю. используются в АО «Особая экономическая зона промышленно-производственного типа «Алабуга» при выборе структуры и основных типов фильтрокомпенсирующих устройств повышения качества электрической энергии в системах электроснабжения промышленных объектов, а также при модернизации электрических сетей.

Главный энергетик
Департамента главного энергетика
Управления эксплуатации и энергетики
АО «ОЭЗ ППТ «Алабуга»
кандидат технических наук

А.В. Сираев



ПРИЛОЖЕНИЕ Б**Акт внедрения результатов исследования диссертации в
электротехнических комплексах производственных объектов ООО
«Энергонефть Югра»****АКТ ВНЕДРЕНИЯ**

результатов диссертации Зимина Р.Ю.
на тему «Повышение качества электроэнергии в электротехнических
комплексах предприятий нефтедобычи гибридными
фильтрокомпенсирующими устройствами», представленной на соискание
ученой степени кандидата технических наук

Диссертационная работа Зимина Романа Юрьевича посвящена решению актуальной научно-технической задачи повышения качества электрической энергии в электротехнических комплексах нефтедобывающих предприятий за счет снижения уровня гармонических составляющих тока и напряжения посредством гибридных фильтрокомпенсирующих устройств.

Теоретические и практические результаты, представленные в диссертации Зимина Р.Ю., в частности, алгоритм выбора структуры гибридных фильтрокомпенсирующих устройств в условиях вариации параметров источника электроснабжения и показателей качества электроэнергии, представляют ценность при планировании, организации и проведении мероприятий по повышению уровня энергосбережения и энергетической эффективности в электротехнических комплексах производственных объектов ООО «Энергонефть Югра».

Результаты диссертационной работы Зимина Р.Ю. приняты к внедрению в системах электроснабжения промышленных объектов ООО «Энергонефть Югра» при выборе структуры и основных типов фильтрокомпенсирующих устройств повышения качества электрической энергии, а также при модернизации электрических сетей.

Генеральный директор
ООО «Энергонефть Югра»
кандидат технических наук



Г.Я. Григорьев